

На правах рукописи



Митрофанов Георгий Михайлович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОЙ
ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И
ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОСНОВЕ
ФАКТОРНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ**

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва - 2014

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор **ВЛАДОВ Михаил Львович**, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ, г. Москва), заведующий кафедры «сейсмометрии»

доктор физико-математических наук, профессор **КАШТАН Борис Маркович**, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ, г. Санкт-Петербург), заведующий лабораторией динамики упругих сред кафедры физики Земли

доктор технических наук **КОНДРАТЬЕВ Игорь Константинович**, Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ВНИГНИ, г. Москва), главный научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск)

Защита состоится «___» _____ 2014 г. в «___» часов на заседании Диссертационного совета Д.002.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) по адресу: 123995, Москва Д-242, Большая Грузинская ул., д. 10, конференц-зал.

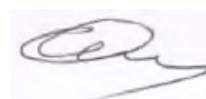
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института <http://www.ifz.ru/>. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте ИФЗ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123995, Москва, Д-242, Большая Грузинская ул., д. 10, ИФЗ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Олегу Григорьевичу Онищенко

Ученый секретарь Диссертационного совета

доктор физико-математических наук



О.Г. Онищенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объектом исследования являются нелинейные преобразования, основанные на мультипликативных факторных моделях, которые используются для представления формы сейсмических сигналов. Преобразования содержат операцию логарифмирования спектральных характеристик интервалов сейсмических трасс и объединяют большие совокупности исходных наблюдений. Как и любые нелинейные преобразования, они требуют тщательного изучения своих свойств. При этом круг возникающих задач достаточно широк, что не позволяет изучить все их возможные свойства и особенности в рамках одной работы. Поэтому главное внимание уделяется вопросам единственности и устойчивости, а также статистическим свойствам преобразований.

Актуальность темы исследования

Поиск новых месторождений, находящихся в сложных сейсмогеологических условиях, требует создания и развития методов обработки и интерпретации сейсмических данных, обеспечивающих повышение детальности и точности прогнозирования характеристик изучаемой среды. Сложность реальных сред и их высокая пространственная неоднородность по геологическим, физическим, петрофизическим и многим другим характеристикам определяют сложность и неоднородность получаемой геофизической информации, в частности, сейсмических данных. Несмотря на известные преимущества, линейные преобразования не могут обеспечить всей полноты и требуемой точности при определении параметров среды в процессе обработки сейсмических данных. Как следствие, появляется значительный интерес в исследованиях, направленных на построение и изучение свойств нелинейных преобразований сейсмических данных. Такие преобразования могут выступать не в виде отдельных частей процедур обработки, часто дающие дополнительные нежелательные искажения, а как самостоятельные процедуры, позволяющие наиболее эффективно решать различные задачи, повышая точность прогноза параметров изучаемой среды. К этим задачам относятся: выделение сейсмических сигналов определенной природы, анализ динамических особенностей выделяемых сигналов, установление связей между динамическими особенностями сигналов и характеристиками среды. Повышение эффективности решения определенной задачи может достигаться в тех случаях, когда конкретное преобразование и построенные на его основе методы наиболее полно учитывают особенности задачи. При этом развиваемые методы должны использовать нетрадиционные, усложненные модели наблюдаемого волнового поля и целевых объектов, а также учитывать имеющуюся или получаемую на этапах предварительной обработки и интерпретации информацию о среде. Важным требованием также является эффективное использование систем наблюдений, кратность которых в настоящее время при выполнении сейсморазведочных работ может составлять несколько сотен. Все указанные моменты определяют актуальность представленной работы.

Степень ее разработанности

Имеются многочисленные примеры успешного применения большого числа нелинейных преобразований при обработке сигналов в различных областях науки и техники. Круг таких преобразований очень широк. Ближайшими к

рассматриваемым в работе преобразованиям можно считать: кепстральный анализ Bogert et al. (1963), гомоморфную фильтрацию Oppenheim (1965), блайнд деконволюцию Stockham et al. (1975). Они получили наибольшее распространение в форме одномерных преобразований. Существенной же особенностью исследуемых преобразований является их многомерность, что связано со спецификой используемых сейсмических моделей. Подобная ситуация возникает, когда регулярные особенности волнового поля, проявляющиеся в пространственных координатах, создают условия для определения нескольких мультипликативных составляющих сейсмических сигналов.

Таким образом, предлагаемые и изучаемые преобразования могут рассматриваться как различные варианты многомерной гомоморфной фильтрации. Примером таких преобразований служит поверхностно согласованная деконволюция: Taner, Koehler (1981), Ronen, Claerbout (1985). Современное развитие блайнд деконволюции для сейсмических моделей способствовало появлению еще одного близкого преобразования: van Vossen (2005).

Основу исследуемых преобразований составляют эвристические модели, инициированные Гурвичем (1970). Они приближают сложные процессы, определяющие формирование динамических особенностей наблюдаемых сейсмических сигналов, последовательностью линейных фильтров. В результате удается разложить форму сигнала на составляющие, учитывающие вариации в условиях сейсмического эксперимента и среде распространения колебаний.

Идея представления наблюдаемого сейсмического сигнала в виде свертки исходного импульса и некоторой импульсной характеристики среды была не новой. Она использовалась при разработке метода предсказывающей деконволюции: Wadsworth et al. (1953) и Robinson (1954). Но в модели Гурвича был новый и принципиальный момент. Он состоял в увязывании выделяемых фильтров и их импульсных характеристик с основными областями среды, наиболее значимо влияющими на характеристики наблюдаемого сигнала. Ими являлись: локальные зоны возбуждения и приема сейсмических колебаний, область покрывающей среды и локальная зона формирования отражения.

Несмотря на феноменологичность моделей многократных сверток, они хорошо понимались геофизиками и оказались удобными для представления основных изменений формы реальных сейсмических сигналов. Важным моментом являлось и то, что предлагаемые модели обобщали широко используемые в практической сейсморазведке модели коррекции временных статических поправок: Михальцев, Гогоненков (1973), Taner et al. (1974).

Первые исследования по многомерному гомоморфному преобразованию, с применением модели Гурвича, начались в рамках построения спектрально-статистического метода. Они проводились автором совместно и под научным руководством Гольдина (1971-1975). Кроме работ по одномерному кепстральному анализу и гомоморфной фильтрации, к тому времени имелись первые работы по применению мультипликативных моделей для определения свойств областей очага, приема и отражения: Гурвич, Чыонг Минь (1971), а также работа Гурвич, Яновский (1971), где предлагалось использовать разложение тейлоровского типа для линеаризации подобных моделей и обработки больших совокупностей данных. Все остальные исследования выполнялись независимо от других авторов и часто носили приоритетный характер. В тексте диссертации указывается соотношение результатов, полученных автором и другими исследователями.

Цели и задачи

Целью выполненной работы являлось создание нелинейных методов обработки сейсмических наблюдений, повышающих точность и эффективность определения характеристик среды. Основу методов составляют волновые объекты, выделяемые в регистрируемых колебаниях и связанные с локальными элементами строения среды (границы, тонкослоистые пакки, разрывные нарушения и т.п.), и применение мультипликативных факторных моделей при описании формы сигналов. Создаваемые методы ориентированы на повышение качества решения задач обработки и интерпретации сейсмической информации, в частности, обратных динамических задач, использующих как формализованные, так и эвристические модели. Это способствует эффективному выполнению геологоразведочных и промысловых работ.

Для достижения цели автору пришлось решить девять крупных научных задач:

1. Разработать многофакторные мультипликативные модели, обеспечивающие требуемую аппроксимацию динамических особенностей сейсмических сигналов для различных типов волн (отраженных, головных, дифрагированных).
2. Исследовать вероятностные и статистические характеристики логарифма спектра интервала сейсмической записи, содержащего целевой сигнал и помеху, при произвольном отношении сигнал/помеха.
3. Создать алгоритмы, обеспечивающие статистическую устойчивость определения параметров мультипликативных факторных моделей по реальным наблюдениям (сейсмотрассам).
4. Определить класс факторных моделей используемых при сейсмических исследованиях, а также изучить их свойства и способы получения оценок, включая вопросы решения систем линейных уравнений с вырожденными матрицами.
5. Разработать методы и алгоритмы эффективного использования априорной информации, требуемой для получения единственного решения в задачах факторной декомпозиции сейсмического волнового поля.
6. Для сейсмических сигналов, наблюдаемых в системах многократного перекрытия, создать и исследовать нелинейные преобразования, которые представляют собой реализацию многомерной гомоморфной фильтрации, и используют многофакторные мультипликативные модели.
7. Разработать методы декомпозиции сейсмического волнового поля на составляющие, связанные с условиями возбуждения, приема, прохождения через покрывающую среду и взаимодействия с целевым объектом для различных типов волн (монотипных и обменных отраженных, головных, дифрагированных).
8. Исследовать проблему совмещения теоретического решения с экспериментальными данными для случая обратной динамической задачи, рассматриваемой в спектральной области по отношению к тонкослоистым объектам упругой среды.
9. Разработать технологию подготовки данных для объектно-ориентированных сейсмических обратных задач с учетом особенностей реального эксперимента, имеющих теоретических решений и получаемых составляющих факторных моделей.

Научная новизна

1. Предложено и исследовано нелинейное преобразование, реализующее многомерную гомоморфную фильтрацию для сейсмических сигналов, наблюдаемых в системах многократного перекрытия. Данное преобразование предложено автором совместно с Гольдиным (1975). Преобразование может использовать различные мультипликативные факторные модели для формы сейсмических сигналов. К ним относятся: модель многократной свертки эффективных фильтров, предложена автором (1980); эффективная лучевая модель, предложена автором совместно с Мадатовым и Середой (1991); модель для локального разрывного объекта, предложена автором совместно с Ландой (1979); модель для головной волны, предложена автором совместно с Сергеевым (1986) при участии Крылова.

2. Предложено и реализовано многоуровневое разложение наблюдаемого волнового поля и формы сигнала на составляющие, отвечающие условиям проведения сейсмического эксперимента, среде прохождения и углу падения на целевой объект с учетом априорной модели среды. Это послужило основой для развития нескольких нелинейных методов обработки и подготовки сейсмических данных для решения обратных задач, включая спектрально-статистический метод (ССМ), предложенный автором совместно с Гольдиным (1975), и сложную сейсмическую декомпозицию (CSD - Complex seismic decomposition), предложена автором совместно с Мадатовым, Ковалевым и Helle (1993).

3. На основе изучения аналитических и вероятностных свойств логарифмов спектральных характеристик интервалов трасс, содержащих целевой сейсмический сигнал и помеху, предложены алгоритмы, обеспечивающие построение эффективных оценок спектра сигнала и его составляющих при совместной обработке совокупностей трасс с различным отношением сигнал/помеха.

4. Для класса аддитивных и мультипликативных факторных моделей, применяемых при представлении сейсмических данных, изучены особенности систем линейных уравнений и разработаны эффективные методы их решения с оптимальным использованием априорной информации, обеспечивающей единственность нахождения всех составляющих модели.

5. Рассмотрена проблема совмещения теоретического решения с сейсмическими наблюдениями и предложены способы, обеспечивающие это совмещение в спектральной области, для моделей упругих тонкослоистых объектов с учетом особенностей проводимого сейсмического эксперимента; выполнено автором совместно с Прийменко (2012).

Теоретическая и практическая значимость работы

В диссертации теоретически исследованы свойства нелинейного преобразования, представляющего собой многомерную гомоморфную фильтрацию. Наиболее значимыми результатами являются: (1) построение вероятностных характеристик логарифма дискретного спектра смешанного сигнала, содержащего регулярную и случайную компоненты, при произвольном отношении сигнал/помеха; (2) исследование свойств фазовой составляющей спектра смешанного сигнала и построение алгоритма ее развертки; (3) анализ единственности и вычислительной устойчивости решения систем линейных уравнений, возникающих при нахождении параметров факторных моделей; (4)

введение понятия «псевдоаприорной» информации, фиксирующей векторы нуль-многообразия матрицы системы линейных уравнений. Они обеспечили единственность и статистическую эффективность предложенного нелинейного преобразования, а также создали основу для оптимального использования априорной информации в задачах оценивания параметров аддитивных и мультипликативных факторных моделей.

На основе нелинейного преобразования предложена и разработана технология углубленной, многоуровневой декомпозиции волнового поля и формы сейсмического сигнала, позволяющая перейти от сложно построенной трехмерной модели среды к квази-одномерной модели исследуемого локального объекта. При этом форма сигнала расщепляется на составляющие, относящиеся к условиям возбуждения, приема, прохождения и взаимодействия с целевым объектом. Технология обеспечивает конструктивный учет имеющейся информации о среде. Таким образом, решения обратных задач, получаемые при ее применении и относящиеся к локальным объектам среды, являются уточнением исходной глобальной модели и могут рассматриваться как последующая итерация в общей схеме решения обратной задачи для трехмерной модели среды. Разные уровни технологии применимы как на этапах предварительной обработки данных с целью устранения вариаций формы сейсмических сигналов, связанных с неоднородностью условий возбуждения и приема, так и на этапах решения обратных задач. Практическим использованием являются нелинейные методы: спектрально-статистический (ССМ), декомпозиция комплексных спектров (ДеКС и ССД), сложная сейсмическая декомпозиция (СДС).

Для эффективного применения теоретических решений прямых задач рассмотрена проблема их совмещения со спектрами, рассчитываемыми по сейсмограммам. Полученные результаты создают условия для существенного улучшения решения обратной задачи, определения параметров тонкослоистых упругих объектов по реальным сейсмическим данным, включая многокомпонентные наблюдения.

Реализация результатов

Автором разработан специальный курс лекций «Обратные задачи геофизики», который читается на Геолого-геофизическом факультете (Кафедра геофизики) Новосибирского государственного университета с 1986 года, а также читался с 2007 по 2012 год в Лаборатории нефтяной инженерии UENF (Бразилия). Часть разделов этого курса основана на результатах, полученных в ходе выполненных исследований. Также в Лаборатории нефтяной инженерии UENF разработан и прочитан курс лекций «Современный спектральный анализ», включающий в себя результаты проведенных исследований.

Первые разработки по декомпозиции формы отраженных сигналов реализовывались непосредственно автором в ИГиГ СО АН СССР в виде программ ССМ: Гольдин, Митрофанов (1975). Также при активном участии автора (совместно с Ландой) созданы программы оценки малоамплитудных разрывных нарушений по реальным данным: Ланда, Митрофанов (1979). Затем на базе СибГЭ МНП СССР (совместно с Сысоевым и Евдокимовым) в развитие ССМ разработаны программы корректирующей фильтрации для учета изменений формы сигналов - Митрофанов, Сысоев, Яшков (1982) и Сысоев, Евдокимов (1986). Они, независимо от зарубежных разработок, обеспечивали поверхностно согласованную

деконволюцию исходных сейсмических трасс. Дальнейшее развитие предлагаемого подхода к анализу и обработке многоканальных сейсмограмм (совместно с Мадатовым, Ковалевым, Середой) привело к созданию пакетов программ ДеКС и ССД на базе НИИМоргеофизика МГ СССР: Мадатов, Митрофанов, Середя (1991, 1992), Mitrofanov, Madatov (1992) и Kovaljev, Madatov, Mitrofanov (1992), а также технологии обработки ССД: Mitrofanov, Helle, Kovaliev, Madatov (1993). При непосредственном участии автора (совместно с Сергеевым) на базе ИГиГ СО АН СССР подготовлены программы для оптимального пересчета головных волн, наблюдаемых в системах многократного перекрытия: Митрофанов, Сергеев (1986) и Крылов, Митрофанов, Сергеев (1992). Под научным руководством и при участии автора (совместно с Рачковской) на базе ИГФ СО РАН разработаны программы определения структуры векторов нуль-многообразия для систем линейных уравнений, формируемых для различных моделей факторной декомпозиции: Rachkovskaja, Mitrofanov (1993) и Митрофанов, Рачковская (1996). При активном участии автора (совместно с Курдюковой и Фомель) подготовлены программы для трассировки лучей в сложнопостроенных блочных средах: Mitrofanov, Kurdyukova (1999) и Курдюкова, Гольдин, Митрофанов (2004). При активном участии автора (совместно с Карчевским) подготовлены программы моделирования волновых полей для тонкослоистых целевых объектов и выполнена программная реализация, обеспечивающая совмещение теоретических и рассчитываемых спектров.

Методология и методы исследования

Высокая сложность и разнообразие рассматриваемых задач потребовали использования различных подходов к их решению, а также большого числа модельных экспериментов и исследования вопросов, связанных с развитием методики применения получаемых решений на практике. Поэтому основным методологическим приемом являлось комплексирование математических и алгоритмических подходов с физическими и эвристическими соображениями для решения поставленных задач. При этом задача всегда определялась геофизической или геологической сущностью проблемы, а модельные и алгоритмические построения выбирались, исходя из того, чтобы обеспечить максимальную эффективность решения задачи.

С учетом особенностей сейсмических данных применялись следующие методы исследования: статистические, линейно-алгебраические, вычислительной математики, нелинейной оптимизации, математического моделирования, физического моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Подход, основанный на многомерном гомоморфном преобразовании и факторном разложении сейсмических наблюдений, с использованием мультипликативных моделей формы сигнала, позволяет определять регулярные особенности волнового поля и импульсные характеристики различных частей среды.
2. Алгоритмы, направленные на развертку фазового спектра, отбраковку наблюдений, введение априорной информации, обеспечивают единственность и устойчивость многомерного гомоморфного преобразования при обработке различных типов волн (отраженных, головных, дифрагированных).

3. Трансформация наблюдений, осуществляемая с использованием импульсных характеристик различных частей среды, позволяет учесть особенности сейсмического эксперимента и скорректировать данные при переходе от сложно построенной трехмерной модели среды к квази-одномерной модели исследуемого объекта. Это создает основу для эффективного решения объектно-ориентированных обратных задач.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов проверялась на математических, физических и реальных данных, а также бурением.

Научные и практические результаты исследований докладывались и обсуждались на заседаниях Ученого совета институтов: ИГиГ СО РАН, ВЦ СО РАН, ИМ СО РАН, ИГФ СО РАН, ИНГГ СО РАН и на ежегодной школе-семинаре С.В.Гольдина, проводимой в различных местах Советского союза и Российской федерации с 1984 по 1993 год. Они представлялись на международных геофизических конгрессах, симпозиумах, конференциях, совещаниях и семинарах. Ими являлись: «Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых», 1973; «Семинар стран-членов СЭВ по нефтяной геофизике», 1982; «SEG/Moscow» (1992, 1993, 1997); Ежегодный конгресс SEG (1990, 1999, 2009); Ежегодный конгресс EAEG (1992, 1993, 1994, 2006); Генеральная Ассамблея EGS, 1998; «International Congress of the Brazilian Geophysical Society and Latin American Geophysical Conference» (2005, 2007, 2009, 2011).

Большое количество результатов обработки модельных и реальных данных представлено в отчетах ИГиГ СО РАН, ИГФ СО РАН, ИНГГ СО РАН, «НИИМоргеофизика», а также в отчетах производственных организаций и частных компаний Советского Союза, России, Норвегии, Китая и Бразилии. Таким образом, реализовывалось практическое использование многих из указанных выше результатов. Все отчеты проходили экспертизу и защиту на соответствующих НТС. Основные из полученных результатов, которые были разрешены к открытой публикации, представлены в диссертационной работе. Основная часть работы была выполнена в соответствии с планами НИР указанных Институтов за 1972-2006, а также поддерживались грантами РФФИ и комплексными проектами СО РАН.

Публикации и структура работы

По теме диссертации опубликовано 65 научных работ, из них: 16 работ – в ведущих рецензируемых отечественных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 6 работ – в рецензируемых зарубежных журналах, включенных в Scopus, 29 работ - в материалах международных конференций, включая SEG, EGS, EAGE и BGS.

Основные результаты исследований изложены в тексте диссертации, который состоит из введения, восьми глав и заключения. Текст содержит 297 страниц и 65 рисунков. Список литературы включает 219 наименований.

Последовательность изложения материалов в диссертации определяется логикой предлагаемых преобразований:

- их связью с декомпозицией наблюдаемого волнового поля на волновые объекты и многомерной гомоморфной фильтрацией;
- особенностями формируемых мультипликативных факторных моделей для различных типов волн и решаемых задач;

- нелинейной частью преобразований, состоящей из логарифмирования комплексных спектров, содержащих регулярную и случайную компоненту;
- линейной частью преобразований, реализующей оценивание линейных факторов по сейсмическим наблюдениям, заданным на двумерных решетках;
- построением эффективного алгоритма введения априорной информации, обеспечивающей единственность решения систем линейных уравнений;
- прикладными аспектами нелинейных методов, созданных на основе преобразований;
- использованием результатов преобразований при решении обратных задач;
- рассмотрением общей проблемы вложения теоретического решения в экспериментальные данные.

При изложении материала совмещены результаты, полученные в разное время, что связано с цикличностью выполненных исследований. Теоретические аспекты работы, в основном, представлены в первых четырех главах. Но деление исследований на теоретические и практические является условным, т.к. при рассмотрении теоретических вопросов всегда подразумевалась их практическая направленность, а в приложениях возникали теоретические задачи, которые необходимо было решать.

Во **введении** определена цель исследования, обоснована актуальность, кратко охарактеризована степень ее разработанности, сформулированы задачи и защищаемые положения, а также представлены научная новизна и личный вклад, показана теоретическая и практическая значимость результатов.

Первая глава содержит обзор исследований, которые предшествовали началу работ автора по данному направлению. Основными здесь являются: описание и использование модели Гурвича, а также появление гомоморфной фильтрации и кепстрального анализа.

Вторая глава посвящена развитию многофакторных мультипликативных моделей, т.е. результатам, полученным при решении первой из научных задач. При обсуждении моделей основное внимание уделяется учету особенностей реальных сигналов, распространяющихся в сложно построенных средах с поглощением и криволинейными границами, представляющими собой тонкослоистые объекты и содержащими малоамплитудные разрывные нарушения.

В **третьей главе** рассматриваются вопросы, связанные с операцией логарифмирования комплексных спектров участков сейсмических трасс и особенностями линейных факторных моделей, включая анализ систем линейных уравнений, возникающих в рамках этих моделей. Приведенные здесь результаты относятся к решению второй, третьей и четвертой научных задач. Они также важны и для решения пятой, шестой и седьмой научной задачи.

В **четвертой главе** представлены результаты, относящиеся к третьей, пятой и шестой задачам. Они завершают теоретические исследования по рассматриваемым нелинейным преобразованиям. Но, как уже отмечалось, деление исследований на теоретические и практические является весьма условным, что демонстрирует эксперимент по введению априорной информации, выполненный в рамках научно-практического проекта для нефтяной компании «Петробраз».

Пятая глава содержит результаты исследований по практической реализации предлагаемого подхода, основанного на многофакторной декомпозиции формы сейсмического сигнала. Исследования проводились на данных различного типа и способствовали развитию новых методов обработки, в

частности, спектрально-статистического и G-корректирующей фильтрации. Одновременно здесь рассматриваются вопросы перехода от глобальной обратной задачи к локальным обратным задачам по отношению к выделенным объектам среды. Такой переход выполняется с использованием многоуровневой декомпозиции волнового поля, среды и формы сигнала, что реализуется в виде CSD-технологии. Возможность получения импульсных характеристик целевых тонкослоистых объектов приводит к исследованиям, связанным с общей проблемой вложения теоретических решений в наблюдаемые данные. Исследования проводились в рамках классических моделей горизонтальнослоистых сред. Таким образом, результаты главы имеют непосредственное отношение к седьмой, восьмой и девятой научным задачам, а также они играют существенную роль в решении шестой научной задачи.

Благодарности

В первую очередь я благодарен моим учителям: А.С.Алексееву, А.А.Кауфману, С.В.Крылову, М.М.Лаврентьеву, А.В.Тригубову, Э.Э.Фотиади, лекции которых слушал в Новосибирском государственном университете, а также основателям советской геофизики: И.С.Берзон, Ф.М.Гольцману и И.И.Гурвичу, с которыми мне посчастливилось общаться в начале своей научной деятельности. Особая благодарность моему Учителю С.В.Гольдину, научившему меня видеть всю сложность и многообразие геофизических задач, и показавшему мне дорогу, которая может привести к их решению. В процессе исследований я обсуждал их результаты с прекрасными специалистами и глубокими исследователями в различных областях геофизики: А.Г.Авербухом, Ю.Н.Антоновым, В.М.Глоговским, Г.Н.Гогоненковым, А.Д.Дучковым, С.А.Кацом, К.Д.Клем-Муссатовым, И.К.Кондратьевым, И.А.Мушиным, И.Р.Оболенцевой, В.Н.Страховым, В.Н.Трояном, Л.А.Таборовским, И.С.Чичининым и многими другими, которые учили меня методам исследований и научному подходу в решении геофизических задач. Со мной вместе росли и развивались будущие выдающиеся геофизики мирового класса: Е.И.Гитерман, А.Ф.Глебов, Г.М.Голошубин, Ю.А.Дашевский, В.И.Добринский, В.И.Кузнецов, Е.И.Ланда, А.Г.Мадатов, Б.Г.Михайленко, С.Н.Птецов, В.С.Селезнев, Д.И.Судварг, А.П.Сысоев, В.Г.Черняков, М.И.Эпов, с которыми мы вместе овладевали знаниями геофизической науки. Организуя летнюю школу-семинар С.В.Гольдина, и участвуя в ней, я общался с молодыми учеными, ставшими известными исследователями у нас в стране и за рубежом: Э.А.Блясом, В.И.Вингаловым, С.А.Гриценко, В.П.Ковалевым, В.Г.Пашковым, В.-А.И.Середой, А.Стовасом, Ю.К.Тяпкиным, С.Б.Фомелем и многими другими. Я им всем искренне благодарен за те знания и исследовательский опыт, которые они мне передавали. В моих исследованиях мне большую помощь оказали сотрудники нашей лаборатории: В.В.Бузлуков, Т.В.Курдюкова, Т.В.Нефедкина, Ю.А.Орлов, И.С.Шеломов. При проведении исследований с реальными данными мне не удалось бы реализовать многие идеи, если бы не помощь руководителей и сотрудников производственных организаций: А.М.Брехунцова, Л.Ш.Гиршгорна, А.С.Ефимова, Ю.М.Ильина, И.С.Муртаева, Л.Д.Слепокуровой, Г.Н.Яшкова и многих других геофизиков-практиков. Сотрудничая с зарубежными компаниями и университетами, я общался с замечательными российскими и иностранными учеными, которые многое привнесли в мои исследования и постановки задач, рассматриваемые в настоящей

работе. Среди этих ученых мне особенно хочется отметить Ханса Хелле (Hans B. Helle), Бьёрна Урсина (Bjorn Ursin), Джона Клаербоута (Jon F. Claerbout), Ванг Су (Wang Su), Джалма (Soares Filho Djalma), Вячеслава Прийменко. Благодаря им мне удалось познакомиться с организацией исследований в научных центрах международных нефтегазовых компаниях и приобрести опыт подготовки специалистов геофизиков в зарубежных университетах.

Поэтому, приведенные в диссертации исследования и полученные результаты принадлежат не только мне, но и всем коллегам, которые меня окружали и с которыми удается общаться уже более сорока лет.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Предшествовавшие исследования по мультипликативным факторным моделям и гомоморфной фильтрации

В разделе 1.1 приведена традиционная концепция волнового поля, которая активно развивалась школами выдающихся российских геофизиков Гамбургцева, Пузырева, Гольцмана, Гольдина, а также за рубежом. Ее возникновение связано с интерпретацией первых сейсмических наблюдений в конце 19 и начале 20 века, а в ее основе лежит следующее предположение о реальной среде и наблюдаемом волновом поле. Среда представима конечным набором однородных слоев, которые разделены сейсмическими границами, формирующими определенные волны, а регистрируемые колебания представимы суммой сигналов (волн), связанных с выделенными элементами среды. Тогда для сейсмического наблюдения (трассы) при определенных допущениях справедливым будет выражение:

$$y(p_i, p_j, t | \mathcal{G}) = \sum_{w=1}^w f^w(p_i, p_j, t | \mathcal{G}) + \xi(p_i, p_j, t). \quad (1)$$

где $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ и $p_j = (x_j, y_j, z_j)$ определяют точки расположения источника и приемника сейсмических колебаний в произвольной системе наблюдений, x_i, y_i, z_i задают пространственные координаты этих точек, а i и j являются их номерами; t - время наблюдения; \mathcal{G} - параметры модели среды. Функции $f^w(p_i, p_j, t | \mathcal{G})$ задают форму сигнала фиксированной волны (продольной, поперечной, обменной и т.п.), а $\xi(p_i, p_j, t)$ включают в себя оставшуюся часть наблюдения, куда входят нерегулярные помехи и сигналы, отвечающие волнам, неучтенным первым слагаемым. Относительно $\xi(p_i, p_j, t)$ могут быть использованы различные предположения. Для достаточно небольших участков трасс они могут состоять в том, что $\xi(p_i, p_j, t)$ является частью реализации стационарного случайного процесса с корреляционной функцией $2\sigma^2 R(t)$.

Дополнительное упрощение выражения (1) состоит в предположении о локальности и симметричности источника колебаний. Тогда для выделяемого сейсмического сигнала применимо выражение:

$$f^w(p_i, p_j, t | \mathcal{G}) = w(p_i, t) * U^w(p_i, p_j, t | \mathcal{G}), \quad (2)$$

где $w(p_i, t)$ - форма исходного сигнала для i -го источника, а $U^w(p_i, p_j, t | \mathcal{G})$ - импульсная характеристика среды, отвечающая заданной волне при ее распространении от точки i -го источника до j -го приемника; $*$ - обозначение оператора свертки по временной переменной. Это представление использовалось в

процедурах деконволюции (Robinson, 1954) для восстановления импульсной характеристики среды с целью определения параметров локальных объектов (границ) и при решении обратных кинематических задач (Гольдин, 1978).

Важным является зависимость $w(p_i, t)$ в выражении (2) только от положения источника в системе наблюдений, что сближает модели дисперсионного анализа (Шеффе, 1980) с сейсмическими моделями. Поэтому воспользуемся следующими понятиями:

- *Фактором называется некоторая составляющая (особенность) формы сигнала или волнового поля, которая постоянна при определенных сочетаний индексов i и j , определяющих положение сейсмической трассы в системе наблюдений.*
- *Модель сеймотрассы, содержащая один или несколько факторов в качестве неизвестных параметров, будет называться факторной моделью. Когда факторы являются мультипликативными, то модель будет называться мультипликативной факторной моделью.*

Под мультипликативными факторами понимаются факторы, входящие в модель сигнала или волнового поля в виде произведения или оператора свертки. Сам же процесс определения (оценивания) факторов будем называть факторным разложением или факторной декомпозицией.

В разделе 1.2 дана первая многофакторная мультипликативная модель, предложенная И.И.Гурвичем (1970) для представления формы сигнала отраженной волны, наблюдаемого при профильной многократной системе. Она имеет вид

$$f_{ij}(t) = r_j(t) * m_k(t) * s_i(t), \quad (3)$$

где $s_i(t)$, $r_j(t)$ определяют импульсные характеристики областей возбуждения и приема сейсмических колебаний, а $m_k(t)$ - импульсная характеристика области отражения, соотносящейся с k -ой общей центральной точкой (ОЦТ).

Амплитудный аналог модели (3) был применен для анализа динамических вариаций наблюдаемых сигналов (Гурвич, Чыонг Минь, 1971). Но отсутствие методов оценивания параметров подобных моделей не позволяло использовать всю систему наблюдений. Поэтому авторы использовали небольшие совокупности наблюдений (4-6), что снижало помехоустойчивость оценок. Понимание этого ограничения способствовало переходу к линеаризованной модели спектрального аналога (3) посредством вариационного принципа (Гурвич, Яновский, 1971). Тогда получалась линейная факторная модель для первых вариаций спектральных характеристик: $s_i(\omega)$, $r_j(\omega)$, $m_k(\omega)$, где ω - круговая частота. Анализ входящих в модель факторов предлагалось выполнять известными статистическими методами. Однако такой подход требовал предположения о случайном характере вариаций исследуемых характеристик и отсутствие взаимодействий между ними.

Раздел 1.3 представляет иной способ линеаризации многофакторных мультипликативных моделей. Он основан на логарифмировании спектральных характеристик сигналов, что является частным случаем гомоморфного преобразования, переводящего операцию свертки в операцию суммы. Понятие гомоморфных преобразований над сигналами было введено Оппенгеймом в его докторской диссертации (Oppenheim, 1965) и использовалось при построении одномерной гомоморфной или обобщенной линейной фильтрации (Oppenheim, 1966, Oppenheim et al., 1968). Такая фильтрация начала применяться и при обработке одноканальных сейсмологических данных (Ulrych, 1971, Stoffa et al.,

1974, Buhl et al., 1974, Tribolet, 1979, Jin and Rogers, 1983). Отметим, что переход к линеаризованной модели посредством операции логарифмирования был рассмотрен до введения гомоморфной фильтрации и получил название кепстрального анализа (Bogert et al., 1963, Noll, 1964). На основе кепстрального анализа развивается метод обратной фильтрации, не требующий знания об исходном импульсе, названный «Blind deconvolution» (Stockham et al., 1975). Но кепстры, в отличие от более широкого понятия гомоморфных преобразований, требуют применения обратного преобразования Фурье к логарифмам спектров.

Существенной особенностью при рассмотрении гомоморфных преобразований в случае многофакторных сейсмических моделей является многоканальность данных, связанная с невозможностью разделения нескольких неизвестных импульсных характеристик, определяющих форму наблюдаемого сигнала. О появлении многоканальных фильтров говорилось в диссертации Оппенгейма. Но их практическая реализация впервые была выполнена автором совместно с Гольдиным только к 1975 году. При этом возникло несколько задач, связанных с особенностями многомерного гомоморфного преобразования и методами совместного оценивания параметров линейных факторных моделей для сейсмических систем наблюдений.

Глава 2. Развитие мультипликативных сейсмических моделей

В разделе 2.1 дано усовершенствование модели (3), обеспечивающее учет возможных вариаций формы сигнала при изменении удалений источник-приемник и помех, присутствующих в реальных данных. В результате получаем следующую модель интервала трассы, содержащего отраженный сигнал от заданного горизонта (Митрофанов, 1980):

$$y_{ij}(t|\mathcal{G}) = w(t) * s_i(t) * r_j(t) * g_k^{(0)}(t|\mathcal{G}) * g_{kl}^{(1)}(t|\mathcal{G}) * \dots * g_{kl}^{(p)}(t|\mathcal{G}) + \xi_{ij}(t). \quad (4)$$

Здесь $w(t)$ - общий импульс посылки, $s_i(t), r_j(t)$ - вариации импульсных характеристик зон возбуждения и приема сейсмических колебаний, определяемые особенностями реального эксперимента. Импульсные характеристики $g_{kl}^{(p)}(t|\mathcal{G})$ отвечают некоторым эффективным фильтрам, определяемым как разложение логарифмов спектров импульсной характеристики среды $U_{ij}^w(\omega|\mathcal{G})$ в конечный ряд по системе линейно-независимых функций $\varphi^{(p)}(i-j)$ с переменной, определяемой расстоянием источник-приемник (РУН) и обозначаемой $(i-j)$. Индексное обозначение k, l или $(i+j), (i-j)$ используется для координат ОЦТ и РУН. Компонента $\xi_{ij}(t)$ аналогична $\xi(p_i, p_j, t)$ в модели (1).

Обоснованием, для введения представления (4), служил эвристический характер модели Гурвича и аппроксимационный подход к анализу геофизических наблюдений. Подход оправдан, когда модель среды и волнового поля не полностью определены. Параметры \mathcal{G} указывают на связь эффективных фильтров с моделью среды, что служит основой для их использования в решении обратных задач. Для устранения слишком высокой степени формализма при введении модели (4), было показано, как характеристики эффективных фильтров соотносятся с параметрами лучевого метода (п.2.1.2) и линейно-неупругого слоя (п.2.1.3). Также отмечено, что импульсная характеристика $g_k^{(0)}(t|\mathcal{G})$ отвечает отклику среды при совмещенном источнике и приемнике. Это позволяет соотносить ее с временными разрезами ОЦТ и использовать в упрощенных постановках решения обратных задач.

Дальнейшее развитие мультипликативных факторных моделей проводилось при рассмотрении задач по определению параметров тонкослоистых объектов (Мадатов, Митрофанов, Серeda, 1991-1992 гг). Результаты изложены в разделе 2.2, где показано как конкретизация задачи позволяет доопределить характеристики $g_{kl}^{(p)}(t|\mathcal{G})$ модели (4). Одновременно удается решить проблему очищения отклика целевого объекта от искажений, связанных с покрывающей средой, и осуществить увязывание аппроксимационной модели среды с аппроксимационной моделью наблюдаемого волнового поля. Это создает условия для подготовки исходных данных в объектно-ориентированных обратных задачах.

Выполненные построения позволяли представить логарифм спектральной характеристики интервала трассы, содержащего отраженный сигнал от n -го горизонта, в виде

$$\ln[Y_{ij}^{(n)}(\omega)] = \ln[W(\omega)] + \ln[S_i(\omega)] + \ln[R_j(\omega)] + \omega \cdot \alpha^{(n)} \cdot C_j^{(n)} + k_0^{(n)}(\omega) + \sum_{p=1}^P k_p^{(n)}(\omega) \cdot j^{2p} + \varepsilon_{ij}(\omega), \quad (5)$$

где

$$k_0^{(n)}(\omega) = \ln[M_0^{(n)}(\omega)] + \sum_{k=1}^{n-1} T_0^{(k)}(\omega) \text{ и } k_l^{(n)}(\omega) = a_l^{(n)}(\omega) + \sum_{k=1}^{n-1} b_l^{(k)}(\omega).$$

Величина n - число горизонтов априорной тостослоистой модели. Параметр $\alpha^{(n)}$ определяет затухание в n -ом толстом слое, а коэффициент $C_j^{(n)}$ рассчитывается на основе кинематической информации, полученной на этапе интерпретации в рамках тостослоистой модели с криволинейными границами. Параметры $a_l^{(n)}(\omega), b_l^{(n)}(\omega)$ являются коэффициентами разложения логарифмов спектров импульсных характеристик отражения/прохождения для горизонтов модели, а $M_0^{(n)}(\omega), T_0^{(k)}(\omega)$ отвечают нормальному лучу, проведенному от поверхности наблюдений до n -ой тонкослоистой зоны. Представление (4) использовалось при факторной декомпозиции и служило основой для развития CSD-технологии.

В разделе 2.3 представлены результаты по возможному использованию мультипликативных факторных моделей при представлении вариаций формы сигналов, относящихся к другим типам волн. Рассматриваются головные волны для слабокриволинейных границ и дифрагированные волны от локальных разрывных нарушений отражающих границ.

Для модели головной волны (п.2.3.1) использовалась идея работы (Крылов, Сергеев, 1985) с обоснованием равенства $f_{11}(t) * f_{22}(t) = f_{12}(t) * f_{21}(t)$, связывающего форму сигналов в четырех точках обобщенной плоскости. Оно позволяет построить схемы пересчета головных волн. Но значительный произвол в выборе точек наблюдения в многократных системах КМПВ приводил к задаче оптимизации процедур пересчета. При ее решении была предложена следующая общая модель для формы сигнала (Митрофанов, Сергеев, 1986):

$$f_{ij}(t) = s_i(t) * H_i^{(1)}(t) * H_{i1}^{(2)}(t) * \dots * H_{ik}^{(2)}(t) * H_j^{(3)}(t), \quad (6)$$

где характеристики $H_i^{(1)}(t), H_j^{(3)}(t)$ связаны с областями прохождения головной волны через покрывающую среду от источника до границы и от границы до приемника, соответственно, а характеристики $H_{ik}^{(2)}(t)$ определяются траекторией скольжения волны вдоль границы. Предложенная модель (6) обладает факторной

структурой, что позволило построить оптимальные схемы пересчета головных волн (Крылов, Митрофанов, Сергеев, 1992).

Значимой для развития методов многомерной гомоморфной фильтрации и применения их результатов при решении обратных задач была модель локального разрывного нарушения (п.2.3.2). Ее основу составляли работы Клем-Мусатова (1975), где отраженный сигнал от локального нарушения представлен суммой отраженных и дифрагированных волн, что позволило реализовать подход в рамках усложненного описания сигнальной составляющей $f^w(p_i, p_j, t | \mathcal{G})$, когда ее спектр представим выражением (Ланда, Митрофанов, 1979):

$$F_{ij}(\omega | \mathcal{G}) = W(\omega) \cdot S_i(\omega) \cdot R_j(\omega) \cdot U_{ij}^{(ref)}(\omega) \cdot \Lambda_{ij}(\omega | \mathcal{G}), \quad (7)$$

где $\Lambda_{ij}(\omega | \mathcal{G}) = \sum_{p=1}^2 [\exp(i \cdot \omega \cdot \tau_{ijp}^{(ref)}) + D[\eta_{ijp}(\omega)] \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot \tau_{ijp}^{(edg)})]$ определяет изменение спектра сигнала отраженной волны за счет разрывного нарушения, задаваемого вектором $\mathcal{G} = \{V, H, x_0, \alpha, \Delta h, \delta\}$, где V - скорость распространения волны в покрывающей толще, H - глубина до отражающей границы, x_0 - положение проекции ребра дифракции относительно источника, α - угол между линией профиля наблюдений и проекцией ребра на плоскость наблюдения, Δh - амплитуда нарушения по вертикали, а δ - тоже по горизонтали. Множитель $D[\eta_{ijp}(\omega)]$ характеризует изменение гармоник отраженной волны, а его параметр зависит от частоты и разности географов волн, как $\eta_{ijp}(\omega) = \sqrt{\pi^{-1} \omega \cdot [\tau_{ijp}^{(edg)} - \tau_{ijp}^{(ref)}]}$. Здесь $U_{ij}^{(ref)}(\omega)$ определяет импульсную характеристику среды для отраженной волны от не нарушенной границы. Поэтому она представима моделями (4)-(5). Тогда при переходе к логарифмам спектров интервалов трасс получим частично-линейную модель с нелинейной составляющей, зависящей от параметров локального объекта, что позволяет в рамках решения одной задачи совместить оценивание, как мультипликативных составляющих, так и параметров объекта.

Глава 3. Линеаризованные факторные модели

В разделе 3.1 рассматриваются особенности перехода к логарифмам спектров интервалов реальных трасс. Указываются значимые характеристики данных, влияющие на свойства такого преобразования. К ним относятся: (1) дискретность данных; (2) произвольное отношение сигнал/помеха; (3) ограниченная длительность интервала (от нескольких десятков до нескольких сотен миллисекунд); (4) возможная интерференционная природа анализируемых сигналов. Отмечается важность применения оптимальных окон, увеличивающих отношение сигнал/помеха при отборе интервалов (Митрофанов, 1979), и использования соответствующих вероятностных характеристик дискретных спектров, построенных в предположении, что помеха является частью реализации стационарного случайного процесса с корреляционной функцией $2\sigma^2 R(t)$. Также вводятся векторные обозначения и равенства для наблюдений, подвергаемых преобразованиям: $\mathbf{y}(t) = \mathbf{s}(t) + \boldsymbol{\xi}(t)$, $\mathbf{Y}(\omega) = \mathbf{S}(\omega) + \boldsymbol{\zeta}(\omega)$. Компоненты вектора $\mathbf{y}(t) = \{y_j(t); j = 1, \dots, N\}^T$ являются участками обрабатываемых трасс $y_j(t)$, а вектор $\mathbf{Y}(\omega) = \{Y_j(\omega); j = 1, \dots, N\}^T$ содержит спектральные характеристики $y_j(t)$. Векторы сигнальной составляющей $\mathbf{s}(t), \mathbf{S}(\omega)$ и аддитивной помехи $\boldsymbol{\xi}(t), \boldsymbol{\zeta}(\omega)$ имеют

структуру, подобную векторам $y(t), Y(\omega)$. Переменные t и ω являются, соответственно, временем и круговой частотой. Они могут обладать, как непрерывной, так и дискретной природой. Подобие равенств позволяет опускать или заменять точкой переменные t, ω , когда это не существенно для выполнения требуемых построений. Компоненты векторов $s(t), S(\omega)$ представимы мультипликативными моделями и обозначены: $s_j(t | \theta) = U^{\otimes} \theta(t)$, $S_j(\omega | \theta) = U^* \theta(\omega)$, где $\theta(\bullet)$ - вектор мультипликативных составляющих, а U^{\otimes} и U^* - операторы свертки и произведения, соответственно, обеспечивающие это представление.

Тогда, перейдя к логарифмам спектров $Y_j(\omega)$, имеем векторные равенства:

$$\mathbf{z} = \mathbf{s}^* + \boldsymbol{\varepsilon} = \Lambda \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (8)$$

где векторы \mathbf{z} и \mathbf{s}^* состоят их комплексных компонент $z_j(\omega) = \ln Y_j(\omega) = \ln |Y_j(\omega)| + i \cdot \varphi_j^Y(\omega)$ и $s_j^*(\omega) = \ln S_j(\omega) = \ln |S_j(\omega)| + i \cdot \varphi_j^S(\omega)$. Здесь $\varphi_j^Y(\omega)$ и $\varphi_j^S(\omega)$ являются фазовой составляющей комплексного спектра $Y_j(\omega)$ и $S_j(\omega)$, соответственно, а i - комплексная единица. Для упрощения записи, имеющаяся зависимость векторов \mathbf{z} и \mathbf{s}^* от $\boldsymbol{\theta}$ и ω , опущена. Вектор \mathbf{z} определяет исходные данные для линейной части многомерного гомоморфного преобразования.

Оператор Λ в правой части (8) является либо полностью, либо частично линейным оператором и определяется видом $\ln S_j(\omega | \theta)$, который задается одной из моделей главы 2. Когда Λ - полностью линеен, то его можно заменить соответствующей матрицей \mathbf{X} . Под частично линейным оператором понимается Λ , представимый суммой операторов Λ_1 и Λ_2 , которые действуют на разные компоненты вектора $\boldsymbol{\theta}$, т.е. $\boldsymbol{\theta} = \{\boldsymbol{\theta}_1^T, \boldsymbol{\theta}_2^T\}^T$, и $\Lambda \boldsymbol{\theta} = \Lambda_1 \boldsymbol{\theta}_1 + \Lambda_2 \boldsymbol{\theta}_2$, причем Λ_1 - полностью линейный оператор. Пример частично линейного оператора получаем в случае модели (7). Введение и использование частично линейных операторов отличает рассматриваемые нелинейные преобразования от классических многомерных гомоморфных преобразований.

Векторная составляющая $\boldsymbol{\varepsilon}$ в выражениях (8) имеет существенно отличающиеся свойства от аддитивных составляющих ξ, ζ исходных мультипликативных факторных моделей. Главное отличие состоит в зависимости свойств $\boldsymbol{\varepsilon}$ от сигнальной составляющей и, следовательно, от вектора неизвестных параметров $\boldsymbol{\theta}$. Учитывая зависимость величины сигнальной составляющей от значений мультипликативных факторов и параметров модели среды, получаем значительные вариации отношения сигнал/помеха и изменение свойств аддитивной помехи линеаризованной модели (8). Важным моментом является и различие свойств реальной и мнимой составляющей $\boldsymbol{\varepsilon}$.

В разделе 3.2 дан анализ свойств мнимой составляющей векторов \mathbf{z} и $\boldsymbol{\varepsilon}$, который потребовал изучения фазовой составляющей спектра интервала сейсмической трассы $Y_j(\omega)$ (или фазового спектра). К сожалению, фазовым спектрам уделяется не достаточное внимание в практической сейсморазведке. Интерес к фазовым спектрам может быть возобновлен при динамическом анализе сложных волновых объектов и в связи с решением обратных динамических задач для тонкослоистых объектов, т.к. известно (Берзон, 1965; Худзинский, 1966), что даже для одного тонкого слоя невозможно полное восстановление упругих параметров только по амплитудной характеристике спектра отраженного сигнала.

Понимание важности фазовых спектров при изучении многих технических процессов проявляется в развиваемых методах современного спектрального анализа, в частности, это способствовало появлению S-преобразования (Stockwell et al., 1996). Фазовым спектрам уделялось большое внимание при разработке кепстрального анализа и гомоморфной фильтрации (Tribolet, 1979; Steiglitz, Dickinson, 1982; Oppenheim, Schaffer, 1998). Также они изучались при развитии теории многомерной гомоморфной фильтрации (Гольдин, 1976; Митрофанов, 1979, 1986; Mitrofanov, Priimenko, 2012). Здесь автором получены такие результаты:

- Окна, используемые при отборе временных интервалов, изменяют свойства фазового спектра. В частности, появляется коррелируемость по частотам и отличие от равномерного распределения.
- Фазовые спектры обладают разрывами двух типов, различающихся по величине и природе.
- Только однозначное определение значений фазового спектра обеспечивает состоятельность оценок при многомерных гомоморфных преобразованиях.

Выполненные исследования (Митрофанов, 1979, 1986; Тяпкин, Бельфер, Погожев, Мушин, Митрофанов, 1986) основаны на совместном распределении значений фазовых спектров, определяемых на различных частотах: ω_l, ω_m , и на аналитических свойствах фазовой составляющей спектра сигнала конечной длительности. В результате создан эффективный алгоритм развертки фазового спектра, обладающий исключительно высоким быстродействием и статистической устойчивостью при высоком уровне помех. Алгоритм использует неравенство $|\varphi_j^Y(\omega_{l+1}) - \varphi_j^Y(\omega_l)| > \delta^l$. Его выполнение указывает на необходимость перехода на новый лист римановой поверхности. Здесь δ^l - заранее задаваемый порог с оптимальными значениями, принадлежащими интервалу (4.2-4.4).

Анализ свойств реальной составляющей векторов \mathbf{z} и $\boldsymbol{\varepsilon}$ приведен в **разделе 3.3**. Он был важен для исследования свойств создаваемых нелинейных методов, т.к. позволял устанавливать граничные значения μ , когда целесообразно их применение. Здесь были получены: распределение вероятностей $\text{Re } \varepsilon_j(\omega | \boldsymbol{\theta})$ при фиксированном значении частоты ω_k и вычислены интегралы, определяющие значения первых двух моментов этой случайной величины в зависимости от величины μ (Митрофанов, 1987). Параметр μ совпадает с отношением сигнал/помеха, что позволило изучить поведение математического ожидания (M) и дисперсии (D) при произвольных значениях μ . В частности, получено, что $D = \pi^2 / 24 \approx 0,41$ при $\mu \rightarrow 0$. Вид кривых M и D , рассчитанных с точностью, превышающей 0,05, для $\mu \in [0.1, 3.0]$, показан на рисунке 1.

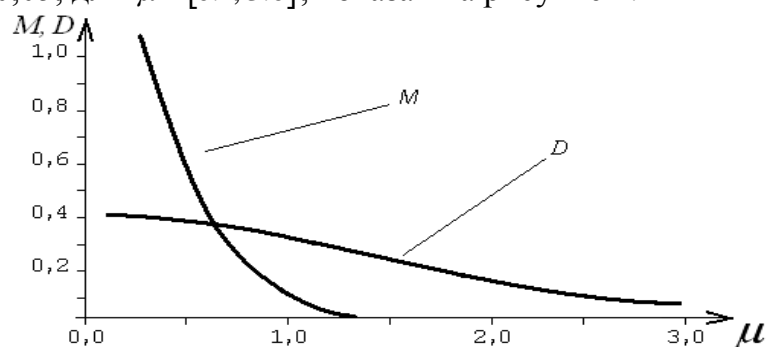


Рисунок 1. Изменение M и D случайной величины $\text{Re } \varepsilon_j(\omega | \boldsymbol{\theta})$ от μ .

Из проведенного анализа следовало, что:

- при малых μ подобные методы дают большие смещения в оценках параметров амплитудного спектра сигнальной составляющей, фактически приводя их к спектру корреляционной функции $R(t)$;
- при $\mu > 1$ методы позволяют получать оценки с очень незначительными смещениями, стремящимися к нулю при $\mu > 1,5$.

Исследования указали на неэффективность традиционных способов контроля качества оценок и моделей, основанных на среднеквадратических отклонениях, при малых μ . Это необходимо учитывать при решении вопроса о соответствии предлагаемых интерпретационных моделей обрабатываемому материалу. Так, анализ кривой D Рисунка 1 позволяет понять эмпирическую границу, которая была ранее определена при обработке реальных данных с использованием спектрально-статистического метода (Гольдин, Митрофанов, 1975; Митрофанов, 1984). Ее смысл состоял в том, что только при значениях среднеквадратического отклонения менее 0,3 удавалось получать устойчивые оценки параметров мультипликативных факторов и производить выбор оптимальных интерпретационных моделей.

Еще одним прикладным аспектом теоретических исследований вероятностных характеристик $\text{Re } \varepsilon_j(\omega | \bar{\theta})$ явилось построение процедур отбраковки и анализа значимости различных групп факторов (**п.3.3.3**). При этом была решена задача определения доверительных интервалов $[a_1, a_2]$, где может находиться случайная величина $\text{Re } \varepsilon_j(\omega | \bar{\theta})$ с заданной вероятностью P_α .

Линеаризация мультипликативных факторных моделей позволила определить целый класс сейсмических моделей (**раздел 3.4**), что дало возможность рассматривать многие задачи обработки сейсмических материалов с единых позиций, например, коррекцию временных статических поправок. При этом удается исследовать влияние структуры системы наблюдений и входящих в модель факторов на единственность и устойчивость решения задачи, определения параметров модели по исходным данным (**разделе 3.5**). Работа (Митрофанов, 1975), вероятно, была первой, где факторные модели использовались для такого анализа. В ней, независимо от работ (Taner at al, 1974; Wiggins at al, 1976), выполнены исследования моделей, относящихся к коррекции временных статических поправок и формы сигналов, используя линейно алгебраический подход, что было естественным с учетом матричной формы (8).

Кроме исследования вопросов построения оценок факторов и обусловленности матриц, в указанной работе рассматривались вопросы связи матриц \mathbf{X} и $\mathbf{A} = \mathbf{X}^T \mathbf{X}$ с матрицами инцидентий и смежностей, из теории графов.

Это позволило доказать Утверждение 2.1: $\text{rank } \mathbf{A} \leq \sum_{p=1}^P N_p - P + 1$, т.е. в матрице \mathbf{A}

имеется не менее $P-1$ линейных зависимостей. Здесь N_p - число значений фиксированного фактора, а P - число факторов. Следовательно, параметры не могут быть определены единственным образом для любой модели, содержащей более одного фактора. Этим обобщались результаты дисперсионного анализа, полученные для более простых моделей.

Следующее выражение можно считать обобщением многих аддитивных сейсмических факторных моделей:

$$z_{ij} = \sum_{p=1}^P \gamma_p(c_1^p i + c_2^p j) \cdot \varphi_p(c_3^p i + c_4^p j) + \varepsilon_{ij}, \quad (9)$$

где коэффициенты $c_1^p, c_2^p, c_3^p, c_4^p$ определяют направления: $c_3^p i + c_4^p j = const$ и $c_1^p i + c_2^p j = const$, вдоль которых значения функций: $\varphi_p(c_3^p i + c_4^p j)$ и $\gamma_p(c_1^p i + c_2^p j)$ - постоянны. При этом φ_p считаются известными, а γ_p - неизвестными. Так, модель коррекции временных статических поправок получается, когда для первых двух слагаемых $c_1^1 = 1, c_2^1 = 0, c_3^1 = 0, c_4^1 = 1, \varphi_p \equiv 1$, а для последующих слагаемых $c_1^p = c_2^p = 1/2, c_3^p = 1, c_4^p = -1, p = 3, 4, \dots$, и в качестве функций φ_p берем четные положительные степени соответствующего аргумента, включая нулевую степень. Тогда для вариаций времен прихода имеем: $\Delta t_{ij} = \Delta t_i + \Delta t_j + c_{i+j}^0 + c_{i+j}^2 \cdot (i-j)^2 + \varepsilon_{ij}$, где $\Delta t_i, \Delta t_j$ являются поправками (факторами) за источники и приемники, а c_{i+j}^0, c_{i+j}^2 являются факторами ОЦТ и связаны с t^0 и $V_{эф}$.

Линейность моделей (9) относительно неизвестных факторов γ_p позволяет представить их в матричной форме (8), которая может иметь вид $\mathbf{z} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon}$. Дальнейшее исследование таких моделей позволило получить для них эквивалентные формы (Митрофанов, 1988):

$$\mathbf{z} = \mathbf{X}_d \boldsymbol{\theta}_d + \boldsymbol{\varepsilon} \text{ и } \mathbf{q} = \mathbf{X}_q \boldsymbol{\theta}_q + \mathbf{v}, \quad (10)$$

которые являются следствием равенств:

$$z_{ij} = \sum_{p=1}^P \sum_{s=0}^{Np-1} d_s^p \psi_s(c_1^p i + c_2^p j) \cdot \varphi_p(c_3^p i + c_4^p j) + \varepsilon_{ij}, \quad \gamma_p(c_1^p i + c_2^p j) = \sum_{s=0}^{Np-1} d_s^p \psi_s(c_1^p i + c_2^p j)$$

и $z_{ij} = \sum_{r=0}^{N-1} q_r f_r(i, j), \quad \psi_s(c_1^p i + c_2^p j) = \sum_{r=0}^{N-1} m_{sr}^p f_r(i, j), \quad \varphi_p(c_3^p i + c_4^p j) = \sum_{r=0}^{N-1} n_{pr}^p f_r(i, j).$

Представления (10) сыграли существенную роль при анализе факторных моделей, когда природа неединственности решения систем (8) и (9) была непонятна. Такой подход выявлял характер возникающих зависимостей между различными факторами и позволял формулировать условия обеспечивающие единственность строящихся решений. Он также позволил дать общее определение допустимого плана наблюдений Q (п.3.5.2), что позволило разделить общую проблему неединственности на две части, связанные: (1) с системой наблюдений и (2) со структурой факторов.

В процессе исследования моделей (9) были изучены свойства итерационного процесса последовательного уточнения оценок факторов (раздел 3.6), появление которого было связано с вопросами разделения волн (Гольцман, Троян, 1967) и коррекции временной статики (Михальцев, Гогоненков, 1973). Также был разработан алгоритма определения векторов нуль-многообразия матриц \mathbf{X} (п.3.5.3), который применялся при анализе различных факторных моделей (Rachkovskaja, Mitrofanov, 1993; Митрофанов, Рачковская, 1996). В частности, на его основе для классической модели коррекции временных статических поправок удалось не только подтвердить известные свойства, но и продемонстрировать их изменения при нарушении регулярности структуры наблюдений.

Глава 4. Априорная информация и свойства оценок

В разделе 4.1 обсуждается, что изложенные в главе 3 исследования численных особенностей матриц для различных факторных моделей и планов

наблюдений позволили понять причины сложностей, возникающих при решении соответствующих систем линейных уравнений. Они расклассифицировали проблемы по вырожденности и плохой обусловленности, что создало основу для разработки эффективных способов решения. При этом может быть введено понятие *эквивалентности решения* для систем (10).

- Решения, полученные при определении параметров факторных моделей, считаются эквивалентными, если они совпадают с точностью до векторов нуль-многообразия соответствующих матриц, построенных для заданной модели и плана Q .

Сами же решения могут быть получены произвольным образом, включая обобщенную инверсию (Алберт, 1977) или эвристические построения.

Именно в эквивалентности решений особенно значимо проявилось удобство представлений (10). Например, задача исследования линейных зависимостей, возникающих между факторами модели (9), привела к использованию в качестве f_r, ψ_s, φ_p степенных функций. Построенные при этом эквивалентные формы использовались для анализа нуль-многообразий следующих четырех факторных моделей (**п.4.1.2**):

- **(I)** трехфакторная модель, получаемая в результате линеаризации модели Гурвича (3), когда для факторов источников и приемников $c_1^1 = 1, c_2^1 = 0, c_1^2 = 0, c_2^2 = 1$, а для фактора ОЦТ берем $c_1^3 = c_2^3 = 1/2$;
- **(II)** четырехфакторная модель, где к предыдущей модели (I) добавлен фактор за удаления λ_{i-j} со значениями $c_1^4 = 1/2, c_2^4 = -1/2$;
- **(III)** классическая модель коррекции временных статических поправок, введенная посредством (9), но при использовании $c_3^p = 1/2, c_4^p = -1/2$;
- **(IV)** к классической модели (III) добавлено еще одно слагаемое, представляющее собой четвертую степень по удалениям источник-приемник.

Здесь получено, что для моделей (I) и (II) неоднозначно определяются составляющие до первой и второй степени, соответственно, а для моделей (III) и (IV) такими составляющими будут третья и четвертая степень, соответственно. Также показано, что между указанными парами моделей имеется существенное отличие. Если в моделях (I) и (II) имеется единый порядок неоднозначности для всех факторов, то в моделях (III) и (IV) неоднозначности сложнее распределены по факторам. Так, в модели (III) $\alpha_i, \beta_j, c_{i+j}^0$ имеют третью степень неоднозначности, а c_{i+j}^2 - только нулевую степень.

Использование полиномиальных разложений позволило не только разработать общий подход к исследованию неоднозначно определяемых составляющих факторных моделей, но и дали возможность ввести следующее важное понятие.

- *Псевдоаприорной информацией* называются условия, добавление которых в исходную систему линейных уравнений, обеспечивает единственность и устойчивость решения расширенной системы.

Для формирования соответствующих условий могут быть использованы статистические аналоги конечных разностей, имеющие вид

$$f^1 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=N+1}^{N_f} f_i - \sum_{i=1}^N f_i \right), \quad f^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=3N+1}^{N_f} f_i - \sum_{i=N+1}^{3N} f_i + \sum_{i=1}^N f_i \right), \quad \dots$$

где верхний индекс определяет порядок разности. Условие $f^k = 0$ при $k = 0, \dots, K$ обеспечивает равенство нулю полиномиальных составляющих K -го порядка.

Введение такого типа информации определялось тремя моментами. Первый, связан со сложностью получения достаточного объема требуемой информации в реальном эксперименте. Второй, основан на возможности разделения задачи введения оптимальных условий, обеспечивающих хорошую устойчивость решения систем или построения обратных матриц, на две подзадачи: (1) обеспечение устойчивости и (2) получение истинных значений параметров. Третий, заключается в применении результатов по исследованию структуры неоднозначно определяемых составляющих линейных факторных моделей.

Разнообразие способов определения параметров и эквивалентность построенных решений с точностью до неоднозначно определяемых составляющих, приводят к проблеме использования априорной информации, обеспечивающей истинные значения факторов. Проблема исследуется в **разделе 4.2**. Анализ различных типов такой информации (**п.4.2.1**), а также четырех способов ее применения (**п.4.2.2**), позволили разработать следующий эффективный метод, состоящий из двух шагов.

I шаг. Исходя из знания структуры нуль-многообразия матриц \mathbf{X} для конкретной факторной модели, строится система уравнений $\mathbf{H}^+ \boldsymbol{\theta} = \mathbf{c}^+$, где матрица \mathbf{H}^+ определяется на основе псевдоаприорной информации. Если информация задается посредством конечных разностей, то можно положить $\mathbf{c}^+ = \mathbf{0}$. Далее строится обратная матрица для расширенной системы линейных уравнений

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{X}^T \mathbf{X} & \mathbf{H}^{+T} \\ \mathbf{H}^+ & \mathbf{O} \end{Bmatrix}^{-1} = \begin{Bmatrix} \mathbf{a}_1^+ & \mathbf{a}_2^+ \\ \mathbf{a}_3^+ & \mathbf{a}_4^+ \end{Bmatrix} \quad (11)$$

и определяется некоторое эквивалентное решение исходной задачи, как $\hat{\boldsymbol{\theta}}_m = \mathbf{a}_1 \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \mathbf{a}_2 \mathbf{c}^+$.

При полном отсутствии априорной информации построенное решение $\hat{\boldsymbol{\theta}}^+$ может считаться окончательным. Оно используется для различных целей с учетом того, что неоднозначные составляющие параметров модели были определены или зафиксированы на основе псевдоаприорной информации, выбираемой из эвристических соображений, которые не подтверждены реальными наблюдениями.

II шаг. На основе истинной априорной информации, обладающей полнотой, находятся значения вектора разности $\Delta \boldsymbol{\theta}^+ = \boldsymbol{\theta}^* - \hat{\boldsymbol{\theta}}^+ \in \ker(\mathbf{X})$ через решение системы $\mathbf{H} \Delta \boldsymbol{\theta}^+ = \mathbf{c}$, где матрица \mathbf{H} и вектор \mathbf{c} соответствуют реальной априорной информации. Полнота информации позволяет по полученным значениям $\Delta \boldsymbol{\theta}^+$ определить вектор истинных параметров $\boldsymbol{\theta}^* = \hat{\boldsymbol{\theta}}^+ + \Delta \boldsymbol{\theta}^+$.

Метод обладает вычислительной и экономической эффективностью. Важно то, что псевдоаприорная информация формируется совершенно вне зависимости от реальных особенностей геофизического эксперимента на основе формальных принципов. При этом объем реальной информации может быть минимально необходимым и определяется экономической эффективностью. Схема метода хорошо алгоритмируется, создавая основу для разработки программ оптимизации систем наблюдения и ввода априорной информации при решении различных задач.

С целью демонстрации возможностей оптимального ввода априорной информации в задаче коррекции формы сейсмического сигнала был подготовлен и

выполнен специальный модельный эксперимент (раздел 4.3). Он подтвердил эффективность предложенного способа, а также продемонстрировал, что декомпозиция формы сигнала с привлечением требуемой априорной информации может быть ключевым моментом при практическом использовании решений обратных динамических задач (Mitrofanov, Priimenko, Misságia, 2011). Отметим, что проведенный эксперимент относится ко всем методам факторной декомпозиции вне зависимости от того, являются ли они процедурами обработки, направленными на устранение вариаций условий возбуждения и приема, или процедурами подготовки данных для решения обратных задач, когда целью служат импульсная характеристика объекта и исходный импульс посылки.

Применяемая при подготовке модели и расчете модельных трасс схема эксперимента, показана на Рисунке 2(а). Здесь представлены: структура модели и положение источников. Модель среды задавала наиболее простой вариант месторождения «Альбокора» (шельф Бразилии) в области выклинивания целевого горизонта, когда покрывающая толща представлялась однородной средой.

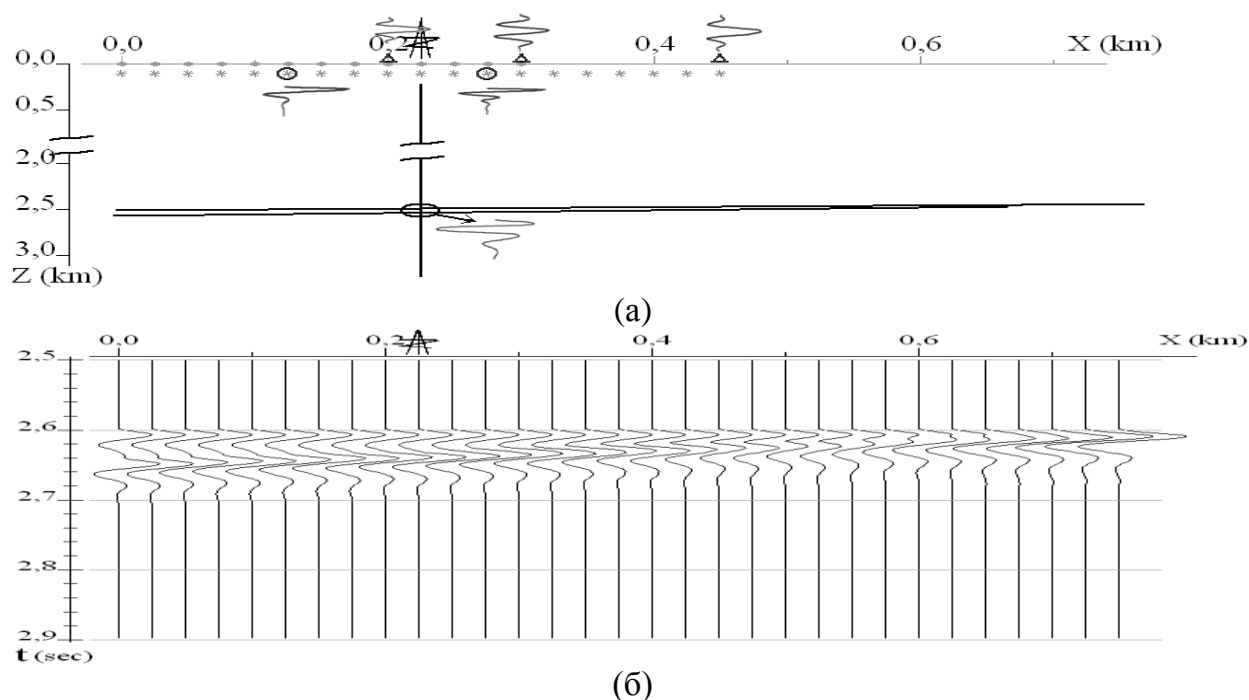


Рисунок 2. Модельный эксперимент по использованию априорной информации в задаче декомпозиции формы сигнала: (а) схема эксперимента, (б) часть временного разреза с отраженным сигналом от целевого горизонта.

В рамках заданной модели на основе метода, рассматриваемого в работах (Mitrofanov, Priimenko, Misságia, Amaral, 2007, 2009), были рассчитаны синтетические сейсмограммы для системы наблюдений, содержащей 19 источников. Каждому источнику отвечала расстановка, содержащая 13 приемников. Показанная на Рисунке 2(а) расстановка приемников соответствовала первому моделируемому источнику. Расстояние между источниками и приемниками составляло 25м.

В простейшем случае, когда условия возбуждения и приема являются идеальными, т.е. все источники имеют одну форму сигнала $s(t)$, а условия приема постоянны, то вариации формы наблюдаемого отраженного сигнала от целевого горизонта связаны только с особенностями его строения. Это хорошо видно на

Рисунке 2(б). При наличии же вариаций в характеристиках источников и приемников изменения формы сигнала могут быть существенными. Для моделирования этой ситуации при расчете сейсмограмм в каждом источнике задавался свой импульс $s_i(t)$. Примеры двух таких импульсов для 6-го и 12-го источника показаны на Рисунке 2(а). Кроме того, в процессе моделирования учитывалось, что для отдельных приемников могут наблюдаться вариации во временных и спектральных характеристиках, что моделировалось изменениями импульсных характеристик $r_j(t)$. На Рисунке 2(а) показаны примеры характеристик приема для трех таких областей: 9, 13 и 19. Получаемые при этом изменения формы отраженного сигнала хорошо видны на Рисунке 3(а). Сопоставление соответствующих трасс Рисунков 2(б) и 3 показывает, насколько такие изменения, могут быть значимыми. Очевидно, что они будут играть существенную роль, как при решении обратных задач, так и при интерпретации результатов обработки.

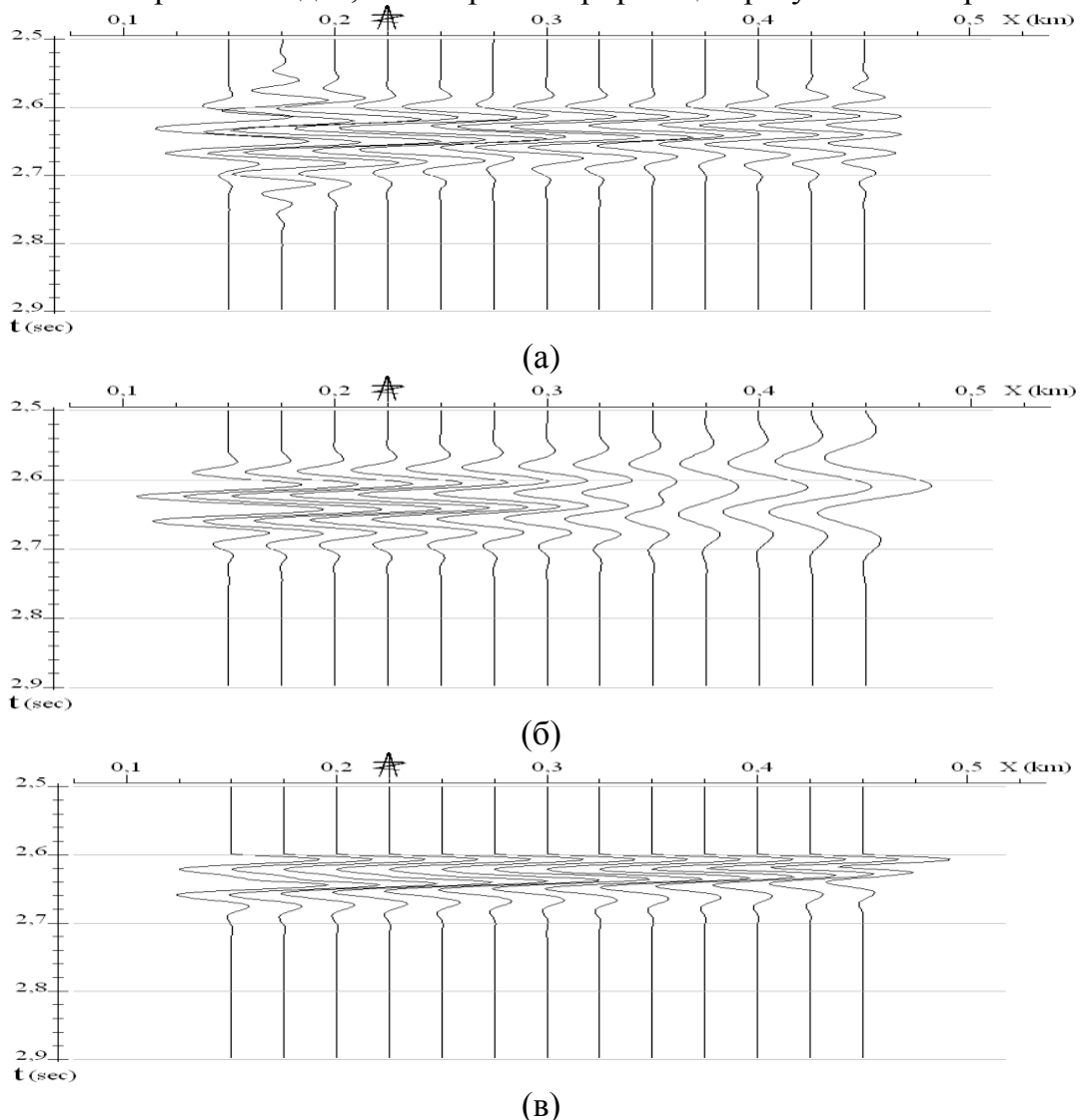


Рисунок 3. Модельные трассы, полученные: (а) до коррекции формы сигнала; (б) после декомпозиции формы сигнала, с использованием только псевдоаприорной информации; (в) с учетом априорной информации.

Модельные данные с изменяющимися характеристиками источников и приемников были подвергнуты мультипликативной факторной декомпозиции (п.4.3.2), выполненной в двух вариантах: с использованием только

псевдоаприорной информации и с ее корректировкой на основе априорной информации. В качестве последней выступали импульсные характеристики источников, приемников и среды, показанные на Рисунке 2(а). По Рисунку 3(б) видно, что в случае применения только псевдоаприорной информации устраняются вариации формы сигнала, связанные с изменениями в условиях возбуждения и приема. Но в форме сигнала имеются значимые отличия от идеального случая. Так, отраженный сигнал обладает более низкой частотой и иной формой, что создает визуальный эффект приближения области выклинивания к точке расположения скважины. При использовании априорной информации (Рисунку 3(в)) позволяет полностью восстановить истинную форму отраженного сигнала.

В разделе 4.4 приведены свойства рассматриваемых многомерных факторных преобразований. Они важны для практического использования методов, построенных на их основе, и концентрируют в себе результаты выполненных теоретических исследований. Свойства, а также их следствия, носят как регулярный, так и статистический характер.

Глава 5. Использование многофакторной декомпозиции при обработке сейсмических сигналов и решении обратных задач

Раздел 5.1 посвящен ранним работам автора по мультипликативной факторной декомпозиции сейсмических сигналов (Митрофанов, 1972; Гольдин, Митрофанов, 1973). Они выполнялись при разработке спектрально-статистического метода и относились к задачам учета вариаций формы сигнала, связанным с неоднородностью условий возбуждения и приема сейсмических колебаний. Важность исследований заключалась в осознании значимости указанных вариаций и их связи с геоморфологическими особенностями местности, где проводятся сейсмические работы (Митрофанов, 1975). Полученные при этом результаты демонстрировали необходимость учета таких изменений формы как для выделения регистрируемого сигнала в наблюдаемом волновом поле, так и для точной оценки импульсной характеристики отражающего горизонта (Гольдин, Митрофанов, 1975). Подобные задачи являются традиционными среди методов обработки. Но первоначально они были направлены на коррекцию времен прихода сигналов. Затем, по мере развития сейсмических методов и построения алгоритмов решения обратных задач, появилась необходимость в коррекции формы сигнала. О важности такой коррекции свидетельствует и то, что она позволяет подтвердить выполнение принципа взаимности (Бабич, 1962) при работе с реальными данными (Гольдин, Оболенцева, Никольский, Окольский, Митрофанов, 1981).

Дальнейшее развитие подхода (раздел 5.2) проводилось совместно с сотрудниками Сибирской геофизической экспедиции МНП СССР и под научным руководством автора (Митрофанов, Сысоев, Яшков, 1982). Оно способствовало появлению эффективной динамической модели (4), которая позволяла точнее представить изменения формы сигнала, связанные с его распространением через промежуточную среду. Также, независимо от поверхностно согласованной деконволюции, была создана G-корректирующая фильтрация (Сысоев, Евдокимов, 1986). Она использовала оценки факторов за источники и приемники, т.е. $s_i(t)$ и $r_j(t)$, построенные при мультипликативной факторной декомпозиции формы одного или нескольких отраженных сигналов для построения корректирующих фильтров: $s_i^{-1}(t)$ и $r_j^{-1}(t)$. Возможности фильтрации были продемонстрированы на

модельных экспериментах и реальных данных. Независимость разработки способствовала ее некоторым преимуществам. Так, корректирующая фильтрация обладала направленностью на определенные волновые объекты, связанные с целевыми объектами среды, а не на всю регистрируемую трассу. Реализация такого направленного воздействия была выполнена существенно позже в варианте поверхностно согласованной деконволюции переменной во времени.

Кроме выше приведенных исследований по анализу влияния поверхностных неоднородностей на форму и спектр сейсмического сигнала, непосредственно автором были продемонстрированы возможности метода при решении задачи выделения сбросов малой амплитуды и определения их параметров (п.5.2.3). Такие нарушения продуктивных горизонтов существенно ухудшают свойства нефтеотдачи пласта и могут приводить к его обводнению, закупорки и пр. Также они осложняют заложение горизонтальных скважин.

Исходные сейсмические данные для исследования получены в процессе опытно-методических работ, выполненных в районе соляного купола «Антипов». Зона разломов простирается почти перпендикулярно линиям профилей. Геолого-сейсмический разрез типичен для межкупольных зон Прикаспийской впадины. В осадочной толще сверху вниз выделены несколько отражающих горизонтов. Для анализа наибольший интерес представляли два первых: горизонт А — контакт терригенных отложений неогена ($V_p \approx 1,7$ км/с) и палеогена ($V_p=2,3$ км/с) и горизонт I — контакт терригенных отложений палеогена с карбонатными сенонтуронскими отложениями ($V_p=3,75$ км/с). Толщина и относительная однородность в сейсмогеологическом отношении залегающих выше слоев позволила применить при обработке материалов четырехфакторную модель (II) главы 4.

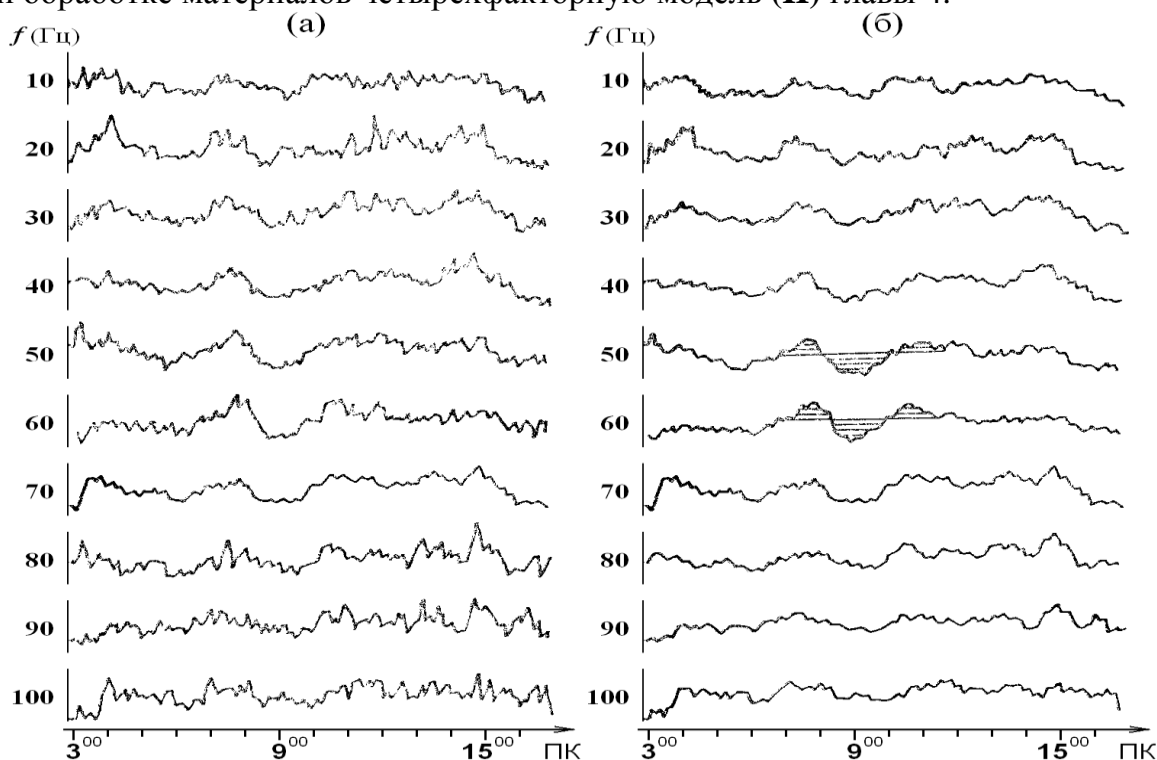


Рисунок 4. Значения фактора ОЦТ, полученные по отраженному сигналу горизонта I: (а) первичные и (б) сглаженные.

Результаты проведенной обработки для одного из профилей представлены на Рисунке 4. Здесь показаны оценки фактора ОЦТ первоначально полученные по

четырем независимым совокупностям наблюдений, а затем сглаженные осреднением. По ним хорошо выделяется аномалия, относящаяся к району ПК ОГТ 9⁰⁰, которая наиболее проявляется на частотах 45—65 Гц. Ее интерпретация однозначно указала на наличие малоамплитудного сброса (Митрофанов, 1984). Полученные результаты также продемонстрировали возможности использования динамического признака для выявления малоамплитудных сбросов, который, в отличие от широко используемого в сейсморазведке кинематического признака смещения осей синфазности отраженных волн, повышал точность определения таких нарушений целевых горизонтов.

В разделе 5.3 излагаются общие принципы структурной декомпозиции волнового поля, среды, сигнала и наблюдений. Такая декомпозиция составляет основу предлагаемого автором подхода к интерпретационной обработке данных. Она возвращает нас к модельным представлениям, рассматриваемым в главе 2, и дает направление возможного развития этих исследований в будущем. Отмеченная во введении сложность реальной среды и наблюдаемых волновых процессов не позволяет до настоящего времени строить решения обратных задач с требуемой точностью для моделей, характеризующих всю исследуемую среду. В то же время большое количество практических задач и не требуют изучения всей среды. Часто эти задачи ориентированы на целевые объекты, которыми могут являться продуктивные горизонты, очаговые зоны и т.п., что существенно упрощает постановку рафинированной математической задачи.

В рамках такого подхода обратная динамическая задача для целевых локальных объектов может быть сведена к следующему многоуровневому процессу по отношению к реальным наблюдениям и моделям реальной среды.

Первый уровень представляет собой декомпозицию наблюденного волнового поля с выделением в нем составляющих, связанных с целевыми объектами. Он содержит построение каркасной макромодели среды, на основе имеющейся априорной геологической и сейсмической информации. Это позволяет использовать лучевой метод для идентификации и выделения требуемых волновых объектов. При этом обеспечивается учет геометрии лучей на участках между изучаемыми объектами, а также учет основных динамических характеристик, связанных с изменением сейсмической энергии в процессе распространения выделяемых волн за счет расхождения фронта, кривизны границ и т.п.

Второй уровень обеспечивает декомпозицию формы сейсмических сигналов на мультипликативные составляющие, отвечающие влиянию поверхностных неоднородностей, а также среде прохождения сигнала и локального отражающего объекта. В результате такой декомпозиции оцениваются: форма падающего сейсмического импульса и спектральная характеристика отражающего целевого объекта. При этом может быть построен и оператор учета влияния верхней части среды, включающий в себя как особенности связанные с неоднородностью условий возбуждения и приема сейсмических колебаний, так и средой прохождения. Он может выступать в роле корректирующего оператора по отношению к форме сигналов для выделяемых волн.

Третий уровень заключается в непосредственном решении объектно-ориентированной обратной динамической задачи для той или иной структуризации отражающего объекта, включая акустические, упругие, вязкоупругие и другие модели. При этом более обосновано может быть использовано квазиодномерное описание для целевого объекта и применено соответствующее решение обратной

задачи в линеаризованной или полной постановке. Получаемые в результате уточнения локальных объектов характеристики могут рассматриваться в качестве последующая итерация в решении глобальной обратной задачи по отношению к макромодели среды.

Развитие этой идеи потребовало разработки современных методов лучевого трассирования в сложно построенных блочных моделях сред (Mitrofanov, Kurdyukova, 1999; Курдюкова, Гольдин, Митрофанов, 2004). Такие методы позволяют идентифицировать и отбирать целевые сигналы. Но более значимым является то, что они обеспечивают возможность формирования «псевдо сейсмограмм». Особенности такого формирования иллюстрируются модельным экспериментом (раздел 5.4).

В разделе 5.5 представлено создание и использование CSD-технологии, которая являлась несколько упрощенной реализацией предлагаемой структурной декомпозиции. Упрощения в основном были связаны с отсутствием эффективных алгоритмов лучевого трассирования и эффективных методов решения обратных задач по отношению к целевым тонкослоистым объектам. Несмотря на упрощения, CSD-технология позволяла определять с более высокой точностью, чем существовавшие методы, форму импульса посылки и импульсные характеристики целевых тонкослоистых зон (Мадатов, Митрофанов, Середя, 1992). При этом применялась модель (5) и не требовалось использования предположений о нуль-фазовости и минимально-фазовости наблюдаемых сигналов, что открывало путь к применению инверсных алгоритмов, которые в настоящее время находят широкое применение в практике сейсморазведки. Технология так же была использована при решении задачи определению зон АВПД (Helle, Inderhaug, Kovaliev, Madatov, Mitrofanov, 1993). Здесь значительную роль сыграли ее возможности по определению параметров затухания. Отметим, что параметр добротности, связанный с параметром затухания, уже длительное время применяется в сейсмологии для характеристики пород, слагающих изучаемую среду. Однако в области практической сейсморазведки вопросам оценивания этого параметра (Q-фактора) по поверхностным сейсмическим наблюдениям стали уделять значительное внимание только последние 10-15 лет. Поэтому наши работы могут считаться одними из первых в этом направлении. Для повышения разрешающей способности при анализе параметра затухания в областях целевых горизонтов применялось разложение Прони. Оно совмещалось с разложением на мультипликативные составляющие, что существенно улучшало локальные оценки параметра затухания (Kovaljev, Madatov, Mitrofanov, 1992). Дальнейший анализ свойств разложения Прони и развитие его прикладных возможностей при обработке сейсмических сигналов способствовало появлению нового метода, названного Прони фильтрацией (Митрофанов, Прийменко, 2011).

Раздел 5.6 и последующие разделы 5.7-5.9 содержит результаты автора по исследованию вопросов, относящихся к общей проблеме вложения теоретических решений в наблюдаемые данные. Исследования были важны для перспективы применения, получаемых в процессе CSD-технологии импульсных характеристик целевых объектов или «псевдосейсмограмм» в качестве исходных данных для решения объектно-ориентированных обратных задач. При изучении этих вопросов возникло понимание того, что перспективы реализации математически эффективных решений задач определяются двумя моментами. Первый – заключается в преобразовании наблюдаемых данных для их лучшего соответствия

модельным предположениям, которые использовались при построении математического решения. Второй – состоит в анализе соответствия математического решения основным характерным реальным данным. Все представленные выше способы декомпозиции волнового поля и формы сейсмических сигналов относились к первому моменту. Второй же момент оставался не изученным. Можно даже утверждать, что его важность не до конца осознается как математиками, так и геофизиками.

Выполняемые исследования проводились в рамках классических обратных динамических задач для тонкослоистых упругих моделей. Такие задачи рассматриваются длительное время, начиная с работы А.С.Алексеева (1967), и могут быть реализованы во временной или частотной области с использованием нелинейных методов и понятий обобщенных производных. Непосредственно автором анализировались особенности решения, получаемого в спектральной области с применением преобразований Лапласа и Фурье-Бесселя, имеющих вид

$$\tilde{U}(v, f) = \int_0^{\infty} x J_m(vx) \int_0^{\infty} U(x, t) \cdot e^{pt} dt dx, \quad (12)$$

где внутренний интеграл представляет собой преобразование Лапласа с параметром $p = -\alpha + i\bar{i}\omega$, а внешний интеграл - преобразование Фурье-Бесселя. При этом $\omega = 2\pi f$ является круговой частотой для временной переменной, а f – обычная частота, измеряемая в герцах, v - пространственная частота, имеющая размерность 1/м, и \bar{i} - комплексная единица. Индекс m указывает на тип функции Бесселя и равен 0, когда в качестве $U(x, t)$ выступает вертикальная компонента наблюдаемого волнового поля, или 1 для горизонтальной компоненты поля.

Переход в спектральную область с использованием преобразований (12) позволяет привести систему дифференциальных уравнений теории упругости к матричному дифференциальному уравнению Рикатти, которое имеет аналитическое решение в каждом слое, что обеспечивает высокое быстродействие и отсутствие накопления ошибок в решении соответствующей прямой задачи. Указанные математические особенности решения задачи были использованы А.Карчевским (2005) в его докторской диссертации при построении эффективного решения обратной задачи. Несмотря на приведенные им положительные модельные примеры, предлагаемый подход вызывал сомнение в возможности его применения на практике. В первую очередь это определялось наличием бесконечных пределов у преобразований (12). Также существенное влияние могли оказать свойства дискретных преобразований Лапласа и Фурье-Бесселя. Все вместе может приводить к несовпадению элементов множества теоретических решений с элементами множества сейсмических наблюдений, которые представляются спектрами, рассчитываемыми по сейсмограммам.

Начальное исследование соответствия теоретических спектров $\tilde{U}(v, f)$ рассчитываемым спектрам проводилось с использованием аналитически заданной функции, представляющей собой экспоненциально затухающий косинус с изменяющимся временем прихода $t_0(x)$ (п.5.6.2). Для функции были получены аналитические выражения $\tilde{U}(v, f)$, что позволило проанализировать некоторые свойства дискретных преобразований Лапласа и Фурье-Бесселя (Mitrofanov, Priimenko, 2009). На рисунке 5 показаны результаты одного из проведенных экспериментов (п.5.6.3). Здесь представлено сопоставление спектров $\tilde{U}(v, f)$,

полученных с использованием аналитических выражений и численных процедур. При этом времена прихода моделируемого аналитической функцией $U(x,t)$ сигнала имеют небольшие изменения, задаваемые в виде $t_0(x) = t_1 x$. При численной реализации дискретных преобразований Лапласа и Фурье-Бесселя функция $U(x,t)$ задавалась как некоторый аналог сейсмограммы, содержащей 24 трассы длительностью 3 секунды с шагом дискретизации 2 миллисекунды и с расстоянием между приемниками 50 метров при выносе первого приемника на 100 метров. Такое задание функции соответствовало дискретности и апертуре реальных сейсмических наблюдений. По рисунку видно, что в этом случае даже небольшие изменения значения параметра t_1 у функции $t_0(x)$ приводят к значительным различиям между двумя типами спектров. Причина получаемых различий кроется в ограниченной апертуре применяемых дискретных преобразований.

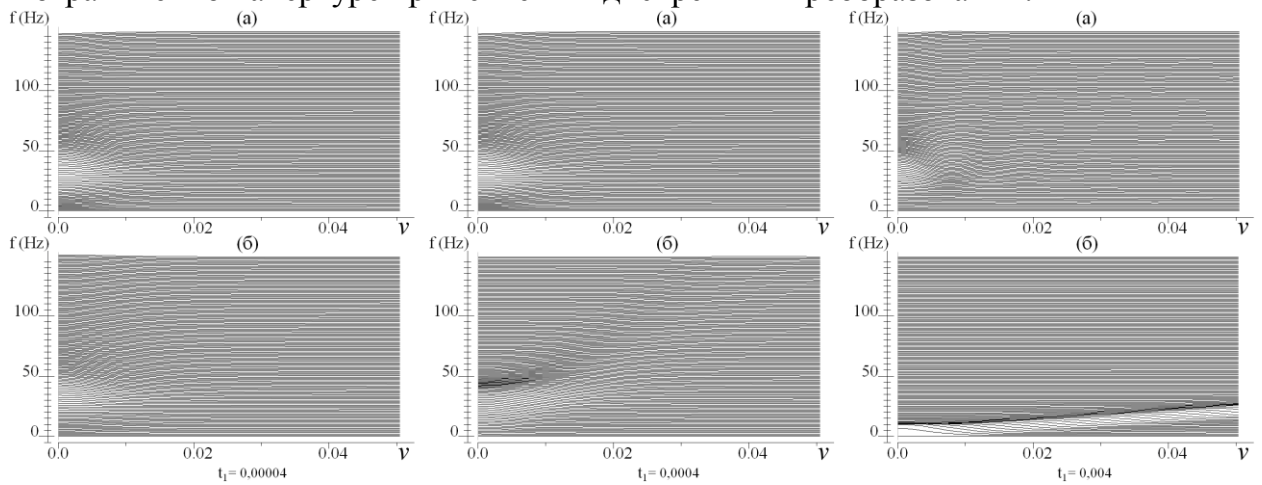


Рисунок 5. Различие в значениях $\text{Re}\{\tilde{U}(\nu, f)\}$, рассчитываемых с использованием дискретных аналогов преобразований Лапласа и Фурье-Бесселя (рисунки (а)) и по аналитическим выражениям (рисунки (б)).

Дальнейшее исследование возможных различий между теоретическими и рассчитываемыми спектрами выполнялось на основе моделей реальных тонкослоистых объектов (Mitrofanov, Priimenko, Misságia, Amaral, 2007, 2009). Эти результаты представлены в разделе 5.7. Они свидетельствуют о значительном различии указанных типов спектров. Возможной причиной такого различия является то, что в теоретических спектрах представлены особенности, отвечающие всем решениям прямой задачи, которые проявляются в силу неограниченности значений пространственных и временных координатах. Очевидно, что ограниченность апертуры для дискретных преобразований Лапласа и Фурье-Бесселя приводит к потере или искажению части решений, что определяет другой тип спектра. Указанные отличия являются фундаментальным свойством элементов рассматриваемых множеств. Поэтому полное совмещение теоретических и рассчитываемых по наблюдаемым сейсмограммам спектров даже в случае отсутствия помех и идеальной модели среды может быть достигнуто только при использовании преобразований (12) с ограниченными пределами интегрирования.

Отсутствие теоретических решений, удовлетворяющих условиям ограниченности апертуры сейсмических наблюдений, потребовало разработки способов их корректировки. В качестве возможного способа такой корректировки автором предложено использовать специальные окна (раздел 5.8), улучшающие

совмещение двух типов спектров. Предлагаемые окна не дают математически строгого решения задачи о совпадении теоретических и рассчитываемых спектров. Но они существенно уменьшают различия между этими спектрами для определенных областей частот, что подтверждает рисунок 6. Следует отметить, что применение предлагаемых окон не только существенно повысило качество совмещения теоретических и рассчитываемых спектров, но и улучшило свойство целевого функционала, используемого при построении решения обратной задачи (п.5.9.1). В частности, появилась возможность для расширения областей пространственных и временных частот, используемых при расчете значений функционала, что может существенно повлиять на устойчивость получаемого решения обратной задачи.

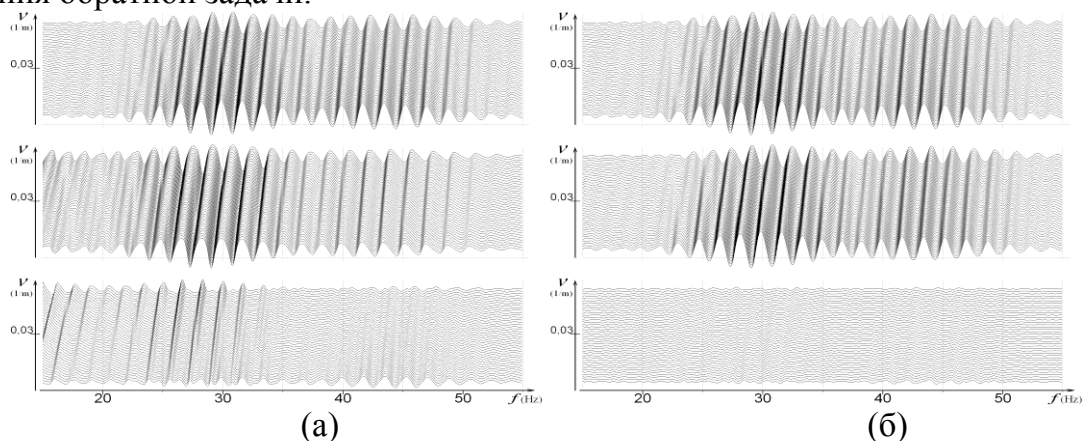


Рисунок 6. Разности (нижняя часть) между теоретическими (верхняя часть) и рассчитываемыми спектрами: (а) без применения и (б) с применением специальных окон.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в процессе работы над решением задач, поставленных в диссертации. Несмотря на значительный объем выполненных теоретических исследований и понимание их важности для развития многомерной гомоморфной фильтрации, результаты формулируются, исходя из их прикладных возможностей.

1. Предложена и разработана технология углубленной многоуровневой, декомпозиции волнового поля и формы сейсмического сигнала. В ее основе лежит описание элементов волнового поля с учетом особенностей реального сейсмического эксперимента и использование априорных данных о строении среды. Априорная модель среды позволяет идентифицировать в наблюдаемом волновом поле сигналы, относящиеся к заданным типам волн и связанные с определенными локальными объектами среды. Также она позволяет произвести трансформацию имеющихся данных, что дает возможность перехода от сложно построенной трехмерной модели среды к квази-одномерной модели по отношению к исследуемому объекту. Особенности реального эксперимента учитываются путем описания условий возбуждения и приема импульсными характеристиками соответствующих зон, а изменение формы сигнала, связанное с прохождением через среду, представляется на основе лучевого метода и разложения формы сигнала по g -эффективным фильтрам. В результате приходим к мультипликативной факторной модели, структура которой зависит от вводимых аппроксимирующих функций и имеющейся системы наблюдений. Такая технология позволяет свести глобальную обратную задачу к ряду локальных обратных задач и использовать общий аппарат факторных моделей для выделения

целевых мультипликативных составляющих, которые могут выступать в роли корректирующих фильтров или являться входными данными для решения объектно-ориентированных обратных задач. При этом технология позволяет конструктивно учитывать информацию о среде, полученную на предшествующих этапах обработки и интерпретации сейсмических материалов современными программными комплексами. Тогда решения обратных задач, получаемые при ее применении и относящиеся к локальным объектам среды, являются уточнением исходной глобальной модели и могут рассматриваться как последующая итерация в общей схеме решения обратной задачи для трехмерной модели среды. Разные уровни технологии применимы, как на этапах предварительной обработки данных с целью корректировки формы сейсмических сигналов, чтобы устранить ее вариации, связанные с неоднородностью условий возбуждения и приема, так и на этапах решения обратных задач. Ее использование демонстрировалось на модельных и реальных данных в различных случаях, в частности, совместно с разложением Прони, для определения зон аномальных пластовых давлений на шельфе Северного моря.

2. Представлен и исследован класс линейных и мультипликативных факторных моделей, возникающих при решении различных задач обработки сейсмических данных, что позволило построить общие схемы решения задач и проанализировать их с единых позиций. К таким задачам относятся: коррекция временных статических поправок и частотно-зависимой статики, вычитание волн, мультипликативная декомпозиция формы сигнала и процедуры пересчета полей головных волн. Как результат предложены и развиты методы многомерной гомоморфной деконволюции и фильтрации сигналов. Одновременно разработаны общие принципы получения оценок для неединственно определяемых составляющих рассматриваемых моделей, что оптимизирует структуру и ввод требуемой априорной информации, обеспечивающей единственность решения. Также предложен способ частичной линеаризации мультипликативных факторных моделей, позволяющий существенно понизить сложность решения локальных обратных задач для реальных наблюдений. Реализованными примерами мультипликативной декомпозиции формы сигнала являются: спектрально-статистический метод (ССМ), предшествовавший в обработке сейсмических данных поперечно-согласованной и блайнд деконволюции; методы деконволюции комплексных спектров (ДеКС и ССД) и сложной сейсмической деконволюции (ССД). Требуемые программные разработки были выполнены непосредственно автором в ИГГ СО АН СССР, а также при его участии и научном руководстве в СибГЭ МНП СССР и НИИморгеофизика МГ СССР.

3. Рассмотрены особенности спектрального анализа участков трасс, содержащих смешанные сигналы в виде регулярной и случайной компоненты. Короткие сигналы являются целевыми и относятся к анализируемым типам волн. В результате предложены простые способы, позволяющие обеспечить однозначное определение и устойчивую обработку логарифмов спектров целевых сигналов по большим совокупностям наблюдений. При этом получают устойчивые оценки фазовой составляющей спектра, которые могут иметь существенное значение при реализации инверсных алгоритмов. Также по результатам обработки удается охарактеризовать отношение сигнал/помеха для исходных участков трасс при изменяющейся форме целевого сигнала. Оба момента носят принципиальный характер и без предложенных решений соответствующих задач не могут быть

получены достоверные результаты при реализации многомерной гомоморфной фильтрации на практике.

4. Исследованы вопросы соответствия теоретического решения прямой задачи экспериментальным данным при построении решения обратной динамической задачи для тонкослоистых объектов среды в спектральной области. Задача служила тестовой для большого числа объектно-ориентированных обратных задач. Одна из существенных трудностей, возникающих при реализации этого подхода на практике, связана с большим различием теоретически рассчитываемых спектров со спектрами реально наблюдаемых сейсмограмм. Причин для этого много. Такими причинами, в частности, являются ограниченность апертуры и дискретность реальных наблюдений. При исследовании этих вопросов удалось разработать способы, обеспечивающие хорошее совмещение (вложение) построенного решения прямой задачи со спектрами, рассчитываемыми по наблюдаемым сейсмограммам. Способы основаны на совместном использовании параметра преобразования Лапласа и оптимальных сглаживающих «окон».

5. Разработаны алгоритмы трассировки лучей в сложно-построенных блочных моделях сред. Они учитывают такие важные особенности, как петли, разрывы годографа волны, каустики, зоны фокусировок, которые тесно связаны со структурой модели среды. Еще одним важным аспектом является построение эффективного решения двухточечной задачи трассирования сейсмических лучей, что предполагает определение траекторий лучей, времён пробега и амплитуд для различных типов сейсмических волн при заданных положениях источника и приёмника. Полученные алгоритмы позволяют анализировать волновое поле, идентифицировать различные типы волн, моделировать синтетические сейсмограммы, производить трансформацию наблюдений необходимую для решения локальных обратных задач. Реализация алгоритмов в виде программ была осуществлена в ИГГ СО АН СССР при участии автора.

В качестве заключения по результатам выполненных исследований могут быть сделаны следующие общие рекомендации:

- С целью повышения эффективности сейсмического метода разведки и увеличения точности прогноза, определяемых на его основе характеристик целевых объектов, необходимо использовать более сложные методы обработки получаемых сейсмических материалов. Методы должны наиболее полно учитывать особенности реального сейсмического эксперимента и априорные данные о строении среды.
- Для эффективного применения теоретических решений, способных повысить точность определения характеристик целевых объектов, необходимо проводить согласование построенных решений с особенностями реального сейсмического эксперимента и используемыми модельными предположениями. При их несоответствии требуется выполнить исследования по возможной корректировке, как теоретических решений, так и исходных данных. Основной целью такой корректировки должно являться эффективное решение поставленной реальной задачи.
- Для повышения точности и детальности решения обратных задач сейморазведки на практике требуется уделить большее внимание использованию фазовых составляющих спектров наблюдаемых сигналов. Поэтому применение предположений о нуль-фазовости и минимально-фазовости

исходных сигналов можно считать правомерным только на этапах предварительной обработки, когда выполняется построение априорной модели среды и выделение основных волн.

- Учитывая ключевую роль априорной информации в решении обратных геофизических задач и высокую стоимость ее получения, требуется разработка специальных методов и алгоритмов, обеспечивающих эффективное получение и использование такой информации.

Приведенные рекомендации и личный опыт, накопленный при разработке проблемы и в процессе использования полученных решений при обработке реальных данных, указывают на такие перспективные направления исследований.

I. Изучение теоретических вопросов факторного и мультипликативно-факторного разложения сейсмических наблюдений. К ним относятся:

- Выбор наилучших классов функций, по которым осуществляется разложение наблюдений и факторов.
- Сопоставление двух типов линеаризации задачи разделения мультипликативных факторов: с использованием разложений Тейлора и путем логарифмирования спектров.
- Использование методов максимума правдоподобия при разделении и оценивании факторов.
- Связь мультипликативной факторной декомпозиции формы сигналов с миграционными преобразованиями, в частности, с фокусирующей миграцией.

В этом направлении могут быть найдены новые представления для сейсмических наблюдений, расширяющие класс факторных моделей.

II. Применение декомпозиции волнового поля и формы сейсмического сигнала непосредственно в процессе решения обратных динамических задач. Оно может быть выполнено различным образом. Укажем два альтернативных варианта, выбор которых определяется постановкой практической задачи.

- Первый вариант состоит в использовании частично линейных моделей, включающих в себя мультипликативные факторы и описание целевого объекта с его параметрами.
- Второй вариант предполагает использование результатов декомпозиции для формирования модифицированных данных, в частности, «псевдосейсмограмм», которые содержат выделенную информацию о целевом объекте и используются в дальнейшем как входные данные при решении рафинированной обратной задачи.

Здесь же интересным представляется исследование влияния процедур декомпозиции на структуру целевого функционала, формируемого при решении рафинированной обратной задачи.

III. Широкая практическая реализация предложенной схемы декомпозиции волнового поля и формы сигналов с анализом возможностей ее использования при решении различных задач. В этом направлении можно ожидать необходимости решения дополнительных задач, таких как:

- Эффективность реализации построенных алгоритмов на современных компьютерах, обладающих возможностями распараллеливания вычислительных процессов.
- Совместное использование нескольких типов волн при исследовании целевого объекта, что требует согласования факторных моделей по

характеристикам возбуждения, приема сейсмических колебаний и среде прохождения.

- Выбор эффективной факторной аппроксимационной модели, учитывающей увеличение базы наблюдений и сложность реальной среды.
- Оценка важности использования фазовой составляющей спектра как при обработке реальных сейсмических данных, в частности, при выделении целевых сигналов, так и при решении обратных задач.
- Построение эффективных схем получения и использования априорной информации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гольдин С.В., **Митрофанов Г.М.** Восстановление формы сигнала при наличии поверхностных неоднородностей. // Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых. - Киев: Знание, 1973. - С. 6-8.
2. **Митрофанов Г.М.** Анализ влияния поверхностных неоднородностей на спектр сейсмического сигнала. // Геология и геофизика. - 1975. - № 5. - С. 133-137.
3. Гольдин С.В., **Митрофанов Г.М.** Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн. // Геология и геофизика. - 1975. - № 6. - С. 102-112.
4. **Митрофанов Г.М.** Совместная оценка линейных факторов в системах наблюдений метода ОГТ. // Применение методов вычислительной математики и математической статистики при цифровой обработке данных сейсморазведки. - Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1975. - С. 166-186.
5. **Митрофанов Г.М.** Последовательное уточнение оценок линейных факторов при интерпретации данных сейсморазведки. // Геология и геофизика. - 1978. - № 2. - С. 109-122.
6. **Митрофанов Г.М.** Использование сглаживающих окон при спектральном анализе сейсмических трасс. // Геология и геофизика. - 1979. - № 1. - С. 110-123.
7. Ланда Е.И., **Митрофанов Г.М.** Оценка параметров малоамплитудного сброса по сейсмограммам ОГТ. // Изв. АН СССР, Сер. Физика Земли. - 1979. - № 7. - С. 34-41.
8. **Митрофанов Г.М.** Эффективное представление волнового поля в сейсморазведке. // Геология и геофизика. - 1980. - № 4. - С. 135-145.
9. Гольдин С.В., Оболенцева И.Р., Никольский Э.В., Окольский А.В., **Митрофанов Г.М.** Развитие методов интерпретации данных сейсморазведки. // Развитие сейсмических методов исследований земной коры и верхней мантии в Сибири. - Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1981. - С. 136-153.
10. **Митрофанов Г.М.**, Сысоев А.П., Яшков Г.Н. Исследование возможностей спектрально-статистического метода (ССМ) при обработке и интерпретации сейсмических данных // Сборник докладов Второго научного семинара стран - членов СЭВ по нефтяной геофизике. - М., 1982. - Сейсморазведка, Т. 1. - С. 183-187.
11. **Митрофанов Г.М.** Использование спектрально-статистического метода при интерпретации динамических аномалий от сбросов // Геология и геофизика. - 1984. - № 3. - С. 90-99.
12. Тяпкин Ю.К., Бельфер И.К., Погожев В.М., Мушин И.А., **Митрофанов Г.М.** Оценка возможностей использования мгновенных динамических характеристик

- сейсмических записей при поисках нефти и газа. М., Разведочная геофизика. Обзор ВИЭМС, 1986, 76 с.
13. **Митрофанов Г.М.**, Сергеев В.Н. Исследование линеаризованной модели для головной волны в связи с задачей обработки данных КМПВ // Геология и геофизика. - 1986. - № 8. - С. 98-108.
 14. **Митрофанов Г.М.** Обработка фазовых спектров многоканальных сейсмограмм. // Геология и геофизика. - 1986. - № 10. - С. 99-109.
 15. **Митрофанов Г.М.** Обработка логарифмов амплитудных спектров многоканальных сейсмограмм. // Алгоритмические проблемы обработки данных сейсморазведки. - Новосибирск: Наука, 1987. - С. 53-65.
 16. **Митрофанов Г.М.** Псевдоаприорная информация в задаче коррекции частотно-зависимой статики. // Математические проблемы интерпретации данных сейсморазведки. - Новосибирск: Наука, 1988. - С. 149-168.
 17. Сысоев А.П., **Митрофанов Г.М.** Коррекция статистических поправок при обработке площадных систем наблюдения МОГТ // Геология и геофизика. - 1989. - № 12. - С. 114-122.
 18. Мадатов А.Г., **Митрофанов Г.М.**, Серeda В.-А.И. Аппроксимационный подход при динамическом анализе многоканальных сейсмограмм. 1. Модельные представления // Геология и геофизика. - 1991. - № 10. - С. 97-106.
 19. Мадатов А.Г., **Митрофанов Г.М.**, Серeda В.-А.И. Аппроксимационный подход при динамическом анализе многоканальных сейсмограмм. 2. Оценивание параметров // Геология и геофизика. - 1991. - № 11. - С. 117-127.
 20. Мадатов А.Г., **Митрофанов Г.М.**, Серeda В.-А.И. Аппроксимационный подход при динамическом анализе многоканальных сейсмограмм. 3. Прикладные аспекты // Геология и геофизика. - 1992. - № 3. - С. 112-122.
 21. Крылов С.В., **Митрофанов Г.М.**, Сергеев В.Н. Селекция и интерпретация головных волн при многократных системах наблюдения. // Сборник рефератов Международной геофизической конференции SEG/Москва'92. – Москва, 1992. - С. 516-517.
 22. **Митрофанов Г.М.**, Рачковская Н.А. Формирование априорной информации при анализе и коррекции данных сейсмического метода отраженных волн. // Геология и геофизика. - 1996. - № 3. - С. 74-84.
 23. Курдюкова Т.В., Гольдин С.В., **Митрофанов Г.М.** Лучевое трассирование в блоковых средах: проблемы и их решение. // Сб. науч. докл. Международной научной конференции “Сейсмические исследования земной коры”. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. - С. 142-148.
 24. **Митрофанов Г.М.**, Прийменко В.И. Основы и приложения метода Прони-филтрации. // Технологии сейсморазведки. - 2011. - № 3. - С. 93-108.
 25. **Митрофанов Г.М.**, Прийменко В.И. Проблема вложения теоретического решения в сейсмические наблюдения. // Технологии сейсморазведки. - 2012. - № 3. - С. 5-26.
 26. Goldin S.V., **Mitrofanov G.M.** Spectro-statistical method of analysis and processing of wave fields in seismic exploration // Expanded abstracts, 60-th Annual SEG meeting, Tulsa. - 1990. - pp. 253-257.
 27. **Mitrofanov G.M.**, Madatov A.G. Complex Convolution Decomposition (CCD) the new approach to seismic dynamic analysis // Extended abstracts of papers, EAEG 54th meeting. – Paris: EAEG, 1992. – pp. 744-745.

28. Kovaljev V.P., Madatov A.G., **Mitrofanov G.M.** Complex Convolution Decomposition (CCD) and new possibilities at detail investigation of attenuation // Extended abstracts of papers, EAEG 54th meeting. – Paris: EAEG, 1992. – pp. 746-747.
29. **Mitrofanov G.M.**, Helle H.B., Kovaliev V.P., Madatov, A.G. Complex seismic decomposition - theoretical aspects // Extended abstracts of papers, EAEG 55th meeting. – Stavanger: EAEG, 1993. - pp. 253-256.
30. Helle H.B., Inderhaug O.H., Kovaliev V.P., Madatov A.G., **Mitrofanov G.M.** Complex seismic decomposition - application to pore pressure prediction // Extended abstracts of papers, EAEG 55th meeting. – Stavanger: EAEG, 1993. - pp. 132-139.
31. Rachkovskaia N.A., **Mitrofanov G.M.** Studying of 'null space' structure in problems of seismic decomposition // Extended abstracts of papers, EAEG 55th meeting. – Stavanger: EAEG, 1993. - pp. 362-363.
32. **Mitrofanov G.**, Kurdyukova T. Algorithms of ray tracing for block media // Expanded Abstracts, SEG 69th Annual Meeting. – Houston: SEG, 1999. – 4 p.
33. **Mitrofanov G.**, Priimenko V., Misságia R., Amaral L. Utilização das transformadas de Laplace e Fourier-Bessel na modelagem de meios elásticos delgados. // Revista Brasileira de Geofísica. - 2009. – vol. 27 (2). - pp. 205-224.
34. **Mitrofanov G.**, Priimenko V., Misságia R., Amaral L. Transformada de Laplace na solução de problemas inversos dinâmicos da sísmica. // Revista Brasileira de Geofísica. - 2009. – vol. 27 (4). - pp. 527-544.
35. **Mitrofanov G.**, Priimenko V., Bueno A. Comparação da solução completa do sistema de Lamé com espectro de sismogramas. // Revista Brasileira de Geofísica. – 2009. - vol. 27 (4). - pp. 545-563.
36. **Mitrofanov G.**, Priimenko V. Structural decomposition of the wave field in the solution of inverse seismic problems. // Revista Brasileira de Geofísica. - 2010. – vol. 28 (4). - pp. 657-671.
37. **Mitrofanov G.**, Priimenko V., Misságia R. Utilização efetiva da informação a priori na inversão da forma de sinal sísmico. // Revista Brasileira de Geofísica. – 2011. - vol. 29 (2). - pp. 247-263.
38. **Mitrofanov G.**, Priimenko V. Features of phase spectrum and its calculation in seismic data processing. // Revista Brasileira de Geofísica. – 2012. - vol. 30 (1). - pp. 15-29.