

На правах рукописи



УДК 550.83:550.8.05

ПЛЕШКЕВИЧ Александр Леонардович

**МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ
ГЛУБИННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЗЕМНОЙ СРЕДЫ
ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ
(«СЕЙСМИЧЕСКАЯ МИГРАЦИЯ»)**

25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в акционерном обществе «Центральная геофизическая экспедиция» Российского геологического холдинга «Росгеология» в отделе разработки технологий обработки сейсмических данных.

**Официальные
оппоненты:**

Владов Михаил Львович,
доктор физико-математических наук, профессор.
Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова, Геологический факультет, заведующий
кафедрой сейсмометрии и геоакустики;

Митрофанов Георгий Михайлович,
доктор физико-математических наук. Институт
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
СО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории
динамических проблем сейсмики;

Максимов Герман Адольфович,
доктор физико-математических наук. Акционерное
общество Акустический институт им. Н.Н. Андреева
(АКИН), начальник Отделения и отдела геоакустики.

**Ведущая
организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский
геологический нефтяной институт «ВНИГНИ».**

Защита диссертации состоится **29 октября 2020 г. в 14:00 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.001.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Сейсморазведка является одной из важнейших составляющих комплекса геологоразведочных работ на нефть и газ. Ключевая задача сейсморазведки, традиционно называемая сейсмической миграцией, состоит в реконструкции 3-мерного сейсмического изображения глубинных неоднородностей изучаемой земной среды. Получаемое с помощью миграции 3-мерное сейсмическое изображение используют совместно со скважинными данными в процессе их комплексной геологической интерпретации, результатом которой является цифровая геологическая модель месторождения с рекомендациями мест бурения скважин. В настоящее время наиболее востребованной является 3-мерная глубинная миграция до суммирования, учитывающая преломление сейсмических волн в фоновой модели неоднородной земной среды. Объем исходных сейсмических данных, используемых для построения 3-мерного сейсмического изображения, может достигать порядка 10 ТБ цифровой информации, а наиболее экономичное приближенное решение задачи методом Кирхгофа требует порядка 10^{17} арифметических операций. Это ставит сейсмическую миграцию в ряд наиболее сложных и актуальных научно-технических задач, для решения которой требуется использование суперкомпьютерных вычислений. Вплоть до начала 2000-х годов необходимыми методами и технологиями миграции обладало ограниченное число крупных зарубежных компаний. Подобная монополия в стратегически важной сфере разведки нефти и газа создавала значительные риски, связанные с зависимостью от дорогостоящего импортного программного обеспечения и технологий.

Степень разработанности темы исследований

Теме сейсмической миграции посвящено большое число научных публикаций и докладов на ежегодно проходящих научно-технических международных и отечественных конференциях со специально посвященными теме сейсмической миграции секциями. Первые эвристические алгоритмы миграции, основанные на кинематических представлениях, были разработаны геофизиками еще в начале 60-х годов прошлого века, одной из первых была разработка Ю.В. Тимошина. В настоящее время известны два основных подхода к решению задачи сейсмической миграции. Первый основан на постановке и решении линеаризованной обратной задачи рассеяния волн, а второй – на обращенном волновом продолжении. Основное практическое значение продолжает иметь второй подход. Важный вклад в разработку метода обращенного волнового продолжения в начале 70-х годов прошедшего

века внесли американские исследователи Дж. Клаербоут и Дж. Газдаг, и отечественные ученые Г.И. Петрашень и С.А. Нахамкин. Основанные на обращенном волновом продолжении методы и алгоритмы сейсмической миграции связаны с решением множества прямых 3-мерных задач на распространения волн от точечных источников, число которых может достигать порядка 10^5 . Наиболее экономичным является асимптотический метод решения в предположении однолучевого распространения. Последнее означает, что из источника в произвольную глубинную точку среды приходит единственный луч по траектории, соответствующей кратчайшему времени пробега. Основанные на этом приближении методы сейсмической миграции сводятся к явным интегральным формулам и называются миграцией методом Кирхгофа. В неоднородных сложно-построенных средах предположение об однолучевом распространении часто нарушается. Присутствие складок фронтов волн и областей их фокусировки, называемых каустиками, требует корректного учета, который недостижим в рамках однолучевой модели. Классическим методом решения подобной задачи является метод канонического оператора, разработанный известным отечественным ученым, академиком РАН В.П. Масловым. Применение этого метода к сейсмической миграции сдерживается отсутствием для него схем сквозного счета. Иной асимптотический метод, известный под названием суммирования гауссовых пучков, разработанный отечественным ученым М.М. Поповым, до сих пор не вошел в число общеупотребительных средств сейсмической миграции. Альтернативой асимптотическим методам является сеточное решение волновых уравнений. Наряду со скалярным волновым уравнением широкое распространение получили т.н. односторонние волновые уравнения, введенные в практику сейсмической миграции Дж. Клаербоутом и Дж. Газдагом. Сеточное решение волновых уравнений на порядки увеличивает объемы арифметических операций и требуемых вычислительных ресурсов. Помимо куба сейсмического изображения среды важное прикладное значение имеют результаты миграции, представленные сейсмограммами общей точки изображения. Анализ этих сейсмограмм позволяет оценить зависимость локальных коэффициентов отражения сейсмических волн от величины угла падения и от азимута падения зондирующих волн на глубинные границы раздела. Изучение этих зависимостей позволяет прогнозировать газонасыщенность горных пород, их микротрещиноватость и связанные с ней скопления углеводородов.

Цели и задачи исследований

Основной целью проведенных автором исследований была разработка более совершенных математических моделей, методов и алгоритмов сейсмической миграции с сохранением амплитуд; разработка

на их основе прикладного программного обеспечения, не уступающего мировому уровню, и его широкое внедрение в практику обработки сейсмических данных. В числе основных задач была разработка теории асимптотической многолучевой, а также псевдоспектральной волновой (не асимптотической) 3-мерных глубинных миграций с сохранением амплитуд и экономичных численных методов расчета решения. Наряду с сейсмической миграцией важной задачей была также разработка методики и технологии азимутального анализа результатов миграции для оценки азимутальной анизотропии амплитуд и прогноза микротрещиноватости.

Научная новизна выполненных исследований

1. Автором впервые предложено в качестве самостоятельного объекта для 3-мерной сейсмической миграции до суммирования использовать регулярные и плотно дискретизированные крестовые выборки сейсмических данных [29]. Впервые выполнена математическая постановка и получены практические результаты 3-мерной сейсмической миграции крестовых выборок данных [12, 22].

2. Для скалярного волнового уравнения дивергентного вида получены оценки величины энергии точечного источника фиксированной силы типа центра расширения, описываемого правой частью волнового уравнения. Установлена зависимость величины энергии от локальных свойств среды, окружающей источник. В силу этого точечные источники с одинаковой энергией могут обладать различной силой [8]. Отсюда сделан важный практический вывод о том, что соотношение взаимности, справедливое для точечных источников равной силы, требует иной формулировки для реальных источников колебаний равной энергии.

3. На основе использования соотношения взаимности, интегральной формулы волнового продолжения и математической модели сейсмических данных многократных перекрытий в виде поля волн в 5-мерном пространстве координат источников, приемников и времени регистрации, получена интегральная формула обращенного волнового продолжения сейсмических данных. На ее основе получен общий вид решения задачи сейсмической миграции данных многократных перекрытий [10]. Установлена связь полученного решения с псевдодифференциальным уравнением DSR с двумя операторными корнями.

4. Разработаны новые квадратурные схемы с осреднением во временном окне для интегрирования волновых полей в ходе асимптотической миграции и волнового продолжения, препятствующие появлению помех типа аляйсинга пространственных частот [9].

5. Разработан новый асимптотический метод волнового продолжения заданного граничного условия Дирихле в лучевой параметрической системе координат, позволяющий корректно учесть

многолучевое распространение и каустики волн [16]. На его основе получены интегральные формулы многолучевой 3-мерной сейсмической миграции до суммирования в лучевой параметрической, а также декартовой системах координат [10].

6. Разработана новая экономичная псевдоспектральная схема повышенного порядка аппроксимации для решения одностороннего волнового уравнения, учитывающая неоднородные волн [17]. Показана важность учета неоднородных волн для моделей контрастных сред.

7. Разработан гибридный алгоритм псевдоспектральной 3-мерной сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд по выборкам квази-равных векторов удаления, сочетающий гибкость миграции Кирхгофа с использованием волновых функций Грина [11].

8. Разработаны и внедрены в практику обработки сейсмических данных крестовых наблюдений новая технология азимутально-сохраняющей 3-мерной сейсмической миграции до суммирования и устойчивый метод азимутального анализа сейсмических амплитуд [3, 4].

Теоретическая и практическая значимость работы

Известные реализации асимптотической миграции методом Кирхгофа используют однолучевое приближение. Однолучевое приближение не способно правильно учесть фокусировку волн и связанных с ней амплитудных особенностей решения, что приводит к амплитудным искажениям и к возможным потерям значительной части энергии рассеянных волн, находящихся за первыми вступлениями, что отрицательно сказывается на качестве сейсмического изображения. Разработан новый асимптотический метод волнового продолжения в лучевой параметрической системе координат. На его основе разработана многолучевая 3-мерная глубинная миграция до суммирования. Новый асимптотический метод пригоден для решения классической задачи рассеяния волн и может найти свое применение в ряде областей, включая акустику, оптику и иные разделы физики волн.

В качестве альтернативы асимптотическим методам миграции с присущими им ограничениями и недостатками, разработана волновая миграция с сохранением амплитуд на основе решения одностороннего псевдодифференциального волнового уравнения. Для этого уравнения построены новые экономичные псевдоспектральные схемы повышенного порядка аппроксимации. Разработаны гибридный алгоритм и программа волновой сейсмической миграции до суммирования по выборкам трасс квази-равных векторов удаления.

Разработана технология азимутальной сейсмической миграции, обеспечивающая сохранение зависимостей сейсмических амплитуд как от величины угла падения, так и от азимута падения. Разработаны методика и

технология азимутального анализа результатов миграции на основе модели Рюгера с помощью метода наименьших квадратов с регуляризацией решения, предназначенные для поиска зон азимутальной анизотропии коэффициентов отражения, прогноза микротрещиноватости и потенциально связанных с ней скоплений углеводородов.

На основе разработанных методов и технологий выполнен ряд программно-алгоритмических разработок, играющих важную роль в импортозамещении и широко используемых для обработки сейсмических данных по заказам нефтяных и газовых компаний.

Методология и методы исследования

Проведенные исследования основаны на использовании элементов теории уравнений математической физики в приложении к 3-мерным задачам на распространение волн; линеаризованной обратной задачи рассеяния волн; методе обращенного волнового продолжения; теории асимптотического приближения; методе Гамильтона для расчета бихарактеристик и лучей в неоднородных изотропных и анизотропных средах; приложений интегрального преобразования Фурье; интерполяции / аппроксимации сеточных функций тригонометрическими полиномами; элементов теории аппроксимации и устойчивости разностных схем, а также их дисперсионном анализе.

Положения, выносимые на защиту

1. Для точечных источников фиксированной силы, представленных правой частью скалярного волнового уравнения дивергентного вида, доказана теорема взаимности, включая случай неоднородного полупространства с однородными условиями Дирихле или Неймана на внешней границе неоднородного полупространства. Для точечных источников фиксированной силы получена оценка величины их энергии, которая зависит от локальных свойств среды, окружающей точечный источник. Поскольку реальные источники типа заряда тротила фиксированной массы являются источниками именно фиксированной энергии, а не фиксированной силы, формулировка соотношения взаимности для источников фиксированной энергии требует известного видоизменения. В свою очередь, указанное обстоятельство требует учета при обработке реальных сейсмических данных, в ходе которой широко используется соотношение взаимности.

2. Сейсмическое изображение глубинных неоднородностей земной среды по результатам регистрации на дневной поверхности однократно отраженных и рассеянных сейсмических волн от этих глубинных неоднородностей можно получить на основе постановки и решения двух альтернативных математических задач: линеаризованной

обратной задачи рассеяния волн и обращенного волнового продолжения. Выполнена математическая постановка обеих задач. В рамках постановки линеаризованной обратной задачи рассеяния волн представлено интегральное уравнение типа Липмана-Швингера относительно неизвестной функции потенциала рассеяния волн, описывающей малые отклонения неоднородной земной среды от ее сглаженной опорной модели, и получено его асимптотическое решение. На основе полученного асимптотического решения реализована компьютерная программа 3-мерной глубинной сейсмической миграции до суммирования и выполнено ее успешное тестирование на комплектах синтетических и реальных сейсмических данных многократных перекрытий.

3. Использование математической модели сейсмических данных многократных перекрытий в виде непрерывного поля отраженных и рассеянных сейсмических волн в 5-мерном пространстве координат точечных источников и приемников на поверхности наблюдений, и времени наблюдения, отсчитываемого от момента срабатывания каждого отдельного точечного источника, позволяет описать полную совокупность реальных сейсмических данных многократных перекрытий как дискретную выборку амплитуд непрерывного волнового поля в указанном 5-мерном пространстве. Использование сейсмических данных многократных перекрытий в качестве обобщенного граничного условия Дирихле на поверхности наблюдений и соотношения взаимности позволяет получить обобщенную интегральную формулу типа Кирхгофа для обращенного волнового продолжения данных многократных перекрытий вглубь неоднородной земной среды.

4. Использование обобщенной интегральной формулы типа Кирхгофа для обращенного волнового продолжения сейсмических данных многократных перекрытий и условия формирования сейсмического изображения позволяет получить в общем виде решение задачи 3-мерной глубинной сейсмической миграции до суммирования. Это решение представлено 5-кратным интегралом по координатам источников, приемников и временной частоте для подынтегральной функции, представленной произведением наблюдаемых сейсмических данных многократных перекрытий и нормальных производных функций Грина для точечных источников и приемников. Использование различных аппроксимаций функций Грина, входящих в указанную интегральную формулу сейсмической миграции, позволяет на единой основе строить разнообразные алгоритмы сейсмической миграции, включая асимптотическую однолучевую миграцию Кирхгофа, асимптотическую многолучевую миграцию, псевдоспектральную миграцию, а также иные виды сейсмической миграции, включая миграцию по сейсмограммам фиксированных источников в обращенном времени. На основе

использования однолучевого асимптотического приближения разработана производственная программа 3-мерной глубинной сейсмической миграции методом Кирхгофа, использующая параллельные расчеты на вычислительных кластерах традиционной архитектуры. Программа внедрена в практику обработки и имеет многолетний успешный опыт ее широкого производственного использования.

5. При выполнении сейсмической миграции Кирхгофа использование традиционных квадратурных формул прямоугольников, трапеций или иных формул более высокого порядка аппроксимации приводит к появлению на результатах миграции значительных по величине помех, связанных с аляйсингом пространственных частот в ходе численного интегрирования волновых полей. Построены квадратурные формулы с осреднением во временном окне заданной переменной ширины, зависящей от величины градиента поля времен (эйконала) в 4-мерном пространстве координат источников и приемников, препятствующие возникновению шумов аляйсинга. Применение указанных квадратурных формул позволяет значимо улучшить результаты асимптотической однолучевой и многолучевой миграций и не приводит к потере разрешенности сейсмического изображения или к амплитудным искажениям. Указанные формулы успешно внедрены в производственную программу сейсмической миграции Кирхгофа.

6. Разработан новый асимптотический метод волнового продолжения граничного условия Дирихле в лучевой параметрической системе координат, обеспечивающий корректный учет многолучевого распространения и каустик волн для моделей сложно-построенных неоднородных сред. С помощью этого метода и на основе использования общего вида решения задачи 3-мерной сейсмической миграции до суммирования получена интегральная формула асимптотической многолучевой миграции в лучевой параметрической системе координат, не содержащая сингулярностей подынтегральной функции. На основе этой формулы получена также интегральная формула многолучевой миграции в декартовой системе координат, содержащая интегрируемые особенности. Разработан прототип производственной версии компьютерной программы 3-мерной многолучевой сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд, ориентированной на использование вычислительных кластеров традиционной архитектуры. Выполнено успешное тестирование программы на комплектах синтетических и реальных сейсмических данных многократных перекрытий.

7. Разработаны новые экономичные псевдоспектральные явные схемы повышенного порядка аппроксимации для сеточного решения псевдодифференциального монохроматического 3-мерного волнового уравнения, допускающего распространение энергии волн исключительно

вглубь среды и представляющего собой одностороннюю аппроксимацию уравнения Гельмгольца. Использование указанных схем позволяет выполнить волновое продолжение заданного граничного условия Дирихле в неоднородное полупространство, а также выполнить псевдоспектральный сеточный расчет нормальных производных функций Грина. Расчет нормальных производных функций Грина для всех расположенных на поверхности наблюдений точечных источников и приемников и подстановка его результатов в интегральную формулу решения 3-мерной сейсмической миграции данных многократных перекрытий позволяет реализовать волновую миграцию вне рамок асимптотического приближения. На этой основе реализованы алгоритм и программа псевдоспектральной сейсмической миграции до суммирования по выборкам сейсмических трасс постоянного вектора удалений. Указанный гибридный алгоритм сочетает гибкость миграции Кирхгофа с преимуществами волновой не асимптотической миграции. Разработан прототип производственной версии компьютерной программы 3-мерной псевдоспектральной миграции с сохранением амплитуд, ориентированной на использование вычислительных кластеров гибридной архитектуры с широким применением графических сопроцессоров для ускорения трудоемких суперкомпьютерных расчетов (использование GPU по технологии CUDA). Программа прошла успешное тестирование на комплексах синтетических и реальных сейсмических данных многократных перекрытий.

8. Разработана технология сборки совокупностей сейсмических трасс крестовых сейсмических наблюдений по критерию постоянного вектора удалений источники-приемники (COV- или OVT-выборки сейсмических трасс в англоязычной терминологии), позволяющая отказаться от традиционного и более грубого разбиения полного диапазона азимутов на ограниченное число азимутальных секторов. Основанная на использовании подборок трасс общего вектора удалений 3-мерная сейсмическая миграция до суммирования позволяет сохранить зависимости сейсмических амплитуд от азимутов и удалений источники-приемники для умеренно-сложных моделей сред. Результаты подобной азимутально-сохраняющей сейсмической миграции могут использоваться для решения обратной задачи азимутального анализа сейсмических амплитуд с целью прогноза трещиноватости. Выполнено решение указанной обратной задачи с целью расчета параметров азимутальной анизотропии, основанное на использовании 4-параметровой модели Рюгера с помощью метода наименьших квадратов. Результаты решения обратной задачи, представленные совокупностью кубов азимутальных атрибутов, используются для поиска и прогноза зон направленной микротрещиноватости пластов горных пород, с которыми могут быть

связаны скопления углеводородов. Технология успешно внедрена в практику обработки 3-мерных данных широко-азимутальных крестовых сейсмических наблюдений.

Степень достоверности и апробация результатов

Математические постановки задач, методы их решения, выполненные программно-алгоритмические разработки и полученные с их помощью результаты были опубликованы в ряде научных статей в журналах, сборниках и в виде расширенных тезисов докладов на 14 международных и отечественных научно-практических конференциях, а также в форме докладов на общемосковском семинаре НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова «Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности». По теме диссертации в общей сложности опубликовано 33 печатные работы, из которых в список ВАК входит 21 печатная работа, включая три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Научный доклад, выполненный на проходившей в 2018 г. международной конференции Суперкомпьютерные дни в России 2018 // Russian Supercomputing Days 2018, отмечен дипломом и свидетельством о 2-м месте в числе лучших научных докладов.

За время производственной эксплуатации созданных программ сейсмической миграции и азимутального анализа амплитуд успешно завершено свыше 80-и крупных производственных проектов по заказам отечественных и зарубежных нефтяных и газовых компаний. Научные отчеты о результатах работ успешно защищены перед заказчиками.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа представлена на 217 стр., состоит из Введения, 4 глав, Заключение и Списка литературы, содержащего 198 наименований, и снабжена 73 иллюстрациями.

Благодарности

Автор выражает искренню благодарность всем сотрудникам и коллегам, принимавшим активное участие в совместной работе по теме сейсмической миграции и внесшим большой вклад в программную реализацию представленных методов и алгоритмов, и выполнивших большой объем суперкомпьютерных расчетов. В числе сотрудников в разные годы участвовали В.И. Турчанинов (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), Б.П. Мороз (ЦГЭ), В.Д. Левченко и А.В. Иванов (оба ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), В.В. Лисица и Д.М. Вишневский (оба ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН), С.А. Хилков (выпускник МФТИ), С.М. Глубоковских (ВНИИГеосистем). На начальном этапе большую помощь в организации суперкомпьютерных расчетов оказал академик РАН В.П.

Мясников (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), ныне покойный. Большую помощь в предоставлении суперкомпьютерных ресурсов для разработки и тестирования программ оказали руководители НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова профессор А.В. Тихонравов и член-корр. РАН В.В. Воеводин. Важнейшую роль в обеспечении условий для начала работ по теме и постоянную поддержку оказывало прежнее руководство ЦГЭ в лице д.т.н. Г.Н. Гогоненкова и А.С. Кашика. Автор хотел бы также выразить искреннюю благодарность сотруднику ЦГЭ д.ф.-м.н. Л.А. Книжнерману за ряд важных замечаний, высказанных по содержанию работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности задачи сейсмической миграции, формулировку целей и задач исследований, описание научной новизны выполненных автором исследований и защищаемые положения.

Глава 1 содержит необходимые для разработки методов и алгоритмов сейсмической миграции соотношения и результаты, касающиеся теории распространения сейсмических волн в акустическом приближении. Особое внимание уделено формулировке и доказательству теоремы взаимности, а также оценкам амплитуд и энергии волн от точечных источников. В **Разделе 1.1** представлен дивергентный вид скалярного волнового уравнения, отвечающий физике распространения волн в неоднородной изотропной среде, с правой частью, описывающей источник колебаний с заданной плотностью массовых сил: $\operatorname{div}(k \operatorname{grad} u) = \rho u_{tt} - F(\mathbf{r}, t)$. Рассмотрены коэффициенты отражения, преломления и амплитуды волн, описываемых волновым уравнением в плоско-волновом приближении. Показано, что для фиксированной скоростной модели среды изменение ее упруго-плотностных характеристик может привести к перемене знаков коэффициентов отражения и амплитуд отраженных волн на противоположные и значимо повлиять на амплитуды проходящих вглубь среды волн. Представлено волновое уравнение для модели неоднородной среды с постоянной акустической жесткостью: $\operatorname{div}(v \operatorname{grad} u) = \frac{1}{v} u_{tt}$, использование которого целесообразно в сейсмической миграции. **Раздел 1.2** содержит формулировку и доказательство теоремы взаимности $G(\mathbf{r}_1, t_1 | \mathbf{r}_0, t_0) = G(\mathbf{r}_0, -t_0 | \mathbf{r}_1, -t_1)$ для волнового уравнения дивергентного вида с точечными источниками равной силы типа центров расширения, описываемых правой частью волнового уравнения. В **разделе 1.3**

рассмотрено нулевое асимптотическое приближение $\tilde{u}(\mathbf{r}; \omega) \approx A(\mathbf{r})e^{i\omega\tau(\mathbf{r})}$ решения неоднородного уравнения Гельмгольца дивергентного вида $\text{div}(k\text{grad}\tilde{u}) + \rho\omega^2\tilde{u} = -4\pi\delta(\mathbf{r})$ с точечным источником в правой части. Приведен вывод уравнения эйконала $\rho - k(\nabla\tau, \nabla\tau) = 0$ и уравнения переноса дивергентного вида $\nabla(kA^2\nabla\tau) = \frac{4\pi}{v(\mathbf{r})k(\mathbf{r})}\delta(\mathbf{r})$ относительно квадрата

лучевых амплитуд с правой частью, описывающей точечный источник. В нулевом асимптотическом приближении получена оценка величины энергии волн $E = \frac{1}{kv} = \frac{1}{v^3\rho}$ для точечного источника фиксированной силы,

которая зависит от локальных свойств среды, окружающей точечный источник. Сделан вывод о том, что реальные источники равной энергии типа заряда тротила фиксированной массы будут иметь в неоднородной среде разную силу, величина которой существенно зависит от локальных свойств среды, окружающей источник. По этой причине формулировка соотношения взаимности в случае использования реальных источников с равной энергией требует модификации. В **Разделе 1.4** получена оценка полной энергии волн вне рамок асимптотического приближения для точечного источника в правой части волнового уравнения дивергентного вида. Зависимость величины полной энергии $E = \frac{8\pi}{kv} \int_0^{\Delta T} d\xi (F'(\xi))^2$ от

локальных свойств среды, окружающей точечный источник типа центра расширения $4\pi F(t)\delta(\mathbf{r})$ с заданной на интервале $[0, \Delta T]$ финитной функцией $F(t)$, имеет сходный вид с асимптотической оценкой. Установлено, что полная энергия мгновенного точечного источника $4\pi\delta(t)\delta(\mathbf{r})$ и соответствующая энергия волн функции Грина оказывается неограниченно большой. **Раздел 1.5** посвящен методам решения уравнения эйконала. В **подразделе 1.5.1** для уравнения эйконала записанного в виде $p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \frac{1}{v(\mathbf{r})^2} = 0$ рассмотрен метод

характеристик и связанная с ним система обыкновенных дифференциальных уравнений Гамильтона для бихарактеристик $\mathbf{r} = \mathbf{r}(s, \xi, \eta)$, $\mathbf{p} = \mathbf{p}(s, \xi, \eta)$, где s, ξ, η - глобальные лучевые координаты. Представлена модифицированная система уравнений Гамильтона с параметризацией бихарактеристик и лучей относительно величины времени τ пробега волны вдоль лучей: $\frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \mathbf{p}v(\mathbf{r})^2$, $\frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = \frac{v(\mathbf{r})^2}{2} \nabla_{\mathbf{r}} \left(\frac{1}{v(\mathbf{r})^2} \right)$,

приспособленная для расчета фронтов волн. **Подраздел 1.5.2** содержит

обзор сеточных методов решения уравнения эйконала. Первый из них основан на конечно-разностном решении дифференциального уравнения движения фронта волны. Примером служит уравнение движения фронта волны: $\frac{1}{v^2} \left(\frac{\partial z}{\partial \tau} \right)^2 = 1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2$, полученное из уравнения эйконала с

помощью замены неизвестной функции и независимых переменных, при которой в качестве неизвестной функции выбрана координата глубины $z = z(\tau, x, y)$, а в качестве независимой переменной использовано время пробега волны τ (эйконал). Вторым сеточным методом расчета фронтов волн является метод марша, использующий непосредственную разностную аппроксимацию уравнения эйконала по схеме, удовлетворяющей принципу причинности. В **подразделе 1.5.3** анализируются сравнительные достоинства и недостатки альтернативных методов расчета фронтов волн. К числу важных достоинств метода характеристик относится возможность расчета складок фронтов волн в областях каустик. К числу недостатков относится трудность его использования для скоростных моделей сред с разрывами. К числу важных достоинств сеточных методов решения уравнения эйконала относится возможность их использования в случае скоростных моделей сред с разрывами и с автоматическим расчетом фронтов дифрагированных и головных волн в областях сильных разрывов фронта волны. К числу существенных ограничений сеточных методов относится возможность расчета фронтов волн лишь первых вступлений без возможности учета складок. В **разделе 1.6** рассмотрено анизотропное уравнение эйконала:

$$v_x^2 \left(\left(\frac{\partial \tau}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial y} \right)^2 \right) + v_z^2 \left(\frac{\partial \tau}{\partial z} \right)^2 + v_z^2 (v_n^2 - v_x^2) \left(\left(\frac{\partial \tau}{\partial x} \right)^2 \left(\frac{\partial \tau}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial y} \right)^2 \left(\frac{\partial \tau}{\partial z} \right)^2 \right) - 1 = 0,$$

соответствующее псевдоакустическому волновому уравнению 4-го порядка, служащему для учета ВТИ-анизотропии скоростей волн в среде с вертикальной осью симметрии, описываемой параметрами Томсена δ и ε либо $v_n = v_z \sqrt{1 + 2\delta}$, $v_x = v_z \sqrt{1 + 2\varepsilon}$. Приведена система уравнений Гамильтона для расчета бихарактеристик, лучей и фронтов волн.

Глава 2 содержит две альтернативные математические постановки задачи сейсмической миграции: на основе линейаризованной обратной задачи рассеяния волн и на основе обращенного волнового продолжения поля отраженных и рассеянных сейсмических волн. В **Разделе 2.1** представлена математическая модель сейсмических данных многократных перекрытий $u_0 = u_0(\mathbf{s}, \mathbf{g}, t)$ в 5-мерном пространстве координат источников, приемников и времени регистрации, отсчитываемого от момента срабатывания каждого импульсного источника. Волновое поле

сейсмических данных многократных перекрытий трактуется как заданное граничное условие Дирихле для поля волн $u = u(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_g, t)$ в 7-мерном пространстве независимых координат источников и приемников, произвольно расположенных в неоднородном полупространстве, и времени регистрации. Комплект зарегистрированных сейсмических данных многократных перекрытий соответствует дискретизации поля сейсмических волн $u_0 = u_0(\mathbf{s}, \mathbf{g}, t)$. **Раздел 2.2** посвящен постановке задачи миграции как линейаризованной обратной задачи рассеяния волн и ее решению. В **подразделе 2.2.1** представлено интегральное уравнение типа Липмана-Швингера:

$$u_{sc}(\mathbf{g}, \mathbf{s}; \omega) = \omega^2 \iiint G_0(\mathbf{r}, \mathbf{g}; \omega) G_0(\mathbf{r}, \mathbf{s}; \omega) f(\mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

относительно неизвестной функции потенциала рассеяния $f(\mathbf{r}) = c^{-2}(\mathbf{r}) - c_0^{-2}(\mathbf{r})$, описывающего малые отклонения скоростей неоднородной земной среды $c(\mathbf{r})$ от ее сглаженной опорной модели $c_0(\mathbf{r})$.

Особенности функции потенциала рассеяния служат для передачи сейсмического изображения глубинных неоднородностей земной среды. В **подразделе 2.2.2** представлен приближенный метод решения интегрального уравнения Липмана-Швингера с помощью метода наименьших квадратов на основе использования совокупности сейсмических данных многократных перекрытий. Рассмотрены присущие этому методу потенциальные достоинства и недостатки. В **подразделе 2.2.3** получено асимптотическое решение интегрального уравнения Липмана-Швингера для подмножества сейсмических данных $u_{sc}(x, y, t)$ многократных перекрытий, имеющего невырожденный спектр рассеяния:

$$f(\mathbf{r}_0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_s \frac{1}{A_z(x, y, \mathbf{r}_0)} \left(\frac{\partial}{\partial x} \nabla_{\mathbf{r}} \tilde{\tau}_z, \frac{\partial}{\partial y} \nabla_{\mathbf{r}} \tilde{\tau}_z, \nabla_{\mathbf{r}} \tilde{\tau}_z \right) \Big| u_{sc}(x, y, \tilde{\tau}_z(x, y, \mathbf{r}_0)) dx dy.$$

Полученное решение типа интеграла Кирхгофа используется в качестве оператора для преобразования подмножества исходных сейсмических данных в куб сейсмического изображения глубинных неоднородностей. В **подразделе 2.2.4** рассмотрен важный для практических приложений пример подмножества исходных сейсмических данных с невырожденным спектром рассеяния – однократная крестовая выборка $u_{sc}(\mathbf{g}, \mathbf{s}, t)$ в параметризации $\mathbf{g} = x\mathbf{i}$, $\mathbf{s} = y\mathbf{j}$, впервые предложенная автором [29] и называемая «cross-spread» в зарубежной литературе. Подробно рассмотрены технология разбиения комплекта сейсмических данных крестовых наблюдений на однократные крестовые выборки и результаты их объединения, названные покрытиями. Рассмотрены свойства покрытий с точки зрения возможностей восстановления неискаженного сейсмического изображения глубинных неоднородностей. В **подразделе**

2.2.5 рассмотрены результаты тестирования 3-мерной сейсмической миграции на основе решения линеаризованной обратной задачи рассеяния по комплексу синтетических данных многократных перекрытий для модели среды с плоскими разномасштабными отражателями. Проанализированы искажения и помехи промежуточных результатов и рассмотрен завершающий суммарный результат сейсмического изображения, лишенный искажений и помех. **Раздел 2.3** посвящен методам 3-мерной глубинной миграции до суммирования, основанным на обращенном волновом продолжении. Получен общий вид решения задачи 3-мерной миграции сейсмических данных многократных перекрытий в виде 5-кратного интеграла с подынтегральной функцией, представленной произведением наблюдаемого поля сейсмических волн с нормальными производными функций Грина, относящихся к источникам и приемникам. Проанализированы с единых позиций различные методы и способы миграции, основные отличия которых обусловлены различиями в аппроксимации входящих в указанную интегральную формулу функций Грина, а также отличиями в методах и алгоритмах численной реализации. В **подразделе 2.3.1** представлен вывод интегральной формулы волнового продолжения заданного граничного условия Дирихле $u|_S = u_0$ для уравнения Гельмгольца дивергентного вида $\text{div}(k \text{grad} u) + \omega^2 \rho u = 0$, описывающего распространение монохроматических колебаний в неоднородной среде с параметрами $k = k(\mathbf{r})$ и $\rho = \rho(\mathbf{r})$:

$$u(\mathbf{r}; \omega) = -\frac{1}{4\pi} \iint_S u_0(\mathbf{r}_0; \omega) k(\mathbf{r}_0) \frac{\partial G(\mathbf{r}_0 | \mathbf{r}; \omega)}{\partial \mathbf{n}} d\mathbf{r}_0, \text{ где } \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} - \text{производная по}$$

внешней нормали к поверхности наблюдений S функции Грина $G(\mathbf{r}_0 | \mathbf{r}; \omega)$, удовлетворяющей условию $G|_S = 0$. В **подразделе 2.3.2** на основе использования интегральной формулы волнового продолжения граничного условия Дирихле, соотношения взаимности и 5-мерной модели сейсмических данных многократных перекрытий получена интегральная формула обращенного продолжения поля отраженных и рассеянных сейсмических волн вглубь неоднородной среды:

$$\tilde{u}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_g; \omega) = \frac{1}{(4\pi)^2} \iint_{S_s} \iint_{S_g} \tilde{u}_0(\mathbf{s}, \mathbf{g}; \omega) k(\mathbf{g}) k(\mathbf{s}) \frac{\partial G(\mathbf{s} | \mathbf{r}_s; \omega)}{\partial \mathbf{n}_s} \frac{\partial G(\mathbf{g} | \mathbf{r}_g; \omega)}{\partial \mathbf{n}_g} d\mathbf{g} d\mathbf{s},$$

где под $\tilde{u}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_g; \omega)$ обозначен результат преобразования Фурье волнового поля по обращенному времени $\tilde{t} = T - t$. На основе этой интегральной формулы и формулировки условия визуализации неоднородностей земной среды, состоящего в наблюдении поля волн с помощью пар совмещенных

источников с приемниками $\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_g = \mathbf{r}$ в нулевой момент времени $t = 0$, получен общий вид решения задачи миграции:

$$f(\mathbf{r}) = \frac{1}{(4\pi)^2} \int d\omega \iint_{S_s} \iint_{S_g} u_0^*(\mathbf{s}, \mathbf{g}; \omega) k(\mathbf{g}) k(\mathbf{s}) \frac{\partial G(\mathbf{s} | \mathbf{r}; \omega)}{\partial \mathbf{n}_s} \frac{\partial G(\mathbf{g} | \mathbf{r}; \omega)}{\partial \mathbf{n}_g} d\mathbf{g} d\mathbf{s},$$

где $u_0^*(\mathbf{s}, \mathbf{g}; \omega)$ - комплексное сопряжение преобразования Фурье наблюдаемого поля волн $u_0(\mathbf{s}, \mathbf{g}, t)$ по времени. В подразделе 2.3.3 рассмотрен новый асимптотический метод волнового продолжения граничного условия Дирихле в лучевой параметрической системе координат. Получена интегральная формула волнового продолжения граничного условия Дирихле u_0 с поверхности наблюдений вглубь среды, которая не содержит сингулярных подынтегральных функций:

$$u(\mathbf{r}_*, t) \approx -\frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega(\varphi, \theta)} \frac{1}{v_0} \left(\frac{k_0}{v_* k_*} \right)^{1/2} |\sin \theta|^{1/2} |J_0|^{1/2} H^{Ind(\varphi, \theta)} (u_0)_t(\mathbf{r}_0, t + \tau_0) d\varphi d\theta,$$

где φ, θ - азимутальный и полярный углы на единичной сфере, окружающей глубинную точку $\mathbf{r}_*$, $\mathbf{r}_0$ и τ_0 - координаты и время выхода луча $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\tau, \varphi, \theta)$ на поверхность наблюдения S , H - знак преобразования Гильберта, $Ind(\varphi, \theta)$ - индекс лучевой трубки, величина которого соответствует полному числу обращений в ноль якобиана $J(\mathbf{r}(\tau, \varphi, \theta) | \mathbf{r}_*) = \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \tau}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} \right)$, $|J_0(\varphi, \theta)| = v \left\| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} \right\|_S$ - модуль якобиана в

точке выхода лучевой трубки на поверхность наблюдений. На основе представленного асимптотического решения и общей интегральной формулы сейсмической миграции получена интегральная формула асимптотической 3-мерной многолучевой миграции. В подразделе 2.3.4 рассмотрены интегральные формулы волнового продолжения и многолучевой 3-мерной сейсмической миграции в декартовой системе координат. Из эквивалентности формул волнового продолжения в лучевой параметрической и декартовой системах координат следует интегрируемость подынтегральных сингулярных функций в декартовой системе координат, представленных лучевыми амплитудами. Проанализирован характер возникающих особенностей, требующих выделения каустик и использования специальных квадратур. Выполнено моделирование волн от расположенного на дневной поверхности точечного источника для модели среды с низкоскоростным включением, играющим роль фокусирующей линзы, приводящим к образованию складок фронтов волн. На рис. 1 представлено сравнение асимптотического решения с эталоном, в качестве которого использованы

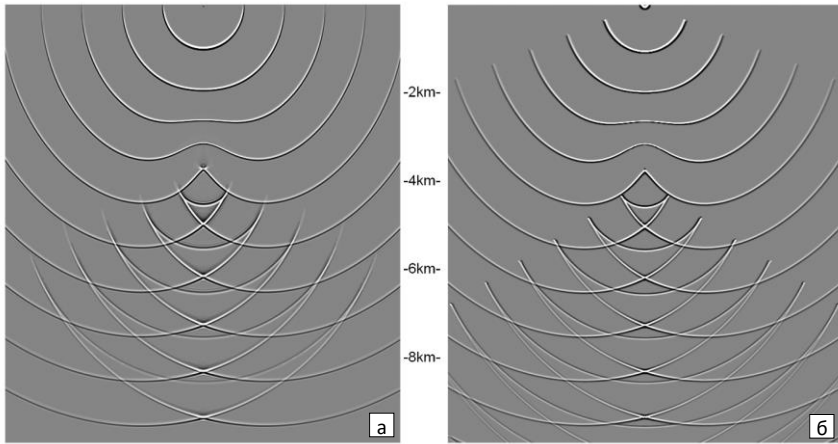


Рисунок 1. Сравнение результатов расчета волн от точечного источника для 3-D модели среды с низкоскоростным включением: а) конечно-разностное решение волнового уравнения; б) асимптотическое решение.

результаты конечно-разностного моделирования волн, демонстрирующее близкое совпадение обоих результатов. В подразделе 2.3.5 рассмотрены свойства преобразования Гильберта, действующего по правилу: $He^{i\omega t} = i \operatorname{sgn} \omega e^{i\omega t} = e^{i(\omega t + \pi/2 \operatorname{sgn} \omega)}$, с помощью которого реализован каустический сдвиг фаз волн. На основе теории рядов Фурье и методов построения цифровых фильтров построен экономичный и высокоточный оператор дискретного преобразования Гильберта, который был использован в компьютерной программе многолучевой миграции. В подразделе 2.3.6 рассмотрен специальный случай сведения общей формулы сейсмической миграции данных многократных перекрытий к миграции отдельной 3-мерной сейсмограммы фиксированного источника. Рассмотрены интегральная формула и особенности реализации указанного способа миграции в системе координат с обращенным временем, известного за рубежом под названием RTM (reverse-time migration). Рассмотрены потенциальные достоинства и недостатки этого способа миграции. В подразделе 2.3.7 рассмотрено волновое продолжение граничного условия Дирихле методами глубинной волновой экстраполяции, введенными в практику сейсмической миграции американскими исследователями Дж. Клаербоутом и Дж. Газдагом. Основой методов является поиск решения в виде суперпозиции плоских нисходящих вглубь среды волн и удовлетворяющего псевдодифференциальному одностороннему волновому уравнению, содержащему нелокальные операторы в виде квадратных корней из линейных комбинаций операторов, представленных

частными производными. В отличие от обычного волнового односторонние уравнения допускают распространение энергии волн от поверхности наблюдений исключительно вглубь среды. Отсюда следует возможность расчета сеточного решения с помощью послойного пересчета волнового поля с предыдущего глубинного слоя на последующий, не нарушая принципа причинности. В подразделе 2.3.8 рассмотрены одностороннее волновое уравнение во временной области:

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \sqrt{\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}} u = 0, \quad \text{аппроксимирующее скалярное волновое}$$

уравнение, и одностороннее уравнение в области временных частот,

$$\text{аппроксимирующее уравнение Гельмгольца: } \frac{\partial u}{\partial z} + \sqrt{-\frac{\omega^2}{v^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}} u = 0.$$

Для одностороннего волнового уравнения в области временных частот Дж. Газдагом была построена псевдоспектральная явная сеточная схема вида:

$$u(x, y, z + \Delta z, \omega) = F_{k_x, k_y}^{-1} e^{ik_z \Delta z} F_{x, y} u(x, y, z, \omega), \quad \text{где } k_z = \text{sgn } \omega \sqrt{(\omega/v)^2 - k_x^2 - k_y^2},$$

аппроксимирующая решение монохроматической задачи волнового продолжения. Поскольку в случае произвольной скоростной модели неоднородной среды отсутствует экономичная численная реализация этой схемы, Дж. Газдагом была предложена эвристическая технология расчета решения, названная PSPI («phase shift plus interpolation»), допускающая экономичную численную реализацию и основанная на интерполяции решений, найденных для набора фиксированных скоростей. Подобная технология рассматривалась различными авторами как чисто эвристическая и обладающая низкой точностью результатов решения. Разработанные годы спустя неявные псевдоспектральные схемы не приспособлены к параллельным расчетам на множестве процессорных либо графических ядер. Автором разработаны экономичные явные псевдоспектральные схемы 6-го и 4-го порядков аппроксимации для решения одностороннего волнового уравнения в области временных частот, допускающие широкое использование параллельных расчетов. Для этих схем проанализированы и сформулированы требования к их априорной точности и определены связанные с этим основные параметры расчетов. Разработана явная псевдоспектральная схема аппроксимации 6-го порядка:

$$e^{i\omega \Delta z \sqrt{\frac{1}{v^2} - n_r^2}} = \alpha_0 + \alpha_1 e^{i\omega \Delta z \sqrt{\frac{1}{v_1^2} - n_r^2}} + \alpha_2 e^{i\omega \Delta z \sqrt{\frac{1}{v_2^2} - n_r^2}} + O(n_r^6),$$

где $v_1 \leq v \leq v_2$, а коэффициенты $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ найдены из условия наилучшей аппроксимации. По числу требуемых арифметических операций эта схема не отличается от схемы более низкого 4-го порядка. Важной особенностью псевдоспектральных схем является их численная вязкость, которая при множестве шагов пересчета по глубине может

привести к потере точности результатов. Для решения этой проблемы найдена оптимизированная сетка узловых значений скоростей, обеспечивающих заданную малую величину отклонения модуля оператора перехода со слоя на слой от единицы. Для повышения экономичности расчетов разработан алгоритм интерполяции решения с редкой 50-метровой глубиной сетки на требуемую частую 5-метровую. В подразделе 2.3.9 приведены оценки относительных фазовых погрешностей явных псевдоспектральных схем 6-го и 4-го порядков аппроксимации, которые были получены при условии использования оптимизированной сетки узловых значений скоростей. Указанные оценки важны для контроля априорной точности результатов расчета. Для обеих псевдоспектральных схем относительная фазовая погрешность не превышает 1% в широком диапазоне интервальных скоростей, углов падения волн и временных частот. Относительная фазовая погрешность схемы 6-го порядка оказывается примерно вдвое меньшей по сравнению со схемой 4-го порядка. Выполнено моделирование волн от расположенного на дневной

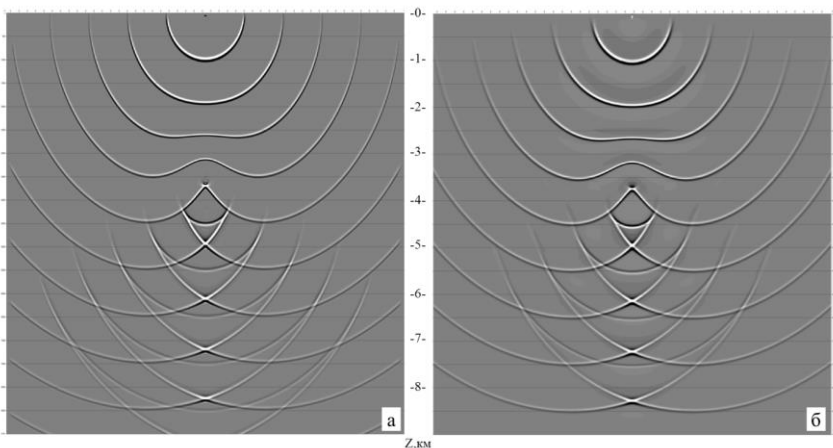


Рисунок 2. Сравнение результатов расчета волн от точечного источника для 3-D модели среды с низкоскоростным включением: а) конечно-разностное решение волнового уравнения; шаг пространственной сетки расчета 2,5м; б) псевдоспектральное решение одностороннего волнового уравнения; шаг пространственной сетки расчета 25м.

поверхности точечного источника для модели среды с низкоскоростным включением, играющим роль фокусирующей линзы, приводящим к образованию складок фронтов волн и каустик. На рис. 2 представлено сравнение псевдоспектрального решения с эталоном, в качестве которого использованы результаты конечно-разностного моделирования волн, демонстрирующее близкое совпадение обоих результатов. Для достижения

желаемых точности и качества результатов 3-мерного конечно-разностного моделирования потребовалось использование пространственной кубической сетки с длиной ребра 2,5 м. Сходный по качеству результат получен с помощью псевдоспектральной схемы на пространственной сетке с длиной ребра 25 м. Эти результаты были затем проинтерполированы на глубинную сетку 5 м. Использование редкой пространственной сетки в ходе основных расчетов позволяет многократно сократить требуемые объемы арифметических операций и оперативной памяти ЭВМ для хранения результатов. Важной особенностью и преимуществом использования волновых псевдоспектральных методов расчета является возможность учета неоднородных волн, которые могут играть важную роль в общем балансе энергии в условиях контрастных скоростных моделей сред. Рассмотрен пример моделирования сейсмических волн, проходящих через расположенный на малой глубине высокоскоростной 250-метровый слой. При закритических углах падения на этот слой наблюдается эффект просачивания неоднородных волн через этот слой практически без потерь энергии. Сходный эффект в квантовой физике носит название туннельного перехода. В лучевом приближении через этот слой могут пройти волны лишь в узком диапазоне углов падения, что приводит к большим энергетическим потерям для проходящих вглубь среды волн. В подразделе 2.3.10 представлена экономичная псевдоспектральная схема, позволяющая решить задачу волнового продолжения и сейсмической миграции для моделей VTI-анизотропных неоднородных сред с вертикально направленной осью симметрии, описываемых параметрами Томсена. Схема построена на основе использования дисперсионного соотношения псевдоакустического волнового уравнения в частных производных 4-го порядка, введенного в практику сейсмической миграции американским геофизиком Аль-Халифа. В подразделе 2.3.11 рассмотрено известное псевдодифференциальное уравнение DSR с двумя операторными квадратными корнями, предназначенное для миграции сейсмических данных многократных перекрытий:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \sqrt{\frac{1}{v_g^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2}{\partial x_g^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_g^2} \right)} u + \sqrt{\frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2}{\partial x_s^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_s^2} \right)} u.$$

Для этого уравнения получено в общем виде решение задачи 3-мерной миграции данных многократных перекрытий в виде 5-кратного интеграла по переменным координатам источников, приемников и по временной частоте, структура которого полностью повторяет общее решение задачи сейсмической миграции, представленное в подразделе 2.3.2. Показано, что для модели однородной среды волновое продолжение граничного условия Дирихле на основе решения одностороннего волнового уравнения и

обычного скалярного волнового уравнения совпадают. Отсюда следует, что для однородной модели среды результаты миграции сейсмических данных многократных перекрытий на основе решения уравнения DSR и на основе общей интегральной формулы сейсмической миграции совпадают. В **подразделе 2.3.12** рассмотрены особенности интерполяции и аппроксимации сеточных функций тригонометрическими полиномами на основе использования дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и его экономичной реализации - быстрого преобразования Фурье (БПФ). Указанные интерполяция и аппроксимация сеточных функций тригонометрическими полиномами лежат в основе численной реализации псевдоспектральных схем сейсмической миграции, а также имеют иные многочисленные приложения. Приведены корректные формулы тригонометрической интерполяции / аппроксимации сеточных функций:

$$u(t) \approx \sum_{k=-N/2}^{N/2} s_k e^{-i\frac{2\pi}{T}kt} = \sum_{k=-N/2}^{N/2} s_k e^{-i\omega_k t}, \text{ где } s_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n e^{i\frac{2\pi}{N}kn},$$

использованные в программе псевдоспектральной сейсмической миграции. Обращено внимание на то важное обстоятельство, что приведенные в части известных справочников и учебных пособий аналоги этих формул содержат серьезную неточность.

Глава 3 посвящена технологиям и практическим реализациям 3-мерной глубинной миграции с сохранением амплитуд сейсмических данных многократных перекрытий. Представлена интегральная формула миграции в пространстве координат средних точек («бинов») и векторов удаления источники-приемники, позволяющая реализовать условие сохранения сейсмических амплитуд. Рассмотрены специализированные квадратурные схемы с осреднением во временном окне, используемые в однолучевой и многолучевой асимптотических миграциях. Приведен обзор методов построения опорных глубинно-скоростных моделей земной среды, требующихся для выполнения сейсмической миграции. Представлены примеры практических результатов сейсмической миграции в различных регионах проведения сейсморазведочных работ, а также сравнение различных методов миграции на комплекте международных синтетических данных SEG Salt. В **разделе 3.1** рассмотрено условие сохранения амплитуд результатов сейсмической миграции, ставшее современным стандартом, соблюдение которого позволяет выполнять динамическую интерпретацию результатов миграции и использовать их для решения важных обратных задач. Рассмотрена связь этого условия с типом подборок сейсмических трасс, используемых для построения сейсмического изображения. В условиях сред с субгоризонтальными границами раздела широкую апробацию получили подборки трасс квази-равных векторов удаления источники-приемники (OVT- / COV-выборки в

англоязычной терминологии). Их использование позволяет сохранить зависимость амплитуд результатов миграции как от величины удаления, так и от азимута направления источники-приемники. Замена переменных $\mathbf{m} = (\mathbf{s} + \mathbf{g})/2$, $\mathbf{h} = (\mathbf{s} - \mathbf{g})/2$ в базовой интегральной формуле сейсмической миграции приводит ее к виду:

$$f(\mathbf{r}) = \int d\omega \iint u_0^*(\mathbf{s}, \mathbf{g}; \omega) \frac{\partial G(\mathbf{s}, \mathbf{r}; \omega)}{\partial \mathbf{n}} \frac{\partial G(\mathbf{g}, \mathbf{r}; \omega)}{\partial \mathbf{n}} d\mathbf{g} d\mathbf{s} =$$

$$= 4 \int d\mathbf{h} \left[\int d\omega \int u_0^*(\mathbf{m} + \mathbf{h}, \mathbf{m} - \mathbf{h}; \omega) \frac{\partial G(\mathbf{m} + \mathbf{h}, \mathbf{r}; \omega)}{\partial \mathbf{n}} \frac{\partial G(\mathbf{m} - \mathbf{h}, \mathbf{r}; \omega)}{\partial \mathbf{n}} d\mathbf{m} \right].$$

В модифицированной интегральной формуле миграции внутренний 3-кратный интеграл в квадратных скобках берется по координатам средних точек и по временной частоте. Результат этого интегрирования соответствует миграции сейсмического куба фиксированного вектора удаления источники-приемники. Внешний 2-кратный интеграл по векторам удаления соответствует «накапливанию» результатов миграции однократных кубов фиксированных векторов удаления, составляющих комплект сейсмических данных многократных перекрытий. Помимо куба сейсмического изображения приведенная интегральная формула позволяет формировать выборки результатов миграции в виде 3-мерных азимутальных сейсмограмм общей точки изображения, имеющих важное прикладное значение. Разработана технология, позволяющая расщеплять данные крестовых сейсмических наблюдений на однократные кубы квази-равных векторов удаления источники-приемники. Указанная технология получила широкое практическое применение. В **разделе 3.2** рассмотрены квадратурные схемы с осреднением во временном окне при интегрировании полей сейсмических волн в ходе однолучевой и многолучевой асимптотических миграций. Показано, что традиционные квадратурные формулы прямоугольников или трапеций приводят к появлению значительных помех на результатах миграции, связанных с потерей аппроксимации поля сейсмических волн. Связанный с этим негативный эффект напоминает аляйсинг пространственных частот и проявляется при интегрировании поля сейсмических волн вдоль кругонаклонных частей годографов дифрагированных волн. В **подразделе 3.2.1** рассмотрены экономичные квадратурные схемы с осреднением во временном окне заданной переменной ширины. Схемы основаны на корректной аппроксимации поля сейсмических волн и успешно используются в созданных программах асимптотической однолучевой и многолучевой миграций. В отличие от опубликованных зарубежными исследователями алгоритмов, основанных на использовании антиаляйсинговых фильтров, разработанные автором квадратурные схемы основаны на естественной модели аппроксимации поля сейсмических

волн. В **подразделе 3.2.2** рассмотрены вопросы сеточной аппроксимации результатов миграции при дискретном представлении ее результатов на заданной пространственной сетке. Изучены связанные с этим проблемы и построены специальные квадратуры, цель которых состоит в оптимизации сеточной аппроксимации результатов миграции. Указанные квадратуры дополняют рассмотренные в подразделе 3.2.1 и реализуются сходным с ними образом. Приведены обобщающие формулы квадратур с осреднением во временном окне, ширина которого связана с величиной модуля градиента эйконала в многомерном пространстве координат источников, приемников и глубинной точки, в которой строится сейсмическое изображение. В **подразделе 3.2.3** рассмотрены конкретные реализации квадратур с осреднением в окне в приложении к миграции различных типов подборок сейсмических трасс, связанных с данными сухопутных и морских сейсмических наблюдений. В **подразделе 3.2.4** на реальном примере проанализированы результаты применения квадратур с осреднением в окне при миграции морских сейсмических данных, позволившего значительно улучшить результат сейсмического изображения в диапазоне глубин до 1 км. **Раздел 3.3** содержит обзор методов построения и уточнения опорных глубинно-скоростных моделей неоднородной земной среды, требуемых для выполнения сейсмической миграции. В **подразделе 3.3.1** представлен обзор методов построения и уточнения опорной глубинно-скоростной модели среды, основанных на решении обратной динамической задачи. Абстрактная постановка задачи сводится в минимизации функционала невязки между реально наблюдаемыми и синтетическими данными, смоделированными для модели неоднородной земной среды, параметры которой подлежат определению. Для обратной динамической задачи отсутствует доказательство теоремы существования и единственности ее решения. Исходя из накопленного в мире опыта и нестрогих рассуждений следует вывод о необходимости использования при решении обратной задачи поля волн сейсмических данных многократных перекрытий, представленного в 5-мерном пространстве координат источников, приемников и времени регистрации (см. подраздел 2.1). Лишь в этом случае можно рассчитывать на единственность решения этой некорректной задачи. Рассмотрены факторы, осложняющие решение обратной динамической задачи, среди которых часто вынужденное использование акустической модели распространения колебаний, не вполне соответствующей реально наблюдаемым данным. Использование упругой модели требует увеличения числа подлежащих определению независимых параметров среды минимум до 3-х, что усугубляет некорректность обратной задачи. Помимо минимизации функционала невязки существует альтернативный метод решения, названный методом граничного управления, разработанный отечественным математиком М.И.

Белишевым. Несмотря на некорректность обратной динамической задачи и связанные с ее решением многочисленные и трудные проблемы, новый перспективный метод требует всестороннего изучения и возможного развития. В **подразделе 3.3.2** представлены эвристический способ и технология построения опорной толсто-слоистой глубинно-скоростной модели среды, основанные на решении обратной кинематической задачи по отраженным волнам. В соответствии с технологией сперва выполняется оценка интервальных скоростей в самом верхнем толстом слое. Для этого используют времена прослеживания отражений от наиболее мелко расположенной границы раздела на суммарном сейсмическом кубе, который получают в ходе стандартной обработки. Для оценки интервальной скорости в первом слое строят теоретические времена наблюдения отражений на сейсмограммах общей средней точки (ОСТ). При этом используют горизонтальные спектры интервальных скоростей, основанные на переборе пробных величин скоростей из заданного диапазона и сравнении теоретических годографов ОСТ с реально наблюдаемыми фронтами отраженных волн, добиваясь наиболее близкого их совпадения. После восстановления интервальных скоростей в первом слое переходят ко второму слою и т.д., учитывая при расчете теоретических годографов отражений локальные углы наклона отражающих границ и преломление лучей на промежуточных границах раздела. Для контроля качества полученной глубинно-скоростной модели выполняют тестовые расчеты глубинной миграции до суммирования по сетке профилей, результаты которой используют для итеративного уточнения глубинно-скоростной модели. Помимо описанной технологии для уточнения скоростной модели среды используются также методы сеточной лучевой томографии. В настоящее время эта технология является основным рабочим инструментом, позволяющим в руках опытного геолога-геофизика добиться, как правило, успешного результата. В **разделе 3.4** представлены результаты тестирования различных методов и алгоритмов 3-мерной глубинной миграции до суммирования на комплексе международных синтетических данных SEG Salt, моделирующих результаты узко-азимутальной морской сейсмической съемки. Основной особенностью модели неоднородной изотропной среды являются резкие контрасты скоростей сейсмических волн, связанные с моделью соляного тела сложной формы, погруженного в толщу более низкоскоростных осадочных пород. По комплекту синтетических данных, включающих сейсмические трассы и сеточную глубинно-скоростную опорную модель среды, были выполнены расчеты с помощью различных программ миграции. В числе тестируемых были разработанные под руководством автора программы однолучевой миграции Кирхгофа в двух вариантах расчета лучевых амплитуд: на основе среднескоростной модели

геометрического расхождения фронтов волн и на основе конечно-разностного решения уравнений переноса; многолучевой асимптотической миграции и псевдоспектральной миграции. Для сравнения приведены результаты известного зарубежного аналога однолучевой миграции Кирхгофа, использующей среднескоростную модель геометрического расхождения. Анализ полученных результатов привел к выводу, что наилучшим качеством сейсмического изображения обладают результаты многолучевой и псевдоспектральной миграций. Результаты однолучевой миграции Кирхгофа со среднескоростной моделью геометрического расхождения сопряжены с регулярными помехами внутри соляного тела и в его окрестностях, которые могут быть ложно приняты за реальные границы раздела. Рис. 3 демонстрирует, что однолучевая миграция в случаях сложной формы кровли соляного тела не позволяет получить

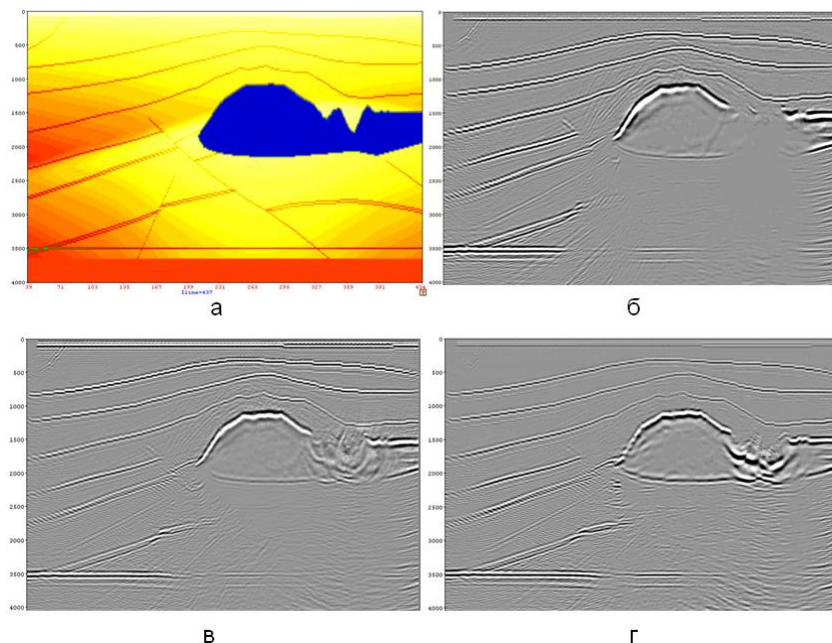


Рисунок 3. Сравнение разрезов XL 437 различных 3-D глубинных миграций до суммирования на синтетических данных SEG Salt:
 а) вертикальное сечение модели; б) однолучевая миграция Кирхгофа с «лучевыми» весами; в) многолучевая; г) псевдоспектральная.

изображение не только кровли, но и его подошвы. Более адекватные результаты были получены с помощью многолучевой и псевдоспектральной миграций. В **разделе 3.5** приведены примеры

практического применения разработанных программ сейсмической миграции и результаты сейсмического изображения, полученные в различных регионах проведения сейсморазведочных работ с отличающимся геологическим строением. Представлены результаты миграции на основе асимптотического решения обратной задачи рассеяния, однолучевой миграции Кирхгофа, асимптотической многолучевой миграции, а также псевдоспектральной волновой миграции. На рис.4 стрелками показаны характерные отличия результатов глубинной миграции до суммирования от результатов временной миграции после

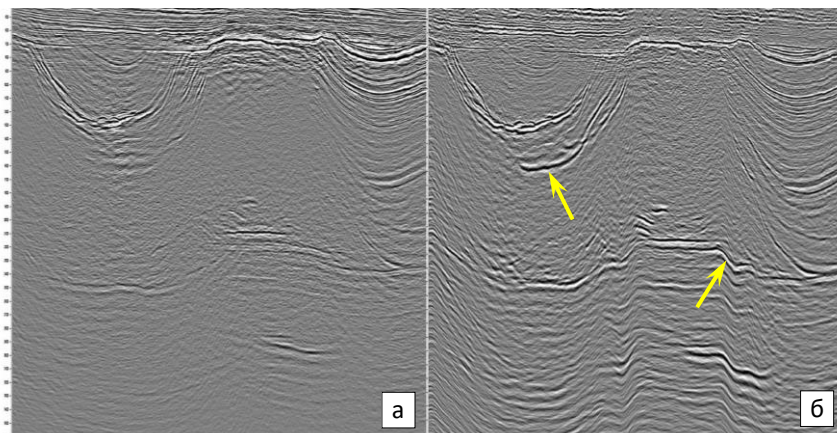


Рисунок 4. Пример сравнения сечений кубов 3-D миграции:
а) временная миграция после суммирования; б) глубинная однолучевая миграция Кирхгофа до суммирования. Астраханский свод.

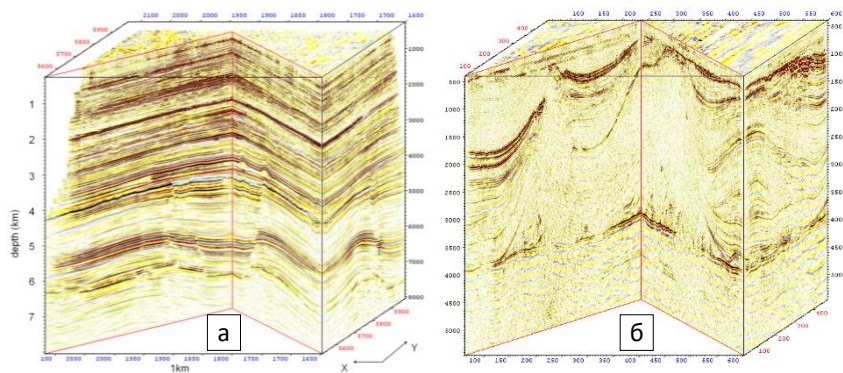


Рисунок 5. Примеры результатов COV-миграции с сохранением амплитуд:
а) многолучевая асимптотическая миграция, Тимано-Печора;
б) волновая псевдоспектральная миграция; Астраханский свод.

суммирования при наличии соляной тектоники. Основная часть приведенных результатов получена в ходе выполнения многочисленных производственных проектов по заказам отечественных и зарубежных газонефтяных компаний. Результаты временной миграции после суммирования, как правило, заметно уступают по качеству результатам глубинной миграции до суммирования. На рис. 5 приведены примеры асимптотической многолучевой и псевдоспектральной волновой COV-миграций, полученные с помощью разработанных программ.

Глава 4 посвящена азимутальному анализу сейсмических амплитуд, цель которого состоит в изучении зависимостей коэффициентов отражения сейсмических волн от величины угла и азимута падения зондирующих волн на глубинные границы раздела и выявление азимутальной анизотропии коэффициентов отражения. Азимутальная анизотропия может быть обусловлена микротрещиноватостью горных пород, с которой, в свою очередь, могут быть связаны скопления углеводородов. Рассмотрен пример азимутального анализа синтетических данных 3-D/3-C конечно-разностного моделирования и ряд примеров практического использования разработанной технологии азимутального анализа амплитуд в различных регионах проведения сейсморазведочных работ, позволяющий получать качественно новую содержательную информацию о строении продуктивного интервала геологического разреза и выполнять прогноз его свойств, включая микротрещиноватость. В **разделе 4.1** сформулированы требования, предъявляемые к исходным сейсмическим данным крестовых наблюдений, предназначенным для азимутального анализа сейсмических амплитуд, а также к составу процедур сигнальной обработки, предвещающей азимутальную сейсмическую миграцию. Помимо общих требований к качеству исходных сейсмических данных, позволяющему выполнять AVO-анализ и решение иных обратных динамических задач, важным является требование широкой азимутальности крестовых наблюдений. Последнее означает, что углы падения зондирующих волн на субгоризонтальные границы раздела в целевом интервале глубин должны заполнять диапазон 0° - 30° во всем диапазоне 0° - 360° азимутов падения зондирующих волн. Кроме того, крестовая система должна обладать достаточной эффективной кратностью, от величины которой зависит репрезентативность 3-мерных азимутальных сейсмограмм общей точки изображения. Крестовую систему наблюдений можно считать широкоазимутальной в том случае, если максимальное удаление источник-приемник в направлении линий приема и в ортогональном направлении линий взрыва равно или превышает глубину отражателя. В этом случае диапазон углов падения на субгоризонтальную границу раздела для модели однородной покрывающей среды составляет 0° - 27° во всем диапазоне 0° - 360° азимутов падения зондирующих волн.

Рассмотрены варианты крестовых систем наблюдения, удовлетворяющих указанным требованиям. Среди важных требований к составу допустимых процедур сигнальной обработки исходных сейсмических данных является то, чтобы в ходе обработки не происходило осреднения сейсмических трасс с резко отличающимися удалениями и азимутами направлений источники-приемники. В частности, требуется исключить популярные процедуры типа F-K фильтрации сейсмограмм общей средней точки (ОСТ), а также интерполяцию трасс сейсмограмм ОСТ с неравномерной на равномерную сетку удалений источники-приемники. В **разделе 4.2** представлена 4-параметровая модель Рюгера, используемая для описания азимутальной анизотропии амплитуд:

$$R(\alpha, \Delta\varphi) = R_0 + (G_I + G_A \cos^2 \Delta\varphi) \sin^2 \alpha,$$

где R_0 - амплитуда отражения при нормальном падении, G_I - «изотропный» градиент, G_A - «анизотропный» градиент, α - угол падения на отражатель, $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi$ - угол между азимутом φ направления источник-приемник и азимутом φ_0 направления оси симметрии (азимут поворота эллипса анизотропии) в плоскости наблюдений, ортогонального направлению возможной микротрещиноватости. Симметризованная формула имеет вид:

$$R(\alpha, \Delta\varphi) = R_0 + (G_Y \sin^2 \Delta\varphi + G_X \cos^2 \Delta\varphi) \sin^2 \alpha,$$

где $G_X = G_A + G_I$ - «аномальный» градиент, $G_Y = G_I$ - «нормальный» градиент. Приведены формулы, позволяющие свести задачу поиска неизвестных параметров этой модели к переопределенной системе линейных уравнений, решение которой отыскивается с помощью метода наименьших квадратов. Рассмотрен ряд проблем, возникающих при оценке параметров азимутальной анизотропии амплитуд, требующих нестандартных методов регуляризации решения. В **разделе 4.3** подробно рассмотрена разработанная автором технология составления подборок сейсмических трасс квазиравных удалений / азимутов направлений источники-приемники для крестовых сейсмических наблюдений. Разработанная технология позволяет для реальной квазирегулярной крестовой системы наблюдений успешно создавать подборки трасс, обладающих желаемыми свойствами аппроксимации регулярных COV-выборок трасс фиксированных векторов удалений. В **разделе 4.4** рассмотрены способ регуляризации решения обратной задачи азимутального анализа сейсмических амплитуд и условия, позволяющие получать надежные оценки параметров горизонтальной анизотропии по 3-мерным азимутальным сейсмограммам общей точки изображения, отягощенным помехами и разбросом амплитуд и фаз полезной сигнальной составляющей. Регуляризация состоит в использовании оконных оценок

амплитуд сигнальной составляющей вместо традиционных точечных оценок, имеющих значительный разброс. Разброс точечных оценок амплитуд эквивалентен сильной зашумленности анализируемых сейсмических данных, который приводит к некорректному решению обратной задачи. В **разделе 4.5** рассмотрены результаты азимутальной миграции и азимутального анализа амплитуд реальных сейсмических данных и синтетических данных конечно-разностного упругого моделирования крестовых сейсмических наблюдений в условиях блоковой толстослоистой модели земной среды с НТИ-анизотропными блоками. Указанные анизотропные блоки на глубинах около 4 км с заданными упруго-плотностными параметрами и азимутами направлений осей симметрии моделировали микротрещиноватые блоки карбонатных пород, имеющих азимутальную анизотропию упругих свойств. Было выполнено конечно-разностное моделирование совокупности 3-D/3-C сейсмограмм для заданной квазирегулярной сети точечных источников типа центров расширения и смоделирован комплект сейсмических данных крестовых сейсмических наблюдений для участка площади около 100 км². По вертикальной компоненте наблюденного на дневной поверхности векторного поля волн был сформирован комплект сейсмических данных многократных перекрытий, который был затем передан на азимутальную COV-миграцию. По результатам миграции был сформирован комплект 3-мерных азимутальных сейсмограмм общей точки изображения, а также получен суммарный куб сейсмического изображения. Далее был выполнен азимутальный анализ амплитуд глубинных сейсмограмм общей точки

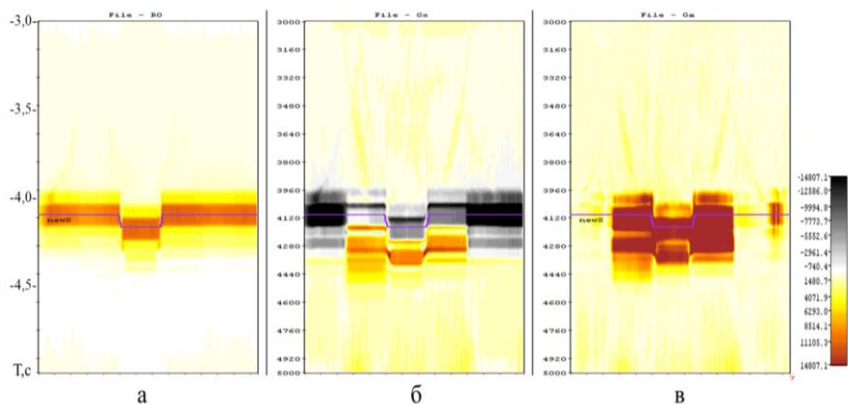


Рисунок 6. Вертикальные разрезы кубов азимутальных атрибутов с регуляризацией: а) амплитуды нормального падения R_0 ; б) аномальный градиент G_X ; в) анизотропный градиент $G_A = G_X - G_Y$.

изображения и рассчитаны интересные кубы азимутальных атрибутов: куб амплитуд нормального падения R_0 , куб нормального («изотропного») градиента G_y , куб аномального градиента G_x , куб азимутов направлений осей симметрии φ_0 . Дополнительно сформирован куб анизотропного градиента G_A , характеризующий величину азимутальной анизотропии. На рис. 6 представлены результаты азимутального анализа 3-мерных глубинных сейсмограмм общей точки изображения. Расчет азимутальных атрибутов G_x и G_A позволил уверенно выделить анизотропные блоки, а также получить надежную оценку азимутов направлений осей симметрии. Сделан вывод о возможности достоверной качественной и количественной интерпретации результатов азимутального анализа при условии регуляризации решения с помощью предложенного способа. На рис. 7 представлен горизонтальный слайс куба анизотропного градиента G_A , полученный в ходе азимутального анализа реальных данных широкоазимутальной сейсмической съемки в Западной Сибири. Черным цветом выделены анизотропные блоки баженовских отложений, расположенные конформно относительно линий разрывных нарушений, прослеженных в ходе интерпретации куба сейсмического изображения.

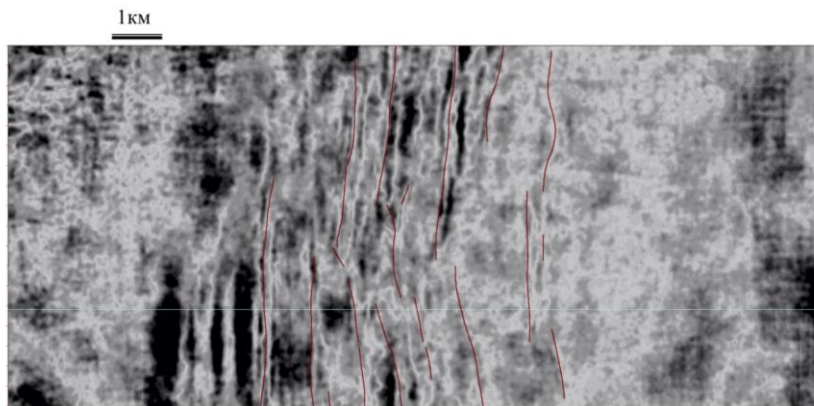


Рисунок 7. Западная Сибирь: стратиграфический (горизонтальный) слайс куба анизотропного градиента G_A по результатам прослеживания баженовских отложений (горизонт «Б») с анизотропными блоками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным практическим результатом выполненных исследований стала разработка ряда производственных комплексов компьютерных программ 3-мерной глубинной сейсмической миграции до суммирования и азимутального анализа сейсмических амплитуд, использующих параллельные суперкомпьютерные расчеты на вычислительных кластерах. За время активной эксплуатации созданных программ миграции начиная с 2003 г. было успешно выполнено свыше 80-и крупных проектов 3-мерной сейсморазведки для ведущих отечественных и ряда зарубежных газонефтяных компаний. Площадь наиболее крупного объекта миграции составляла около 3400 км², а объем сейсмических данных – около 10 ТБ. Неоднократные примеры сравнения полученных результатов с известными зарубежными аналогами демонстрировали самое высокое качество созданного программного обеспечения, не уступающего лучшим мировым образцам. Выполненные разработки позволили успешно решить важную задачу импортозамещения в важной сфере приложения суперкомпьютерных технологий к сейсмической разведке месторождений нефти и газа.

Математические модели, методы и технологии сейсмической миграции в мире постоянно совершенствуются. Теме сейсмической миграции посвящены постоянные секции на ежегодно проходящих отечественных, европейских и мировых конференциях геофизиков-разведчиков. При этом необходимо отметить, что сейсмическая миграция является завершающей стадией полного цикла обработки исходных сейсмических данных. Предваряющая миграцию многостадийная сигнальная сейсмическая обработка выполняется в специализированных программных системах, содержащих многие десятки и даже сотни разнообразных геофизических процедур, основанных часто на сложных математических моделях и включающих разнообразное использование интерактивных графических средств. Подобные системы создаются большими коллективами ученых-геофизиков и опытных программистов, поддерживаются и регулярно обновляются в течение не одного десятилетия. Наличие современной системы цифровой сейсмической обработки является важным свидетельством наличия прикладной геофизической научной школы, с которой самым тесным образом связана система образования и подготовки молодых специалистов, способных к созданию востребованных программно-алгоритмических разработок и новых методов обработки.

С большим сожалением следует констатировать, что с середины 90-х годов прошедшего века в России фактически отсутствует отвечающая мировому уровню отечественная система цифровой сейсмической

обработки. По этой причине отечественные специалисты вынуждены заниматься разработкой сравнительно автономных комплексов программ, в числе которых можно указать сейсмическую миграцию, моделирование сейсмических волн, а также некоторые другие сравнительно автономные задачи. Такое положение резко ограничивает сферу деятельности отечественных специалистов и не дает возможности широкого научного развития во многих иных областях сейсмического метода разведки, а также методов комплексной интерпретации его результатов. В свете сказанного, воссоздание полноценной отечественной системы цифровой сейсмической обработки, находящейся на современном мировом уровне, следует рассматривать в числе важных национальных задач. К решению этой важной задачи должны быть привлечены специалисты ведущих научных центров России при активной поддержке государства.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рекомендованных ВАК журналах и приравненные к ним свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Белоусов, А.В. Актуальные вопросы оптимизации геометрии 3D-сейсмических наблюдений / А.В. Белоусов, Ю.Ш. Закариев, М.З. Мусагалиев, **А.Л. Плешкевич**, Н.Н. Цыпышев // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 74-81.
2. Гогоненков, Г.Н. Теоретические основы и практическое использование отечественной программы 3D-глубинной сейсмической миграции до суммирования / Г.Н. Гогоненков, Б.П. Мороз, **А.Л. Плешкевич**, В.И. Турчанинов // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 15–24.
3. Гогоненков, Г.Н. Технология азимутального анализа амплитуд данных наземных 3D-сейсмических наблюдений при поисках трещиноватых зон / Г.Н. Гогоненков, **А.Л. Плешкевич** // Геофизика. – 2012. – № S (спец. выпуск). – С. 18–27.
4. Левченко, В.Д. Результаты азимутальной миграции и азимутального анализа амплитуд синтетических данных 3D/3C конечно-разностного моделирования и реальных данных широкоазимутальных сейсмических наблюдений / В.Д. Левченко, Б.П. Мороз, **А.Л. Плешкевич** // Геофизика. – 2017. – № S (спец. выпуск). – С. 102–112.
5. Локтионов, Б.А. Разностный метод решения уравнения эйконала / Б.А. Локтионов, **А.Л. Плешкевич** // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 12. – С. 57–64.
6. **Плешкевич, А.Л.** Скалярное волновое уравнение в задаче продолжения волновых полей в сейсморазведке / **А.Л. Плешкевич** // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1988. – № 6. – С. 27–35.

7. **Плешкевич, А.Л.** Актуальные вопросы группирования источников и приемников при наземных 3D сейсмических наблюдениях / А.Л. Плешкевич // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 93–102.
8. **Плешкевич, А.Л.** Соотношение взаимности, амплитуда и энергия волн от точечных источников в неоднородной изотропной среде / А.Л. Плешкевич // Геофизика. – 2012. – № S (спец. выпуск). – С. 38–48.
9. **Плешкевич, А.Л.** Экономичные квадратурные схемы с осреднением в окне и их приложение к сейсмической миграции Кирхгофа / А.Л. Плешкевич, В.И. Турчанинов // Геофизика. – 2012. – № S (спец. выпуск). – С. 57–65.
10. **Плешкевич, А.Л.** Многолучевая 3D-глубинная сейсмическая миграция до суммирования с сохранением амплитуд / А.Л. Плешкевич, А.В. Иванов, В.Д. Левченко, С.А. Хилков // Геофизика. – 2017. – № S (спец. выпуск). – С. 76–84.
11. **Плешкевич, А.Л.** Разработка волновой псевдоспектральной 3D-глубинной сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд / А.Л. Плешкевич, Д.М. Вишневский, В.В. Лисица // Геофизика. – 2017. – № S (спец. выпуск). – С. 94–101.
12. **Pleshkevitch, A.** 3D DMO of cross-gather data / A. Pleshkevitch, B. Plyushchenkov, V. Turchaninov // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 1996. – P. 1118–1121.
13. **Pleshkevitch, A.** Parallel GPU-based Implementation of One-Way Wave Equation Migration / A. Pleshkevitch, V. Lisitsa, D. Vishnevsky, V. Levchenko, B. Moroz // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2018. – V. 5. – N. 3. – P. 34–37.
14. **Pleshkevitch, A.** Sixth-order accurate pseudo-spectral method for solving one-way wave equation / A. Pleshkevitch, D. Vishnevskiy, V. Lisitsa // Applied Mathematics and Computation. – 2019. – T. 359. – P. 34–51.
15. **Pleshkevitch, A.** Parallel algorithm for one-way wave equation based migration for seismic imaging / A. Pleshkevitch, D. Vishnevsky, V. Lisitsa, V. Levchenko // Supercomputing Book Series V. 965, Springer Link, 2019. – P. 125–135.
16. **Pleshkevitch, A.** Asymptotic solution of wavefield continuation problem in the ray parametric coordinates / A. Pleshkevitch, A. Ivanov, S. Khilkov // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2017. – P. 5551–5555.
17. **Pleshkevitch, A.** Explicit additive pseudospectral schemes of wavefield continuation with high-order approximation / A. Pleshkevitch, D. Vishnevskiy, V. Lisitsa // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2017. – P. 5546–5550.
18. **Pleshkevitch, A.L.** Efficient parallel implementation of multi-arrival 3D prestack seismic depth migration / A.L. Pleshkevitch, A.V. Ivanov, V.D.

- Levchenko, S.A. Khilkov, B.P. Moroz // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. – 2019. – V. 6. – N. 1. – P. 4–8.
19. Гогоненков, Г.Н. Программный комплекс СейсмоСкан (SeismoScan) / Г.Н. Гогоненков, Б.П. Мороз, **А.Л. Плешкевич**, В.И. Турчанинов. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614208 от 29.06.2010.
20. **Плешкевич, А.Л.** «Миграция.Кирхгофа.ЦГЭ» / А.Л. Плешкевич, Г.Н. Гогоненков, Б.П. Мороз. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613562. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.03.2017 г.
21. **Плешкевич, А.Л.** «Миграция.Азимутальная.ЦГЭ» / А.Л. Плешкевич, Г.Н. Гогоненков, Б.П. Мороз. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611958. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.02.2017 г.

Материалы конференций

22. Гогоненков, Г.Н. Особенности кластерной реализации 3-D глубинной сейсмической миграции до суммирования / Г.Н. Гогоненков, В.П. Мясников, **А.Л. Плешкевич**, В.И. Турчанинов [Электронный ресурс] // Расширенные тезисы доклада на международной конференции SEG, Москва, 2003. – 2003. – ср-38-00112. – Режим доступа: URL. – <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.38.F221>.
23. Иванов, А.В. Опыт разработки многолучевой 3-D глубинной сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд и предварительные результаты ее тестирования с использованием суперкомпьютерных мощностей / А.В. Иванов, В.Д. Левченко, **А.Л. Плешкевич** // Расширенные тезисы доклада на конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение», Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова. – 2017. – С. 30– 34.
24. **Плешкевич, А.Л.** Опыт разработки псевдо-спектральной 3D глубинной сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд и предварительные результаты ее тестирования на суперкомпьютере гибридной архитектуры «Ломоносов-2» / А.Л. Плешкевич, Д.М. Вишневский, В.В. Лисица // Сейсмические технологии – 2017: Материалы научно-практической конференции. – 2017. – С. 92–96.
25. **Плешкевич, А.Л.** Реконструкция изображения глубинных неоднородностей земной среды по сейсмическим данным («сейсмическая миграция») / А.Л. Плешкевич, Д.М. Вишневский, А.В. Иванов, В.Д. Левченко, В.В. Лисица, Б.П. Мороз // Сборник научных

- трудов XVII Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». – г. Саров, 2018. – С. 429–442.
26. **Плешкевич, А.Л.** Реализации асимптотической многолучевой и псевдоспектральной 3D-глубинных сейсмических миграций с сохранением амплитуд по выборкам общего вектора удалений [Электронный ресурс] / А.Л. Плешкевич, Д.М. Вишнеvский, А.В. Иванов, В.Д. Левченко, В.В. Лисица, Б.П. Мороз // «ГеоЕвразия - 2020». – Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии», том 3. – Москва, 2020. – стр. 67-70. – Режим доступа: URL. – https://drive.google.com/drive/folders/1Bk7ofh3l67WeCwDYKpCpVGQrKZGM9d_D
 27. Lisitsa, V. Pseudospectral 3-D Migration of Common-Offset Vector Gathers – Highly Parallel Algorithm [Электронный ресурс] / V. Lisitsa, **A. Pleshkevich**, D. Vishnevskiy, V. Levchenko, B. Moroz // Expanded Abstracts. – 2018. – 80th EAGE Meeting. – Режим доступа: URL. – <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801345>.
 28. Lisitsa, V. Multi-level CPU/GPU Parallel Algorithm for One-way Wave Equation Seismic Imaging [Электронный ресурс] / V. Lisitsa , **A. Pleshkevich**, D. Vishnevsky , V. Levchenko // Saint Petersburg 2018: 8th Saint Petersburg International Conference and Exhibition Saint Petersburg. Innovations in Geosciences - Time for Breakthrough (Saint Petersburg, Russia, 9–12 April 2018).
 29. **Pleshkevitch, A. L.** Cross gather data - A New subject for 3D prestack wave - Equation processing [Электронный ресурс] / A. L. Pleshkevitch // Expanded Abstracts. – 1996. – 58th EAGE Meeting. – cp-48-00291. – Режим доступа: URL. – <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201408880>.

Подписано в печать __. __. 2020 г.
 Формат 64×84/16. Объем 2,0 усл. печ. л.
 Тираж 100 шт. Заказ №

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
 123242 г.Москва, Б.Грузинская ул., д.10, стр. 1
 Тел./факс: (499) 254 90 88. E-mail: serg@tigra-press.ru