

На правах рукописи

ЗЯТЬКОВ Николай Юрьевич

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ДИФРАКЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН
С АДАПТАЦИЕЙ ПОД ГРАФИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент
Айзенберг Аркадий Маркович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сейсмический метод исследования недр Земли использует отраженные и преломленные волны для послойного восстановления материальных параметров блоков реальной среды и геометрической структуры границ между ними по наблюдаемым данным. В настоящее время наибольшее внимание исследователей привлечено к методам послойного восстановления материальных и геометрических параметров реальной среды, понижающим размерность задачи за счёт введения модели среды типа «покрывающая среда известного строения – целевая локальная область искомого строения» (Goldin (1986), Treitel and Lines (2001), Weglein и др. (2003), Tarantola (2005), Moser (2012), Jakobsen and Ursin (2015)). Эти методы базируются на одноразовом математическом моделировании волновых полей в покрывающей среде и многократном математическом моделировании волновых полей в целевой области (Virieux and Operto (2009), Virieux и др. (2011), Chandler-Wilde и др. (2012)). При сильной латеральной неоднородности покрывающей среды (соляные тела, рифовые структуры, базальтовые слои и т.д.) восстановление искомым параметров в целевой области сталкивается с проблемой ухудшения разрешающей способности сейсмоки из-за наличия больших скоростных контрастов, локальных неоднородностей, анизотропии и затухания в слоях, сложной геометрической формы границ, которая порождает многократную дифракцию на рёбрах, ползущие волны вокруг вогнутых границ и т.п. Для таких сред в последние десятилетия развивалась строгая теория решения прямой задачи для акустических и сейсмических волновых полей – теория операторов прохождения-распространения-дифрагирования (ТОПРД) (Klem-Musatov и др. (2005), Aizenberg и др. (2014), Aizenberg and Auzenberg (2015)). Аналитическая форма её решения позволяет анализировать волновую структуру интерференционного поля. Для сейсмических приложений была разработана матрично-векторная аппроксимация ТОПРД – метод наложения концевых волн (МНКВ) (Auzenberg и др. (2007), Auzenberg и др. (2009), Aizenberg и др. (2011)). Данная диссертация посвящена исследованию точности элементов этой аппроксимации и разработке программного комплекса, реализующего МНКВ для случая акустических сред с однородными слоями и границами произвольной формы.

Степень разработанности темы исследования. В обзорах Carcione и др. (2002), Virieux и др. (2011), Virieux and Operto (2009), Carcione и др. (2010) все существующие методы математического моделирования сейсмического волнового поля разделены на: 1) численные методы (метод конечных разностей, метод интегральных представлений, метод конечных элементов, метод конечных объёмов, граничные интегральные уравнения и т.п.); 2) приближённые аналитические методы (методы лучевого трассирования, геометрическая теория

дифракции, физическая теория дифракции и т.п.); 3) строгие аналитические методы (пространственно-спектральные методы, метод разложения на плоские волны, обобщённый лучевой метод, рефлективити-метод и т.п.). Численные методы широко используются в моделировании полного волнового поля, но характеризуются невозможностью его декомпозиции на элементарные волны, что важно для эффективного решения обратной задачи. Приближённые аналитические методы дают возможность вычислять волновые фрагменты полного волнового поля, но используют высокочастотное приближение, которого недостаточно для описания сложных дифракционных явлений. Строгие аналитические методы дают как полное волновое поле, так и разбиение его на волновые фрагменты. Однако в настоящее время эти методы развиты только для одномерно-неоднородных сред.

Методология и методы исследования. Методология исследования комбинирует методы математической физики, теории аппроксимации функций, линейной алгебры и информационных технологий. В диссертации использованы новые методы теории распространения волн в трёхмерно-неоднородных средах: 1) строгая теория операторов прохождения-распространения-дифрагирования (ТОПРД) (Klem-Musatov и др. (2005), Aizenberg и др. (2014), Aizenberg and Auzenberg (2015)); 2) метод наложения концевых волн (МНКВ), являющийся аппроксимацией ТОПРД для средних частот (Auzenberg и др. (2007), Auzenberg и др. (2009), Aizenberg и др. (2011)); 3) современные информационные технологии для реализации МНКВ в виде комплекса программ. ТОПРД даёт точное аналитическое решение прямой задачи для неоднородной среды с гладкими и кусочно-гладкими границами в специфических терминах математической теории волн (например, в акустике: пара продольных волновых амплитуд, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях). МНКВ является аппроксимацией ТОПРД в диапазоне конечных частот и позволяет имитировать как каждую волновую амплитуду, так и их отдельные волновые составляющие, приходящие от различных частей покрывающей среды и целевой области. При реализации МНКВ в виде программного комплекса МНКВ использованы современные информационные технологии в виде параллельных вычислений с использованием кластера из графических ускорителей.

Цель данной работы – разработка программного комплекса для кластера из графических ускорителей, реализующего алгоритм МНКВ для вычисления интерференционного волнового поля и его отдельных волновых компонент в акустических средах с границами сложной геометрической формы.

Научная новизна. Научная новизна работы характеризуется четырьмя пунктами:

1) Комбинирование ТОПРД и МНКВ разделяет решение прямой задачи и его вычисление на независимые процессы: строгое аналитическое решение прямой задачи получается в рамках ТОПРД, а вычисление готового аналитического решения или его отдельных волновых

фрагментов производится с помощью МНКВ. В итоге существенно ослаблены требования к алгоритму МНКВ: не требуется его сходимости, а его устойчивость обеспечивается аналитическими критериями, которые следуют из типа аппроксимаций формул ТОПРД.

2) ТОПРД представляет строгое решение прямой задачи в виде пары новых независимых операндов: волновых амплитуд a^{\pm} , распространяющихся во взаимно-встречных направлениях. МНКВ позволяет вычислять не только пару волновых амплитуд, но и их элементарные составляющие, которые находятся во взаимно-однозначном соответствии с порождающими их элементами неоднородной модели среды (отдельные границы, локальные области и т.п.). Это позволяет заменить эвристические элементы интерпретации полного волнового поля (интерференция этих компонент) вычислительными процедурами, которые могут существенно повысить разрешающую способность сейсмоки.

3) МНКВ аппроксимирует строгие операторы ТОПРД в виде матриц прохождения-распространения волнового поля внутри слоёв сложной формы, которые умножаются на вектор, составленный из волновых амплитуд a^+ и a^- . Матричный подход программного комплекса МНКВ позволяет вычислять передаточные волновые характеристики слоистой блоковой среды и её отдельных блоков без задания источников и приемников, что недостижимо при использовании других существующих методов линейной теории волн.

4) Программный комплекс МНКВ позволяет вычислять волновые амплитуды a^+ и a^- в средах с границами сложной геометрической формы, например, соляные купола, базальтовые траппы, рифовые структуры и т.д., в которых возникает эффект каскадной дифракции. Каскадная дифракция реализована в виде процедуры быстросходящегося матрично-степенного ряда, каждый следующий член которого является поправкой к предыдущему.

Теоретическая значимость работы обусловлена особенностями теоретических и алгоритмических концепций, реализованных в программном комплексе МНКВ:

1) строгое аналитическое решение прямой задачи акустики вычисляется в неклассическом виде пары волновых амплитуд, распространяющихся во взаимно-встречных направлениях, и их элементарных составляющих, которые находятся во взаимно-однозначном соответствии с порождающими их криволинейными границами неоднородной модели среды;

2) универсальность записи математического аппарата ТОПРД и алгоритмической структуры МНКВ позволяют обобщение на линейные гиперболические задачи математической физики для более сложных сред: 1) упругость, 2) пористо-упругие среды, 3) пористо-упругие среды с флюидо-газо-насыщением и т.п.

Практическая значимость работы обусловлена следующими особенностями применения программного комплекса МНКВ:

1) вычисление независимых волновых амплитуд в акустических моделях с произвольными криволинейными и кусочно-криволинейными границами (соляные тела, базальтовые слои, рифовые структуры и пр.);

2) возможность применения в качестве моделирующего ядра для решения обратной задачи сейсмологии с помощью послойного восстановления границ и материальных свойств;

3) возможность применения не только для сейсмических задач (декагерцовый диапазон), но и для других задач, использующих акустические волны: а) акустическое моделирование (килогерцовый и мегагерцовый диапазоны), б) сейсмология и ГСЗ (герцевый и децигерцовый диапазоны), в) методы неразрушающего контроля ультразвуком (килогерцовый и мегагерцовый диапазоны), г) ультразвук в медицине (мегагерцовый диапазон) и т.п.

Положения, выносимые на защиту, соответствуют пунктам 2, 3, 4 паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по техническим наукам:

1) Развитие аналитического метода исследования математической модели распространения акустических волновых полей в слоисто-блоковых средах со сложными границами (*пункт 2 паспорта*) в виде следующего результата:

i. Построена аппроксимация матричного интегрального оператора распространения волнового поля четырьмя матрицами, оптимально соединяющая аналитическое описание их элементов в виде элементарных функций с устойчивостью и точностью их численной реализации.

2) Разработка, обоснование и тестирование следующих эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий (*пункт 3 паспорта*):

i. Разработаны, оптимизированы и адаптированы для кластера из графических ускорителей алгоритмы вычисления и хранения данных программного комплекса МНКВ,

ii. Произведено тестирование алгоритма метода наложения концевых волн (МНКВ) и показана его точность и устойчивость на примерах численных экспериментов для моделей со сложными криволинейными и кусочно-криволинейными границами, порождающими каскадную дифракцию.

3) Реализация алгоритма метода наложения концевых волн (МНКВ) в виде комплекса программ МНКВ для вычисления отдельных волн интерференционного акустического волнового поля (*пункт 4 паспорта*).

Степень достоверности подтверждается следующими фактами:

1) Сравнение трёхмерных волновых полей, вычисленных упрощённой версией программного комплекса МНКВ без учёта каскадной дифракции и измеренных с помощью установки

Лаборатории механики и акустики Университета Aix-Marseille (г. Марсель, Франция), показывают высокую степень соответствия (Tantsereva и др. (2014), Favretto-Cristini и др. (2014)).

2) Высокая степень соответствия волновых полей, вычисленных программным комплексом МНКВ, наблюдается при сравнении с результатами математического моделирования аналитическим методом (М. Auzenberg и др. (2007)) и методом конечных разностей (Rakshaeva и др. (2015), А. Auzenberg и др. (2015)).

3) Программный комплекс МНКВ был представлен на конкурс «GPU: серьёзные ускорители для больших задач», организованный компанией NVIDIA и Московским государственным университетом им. М.И. Ломоносова, где занял первое место в номинации «Эффективное приложение» (декабрь 2013 г., г. Москва).

Апробация результатов. Результаты исследований автора докладывались и обсуждались на: трёх ежегодных международных конференциях и выставках «European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE)» в г. Копенгаген (Дания, 2012), г. Лондон (Великобритания, 2013) и г. Амстердам (Нидерланды, 2014); ежегодной Международной конференции и выставке «European Geosciences Union (EGU)» в г. Вена (Австрия, 2015); двух международных конференциях «The Joint International Conference on Human-Centered Computer Environments (HCCE-2012)» и «International Conference on Applications in Information Technology (ICAIT-2016)» в г. Айзу-Вакаматсу (Япония); Международном семинаре «Active and passive seismics in laterally inhomogeneous media (APSLIM)» в г. Прага (Чехия, 2015); международном коллоквиуме 584 «Multi-uncertainty and Multi-scale Methods and Related Applications» в г. Порто (Португалия, 2016); Девятой международной азиатской школе-семинаре «Проблемы оптимизации сложных систем» в г. Алматы (Казахстан, 2013); Третьей, Четвёртой, Пятой, Шестой и Седьмой Международных молодёжных научных школах-конференциях «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» в г. Новосибирск (Россия, 2011, 2012, 2013, 2015) и в г. Алматы (Казахстан, 2014); Международной конференции «Advanced Mathematics, Computations & Applications (AMCA)» в г. Новосибирск (Россия, 2014); Всероссийской конференции молодых учёных и студентов, посвящённой 80-летию академика А.Э. Конторовича, в г. Новосибирск (Россия, 2014); «VII Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов)» в г. Новосибирск (Россия, 2014); Всероссийской конференции «Геофизические методы исследования земной коры», посвящённой 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева в г. Новосибирск (Россия, 2014); 50-ой и 51-ой Международных научных студенческих конференциях «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2012 и 2013).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе **введение** приведены актуальность темы исследования, цели и задачи диссертационной работы, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора в полученные результаты.

В **разделе 1** проведён краткий аналитический обзор методов моделирования сейсмических (в том числе акустических) волновых полей. В **подразделе 1.1** описываются методы физического (натурного) моделирования. В **подразделе 1.2** описываются численные методы математического моделирования. В **подразделе 1.3** описываются аналитические методы математического моделирования. Приведены особенности отдельных методов, существенные для темы исследования диссертации.

В **разделе 2** описан метод наложения концевых волн (МНКВ) для акустических сред, который является аппроксимацией в конечном диапазоне временных частот теории операторов прохождения-распространения-дифрагирования (ТОПРД), которая приведена в объёме, необходимом для данного раздела, в **приложениях А и В**. В **подразделе 2.1** описаны принципы матричной аппроксимации интегральных операторов распространения и дифрагирования и композитного интегрального оператора прохождения-распространения в конечном диапазоне временных частот в форме суммы пучков концевых волн (ПКВ), основанных на формулах из **приложения В**. ПКВ, с помощью которых вычисляется давление, имеют вид:

$$\Delta K^{pv} \cong -\rho v (ikR) \frac{\Delta S}{4\pi R^2} e^{ikR}, \quad \Delta K^{pp} \cong (1-ikR) \cos\theta \frac{\Delta S}{4\pi R^2} e^{ikR}. \quad (1)$$

В **подразделе 2.2** приведён тест, подтверждающий корректность выбранной матричной аппроксимации интегральных операторов. Рассматриваются строгие равенства для давления и нормальной скорости частиц с матричным интегральным оператором ортогональной проекции в канонической модели среды при заданной конфигурации источника и приёмников (Рисунок 1). Строгое равенство для давления имеет вид:

$$K^{pv}(x, s) v_n^{(0)}(s) + K^{pp}(x, s) p^{(0)}(s) = -p^{(0)}(x), \text{ если } x < 4.0 \text{ иначе } 0. \quad (2)$$

Левая часть равенства (2), вычисленная программным комплексом МНКВ, показана на сейсмограмме (Рисунок 2), которая соответствует правой части этого равенства. Сумма этой сейсмограммы со сферической волной источника (Рисунок 3) показывает зануление всех амплитуд при $x < 4.0$ и положительную сферическую волну при $x > 4.0$. Это показывает хорошее качество (видимое на сейсмограммах) вычисления времён вступления и амплитуд волн. Сравнение амплитуд, вычисленных программным комплексом МНКВ и по элементарным аналитическим формулам, даёт количественные оценки относительной погрешности в амплитудах волн менее 1%.

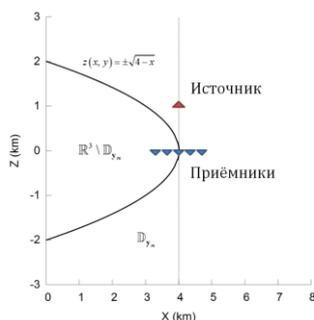


Рисунок 1. 2D сечение тестируемой модели.

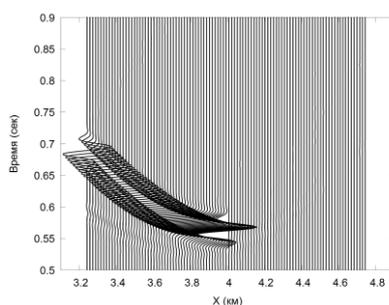


Рисунок 2. Волновое поле в приёмниках для модели на Рисунке 1.

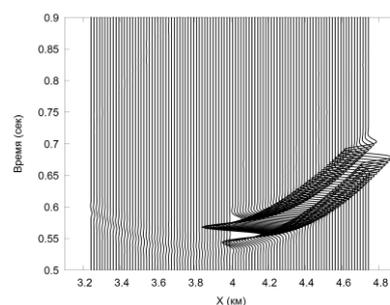


Рисунок 3. Сумма сейсмограммы Рисунок 2 и сферической волны.

В подразделе 2.3 приводится краткое описание алгоритма МНКВ: общая структура матриц среды и всех слоёв, схема пошагового умножения матриц на входные дискретные векторы, а также схема вычисления наборов векторов волновых амплитуд. Кратко намечен способ локализации пошагового умножения матриц при использовании алгоритма МНКВ в моделирующем ядре оптимизационного алгоритма обратной задачи.

Раздел 3 посвящён описанию программного комплекса МНКВ, реализующего метод наложения концевых волн для случая акустики, и разработке его вычислительных процедур. В подразделе 3.1 показана общая архитектура программного комплекса МНКВ, описаны его компоненты и показан пример задания геологической модели с помощью данного программного комплекса. В подразделе 3.2 описаны основные проблемы реализации программного комплекса МНКВ, возникающие на уровне требуемых вычислительных ресурсов и объёмов оперативной памяти для хранения данных алгоритма. Подраздел 3.3 содержит описание реализации компоненты программного комплекса *ИсточникГраница*, которая вычисляет волновое поле, распространяющееся от источника на границу модели, и представляет его в векторной форме. Подраздел 3.4 содержит описание реализации компоненты программного комплекса *ГраницаГраница*, которая вычисляет волновое поле, распространяющееся от предыдущей границы слоя на следующую в соответствии с заданным волновым кодом. Подраздел 3.5 содержит описание реализации компоненты программного комплекса *ГраницаПриёмники*, которая вычисляет волновое поле, распространяющееся от границы слоя в приёмники. В подразделе 3.6 рассмотрена реализация компоненты программного комплекса *МатрицаРаспространения*, которая представляет собой перемножение набора элементарных матриц распространения крупных размерностей на набор векторов для дискретных частот. Каждая матрица из набора заполняется по формулам ПКВ. Процедура заполнения матриц была оптимизирована, процедура перемножения матриц на векторы – адаптирована для параллельных архитектур. На Рисунке 4 показана схема адаптации перемножения набора элементарных матриц распространения на набор векторов для GPU-кластера. Каждому GPU

назначался набор полос матриц для их умножения на набор векторов. Для формирования набора преобразованных векторов все GPUs обменивались друг с другом результатами вычислений. Каждому GPU выделялся блок памяти для хранения только одной подматрицы из назначенного набора. Остальные подматрицы повторно использовали выделенный блок. На Рисунке 5 показан график зависимости производительности процедуры *МатрицаРаспространения* от числа задействованных GPUs в сравнении с идеальным случаем (линейная масштабируемость). В Таблице 1 показано время исполнения процедуры (реальный и идеальный случаи) в зависимости от числа задействованных GPUs для случая перемножения K матриц распространения размерности $N \times N$ на K векторов волнового поля размерности N , где $N = 112000$ и $K = 128$. Процедура *МатрицаРаспространения* является составной частью программного комплекса МНКВ и используется при вычислении физически реализуемых волновых полей, распространяющихся внутри слоёв модели.

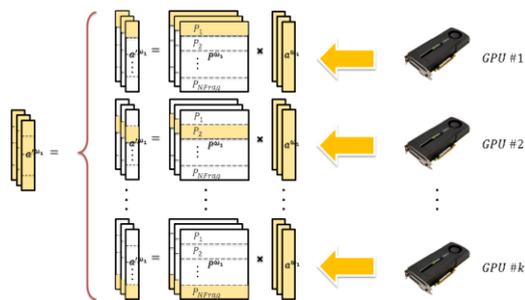


Рисунок 4. Схема реализации компоненты *МатрицаРаспространения* для GPUs.

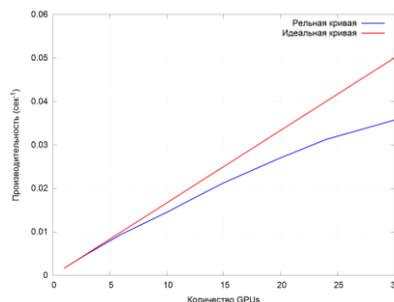


Рисунок 5. График масштабируемости компоненты *МатрицаРаспространения* для GPUs.

Таблица 1. Анализ масштабируемости компоненты *МатрицаРаспространения* программного комплекса МНКВ.

Количество GPUs	1	2	3	6	10	12	15	20	24	30
Время работы (сек)	600	302	204	106	69	58	47	37	32	28
Время работы, идеальный случай (сек)	600	300	200	100	60	50	40	30	25	20

В подразделе 3.7 описана реализация компоненты *МатрицаДифракции*, которая представляет собой перемножение набора матриц дифрагирования крупных размерностей на набор векторов. В подразделе 3.8 описаны принципы построения и оптимизации, а также тестирование целочисленной матрицы виртуальной тени границы слоя, позволяющей геометрически определять освещённые (значение элемента матрицы 0) и затенённые (значение 1) относительно друг друга элементы триангулированной границы слоя. На Рисунке 6 показана схема хранения матрицы тени, разрезанной на квадратные блоки. Жёлтые блоки заполняются по алгоритму расчёта матрицы тени, который использует оптическую аналогию. Белые блоки

заполняются путём транспонирования соответствующих жёлтых. Каждый блок сжимался по алгоритму, являющемуся вариацией алгоритма Run-length encoding (Storer, 1988), и сохранялся на жёсткий диск ЭВМ. Для случая границы типа «катушка» (Рисунок 7) показаны три вектора матрицы тени (Рисунок 8). Тёмные пятна соответствуют зонам, освещённым относительно красных точек, а светлые – затенённым. В Таблице 2 показаны результаты тестирования этого алгоритма для разных типов границ. Результаты исследований, описанные в данном подразделе, реализованы в компоненте *МатрицаТени* программного комплекса МНКВ. В подразделе 3.9 кратко описана схема вычисления преломления/отражения волнового поля на искривлённой границе. В подразделе 3.10 представлены расчётные формулы для оценки времени вычисления волновых полей для заданной модели геологической среды с помощью программного комплекса МНКВ, которые, в частности, используются в разделе 4 для оценки времени вычисления волнового поля для тестируемых моделей.

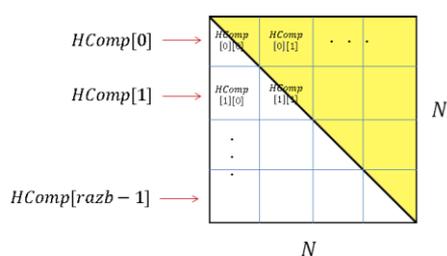


Рисунок 6. Алгоритм хранения матрицы тени.

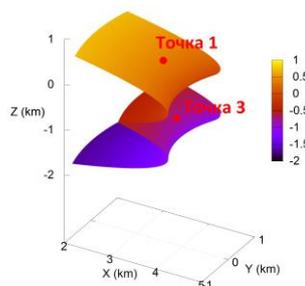


Рисунок 7. Граница типа «катушка».



Рисунок 8. Три вектора матрицы тени для границы «катушка».

Таблица 2. Результаты тестирования алгоритма построения матрицы тени для разных типов границ.

Тип границы	Количество элементов	Размер матрицы до сжатия	Размер матрицы после сжатия	Коэффициент сжатия	Время вычисления (мин) 2 GPUs	Время вычисления (мин) 4 GPUs	Время вычисления (мин) 6 GPUs	Время вычисления (мин) 12 GPUs
<i>Диск</i>	240 000	53,6 Гб	132 Мб	416	30	15	10	5
<i>Катушка</i>	240 000	53,6 Гб	419 Мб	131	28	15	10	5
<i>Вулкан</i>	252 000	59,1 Гб	90 Мб	673	31,3	15,8	10,5	5,5

Раздел 4 посвящён тестированию программного комплекса МНКВ. В подразделе 4.1 описываются результаты вычисления волнового поля в трёхмерных акустических блоковых и слоистых моделях среды с криволинейными и кусочно-криволинейными границами. Для всех моделей среды произведён анализ полученных сейсмограмм и приведены оценки времени вычисления с помощью программного комплекса МНКВ. В подразделах 4.1.1-4.1.7 рассматриваются модели двублоковой среды, которая имитирует соляное тело различной формы, контактирующее на границе с полупространством, заполненным песчаником. Части

границы между соляным телом и песчаником, вогнутые в соляное тело или песчаник, порождают интерференцию (наложение) волновых полей различного типа: отражённые и преломленные волны, однократные и многократные краевые волны от рёбер, каскадная дифракция на гладких частях границы, включая ползущие волны. В качестве примера рассмотрим сейсмограммы для двублоковой среды с границей клиновидной (Рисунок 9) и двуклинной (Рисунок 13) формы. Задан точечный источник и одна линия приёмников. На Рисунке 10 показано интерференционное поле первых вступлений в приёмниках на «линия 1». Оно состоит из двух волновых фрагментов, учитывающих каскадную дифракцию: поле источника, огибающее соляной клин (Рисунок 11); поле волны, двукратно преломленной сквозь соляной клин (Рисунок 12).

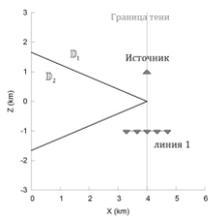


Рисунок 9. 2D сечение модели среды и система наблюдений.

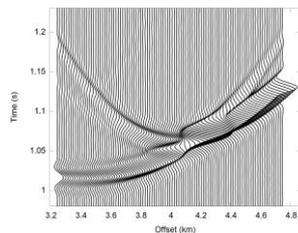


Рисунок 10. Интерференционное поле в приёмниках на «линия 1».

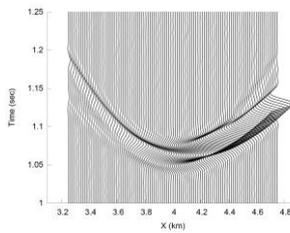


Рисунок 11. Поле источника в приёмниках на «линия 1».

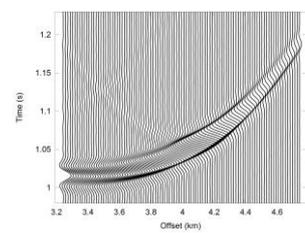


Рисунок 12. Двукратное преломление в приёмниках на «линия 1».

На Рисунке 14 показано интерференционное поле первых вступлений в приёмниках на «линия 2». В подразделе 4.1.8 рассматривается трёхмерная акустическая трёхслойная модель среды с включением диска высокоскоростного ангидрита в среднем слое галита. Высокоскоростное дисковое включение позволяет исследовать зоны дифракционной тени в преломленной волне под этим включением. Присутствие зон тени в наблюдаемых сейсмических данных резко понижает разрешающую способность алгоритмов решения обратной задачи сейсмологии. В подразделе 4.2 описываются результаты вычисления волновых амплитуд a^+ и a^- для границы двуклинной формы (Рисунок 13). Интерференционное поле (Рисунок 14) состоит из: 1) волновой амплитуды a^+ (Рисунок 15) краевой волны, распространяющейся от внутреннего ребра двуклинной границы, 2) волновой амплитуды a^- (Рисунок 16) волны, преломленной сквозь верхнюю грань внутрь соляного двуклина. В подразделе 4.3 описано сравнение синтетических сейсмограмм волнового поля, вычисленных программным комплексом МНКВ, с синтетическими сейсмограммами метода конечных разностей (МКР) на примере модели, показанной на Рисунке 9. Качественное сравнение интерференционного поля первых вступлений, вычисленного МНКВ (Рисунок 10), и полного волнового поля, смоделиро-

ванного МКР (Рисунок 17) показано в виде разности сейсмограмм на Рисунок 20. Количественное сравнение показано в виде: наложения пары трасс МНКВ и МКР для приёмников 3.75 км (Рисунок 18) и 4.75 км (Рисунок 19) и пары кривых коэффициентов дифракционного ослабления (КДО) амплитуды волны первого вступления (Рисунок 21), а также относительного отклонения КДО МНКВ от КДО МКР (Рисунок 22).

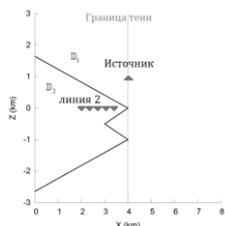


Рисунок 13. 2D сечение модели среды и система наблюдений.

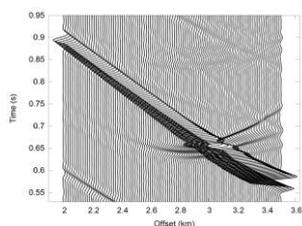


Рисунок 14. Интерференционное поле в приёмниках на «линия 2».

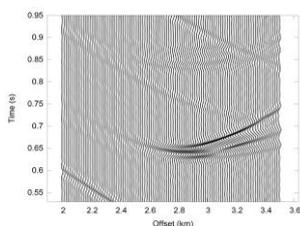


Рисунок 15. Волновая амплитуда a^+ в приёмниках на «линия 2».

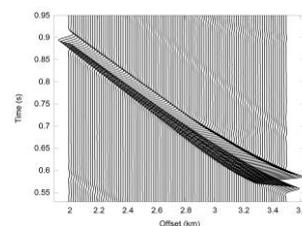


Рисунок 16. Волновая амплитуда a^- в приёмниках на «линия 2».

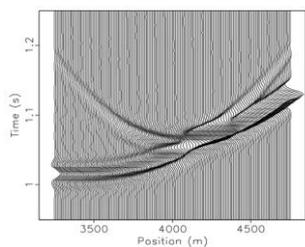


Рисунок 17. Полное волновое поле, смоделированное МКР.

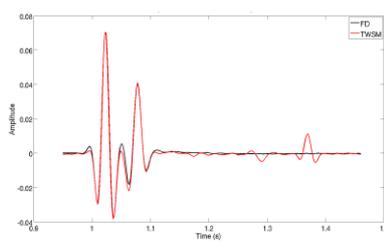


Рисунок 18. Наложение трасс МНКВ (красная) и МКР (чёрная).

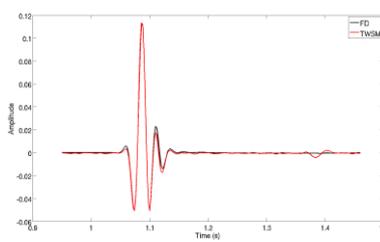


Рисунок 19. Наложение трасс МНКВ (красная) и МКР (чёрная).

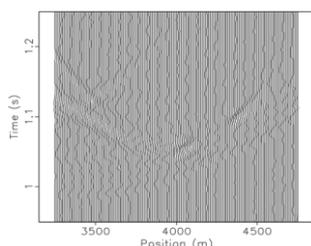


Рисунок 20. Разница сейсмограмм МНКВ и МКР.

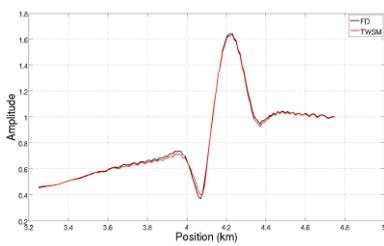


Рисунок 21. Наложение кривой КДО МНКВ на КДО МКР.

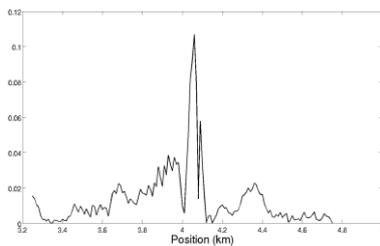


Рисунок 22. Относительное отклонение КДО МНКВ от КДО МКР.

В разделе **заключение** изложены основные итоги исследования по теме диссертации, полученные автором лично, даны некоторые рекомендации, вытекающие из полученных результатов, и намечены перспективы дальнейшей разработки темы.

Приложение А имеет реферативный характер. В нём описана постановка прямой задачи для акустической среды с однородными слоями и кусочно-криволинейными границами сначала в терминах механики сплошной среды, а затем в терминах теории операторов прохождения-распространения-дифрагирования (ТОПРД). Также кратко описано преобразова-

ние постановки прямой задачи в терминах математической теории волн в её аналитическое решение в терминах ТОПРД.

Приложение В имеет реферативный характер. В нём описана волновая структура матричных операторов и векторных операндов ТОПРД. Их волновая структура взаимнооднозначно отображает полный набор границ слоистой среды.

Приложение С имеет реферативный характер. В нём приводится верификация МНКВ посредством сравнения волновых полей, вычисленных упрощённой версией (без учёта каскадной дифракции) программного комплекса МНКВ, с лабораторными (натурными) данными, измеренными с помощью установки Лаборатории механики и акустики Марсельского университета (г. Марсель, Франция). Коэффициенты корреляции лабораторных и вычисленных трасс находятся в диапазоне от 0.9255 до 0.9745. Когда лабораторные трассы содержат каскадную дифракцию, коэффициенты корреляции уменьшаются до 0.8312 и менее.

В **приложении Д** представлено свидетельство о регистрации программного комплекса МНКВ в виде программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ (Роспатент).

В **приложении Е** представлен сертификат победителя конкурса «GPU: серьёзные ускорители для больших задач» в номинации «Эффективное приложение», проведённого совместно компанией NVIDIA и Московским государственным университетом им. М.И. Ломоносова (г. Москва, декабрь 2013 года).

В **приложении F** представлен документ, аналогичный акту о внедрении, который подтверждает использование программного комплекса МНКВ Лабораторией механики и акустики Университета Экс-Марсель (г. Марсель, Франция), и его перевод на русский язык.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги исследования по теме диссертации, полученные автором лично, заключаются в следующих пунктах:

1) Построена аналитическая аппроксимация композитного интегрального оператора пространства волнового поля суммой четырёх пучков концевых волн (ПКВ), оптимально соединяющая элементарные формулы с устойчивостью и точностью численной реализации.

2) Произведена реализация и оптимизация высокооптимизированного программного комплекса МНКВ для случая акустических сред: (а) численно реализованы аналитические формулы, описывающие каскадную дифракцию внутри слоёв; (b) численно реализована технология вычисления волновых амплитуд приходящих и отходящих волн от целевых границ; (с) разработаны и численно реализованы оптимизационные алгоритмы, ускоряющие вычисления программного комплекса МНКВ приблизительно в сто раз (по сравнению с исходным

прототипом 2011 года), а также, позволяющие запускать этот комплекс при любом имеющемся в свободном доступе объёме оперативной памяти ЭВМ; (d) произведена адаптация программного комплекса МНКВ на кластер из графических ускорителей, позволившая ускорить вычисление алгоритма в тысячи и более раз по сравнению с неадаптированной версией.

3) Произведена алгоритмическая и численная реализация процедуры построения семейства зон виртуальной тени на границах слоя. Достигнуты приемлемые объёмы памяти, требуемые для хранения матрицы виртуальной тени. Произведена оптимизация алгоритма и его адаптация для кластера из графических ускорителей и достигнуто увеличение производительности процедуры в сто и более раз.

4) Проверена точность, стабильность и эффективность программного комплекса МНКВ численными примерами для моделей акустической среды со сложными границами.

Исходя из полученных результатов, даны некоторые рекомендации по использованию существующей акустической версии программного комплекса МНКВ и её модернизации для решения обратных сейсмических задач, например, послойного восстановления материальных параметров и структуры границ геологических сред.

Используя перечисленные выше основные итоги исследования по теме диссертации и рекомендации, вытекающие из итогов исследования, намечены перспективы развития акустической версии программного комплекса МНКВ в двух направлениях: (a) на блоковые модели сред с границами сложной геометрической формы; (b) на изотропную и анизотропную упругость, упруго-пористость и затем упруго-пористо-флюидонасыщенность и т.д.

ОСНОВНОЙ СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Н.Ю. Зятьков, А.А. Айзенберг, А.М. Айзенберг. Высокооптимизированная реализация процедуры распространения волнового поля в трёхмерных геологических средах с адаптацией для GPU-кластера. Вестник НГУ Серия: Информационные технологии, Том 14, Выпуск №2 (2016), с. 38-51.
2. Н.Ю. Зятьков, А.А. Айзенберг. Высокооптимизированная реализация вычисления матрицы тени для моделирования каскадной дифракции в геологических слоях. Вестник НГУ Серия: Информационные технологии, Том 14, Выпуск №2 (2016), с. 17-37.
3. Свидетельство № 2015662020. Высокооптимизированный программный комплекс МНКВ для дифракционного моделирования // Зятьков Н.Ю., Айзенберг А.А., Айзенберг А.М.; Федеральная служба по интеллектуальной собственности РФ (Роспатент) – заявка № 2015617805, дата поступления 25 августа 2015 г, зарегистрирована 16 ноября 2015.
4. Зятьков, Н.Ю., Айзенберг, А.А., Айзенберг, А.М., Романенко, А.А. Вычисление на GPUs волнового поля в трехмерных геологических средах методом наложения концевых волн, глава 2.2, стр. 66-87 // Математическое моделирование и программная модель CUDA: учебное пособие / А. В. Снытников, А. С. Колганов, Н. Н. Попова. – Москва: МАКС Пресс, 2018. – 176 с. – (Суперкомпьютерное образование). ISBN 978-5-317-05911-8.

5. Zyatkov N., Romanenko A., Ayzenberg A.A., Aizenberg A.M., and Andersson F. Modeling of seismic waves in layers with shadow boundaries in terms of unsparse propagation-absorption matrices: realization and optimization. The Join International Conference on Human-Centered Computer Environments, March 8-13, 2012, Aizu-Wakamatsu & Hamamatsu, Japan, pp. 101-105.
6. Zyatkov N., Ayzenberg A., Aizenberg A.M., Romanenko A., and Andersson F. Modeling of cascade diffraction in terms of unsparse propagation-absorption matrices – realization and optimization for GPU. Extended Abstracts, 74th EAGE Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012, P288.
7. Ayzenberg A.A., Aizenberg A.M., Zyatkov N.Y., and Andersson F. Single-diffraction approximation of the feasible Green's function in geometrical shadow zones. Extended Abstracts, 74th EAGE Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012, P287.
8. Zyatkov N., Ayzenberg A., Aizenberg A.M., and Romanenko A. Highly-optimized TWSM Algorithm for Modeling Cascade Diffraction in Terms of Propagation-absorption Matrices. Extended Abstracts, 75th EAGE Conference and Exhibition, London, England, 10-13 June 2013, Th-P02-11.
9. A. Ayzenberg, N. Zyatkov, A. Stovas, and A.M. Aizenberg. Double-diffraction Approximation of the Feasible Green's Function in Geometrical Shadow Zones. Extended Abstracts, 75th EAGE Conference and Exhibition, London, England, 10-13 June 2013, Th-P02-10.
10. A.A. Ayzenberg, N. Zyatkov, A. Stovas, A.M. Aizenberg. Subsalt Illumination by the Feasible Green's Function of Covering Sediments. EAGE/SPE Workshop on Subsalt Imaging. The Challenges of Subsalt Exploration and Imaging in Deep Water of the Middle East and North Africa. Limassol, Cyprus, 16-19 February 2014, SS09.
11. A.A. Ayzenberg, N.Y. Zyatkov, A. Stovas, A.M. Aizenberg. The Feasible Near-front Wavefield Below Salt Overhang in Terms of Cascade Diffraction. Extended Abstracts, 76th EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, Netherlands, 16-19 June 2014, We P06 06.
12. A.M. Aizenberg, N.Y. Zyatkov, A.A. Ayzenberg, E.Z. Rakshaeva. New concepts of the transmission-propagation operator theory in seismic diffraction modeling and interpretation. Extended Abstracts, 76th EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, Netherlands, 16-19 June 2014, We P06 07.
13. Н.Ю. Зятьков, А.А. Айзенберг, Е.Ж. Ракшаева, А.М. Айзенберг. Прототип высокооптимизированного пакета TWSM для дифракционного моделирования сейсмических волновых полей с адаптацией под GPU-кластер. Журнал «Сибирские электронные математические известия» в «Труды V международной молодежной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач"», Том 11, с. 35-40 (2014).
14. Ракшаева Е.Ж., Зятьков Н.Ю., Нефедкина Т.В., Айзенберг А.М. 3D моделирование волновых полей, отраженных от криволинейных границ, методом МНКВ с модифицированным коэффициентом отражения. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., Новосибирск, Россия, 16–18 апреля 2014 г., Т. 3, с. 37-42.
15. N. Zyatkov, A.A. Ayzenberg, K.O. Omosanya, A. Romanenko, A.M. Aizenberg. Evaluation of diffracted wavefields below the salt stringer using the transmission-propagation operator theory and TWSM software package. Proceedings of the 2nd International Conference on Applications in Information Technology (ICAIT-2016), October, 6-8, 2016, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan, p. 21-24.
16. Lavrentiev, M., Romanenko, A., Zyatkov, N., Ayzenberg, A., Aizenberg, A. Modern hardware facilities to accelerate seismic data processing. Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, V. 18, Issue 1.5. 3-6, Vienna, Austria, 2018, pp. 171-178.