

УТВЕРЖДАЮ
Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института геофизики
им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
к.т.н.
Козлова Ирина Анатольевна
“ 17 ” 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Зятькова Николая Юрьевича

«Разработка и оптимизация программного комплекса для дифракционного моделирования сейсмических волн с адаптацией под графические ускорители»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность.

Диссертационная работа посвящена **безусловно актуальной проблеме** аналитического описания распространения сейсмических волновых полей в трёхмерных средах со сложными границами.

Цель работы – создание программного комплекса для кластера из графических ускорителей, реализующего алгоритм метода наложения конечных волн (МНКВ) для вычисления интерференционного волнового поля и его отдельных волновых компонент в акустических средах с границами сложной геометрической формы.

Общая характеристика работы.

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка работ, опубликованных по теме диссертации, списка литературы и шести приложений.

Во **введении** автор описывает актуальность, степень разработанности, методологию и методы исследования, цель и научную новизну, теоретическую и практическую значимость диссертационной работы. Автор указывает свой личный вклад, положения, выносимые на защиту, степень достоверности работы, даёт ссылки на опубликованные им работы и список конференций, на которых докладывались результаты исследования.

В **первом** разделе приводится краткий обзор существующих методов сейсмического моделирования в виде трёх групп: методы физического (лабораторного) моделирования, численные и аналитические методы. Проведено сравнение существующих методов и описаны их преимущества и недостатки.

Во **втором** разделе приведено описание акустической версии метода наложения концевых волн (МНКВ), который является аппроксимацией теории операторов прохождения-распространения-дифрагирования (ТОПРД). Краткое описание ТОПРД для случая акустических сред приводится в приложениях А и В диссертации.

Описаны также основные принципы матричных аппроксимаций операторов ТОПРД: поверхностного интегрального оператора распространения, поверхностного интегрального оператора дифрагирования и композитного оператора прохождения-распространения волн для отдельного слоя слоистой среды. В частности, в диссертации предложен оригинальный способ равномерной матричной аппроксимации операторов распространения и дифрагирования.

Ранее используемые в упрощённой версии МНКВ аппроксимации операторов распространения $K^{vv}(s^j, s^l)$, $K^{vp}(s^j, s^l)$, $K^{pv}(s^j, s^l)$, $K^{pp}(s^j, s^l)$ не учитывали возможные бесконечно малые удаления $R = |s^j - s^l|$, возникающие при вычислении каскадной дифракции, порождаемой на вогнутых частях границ слоя. В диссертации получены равномерные матричные аппроксимации операторов распространения $K^{vv}(s^j, s^l)$, $K^{vp}(s^j, s^l)$, $K^{pv}(s^j, s^l)$, $K^{pp}(s^j, s^l)$ по параметру R следующим способом:

1. Граница S , область определения операторов $K^{vv}(s^j, s^l)$, $K^{vp}(s^j, s^l)$, $K^{pv}(s^j, s^l)$, $K^{pp}(s^j, s^l)$, разбивается на N малых треугольников.
2. Операторы $K^{vv}(s^j, s^l)$, $K^{vp}(s^j, s^l)$, $K^{pv}(s^j, s^l)$, $K^{pp}(s^j, s^l)$ представляются в виде четырёх матриц K^{vv} (скорость-скорость), K^{vp} (скорость-давление), K^{pv} (давление-скорость) и K^{pp} (давление-давление) элементарных операторов распространения волн ΔK^{vv} , ΔK^{vp} , ΔK^{pv} , ΔK^{pp} от одного малого криволинейного треугольника ΔS^l границы S до другого треугольника ΔS^j границы S .
3. Когда точка вычисления s^j не сближается с ΔS^l , все операторы ΔK^{vv} , ΔK^{vp} , ΔK^{pv} , ΔK^{pp} не содержат сингулярных точек и вычисляются с помощью теоремы о среднем значении интеграла (следствие теоремы Лагранжа). Подынтегральная функция в ΔK^{vv} , ΔK^{pv} , ΔK^{pp} и регулярной части ΔK^{vp} фиксируется в центральной точке треугольного элемента. Подынтегральная функция в гиперсингулярной части ΔK^{vp} – в точке, отличной от центра треугольного элемента. Оригинальность результата в том, что автор определяет эту точку по явным формулам, добиваясь высокой точности вычисления гиперсингулярной части ΔK^{vp} с помощью теоремы о среднем значении.
4. Когда точка вычисления s^j сближается с ΔS^l для интегралов ΔK^{vv} , ΔK^{pv} , ΔK^{pp} и регулярной части ΔK^{vp} , применяется метод эквивалентного контурного интеграла. Для гиперсингулярной части ΔK^{vp} применяется свойство ортогональной проекции оператора распространения $\sum_{\{s^l\}} [K^{vv}(s^l) v(s^l) + K^{vp}(s^l) p(s^l)] = 0$.

В разделе демонстрируется тестовый пример, подтверждающий корректность полученной аппроксимации, а также описан алгоритм МНКВ, определяющий структуру матриц и последовательность их умножений друг на друга для слоистой среды для вычисления волнового поля и его отдельных фрагментов.

Третий раздел посвящён описанию архитектуры программного комплекса МНКВ, его отдельных компонент, алгоритмов, проблем их численной реализации, а также анализу производительности программного комплекса.

Вычисления волновых полей с помощью программного комплекса МНКВ сводятся к многократным матрично-векторным операциям больших размерностей. Алгоритм МНКВ использует плотные большеразмерные (порядка 10^5 - 10^6) матрицы, для обработки которых требуются большие вычислительные ресурсы и большие объёмы оперативной памяти (порядка 10^0 - 10^3 Тб) для их хранения.

Описана реализация основных блоков программного комплекса МНКВ:

- «ИсточникГраница» – схема вычисления волнового поля источника на границах заданного слоя.
- «ГраницаГраница» – схема вычисления волнового поля, распространяющегося с предыдущей границы на следующую границу заданного слоя.
- «ГраницаПриёмники» – схема вычисления волнового поля, распространяющегося с границы слоя в приёмники.

Отдельно рассмотрена реализация и оптимизация следующих компонент программного комплекса МНКВ:

- «МатрицаРаспространения» и «МатрицаДифрагирования» – схема заполнения и перемножения большеразмерных матриц на векторы для каждой дискретной частоты, используемые для вычисления физически-реализуемых волновых полей, распространяющихся внутри заданного слоя.

- «МатрицаТени» – заполнение и сжатие большеразмерной матрицы из нулей и единиц для определения освещённых и затенённых относительно друг друга элементов заданной криволинейной дискретизированной границы слоя. Данная компонента участвует при реализации компоненты «МатрицаДифрагирования» и необходима для вычисления дифракционных волн внутри заданного слоя.

Эти компоненты являются составными частями перечисленных выше блоков. Автором представлены оригинальные алгоритмы ускорения вычисления компонент «МатрицаРаспространения», «МатрицаДифрагирования» и «МатрицаТени» как за счёт алгоритмической реализации, так и за счёт переноса их на параллельные архитектуры. В частности, произведена реализация этих компонент для GPU-кластера и получено ускорение в 135 раз на одном GPU NVIDIA Tesla C2070 по сравнению с неоптимизированной последовательной версией, реализованной для 1 ядра процессора Intel Xeon E5630 и ускорение в 3471 раз при запуске программы на 30 GPU NVIDIA Tesla C2070. Проведён анализ масштабируемости компонент, в зависимости от количества задействованных GPU. Также автором разработаны алгоритмы хранения данных МНКВ при наличии ограниченных ресурсов оперативной памяти ЭВМ, что позволило программным комплексом МНКВ производить вычисления при наличии фиксированного объёма оперативной памяти ЭВМ.

В четвёртом разделе диссертации автор описывает тестирование программного комплекса МНКВ на 8 трёхмерных акустических моделях сред, содержащие криволинейные, кусочно-криволинейные и кусочно-плоские границы, порождающие дифракционные и ползущие волны. Большинство моделей имитируют высокоскоростные соляные тела канонической формы, включённые в песчаник. Модель 8 имитирует прослойку ангидридного диска в среде галита. Показаны высокая точность сейсмограмм (используя аналитические оценки, полученные для канонических моделей в статьях из списка литературы диссертации), а также возможность производить их декомпозицию на отдельные волновые составляющие (дифракционные волны, ползущие, отдельные отражённые и преломленные волны, отдельные акты каскадной дифракции).

Автор также сравнивает волновые поля, вычисленные программным комплексом МНКВ с волновыми полями, смоделированными методом конечных разностей для высокоскоростного акустического клина с раствором угла 45° , имитирующего соляной выступ, внутри низкоскоростного акустического полупространства, имитирующего песчаник. Показана приемлемая точность сейсмограмм и отдельных трасс МНКВ.

В приложении Е также показано сравнение волнового поля вычисленного с помощью программного комплекса МНКВ и волнового поля полученного лабораторной установкой университета Марселя (Франция). Показано хорошее совпадение вычисленных и лабораторных трасс по амплитуде и форме импульса волны.

В заключении диссертационной работы представлены основные результаты и подведены итоги исследования. Представлен план дальнейшего его развития.

Научная новизна работы и основных результатов.

В диссертационной работе были использованы новые подходы для исследования распространения волн в трёхмерных неоднородных средах со сложными границами:

1) теория операторов прохождения-распространения-дифрагирования (ТОПРД), дающая точное аналитическое решение прямой задачи для неоднородной среды с произвольными гладкими и кусочно-гладкими границами;

2) метод наложения концевых волн (МНКВ), являющийся аппроксимацией ТОПРД;

3) современные информационные технологии для реализации МНКВ в виде программного комплекса.

Научная новизна работы обусловлена следующими возможностями программного комплекса МНКВ:

1) позволяет вычислять по аналитическим формулам каскадную дифракцию, которая порождается на выпуклых частях криволинейных и кусочно-криволинейных границ, что даёт возможность использовать программный комплекс МНКВ для вычисления волновых полей в средах с границами сложной геометрической формы (соляные купола, рифовые структуры, базальтовые траппы и т.д.);

2) вычисление отдельных волновых составляющих, порождённых элементами модели среды (отдельными границами, локальными областями и т.п.), позволяет заменить эвристическую процедуру интерпретации полного волнового поля, которая необходима для повышения разрешающей способности решения обратной задачи сейсмологии;

3) позволяет представлять волновое поле на элементах модели среды (отдельных границах, приёмниках и пр.) в виде пары волновых мод a^+ и a^- , распространяющихся во взаимно-встречных направлениях, что даёт возможность не использовать эвристические процедуры подавления кратных волновых полей;

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

1) Универсальность записи математического аппарата ТОПРД и алгоритмической структуры МНКВ позволяют выполнить обобщение на линейные гиперболические задачи математической физики для более сложных сред: упругость, пористо-упругие среды и т.п.

2) 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.

Практическая значимость работы состоит в том, что программный комплекс МНКВ можно применять

1) для вычисления независимых волновых амплитуд в акустических моделях с произвольными криволинейными и кусочно-криволинейными границами (соляные тела, базальтовые слои, рифовые структуры и пр.), т.е. использовать для решения задач, возникающих при поисках нефтяных месторождений;

2) для других (несеismicких) 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.

Программный комплекс МНКВ используется Лабораторией механики и акустики Университета Марсея (Франция) для сравнения волновых полей, полученных с помощью натуральных экспериментов с волновыми полями, вычисленными программным комплексом МНКВ.

Соответствие специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки), так как в диссертации рассматриваются вопросы применения математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем:

– **пункту 2** «развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей» относится оптимальная аналитическая аппроксимация поверхностного интегрального оператора распространения в слоях посредством аналитико-численных исследований;

–**пункту 3** «разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» относятся:

1) разработка алгоритма адаптации программного комплекса МНКВ для графических ускорителей, позволившие производить вычисления с помощью данного комплекса в 1000 и более раз быстрее, по сравнению с неоптимизированной версией;

2) разработка алгоритмов программной оптимизации, позволившие запускать программный комплекс МНКВ для заданного фиксированного объёма оперативной памяти ЭВМ;

3) верификация алгоритма МНКВ посредством его тестирования для моделей со сложными криволинейными и кусочно-криволинейными границами, порождающими каскадную дифракцию.

–**пункту 4** «реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» относится реализация алгоритма метода наложения концевых волн (МНКВ) в виде комплекса программ МНКВ для вычисления фрагментов волнового поля (отражённые, преломленные, головные и дифракционные волны) в виде пар «скорость частиц – давление» или пар волновых амплитуд « a^+ - a^- » в акустических средах со сложными границами.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов подтверждается

–соответствием волновых полей, вычисленных с использованием программного комплекса МНКВ, натурным экспериментам, выполненным Лабораторией механики и акустики Университета Марсея (Франция) для трёхслойной модели «Марсель»;

–соответствием волновых полей, вычисленных с использованием программного комплекса МНКВ, волновым полям, вычисленным с помощью метода конечных разностей для модели «Клин».

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 1-е место в номинации «Эффективное приложение».

Результаты по теме диссертации с исчерпывающей полнотой изложены в 31 публикации и главе в учебном пособии, в том числе:

- 2 работы опубликованы в журнале из списка ВАК,
- 10 - изданы в трудах международных конференций, которые индексируются базой данных Scopus,
- одна - в трудах международной конференции, которая цитируется базой данных РИНЦ,
- 16 публикаций - в тезисах международных и российских конференций. Программа для ЭВМ (программный комплекс МНКВ) зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент),

По содержанию диссертации имеются следующие замечания.

1) Непонятны перспективы применения предлагаемого алгоритма для сколь-нибудь реалистичных моделей сред, интересных в геофизическом приложении, таких как наиболее популярные у специалистов Sigsbee model или SEG/EAGE Overthrust model (которые имеются в свободном доступе и предназначены для верификации и тестирования новых алгоритмов).

2) В разделе 3 автор описывает схему вычисления волновых полей методом наложения концевых волн, реализованную в программном комплексе. В формулах (3.1), (3.3), (3.4), (3.6), (3.7), (3.11), (3.12) показаны матричные схемы вычисления каскадной дифракции в виде бесконечных рядов дифракционных поправок. В работе не указана скорость сходимости таких рядов и количество итераций суммирования ряда, которое необходимо произвести для получения дифракционной волны с приемлемой точностью.

Заключение.

Диссертационная работа Н.Ю. Зятькова «Разработка и оптимизация программного комплекса для дифракционного моделирования сейсмических волн с адаптацией под графические ускорители» является научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискания учёной степени кандидата наук, установленными «Положением о порядке присуждения ученых степеней», а её автор Зятьков Николай Юрьевич заслуживает присуждения **учёной степени кандидата технических наук** по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертация и отзыв рассмотрены и обсуждены на семинаре лаборатории математической геофизики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН (12 марта 2020 г., протокол № 2), направление научно-исследовательской деятельности которой соответствует тематике представленной диссертации. Отзыв подготовлен на основании заключения этой лаборатории и одобрен в качестве официального отзыва Института.

Сведения о ведущей организации.

Наименование: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук

Почтовый адрес: Российская Федерация, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100

Сайт: <http://igfuran.ru>

E-mail: igfuran@mail.ru

Телефон: (343) 267-88-68

Факс: (343) 267-88-72

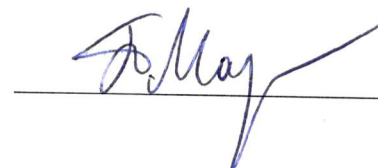
Отзыв составил:

Зав. лабораторией Математической геофизики
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института геофизики им.
Ю.П. Булашевича Уральского отделения
Российской академии наук,
член-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н. по
специальности 25.00.10 – «Геофизика,
геофизические методы поисков полезных
ископаемых»

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100,
тел. (343) 267-88-83

e-mail: pmart3@mail.ru

Мартышко Петр Сергеевич



“12” марта 2020 г.