

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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 темы исследования.

Современная теоретическая сейсмика сталкивается с проблемой эффективного восстановления материальных и геометрических параметров геологических сред со сложной структурой. В природе это могут быть соляные тела, рифовые структуры, базальтовые слои и др. В таких средах на вогнутых частях сложных границ порождается многократная дифракция, ползущие волны, головные волны и другие сложные эффекты.

Среди существующего многообразия методов сейсмического моделирования лишь численные методы позволяют моделировать полное волновое поле для сложных геологических сред (многослойных, неоднородных, со сложными границами). Однако они не позволяют производить декомпозицию этого поля на отдельные составляющие, что необходимо для эффективного решения обратной задачи сейсмики.

В диссертационной работе автор рассматривает новую теорию операторов прохождения-распространения-дифрагирования (ТОПРД), дающую точное аналитическое решение прямой задачи для трёхмерных неоднородных сред с произвольными криволинейными и кусочно-криволинейными границами, а также метод наложения концевых волн (МНКВ), являющийся аппроксимацией ТОПРД.

Работа посвящена исследованию и развитию МНКВ, а также разработке, оптимизации и тестированию программного комплекса, реализующего МНКВ, с использованием кластера из графических ускорителей.

Содержание диссертации.

Во введении автор описывает актуальность диссертационной работы, методологию и методы исследования, с помощью которых решалась поставленная задача, научную новизну, практическую и теоретическую значимость работы, а также личный вклад, внесённый в результаты, выносимые автором на защиту.

В **первом** разделе автор приводит аналитический обзор, а также краткую историю развития существующих методов моделирования сейсмических волн. Приведён краткий обзор методов физического (лабораторного) моделирования, численных и аналитических методов. Проведено сравнение численных и аналитических методов по пяти параметрам, представляющих интерес для инженеров-сейсмологов: 1) скорость вычислений (моделирования), 2) сложность среды (количество блоков или слоёв модели, сложность геометрических форм границ), 3) возможность расщепления полного волнового поля на отдельные элементарные волны, 4) возможность моделирования в среднечастотном диапазоне, 5) возможность вычислений без задания источника и приёмников сейсмических волн.

Во **втором** разделе описаны принципы матричной аппроксимации теории операторов распространения-прохождения-дифрагирования (ТОПРД). Рассмотрены принципы аппроксимации базовых операторов ТОПРД:

- 1) поверхностного интегрального оператора распространения типа Кирхгофа, распространяющего волновое поле с одной границы слоя на другую;
- 2) конволюционного оператора прохождения (отражения или преломления), отражающего или преломляющего волновое поле на границе слоя;
- 3) поверхностного интегрального оператора дифрагирования, позволяющего учитывать дифракцию, порождающуюся на границе слоя.

В данном разделе предложена оригинальная аппроксимация поверхностных интегральных операторов типа Кирхгофа (операторы распространения и операторы дифрагирования), равномерная по трём пространственным координатам и частоте, которая позволяет:

- 1) представить криволинейную границу в виде набора треугольных сегментов с поперечником менее четверти доминантной длины волны;
- 2) применить одноточечную схему вычисления элементарных поверхностных интегралов со слабо-, сильно- и гипер-сингулярными ядрами на всех треугольных сегментах дискретизованной границы.

В итоге, каждый из четырех интегральных операторов отображен в матрицу, скалярные элементы которых автор называет пучками концевых волн, а их граничные значения – в векторы. Скалярные элементы матриц, расположенные вне главной диагонали, вычисляются по теореме о среднем значении интеграла (следствие теоремы Лагранжа):

- 1) на диагоналях, соседних к главной, значение гипер-сингулярного слагаемого ядра оператора фиксируется в виртуальной точке сегмента;
- 2) значения всех остальных слабо- и сильно-сингулярных слагаемых – в центральной точке сегмента.

Скалярные элементы матриц, расположенные на главной диагонали, также вычисляются аналитически:

- 1) значения операторов с ядрами из слабо- и сильно-сингулярных слагаемых вычисляются редукцией поверхностных интегралов к эквивалентным контурным интегралам с последующим приближенным интегрированием;
- 2) значения оператора с ядром из гипер-сингулярного слагаемого вычисляются с помощью свойства ортогональной проекции оператора распространения типа Кирхгофа.

С помощью численных тестов показано, что предложенная аппроксимация позволяет удовлетворить свойство ортогональной проекции матричного оператора распространения с относительной амплитудной погрешностью менее 1% по отношению к амплитуде граничного значения.

В данном разделе также описан метод наложения концевых волн (МНКВ), являющийся аппроксимацией ТОПРД для средних частот. Этот метод определяет структуру матриц и порядок их вычислений и умножений друг на друга в слоистой модели среды. Приведена специфика нового метода МНКВ в сравнении с существующими численными и аналитическими методами решения прямой задачи.

В **третьем** разделе автор описывает реализацию МНКВ в виде комплекса программ, оптимизацию кода, а также адаптацию его на кластер из графических ускорителей с целью увеличения производительности и эффективности программы. Данный раздел разбит на подразделы, где подробно описывается каждая компонента программного комплекса МНКВ – «ИсточникГраница», «ГраницаГраница», «ГраницаПриёмники», «МатрицаРаспространения», «МатрицаДифракции», «МатрицаТени». В подразделе 3.6 уделено повышенное внимание оптимальной реализации базовой компоненты «МатрицаРаспространения», которая реализует умножение большеразмерной матрицы распространения и вектора волнового поля на грани слоя для набора дискретных частот.

Последовательно показан процесс оптимизации кода для этой компоненты: на уровне алгоритма, а также перенос данной процедуры сначала на один графический ускоритель, а затем на набор графических ускорителей (GPU-кластер). Автору удалось ускорить данную процедуру с 27 часов на однопроцессорной машине без оптимизации кода до 28 секунд для GPU-кластера с 30-ю графическими ускорителями. Приведена кривая масштабируемости программного комплекса – зависимость производительности программного комплекса от задействованного количества GPUs. Также показан процесс оптимизации хранения большемерных матриц распространения МНКВ. Автор предлагает делить их на полосы такой высоты, что объём имеющейся в наличии памяти графического ускорителя позволял бы хранить одну такую полосу.

В отдельном подразделе 3.8 описаны принципы построения и оптимизации, а также тестирование целочисленной матрицы виртуальной тени границы слоя, позволяющей геометрически определять освещённые и затенённые относительно друг друга элементы триангулированной границы слоя. Данная матрица используется для вычисления каскадной дифракции, порождающейся на границе сложной формы. Автором предложен оптимальный алгоритм вычисления данной матрицы, сжатия и хранения её в памяти ЭВМ.

В **четвёртом** разделе приведены результаты тестирования программного комплекса МНКВ для акустических моделей сред, составленных из однородных областей с криволинейными и кусочно-криволинейными границами (модели, имитирующие соляной выступ, окружённый песчаником, а также модель слоистой среды, содержащей ангидритную прослойку в форме диска). Выпуклые части границ, а также края границ данных моделей порождают сложные волновые поля: дифракционные и ползущие волны. Показаны результаты вычисления данных волновых полей, а также возможность МНКВ производить декомпозицию этих волновых полей на отдельные составляющие. В отдельном подразделе 4.3 произведено сравнение вычисления волнового поля с помощью программного комплекса МНКВ и метода конечных разностей (МКР) на примере моделирования волнового поля в двуслойной модели, имитирующей трёхмерный соляной клиновидный выступ в песчанике. Показана приемлемая точность сейсмограмм и отдельных трасс МНКВ.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются высоким соответствием волновых полей, вычисленных с помощью программного комплекса МНКВ, волновым полям полученным:

- 1) ультразвуковым моделированием в трёхслойной модели «Марсель» (в рамках совместного проекта с Лабораторией механики и акустики Университета Aix-Marseille, г. Марсель, Франция и Норвежским университетом науки и технологии, г. Тронхейм, Норвегия);
- 2) методом конечных разностей (МКР) в частной модели клиновидного соляного выступа в осадках (совместно с Норвежским университетом науки и технологии, г. Тронхейм, Норвегия);
- 3) вычислением по аналитическим формулам теории дифракции в частных случаях модели среды (совместно с Норвежским университетом науки и технологии, г. Тронхейм, Норвегия).

Полнота опубликования результатов диссертации, соответствие автореферата содержанию диссертации.

Основные результаты диссертационной работы изложены в 31 печатном издании, в числе которых 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов диссертации, 1 свидетельстве о регистрации программного комплекса МНКВ и 1 учебном пособии в виде отдельной главы. Автореферат достаточно полно отражает все основные положения диссертационной работы. Результаты работы докладывались на

многих международных и всероссийских конференциях, а также на научных семинарах.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- 1) Программный комплекс, разработанный автором, позволяет учитывать каскадную дифракцию для слоёв с произвольными криволинейными и кусочно-криволинейными границами, вычисляемую по аналитическим формулам.
- 2) Аналитическое представление решения прямой задачи позволяет производить декомпозицию полного волнового поля на элементарные волны, отождествляя каждую волну с элементами модели среды (отдельная грань слоя, отдельная локальная область слоя и пр.), что позволяет заменить эвристику в процедуре интерпретации на строго обоснованные формулы и более эффективно решать обратную задачу с помощью оптимизационных методов.
- 3) Аналитическое представление решения прямой задачи позволяет представлять решение как в виде полного волнового поля «давление-скорость частиц», так и в виде пары волновых мод a^+ и a^- , распространяющихся во взаимно-встречных направлениях. Теоретический аппарат таких мод может быть использован для решения проблемы подавления кратных волновых полей.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного программного комплекса в качестве моделирующего ядра для решения обратной задачи сейсмоки с целью поиска нефтегазовых скоплений в сложно исследуемых геологических структурах (например, под структурой «соляной купол»).

По материалам диссертации имеются следующие замечания:

- 1) Соискатель не обращает внимание на наличие артефактов, связанных с урезанием размеров моделей среды. Такие артефакты отчётливо видны на сейсмограммах в разделе 4 (например, в подразделе 4.1.5 на рисунках 4.39-4.40 и в подразделе 4.1.7 на рисунках 4.54-4.63).
- 2) Для тестирования программного комплекса, разработанного автором диссертации, использовано 8 моделей сред, которые относятся к классу канонических (простых) моделей. Хотя выбор примитивных моделей и обосновывается специфическими особенностями метода вычислений, но хотелось бы видеть также примеры работы программного комплекса для более реалистических моделей среды.
- 3) В Приложении А упоминается метод простой итерации для операторного интегрального уравнения второго рода (А.9) и приводится решение этого уравнения в форме усечённого операторного ряда Неймана (А.10). В Приложении А не даётся доказательство сходимости метода простой итерации для уравнения (А.9) и не приводится ссылка на публикацию, которая бы содержала такое доказательство. К сожалению, приводится только лишь краткая аргументация правдоподобности сходимости в конечном временном окне.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов, не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования и скорее могут быть рассмотрены как пожелание на будущее.

Заключение.

Диссертация Зятькова Николая Юрьевича «Разработка и оптимизация программного комплекса для дифракционного моделирования сейсмических волн с адаптацией под графические ускорители» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, результаты которой достоверны, опубликованы и хорошо апробированы. Содержание автореферата достаточно полно отражает результаты, изложенные в диссертации. Диссертация вносит существенный вклад в развитие теории распространения волновых полей и полностью соответствует специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам: 2 –

