

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Вишневого Дмитрия Михайловича
«Конечно-разностный алгоритм моделирования
сейсмических волновых полей в анизотропных упругих средах»
по специальности 1.6.9, геофизика,
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Как известно, численное моделирование сейсмических волновых полей – важный исследовательский инструмент современной геофизики. Оно предшествует полевым физическим экспериментам и дополняет их. С появлением вычислительных систем с параллельной архитектурой открылась принципиальная возможность перейти от двумерных к более реалистичным трехмерным сейсмогеологическим средам при расчетах сейсмических волновых полей. В связи с этим приобретают актуальность развитие численных методов решения таких задач и разработка на их основе алгоритмов, ориентированных на параллельные вычисления.

Также требуется адаптация существующих математических моделей и численных методов для более полного отражения физики распространения сейсмических волн в реальных горных породах, в частности, учитывающих анизотропию скоростей распространения волн. Тогда при программной реализации алгоритмов моделирования сейсмических волновых полей и практических расчетах время вычислений и объем вычислительных ресурсов существенно увеличиваются следующими факторами: трехмерностью среды, анизотропией среды и необходимостью полномасштабных численных экспериментов. Поэтому особую актуальность приобретают увеличение вычислительной эффективности используемых численных методов и алгоритмов на их основе.

Работа Вишневого Д.М. посвящена разработке конечно-разностного алгоритма расчета сейсмических волновых полей в анизотропных упругих средах. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Во введении автором определен объект исследования, обоснована актуальность, поставлены цели и научные задачи, представлена методология исследования, сформулирована научная новизна защищаемых результатов, а также указаны их теоретическая и практическая значимость.

В первой главе диссертации соискателем выполнен обзор известных из публикаций математических подходов к решению системы уравнений динамической теории упругости, начиная с аналитического и аналитически-вычислительного и заканчивая такими современными численными методами, как метод конечных элементов, метод спектральных элементов и метод конечных разностей. Для последнего подробно разбираются его достоинства и недостатки в целом, различные способы получения конечно-разностных уравнений для системы уравнений упругости, в том числе и для анизотропной среды, их частные достоинства и недостатки. Отдельно анализируется математические подходы к ограничению расчетной области – идеально согласованный слой и поглощающие граничные условия – и необходимость декомпозиции расчетной области для практической реализации конечно-разностного метода для трехмерной анизотропной среды на современных многопроцессорных компьютерах. Список анализируемой литературы включает 110 наименований.

Во второй главе диссертационной работы Вишневым Д.М. разрабатывается и аналитически исследуется новая конечно-разностная схема для численного решения системы уравнений упругости для трехмерной анизотропной среды. Глава начинается с математической постановки начально-краевой задачи для системы уравнений упругости. Из публикаций известны две конечно-разностные схемы, применяемые для численного решения поставленной дифференциальной задачи: схема на сдвинутых сетках – для случая изотропной среды и схема на повернутых сетках – для анизотропной среды. Для повышения вычислительной эффективности конечно-разностного метода при численном решении системы уравнений упругости соискатель предлагает использовать новую конечно-разностную схему. Для определения этой схемы соискатель вводит регулярную сетку, заимствованную из работы В.И. Лебедева, и задает операторы конечно-разностного дифференцирования. Коэффициенты полученной схемы в случае разрывных коэффициентов исходных дифференциальных уравнений определяются с использованием метода баланса и осреднения тонкослоистой пачки. Для сравнения вычислительной эффективности разработанной конечно-разностной схемы с известной из публикаций схемой на повернутых сетках соискателем выполняется анализ численной дисперсии этих схем,

который показал преимущество разработанной схемы по объему оперативной памяти, необходимой для хранимых данных, приблизительно в два раза.

Последующий анализ схемы при помощи построения для нее первого дифференциального приближения показывает, что схема аппроксимирует более широкую, относительно исходной системы уравнений упругости, систему уравнений, при этом часть решений оказываются «нефизичными». Для их устранения Д.М. Вишневым выведена специальная аппроксимация начальных условий и правых частей уравнений. В окончании главы обосновывается необходимость использования при практической реализации разработанной конечно-разностной схемы слабоотражающих граничных условий. В качестве таких условий предлагается и обосновывается использование многоосно-идеально- согласованного слоя.

В третьей главе диссертации соискателем описывается алгоритм на основе разработанной схемы, его программная реализация и ее применение для расчета сейсмических волновых полей в моделях анизотропных геологических сред. Требования к оперативной памяти компьютера, необходимой для применения разработанной конечно-разностной схемы для трехмерной анизотропной модели геологической среды, подразумевают использование многопроцессорной вычислительной системы. Для адаптации конечно-разностного алгоритма к параллельным вычислениям соискатель применяет декомпозицию расчетной области – она делится на подобласти достаточно небольшого размера, чтобы выполнять для подобластей вычисления при помощи одного вычислительного ядра многопроцессорного компьютера, при этом недостающие данные пересылаются между смежными подобластями на каждом временном шаге схемы. Практическая реализация этого подхода показывает эффективность распараллеливания около 90% при переходе от 200 вычислительных ядер к 4000.

Разработанный алгоритм и его программная реализация успешно верифицируются соискателем на моделях однородных анизотропных сред, для которых получается аналитически найти индикатрисы групповых скоростей для сравнения с рассчитанными данными. Далее корректность построения коэффициентов схемы Лебедева в случае разрывных коэффициентов системы уравнений упругости подтверждается численными исследованиями

сходимости конечно-разностных решений для набора моделей неоднородных упругих сред.

После верификации алгоритм применяется для расчетов в практических геофизических задачах. Д.М. Вишневым с помощью разработанного конечно-разностного алгоритма рассчитываются сейсмические волновые поля для подтверждения метода нахождения коэффициентов отражения плоской продольной волны для границы раздела анизотропных сред совместно со специалистами ООО «Тюменский нефтяной научный центр», для изучения влияния анизотропии верхней части разреза на отражения от анизотропного слоя в нижней части разреза модели Юрубчено-Тохомской зоны совместно с коллегами из ИНГГ СО РАН.

В заключении автором сформулированы научные результаты, перечислены достоинства и недостатки разработанного алгоритма расчета сейсмических волновых полей. Предложены возможные направления развития алгоритма, связанные с устранением его недостатков, например, подходы к повышению его вычислительной эффективности.

Высокая степень достоверности результатов исследования Вишневого Д.М. обоснована использованием современных математических теорий и методов – теории упругости для анизотропной среды, метода конечных разностей, метода дифференциального приближения – и подтверждается сопоставлением результатов численных экспериментов с известными из теории.

Надо отметить внутреннее единство, грамотность, точность формулировок, продуманность структуры диссертации Д.М. Вишневого. Автореферат в полной мере отражает основное содержание и результаты диссертационной работы.

При анализе диссертационной работы возникли следующие вопросы и замечания:

- 1) Соискатель ограничивается рассмотрением только идеально упругих моделей среды, изотропных и анизотропных, насколько предлагаемый конечно-разностный подход применим для сред с более общей реологией?

2) В главе 2 отсутствуют формулы конечно-разностной аппроксимации условий на свободной поверхности, хотя при решении практических задач в моделях упругой среды свободная поверхность есть.

3) Разработанный конечно-разностный алгоритм основывается на аппроксимации системы уравнений упругости в форме системы уравнений первого порядка. Возможно для повышения вычислительной эффективности целесообразно обратиться к аппроксимации системы уравнений упругости, как системы уравнений второго порядка?

Приведенные выше вопросы и замечания несколько не отражаются на в целом высокой оценке диссертационной работы Вишневого Д.М.

На основе анализа диссертации и опубликованных работ по ее теме (6 статей в рецензируемых изданиях, 14 – в материалах российских и международных конференций и симпозиумов, 2 зарегистрированные программы) можно с уверенностью утверждать, что работа выполнена на актуальную, набирающую популярность тему, результаты и выводы, сформулированные в диссертации, имеют высокую степень обоснованности и достоверности, а также обладают научной новизной.

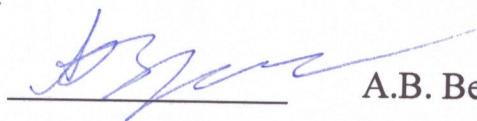
Диссертация Д.М. Вишневого соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней, это научно-квалификационная работа, в которой представлены новые конечно-разностная схема и алгоритм для численного моделирования сейсмических волновых полей, значительно повышающие вычислительную эффективность алгоритма в сравнении с аналогичными. Наличие такого высокоэффективного инструмента моделирование волновых полей открывает возможности для развития принципиально новых методов обработки сейсмических данных, которые позволят проводить детальное картирование анизотропных свойств среды и их петрофизическую интерпретацию для выделения зон повышенной трещиноватости, зон аномальных предварительных напряжений и прочее. Все это может быть использовано для уточнения строения резервуаров углеводородов, выработки оптимальной стратегии их разработки и сейсмического мониторинга изменения свойств резервуара в процессе разработки.

Считаю, что диссертационная работа Д.М. Вишневого «Конечно-разностный алгоритм моделирования сейсмических волновых полей в анизотропных упругих средах» по специальности 1.6.9, «геофизика», полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

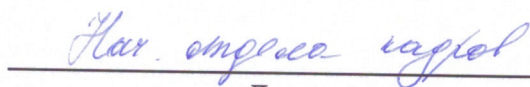
Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

01.03.2023

Официальный оппонент,
профессор кафедры вычислительной
механики отделения механики
механико-математического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук


А.В. Вершинин

Подпись Анатолия Викторовича Вершинина удостоверяю.


Должность


Подпись (Расшифровка)



Телефон: +7 (495) 9391834

Почтовый адрес: 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские Горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, Механико-математический факультет

Эл. почта: versh1984@mail.ru