

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Вишневого Дмитрия Михайловича
«Конечно-разностный алгоритм моделирования сейсмических
волновых полей в анизотропных упругих средах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.6.9. Геофизика

Численное моделирование волновых сейсмических полей представляет собой надежный инструмент для изучения специфики формирования и распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Оно также является неотъемлемой частью решения обратных задач сейсмики – обращения полных волновых полей; задач построения сейсмических изображений методами миграции в обратном времени; локализации источников сейсмических волн. Особенно актуальным моделирование является именно в приложении к анизотропным средам, когда построение асимптотических решений невозможно ввиду чрезвычайной сложности волновой картины. Как правило, при моделировании рассматриваются упрощенные постановки. В частности, известны работы по расчету волновых полей в вертикально-трансверсально изотропных средах или в ортотропных средах с осями симметрии, совпадающими с осями координат, что значительно упрощает расчеты, но приводит к приближенным решениям. Исследование Д.М. Вишневого посвящено разработке эффективного алгоритма численного моделирования волновых полей в анизотропных средах в полной постановке с произвольной симметрией. При этом структура алгоритма и его реализация свидетельствуют о том, что полученный инструмент может применяться не только для проведения единичных расчетов, но и для моделирования сейсмических данных, соответствующих реальным площадным системам наблюдения, для построения полных сейсмических изображений анизотропных сред.

Работа состоит из введения, трех глав и заключения. В первой главе приводится обзор литературных источников, который включает в себя анализ развития численных методов решения системы уравнений динамической теории упругости для анизотропных сред и анализ исследований, посвященных геологическому и петрофизическому обоснованию применимости упругой модели. Следует отметить полноту и глубину проведенного обзора. Автор демонстрирует знание аналитических и численных подходов, предложенных классиками Сибирской научной школы математической геофизики академиками А.С. Алексеевым и Б.Г. Михайленко.

Отдельно обсуждаются методы ограничения расчетной области, что является, пожалуй, самой сложной задачей при моделировании волновых полей в анизотропных упругих средах. В этом направлении уделяется особое внимание методу идеально-согласованных слоев, как наиболее эффективному и широко применимому методу, однако приводятся и менее известные подходы, такие как поглощающие граничные условия, расширение расчетной области с использованием спектрально-согласованных сеток. В целом проведенный обзор является исчерпывающим и демонстрирует высокий уровень владения автором современными численными методами моделирования волновых сейсмических полей.

Вторая глава диссертационной работы посвящена математическому обоснованию разрабатываемого алгоритма. Приводится постановка краевой задачи для системы уравнений динамической теории упругости, обсуждаются модели различных типов анизотропии, анализируются решения в виде плоских волн, допускаемых такой системой. Далее описывается разностная схема на сетке Лебедева для решения краевой задачи. Эта схема сконструирована таким образом, что вектор скорости хранится в одном наборе узлов сетки, а компоненты тензора напряжений – в другом. При этом взаимное расположение узлов сетки обеспечивает возможность использования стандартных симметричных одномерных шаблонов для аппроксимации производных, в отличие от схемы на сдвинутых сетках, которая широко применяется для расчета волновых полей в анизотропных средах. Сравнительному анализу схемы Лебедева с известной из публикаций схемой на повернутых сетках по численной дисперсии и диапазону устойчивости посвящен раздел второй главы, в котором показано, что предложенная соискателем схема дает экономию объема оперативной памяти за счет возможности использования большего шага пространственной дискретизации. Также при построении и анализе схемы обсуждается важная с практической точки зрения задача учета разрывных коэффициентов уравнений для моделирования неоднородной среды с контрастными границами. В частности, показано, что использование модификаций коэффициентов схемы на основе балансных соотношений позволяет в ряде практически значимых случаев сохранить высокий порядок сходимости численного решения. Следующий раздел главы посвящен построению слабоотражающих граничных условий – идеально-согласованного слоя. Известно, что в случае анизотропной среды введение идеально-согласованных слоев может приводить к неустойчивости решения. Чтобы обойти эту сложность, предлагается использовать вариант многоосного идеально-

согласованного слоя, в котором снижаются поглощающие свойства, что является приемлемой платой за принципиальную возможность построения решения задачи.

В третьей главе разработана программная реализация алгоритма, ориентированная на использование современных вычислительных систем с распределенной памятью. Описывается метод декомпозиции расчетной области, при котором расчет решения в подобластях проводится вычислительными процессами с организацией обменов данными между подобластями на каждом временном шаге. Высокая эффективность программной реализации (масштабируемость составляет более 90% при увеличении числа процессов от 200 до 4000) подтверждается численными экспериментами. Верификация алгоритма выполняется на однородных анизотропных средах, для которых можно полуаналитически построить индикатрисы групповых скоростей и верифицировать кинематику моделируемого волнового процесса. Отдельное внимание уделяется численному исследованию сходимости решения для неоднородных сред. Применение алгоритма для решения практически значимых задач сейсмологии проиллюстрировано на ряде примеров, в которых моделировалось влияние анизотропии верхней части разреза на поверхностные данные и на данные вертикального сейсмического профилирования. Важно отметить, что эти эксперименты проводились соискателем совместно с коллегами из ИНГГ СО РАН, специалистами Тюменского нефтяного научного центра компании Роснефть и специалистами компании Газпромнефть.

В заключении диссертации формулируются основные результаты работы, анализируются преимущества предложенного алгоритма расчета волновых полей в анизотропных средах по сравнению с существующими и его недостатки, приводятся направления дальнейшего развития предлагаемого подхода.

По тексту диссертации имеются следующие вопросы и замечания.

1. В начале второй главы утверждается, что схема, построенная на сетке Лебедева, имеет второй порядок аппроксимации и обладает условной устойчивостью. По известной теореме Лакса отсюда следует сходимость численных решений. Однако анализ первого дифференциального приближения в заключительной части главы показал наличие нефизичных решений ввиду отсутствия аппроксимации. Как объяснить это противоречие?

2. Строго говоря, понятие характеристик применимо только к одномерным по пространственной переменной системам уравнений. У неодномерных систем нет характеристик, а есть характеристические конуса (коноиды) и бихарактеристики.
3. Планируется ли в дальнейшем программная реализация разработанного вычислительного алгоритма для современных суперкомпьютеров гибридной архитектуры, основанной на графических ускорителях? Возможно ли обобщение построенной схемы для анализа сейсмических волн с учетом вязких эффектов?
4. При достаточно аккуратном оформлении диссертации и автореферата, имеются все же некоторые опечатки. На стр. 9 автореферата приведена неверная формула для относительной ошибки схемы на повернутых сетках.

Перечисленные замечания не снижают в целом высокую оценку диссертационной работы. Диссертация Д.М. Вишневого является оригинальным завершенным исследованием, оформленным в соответствии с требованиями Минобрнауки РФ, выполненным на высоком научном уровне лично соискателем. Диссертация написана корректным научным стилем, аккуратно оформлена и иллюстрирована качественным графическим материалом, сделаны ссылки на авторов и источники заимствования материалов, а также на соавторов совместных работ. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По теме диссертации соискателем опубликовано 6 статей в журналах из списка ВАК, получены 2 свидетельства о регистрации программного обеспечения в Роспатенте. Результаты докладывались и обсуждались на 20 международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, что свидетельствует о новизне и практической значимости проведенных соискателем научных исследований.

Диссертация Д.М. Вишневого соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней как научно-квалификационная работа, в которой разработан, теоретически обоснован и программно реализован новый конечно-разностный алгоритм для моделирования волновых процессов в трехмерных анизотропных упругих средах, обладающий более высокой вычислительной эффективностью по сравнению с существующими алгоритмами. Учет сейсмической анизотропии практически важен при решении прикладных задач моделирования резервуаров, трещиноватость которых приводит к изменению флюидопроницаемости.

5