

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Лисицы Вадима Викторовича

**«Численные методы и алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности

05.13.18, «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Актуальность работы.** В настоящее время численное моделирование является одним из основных инструментов получения новых знаний о физических процессах и явлениях. Считается, что это направление является третьей, равноправной компонентой познания мира. Связано это прежде всего с бурным развитием вычислительной техники, разработкой новых высокопроизводительных вычислительных систем с распределенной памятью, применением сопроцессоров и новых вычислительных технологий. Поэтому для расчета сложной задачи большого размера, как правило, используются более мощные кластеры с большим числом вычислительных узлов. Однако с ростом возможностей растут и потребности, то есть каковы бы ни были доступные ресурсы, всегда существует актуальная научная задача, решение которой невозможно рассчитать с использованием существующих вычислительных мощностей и стандартных вычислительных алгоритмов.

Отметим что, наряду с развитием вычислительных мощностей, рядом зарубежных и отечественных исследователей активно развиваются новые вычислительные технологии, в частности со-дизайн. Понятие со-дизайна в контексте математического моделирования физических процессов понимается как построение физико-математической модели явления, численного метода, параллельного алгоритма и его программной реализации, эффективно использующей архитектуру суперкомпьютера. В этом смысле численное моделирование сейсмических волновых полей один из наиболее ярких примеров необходимости применения новых технологий. Современные системы наблюдения регистрируют данные на площади до двухсот длин волн в каждом направлении при глубине расчетной области до ста длин волн. И тогда для расчета полного набора сейсмических данных необходимо решить десятки и даже сотни тысяч таких задач, в соответствии с числом источников. Использование же известных путей решения таких задач приведет к потребностям в вычислительных ресурсах и времени счета не реализуемых на современных компьютерах.

Поэтому разработка численных методов и алгоритмов, оптимизированных под решение современных задач, учитывающих специфику физического процесса, строение

среды и пр. с целью уменьшения машинного времени счета чрезвычайно актуальна. В частности, в геологической среде повсеместно встречаются неоднородности разного масштаба, некоторые необходимо учитывать явно при моделировании волновых полей, а учет других можно проводить осреднением коэффициентов уравнения, получая новые математические модели, такие как анизотропные и вязкоупругие среды. Для таких формаций, зачастую локализованных в пространстве в определенном слое, в окрестности крупномасштабных неоднородностей (таких, например, как вулканические магматические камеры и выводящие каналы) прямое применение известных численных методов, одновременно учитывающих все имеющиеся в модели сложности строения, как уже отмечалось выше, приводит к нереалистичным затратам машинного времени. Для таких случаев требуется новые подходы с позиций со-дизайна, в частности, создание эффективных вычислительных алгоритмов локального использования. Этим и определяется актуальность темы диссертации В.В. Лисицы.

Отдельно хотелось бы подчеркнуть, что предлагаемые в работе подходы актуальны при разработке алгоритмов, ориентированных на современные вычислительные системы с гибридной гетерогенной структурой, когда часть вычислений выполняется на сопроцессорах. Так, например, расчет волновых полей в средах с мелкомасштабными неоднородностями на основе локального измельчения сеток удобно проводить на узлах с графическими сопроцессорами, так что решение на грубой сетке рассчитывается с использованием центрального процессора, а вычислительно тяжелая часть алгоритма – расчет на мелкой сетке - может быть вынесена на графические карты. В этом случае можно будет добиться высокой эффективности использования гибридных вычислительных систем.

**Содержание диссертации и автореферата.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 353 страницах. Содержание автореферата в полном объеме передает читателю суть и основные результаты диссертационного исследования.

Отметим, что в каждой из глав численные методы и алгоритмы разрабатываются с учетом определенного осложняющего геофизического фактора.

*Первая глава* посвящена оригинальной разработке метода расчета сейсмических полей в средах со скоплением мелкомасштабных неоднородностей, таких как кавернозные и трещиноватые слои, системы трещин, трещины гидроразрыва и пр. Метод основан на локальном измельчении шагов сетки конечно-разностных схем как по пространству, так и по времени, при этом мелкая сетка, описывающая строение кавернозно-трещиноватого коллектора, используется в области не более 3-10 длин волн в каждом направлении. В результате, при незначительном увеличении размерности задачи, в сравнении с дискретизацией на грубой сетке, становится возможным моделирование процессов рассеяния сейсмических волн на скоплениях каверн и системах трещин.

*Вторая глава* посвящена учету анизотропных включений. В этой главе содержится анализ и обоснование оптимальности конечно-разностной схемы Лебедева для моделирования волновых процессов в анизотропных средах. Здесь автор не ограничивается

разрывными коэффициентами, что чрезвычайно важно для геофизических приложений. Диссертант анализирует метод многоосного идеально согласованного слоя, тип неотражающих граничных условий, и формулирует необходимое условие его устойчивости. Значение этого исследования сложно переоценить, поскольку без эффективного подхода к ограничению расчетной области невозможно проводить моделирование волновых полей в реалистичных постановках. Оригинально решается задача комбинирования схемы Лебедева со стандартной схемой на сдвинутых сетках (применяется в изотропной части модели); основанного на требовании сходимости коэффициентов отражения/прохождения конечно-разностного решения в виде плоской волны к решению задачи в дифференциальной постановке.

*Третья глава* посвящена разработке алгоритма расчета волновых полей в средах с вязкоупругими включениями. Особое внимание здесь уделяется структуре параллельного алгоритма и его оптимизации: в зависимости от порядка используемой конечно-разностной схемы и числа механизмов затухания в модели вязкоупругой среды минимизируется функционал расчетного времени в зависимости от декомпозиции расчетной области. Несомненным достоинством этой главы является детальный анализ производительности параллельной реализации алгоритма, что также вписывается в современную концепцию со-дизайна.

*В четвертой главе* ставится и решается задача расчета волновых полей в моделях со сложной топографией свободной поверхности. Здесь для учета осложняющего фактора используется разрывный метод Галеркина на треугольной нерегулярной сетке, который позволяет аппроксимировать свободную поверхность кусочно-линейной функцией и, как следствие, практически полностью избежать дифракции волн на этой границе. Для комбинирования разрывного метода Галеркина со стандартной схемой на сдвинутых сетках соискателем предлагается оригинальная идея введения переходного слоя, в котором применяется метод конечных объемов, сочетающий в себе свойства как метода Галеркина, так и конечных разностей.

*В заключении*, в соответствии с требованиями пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, дается оценка предложенных подходов к разработке численных методов и алгоритмов расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами, указываются преимущества, выгодные отличия от известных, формулируются нерешенные задачи и направления дальнейших исследований.

Отмечу, что диссертация обладает внутренним единством, ее структура логически выдержана – каждый тип осложняющих факторов рассматривается в одной главе. При этом работа хорошо структурирована: каждая глава включают в себя анализ известных решений; постановку задачи; разработку численного метода; теоретический и численный анализ и верификацию полученных решений. Проведены численные эксперименты по расчету волновых полей для актуальных задач промышленной геофизики: анализ интенсивности рассеяния волновых полей на скоплениях флюидонаполненных и минерализованных каверн; выделение расщепления поперечных волн в верхней части разреза в анизотропной

среде в данных вертикального сейсмического профилирования; оценка влияния изменчивости рельефа свободной поверхности на данные сейсмического мониторинга и пр.

**Достоверность научных результатов** подтверждается их апробацией на международных и российских конференциях по геофизике и вычислительной математике и публикациями в рейтинговых журналах. Следует отметить, что на основе представленного в работе расчета волновых полей в среде с флюидозаполненными кавернами в ОАО «РН-КрасноярскНИПИнефть» была разработана методика картирования скоплений флюидозаполненных мелкомасштабных неоднородностей в карбонатных резервуарах Восточной Сибири, что свидетельствует о практическом применении полученных результатов.

#### **Замечания.**

1. При описании разработанных алгоритмов диссертант уделяет внимание распараллеливанию только на основе метода расщепления по пространственным подобластям с применением библиотек MPI (Message Passing Interface), в то время как применение гибридных технологий, например, OMP+MPI, CUDA+MPI, могло бы в еще большей мере повысить эффективность предлагаемых алгоритмов.
2. В главе 3, посвященной разработке алгоритма расчета волновых полей в средах с вязкоупругими включениями, используется стандартная схема на сдвинутых сетках, аппроксимирующая систему уравнений первого порядка в терминах скоростей и напряжений. В результате возникает два типа точек синхронизации алгоритма, что и приводит к сложности в балансировке гибридного алгоритма. Возможно, для решения этой задачи эффективнее было бы использовать систему уравнений второго порядка и тогда пришлось бы проводить синхронизацию лишь один раз при переходе со слоя на слой.
3. В работе приводятся результаты численных экспериментов, но нет данных на каких вычислительных ресурсах проводились расчеты, какие программные инструменты использовались для расчетов.
4. Работа изобилует большим количеством опечаток.

Приведенные выше замечания являются не критичными и несколько не принижают значимость полученных В.В. Лисицей результатов. В целом работа заслуживает самой высокой оценки.

На основе анализа работы и публикаций соискателя (19 статей по теме диссертации в журналах из списка ВАК, общее число публикаций более 70) можно с уверенностью утверждать, что разработанные методы и алгоритмы расчета волновых полей в средах с осложняющими факторами являются новыми и оригинальными и существенно превосходят известные, позволяют снизить время вычислений и потребности в вычислительных ресурсах без снижения точности численного решения.

Диссертация В.В. Лисицы соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, это научно-квалификационная работа, в которой на основе комбинирования разных численных методов решена научная проблема – разработаны методы и реализованы алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с

локальными осложняющими факторами: анизотропия, частотная зависимость скорости распространения волн, кластеры неоднородностей субсейсмического размера, резкоконтрастные границы со сложной топографией, что является существенным вкладом в развитие аппарата математического моделирования волновых полей.

Считаю, что диссертация В.В. Лисицы «Численные методы и алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами» соответствует специальности 05.13.18, «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

доктор технических наук

Б. М. Глинский

26.02.18

Заведующий лабораторией «Сибирский суперкомпьютерный центр», Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева д. 6, телефон: +7 383 3306279, эл. почта: gbm@sscc.ru.

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

Подпись зав. лаб. Сибирский суперкомпьютерный центр ИВМиМГ СО РАН Б. М. Глинского заверяю

Ученый секретарь ИВМиМГ СО РАН  
д.ф.-м.н.

И.М. Куликов