

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
МАТЕМАТИКИ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИВМиМГ СО РАН)

просп. Академика Лаврентьева, 6,
Новосибирск, 630090

Тел.: (383)330-83-53, факс (383)330-87-83
e-mail: director@sscc.ru

ОКПО 03533843, ОГРН 1025403656420,

ИНН/КПП 5408100025/540801001

06.03.2023 № 15301/ 1-01-24

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИВМиМГ СО РАН

д.ф.м.н., профессор РАН

М.А. Марченко

«6» марта 2023 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Диссертационная работа Д.М.Вишневого посвящена развитию численного метода, создания на его основе алгоритма и построения программного обеспечения для выполнения моделирования процессов распространения сейсмических волновых полей в трёхмерно-неоднородных анизотропных средах. В качестве объектов для апробации полученных численных методов и созданного на их основе программного обеспечения автор использовал ряд моделей скоростного строения хорошо изученных месторождений углеводородов в Западной и Восточной Сибири, а также результаты выполненных на них полевых сейсмических наблюдений. В частности, в качестве эталонных объектов Д.М.Вишневым использовались некоторые отдельные участки Юрубчено-Тохомского месторождения в Восточной Сибири.

В диссертации рассматриваются следующие *Научные задачи*:
На основе использования сетки Лебедева разработать конечно-разностный метод моделирования процессов распространения сейсмических волновых полей в анизотропных средах в целях выполнения предсказательного численного моделирования для:

- анализа основных особенностей волновых полей,
- формирования тестовых наборов данных для апробации подходов к обработке сейсмических данных;

- выбора оптимальных систем возбуждения-регистрации волновых полей, обеспечивающих максимально детальное описание целевых геологических объектов.

Общая характеристика работы.

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 110 наименований. Она содержит 164 страницы основного текста и 38 рисунков.

Во **введении** определяется объект исследования, обосновывается его актуальность, формулируются цели и научные задачи, а также указаны защищаемые результаты, научная новизна, теоретическая и практическая значимость найденных решений и выполненных разработок.

Первая глава содержит анализ существующих подходов к численному моделированию сейсмических волновых полей и детальному изучению их достоинств и недостатков. Автор начинает эту главу с объяснения особенностей строения геологических сред, которые и обуславливают возникновение анизотропии, то есть зависимости скорости волны от направления её распространения.

Диссертант отмечает, что в природе существуют несколько типов таких особенностей, среди которых наибольший интерес применительно к сейсмическим методам поиска и разведки углеводородов имеют системы ориентированных трещин, а также тонкослоистые пачки, перекрывающие/подстилающие целевые объекты. При этом наиболее распространённым типом анизотропии является так называемая трансверсальная анизотропия, которая может быть как вертикальной, так и наклонной. В первом случае для численного моделирования сейсмических волн удаётся использовать тот же самый математический аппарат, что и для изотропной среды, в то время как во втором требуется существенная их модификация. Причём это относится ко всем составляющим метода – от выбора сетки и способа выполнения конечно-разностной аппроксимации, вплоть до использования специальных приёмов ограничения расчётной области. Отметим, что разработанный в диссертации подход ориентирован на самый общий тип анизотропии, в том числе и на наиболее распространённые в сейсмических исследованиях среды с наклонной осью симметрии, так называемые ТТИ – от английского Tilted Transversely Isotropic.

Приведённый в этой главе детальный анализ наиболее распространённых в настоящее время методов численного моделирования сейсмических волн в упругих средах позволил автору глубоко проанализировать их преимущества и недостатки и на этой основе наметить принципиально новые подходы, существенно повышающие эффективность вычислений и достоверность получаемых результатов.

Вторая глава описывает основные теоретические результаты диссертации, а именно подробное описание методов построения новой

конечно-разностной схемы, ориентированной на проведение численного моделирования процессов формирования и распространения сейсмических волновых полей в анизотропных упругих средах. Особое внимание при этом уделяется её сравнению со ставшей уже классической конечно-разностной схемой на сдвинутых сетках, известной с 1986 года, а также с получившей широкое распространение схемой на повернутых сетках, предложенной и исследованной в серии работ E. Saenger и T. Bohlen, опубликованных в начале 2000-х годов.

Проведённый в этой главе сравнительный анализ разработанной автором конечно-разностной схемы и двух упомянутых схем (на сдвинутых и на повернутых сетках) установил преимущество этой схемы по объёму оперативной памяти, необходимой для проведения численного моделирования сейсмических волн в трёхмерных анизотропных средах. Полученные оценки говорят о том, что схема на основе сеток Лебедева требует от одной до двух третей объёма памяти, необходимого для схемы на повернутых сетках.

Здесь важен тот факт, что численное моделирование волновых полей в трёхмерных анизотропных средах требует весьма значительной памяти, и снижение на одну треть требуемых объёмов даёт весьма ощутимый выигрыш на практике.

Отдельно следует отметить специально проведённый автором анализ построенной схемы на основе метода дифференциального приближения, изложенный в монографии Ю.И.Шокина и Н.Н.Яненко «О первом дифференциальном приближении разностных схем для гиперболических систем уравнений» (СМЖ, 1969), показавший, что полученная конечно-разностная схема аппроксимирует гораздо более широкий набор уравнений математической физики. Именно этим фактом объясняется наличие существенных численных артефактов, возникающих при прямолинейном применении этой схемы. Несомненной заслугой соискателя здесь представляется модификация аппроксимации правой части, ведущая к практически полному подавлению таких артефактов.

Заслуживает внимания предложенный в работе метод ограничения расчётной области слабо поглощающими граничными условиями. Эти условия, в отличие от стандартных, не приводят к неустойчивости моделируемого волнового процесса, что позволяет получать качественные результаты, пригодные для проведения предсказательного моделирования и анализа физических характеристик процесса.

Третья глава посвящена разработке алгоритма на основе построенной конечно-разностной схеме и описанию созданного на его основе программного обеспечения. Как уже было отмечено, выполнение численных расчётов для трёхмерно-неоднородной анизотропной среды требует привлечения параллельных вычислений с использованием многопроцессорных вычислительных систем. Для реализации этого подхода

Д.М.Вишневский использует трёхмерную пространственную декомпозицию расчётной области, распределённую на заранее заданном наборе процессорных элементов. Взаимодействие этих элементов реализуется с использованием программного обеспечения MPI (Multi Passage Interface).

Разработанное программное обеспечение используется автором для получения скорости сходимости полученного при численном решении путём проведения серии расчётов на вложенных сетках. Как и следовало ожидать, для однородной среды и среды с горизонтальными границами схема имеет второй порядок сходимости. При наличии наклонных и криволинейных границ разработанный алгоритм даёт первый порядок сходимости.

Третья глава заканчивается изложением результатов численных расчётов, выполненных как для апробации разработанной конечно-разностной схемы, так и для предсказательного моделирования сейсмических волновых полей в сложно устроенных трёхмерно-неоднородных средах. Особо хочется выделить результаты, полученные для палеозойских отложений Западной Сибири, изучение которых давно привлекают внимание специалистов. Полученные автором эталонные синтетические данные позволят выполнить объективную оценку качества результатов обработки данных трёхмерной сейсморазведки по различным методикам и выбрать оптимальную, как в плане графа обработки, так и системы возбуждения-регистрации сейсмических данных.

В заключении соискатель формулирует основные преимущества и недостатки разработок и намечает некоторые пути их дальнейшего развития и практического применения с целью повышения качества и достоверности результатов обработки данных площадных сейсмических наблюдений в сложноустроенных средах.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы полностью опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, докладывались и обсуждались на 20 международных и всероссийских конференциях, получены 2 свидетельства о регистрации программного обеспечения.

Актуальность исследования.

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений современных методов сейсмических исследований становится построение реалистичных геологических моделей целевых объектов и проведение для них полномасштабного численного моделирования. Именно на этой основе и строятся так называемы цифровые двойники реальных геологических объектов. Надо отметить, что такая авторитетная международная организация, как SEG (Society of Exploration Geophysicists) уже в течение довольно длительного времени ведёт методичную работу по развитию своей базы таких синтетических данных для различных типов геологических объектов.

Естественно, что такие работы невозможны без наличия специализированного программного обеспечения, одной из ключевых компонент которого как раз и выступает расчёт полных волновых полей в сложно устроенных геологических средах. Следовательно, результаты Д.М.Вишневого как раз и обеспечивают развитие такого актуального направления в Российской Федерации.

Научная новизна.

Прежде всего, научная новизна заключается в развитии конечно-разностных алгоритмов для численного моделирования процессов формирования и распространения сейсмических волн в трёхмерно-неоднородных анизотропных средах. Наличие анизотропии существенно осложняет эти процессы, привнося в них ряд весьма значимых особенностей, таких, например, как расщепление поперечных волн. Кроме того, стандартные конечно-разностные схемы, такие как схемы на сдвинутых сетках и схемы на повернутых сетках, существенно проигрывают схемам на основе сеток Лебедева в объёмах оперативной памяти, необходимой для численного моделирования. Также необходимо отметить, что для анизотропных сред нужно модифицировать стандартный подход к построению условий, позволяющих ограничивать расчётную область без возникновения сколько-нибудь заметных численных артефактов, возникающих на вводимой искусственной границе. Предложенный и реализованный автором подход позволяет строить такие искусственные границы с чрезвычайно низким уровнем артефактов.

Таким образом, научная новизна заключается в разработке алгоритма и исследовании нового класса конечно-разностных схем для численного моделирования сейсмических волн в трёхмерно-неоднородных анизотропных упругих средах.

Научная и практическая значимость

Значимость работы Д.М.Вишневого заключается в дальнейшем развитии подходов к совершенствованию методов обработки результатов площадных сейсмических наблюдений на основе предсказательного численного моделирования. Использование разработанных в ходе её выполнения численных методов и программного обеспечения открывается возможность детального изучения проявлений типичных особенностей геологического строения среды в сейсмических волновых полях.

Ещё одним её важным аспектом является возможность проведения полностью контролируемых численных экспериментов для оценки качества процедур обработки сейсмических данных. А именно, для типичного набора объектов строится их численная модель, выполняется полномасштабное моделирование и полученные данные обрабатываются с использованием тестируемых процедур. Полученный результат сравнивается с исходной

моделью, на основании чего и делается заключение о качестве предлагаемых подходов к обработке сейсмических данных.

Другими словами, на основе полученных результатов открывается путь к построению цифровых двойников изучаемых геологических объектов.

Степень обоснованности представленных результатов.

Обоснованность результатов не вызывает сомнений, так как в процессе работы автор опирался на неоднократно проверенные положения теории распространения волн, элементы теории конечно-разностных схем, последние достижения методов теории аппроксимации, результаты полевых сейсмических наблюдений. Кроме того, им проведено сравнение полученных результатов с результатами других методов, а именно с конечно-разностными методами на сдвинутых (изотропные среды) и повёрнутых (изотропные и анизотропные среды) сетках.

Диссертационная работа Вишневого Д.М. представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Основные научные результаты по теме диссертации изложены в открытой печати, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК РФ, апробированы на международных и всероссийских конференциях. Соискателем сделаны ссылки на все используемые материалы, в работе сделаны акценты на личный вклад и результаты, полученные в соавторстве. Материал, представленный в автореферате и публикациях автора, соответствует содержанию диссертации, все защищаемые результаты обоснованы.

Замечания по содержанию диссертации. По диссертационной работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. Одним из наиболее значимых вопросов при разработке параллельного программного обеспечения заключается в исследовании его масштабируемости. К сожалению, в диссертации не исследована ни слабая, ни сильная масштабируемости.

2. При использовании программного обеспечения для расчёта часто возникает потребность в моделировании волновых полей для сред, содержащих границы упругой и акустической среды. О возможности использования разработанного метода в этих целях в диссертации нет никакого упоминания.

Высказанные замечания не имеют принципиального значения и не снижают положительной оценки диссертации.

Заключение. Диссертационная работа Вишневого Дмитрия Михайловича «Конечно-разностный алгоритм моделирования сейсмических волновых полей в анизотропных упругих средах» по специальности 1.6.9 – «геофизика» выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, внутренним единством и является завершённой научно-квалификационной работой, ориентированной на развитие методов обработки данных

сейсмических наблюдений и создание перспективных технологий цифровых двойников в этом направлении.

Диссертация Д.М. Вишневого «Конечно-разностный алгоритм моделирования сейсмических волновых полей в анизотропных упругих средах», выполненная по специальности 1.6.9, «геофизика», соответствует критериям, установленным пп. 9, 10 и 11 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

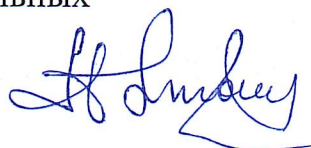
Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки.

Заведующий лабораторией вычислительных
задач геофизики ИВМиМГ СО РАН,
д.ф.-м.н.

Тел: +7(383) 3308352

630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6

e-mail: imom@omzg.sccc.ru



Х.Х. Имомназаров

Диссертация Вишневого Дмитрия Михайловича и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании лаборатории вычислительных задач геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, одним из основных направлений научно-исследовательской деятельности которой является разработка численных методов решения динамических задач сейсмологии для неоднородных сред с осложняющими факторами, 9 февраля 2023 г., протокол № 2, отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Отзыв утвержден на заседании Ученого совета ИВМиМГ СО РАН, протокол №2 от 10 февраля 2023 г.

Подпись Холматжона Худайназаровича Имомназарова заверяю.

Ученый секретарь ИВМиМГ СО РАН

к.ф.-м.н.




Л.В. Вшивкова