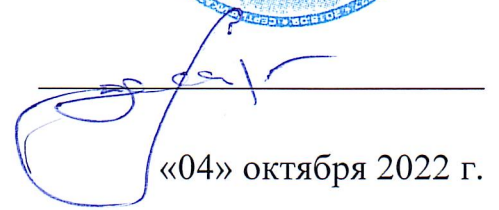


УТВЕРЖДАЮ
Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения
Российской академии наук
член-корр. РАН, д.ф.м.н.
Глинских Вячеслав Николаевич



«04» октября 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИНГГ СО РАН)

Диссертация **«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 выполнена Вишневым Дмитрием Михайловичем в лаборатории вычислительной физики горных пород Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Вишневы Дмитрий Михайлович работал в должности научного сотрудника лаборатории вычислительной физики горных пород ИНГГ СО РАН.

В 1997 г. Д.М. Вишневы окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета (в настоящее время – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», НГУ) по направлению «математика» с получением степени бакалавра, а в 2017 г. получил степень магистра по специальности «геология» на геолого-геофизическом факультете того же вуза.

Справка №15350-101-6525 от 16 июня 2018 г. о сдаче кандидатских экзаменов выдана Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук в период подготовки диссертации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Лисица Вадим Викторович, заведующий лабораторией вычислительной физики горных пород Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Материалы диссертации представлены соискателем на заседании Учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук 04 октября 2022 г., протокол № 8.

Присутствовали:

Члены Учёного совета ИНГГ СО РАН: чл.-корр. В.Н. Глинских, д.ф.-м.н. Е.Ю. Антонов (дистанционно), д.г.-м.н. С.Б. Бортникова, д.т.н. В.М. Грузнов (дистанционно), д.г.-м.н. Е.В. Деев, к.ф.-м.н. А.А. Дучков, д.т.н. Ю.И. Колесников (дистанционно), д.г.-м.н. В.Д. Суворов (дистанционно), д.т.н. К.В. Сухорукова (дистанционно), д.ф.-м.н. В.Ю. Тимофеев, д.э.н. И.В. Филимонова, д.г.-м.н. А.Н. Фомин, к.г.-м.н. М.А. Фомин.

сотрудники ИНГГ СО РАН: д.т.н. И.Н. Ельцов (дистанционно), д.т.н. А.К. Манштейн, д.ф.-м.н. В.А. Чеверда, к.ф.-м.н. А.М. Айзенберг, к.ф.-м.н. А.Ю. Белинская (дистанционно), к.г.-м.н. Дядьков, к.т.н. А.Л. Макась, к.ф.-м.н. С.И. Марков, к.г.-м.н. Е.А. Мельник, д.ф.-м.н. Г.М. Митрофанов, д.г.-м.н. Н.Н. Неведрова (дистанционно), д.ф.-м.н. Б.П. Сибиряков, к.ф.-м.н. И.В. Суродина, к.г.-м.н. Н.В. Юркевич, А.А. Татаурова, Д.И. Фадеев.

Вопросы задали: д.ф.-м.н. Б.П. Сибиряков, к.ф.-м.н. А.А. Дучков, д.ф.-м.н. Г.М. Митрофанов, член-корр. РАН В.Н. Глинских, д.т.н. А.К. Манштейн, д.т.н. Ю.И. Колесников, д.г.-м.н. Н.Н. Неведрова.

Выступили: д.ф.-м.н. В.А. Чеверда, д.г.-м.н. В.Д. Суворов, д.ф.-м.н. Г.М. Митрофанов, член-корр. РАН В.Н. Глинских.

С диссертацией ознакомилась комиссия в следующем составе: д.ф.-м.н. Е.И. Роменский, д.г.-м.н. В.Д. Суворов, д.ф.-м.н., профессор В.А. Чеверда.

Выступившие члены экспертной комиссии дали **положительную** оценку диссертационной работе Д.М. Вишневого.

По результатам рассмотрения диссертации **принято следующее заключение.**

Объект исследования – конечно-разностный метод решения прямой задачи сейсмологии на предмет развития его теоретической и алгоритмической составляющих для увеличения вычислительной эффективности алгоритмов расчета сейсмических волновых полей в трехмерных анизотропных средах на вычислительных системах с параллельной архитектурой.

Актуальность. Численное моделирование сейсмических волновых полей – важный исследовательский инструмент современной геофизики. Оно предшествует полевым физическим экспериментам, дополняет их и частично заменяет, когда выполнение полевых экспериментов затруднено или невозможно.

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**.

Одновременно с этим углубляется понимание физики распространения сейсмических волн в реальных горных породах, и требуется адаптация соответствующих численных методов, в частности, учитывающих **анизотропию** скоростей распространения волн. Например, учет анизотропии важен при моделировании трещиноватых резервуаров. Ориентированная трещиноватость горной породы приводит и к её сейсмической анизотропии, и к изменению флюидопроницаемости в разных направлениях, которые в результате связаны между собой. Следовательно, знание параметров анизотропии необходимо для определения флюидопроницаемости при проектировании добывающих скважин большей эффективности.

Тогда при программной реализации численных методов 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.

Цель исследования - развитие конечно-разностных алгоритмов решения прямой задачи сейсмологии, повышение вычислительной эффективности ее решения для трехмерной анизотропной упругой среды за счет использования схемы на основе сетки Лебедева, соответствующего алгоритма и его программной реализации для вычислительных систем с распределенной памятью.

Научные задачи:

1. На основе сетки Лебедева разработать конечно-разностную схему для численного решения прямой задачи сейсмологии в трехмерной анизотропной среде.
2. На основе схемы разработать алгоритм численного решения прямой задачи сейсмологии и реализовать его в научно-исследовательской версии программного обеспечения, ориентированного на параллельные вычисления.

Защищаемые научные результаты:

1. Разработанная, теоретически и численно исследованная конечно-разностная схема на основе сетки Лебедева для решения прямой задачи сейсмологии в трехмерной анизотропной среде.

2. Разработанный по схеме и реализованный в виде научно-исследовательской версии программного обеспечения алгоритм для расчета волновых полей в прикладных задачах сейсмологии.

Научная новизна

С использованием конечно-разностной сетки Лебедева разработана и теоретически обоснована конечно-разностная схема для динамической системы уравнений теории упругости в трехмерной анизотропной среде. Методом дифференциального приближения показано существование у разработанной схемы более широкого набора независимых решений (плоских волн), часть из которых являются нефизическими; разработан способ подавления нефизических решений путем аппроксимации начальных условий.

С использованием слабоотражающих слоев и декомпозиции вычислительной области на основе схемы разработан алгоритм, ориентированный на параллельные вычислительные системы. С помощью численных экспериментов на сетках с уменьшающимися шагами подтвержден первый порядок сходимости схемы на репрезентативном наборе моделей.

Личный вклад

Для расчета сейсмических волновых полей в трехмерной анизотропной среде разработана новая конечно-разностная схема (совместно с В.В. Лисицей): построены формулы для коэффициентов схемы, выведено условие устойчивости, исследована численная дисперсия и нефизические решения.

На основе схемы разработан и реализован в виде научно-исследовательской версии программного обеспечения алгоритм расчета волновых полей. Выполнены численные эксперименты для исследования сходимости разработанной схемы и ее аналогов. Рассчитаны волновые поля для двух плоскостных трехмерных моделей анизотропных сред. Выполнено полномасштабное трехмерное численное моделирование для изотропной модели доюрского комплекса Томской области.

Лично участвовал в подготовке публикаций по теме диссертации.

Высокая степень **достоверности** полученных научных результатов определяется использованием следующих математических теорий и методов:

- теория упругости, а именно динамическая линейная система уравнений в анизотропной постановке в качестве математической модели распространения упругих сейсмических волн;
- метод конечных разностей для численного решения начально-краевой задачи для системы уравнений упругости;
- теория уравнений в частных производных и теория конечно-разностных уравнений для сравнительного анализа численной дисперсии конечно-разностных схем и определения их относительной вычислительной эффективности;
- метод дифференциального приближения конечно-разностного уравнения для устранения нефизических решений, допускаемых конечно-разностными схемами;
- прием PML (Perfectly Matched Layer – абсолютно согласованный слой) к построению слабоотражающих слоев для гиперболической системы дифференциальных уравнений;

– теория распространения волн в упругих анизотропных средах при верификации полученных численных решений.

Верификация разработанных алгоритмов выполнялась сериями численных экспериментов, сопоставлением результатов с полученными теоретически.

Для создания научно-исследовательской версии программной реализации алгоритма для параллельных вычислительных систем используются:

- язык программирования C/C++;
- метод пространственной декомпозиции расчетной области;
- интерфейс передачи сообщений MPI (англ. «Message Passing Interface») для организации передачи информации между параллельными вычислительными потоками.

Теоретическая и практическая значимость.

С помощью современных достижений теории разностных схем разработан конечно-разностный алгоритм численного решения прямой задачи сейсмологии для трехмерной анизотропной среды, обладающий меньшими, чем известные аналоги, требованиями к вычислительным ресурсам при одинаковой точности численного решения. На основе разработанного алгоритма создан ориентированный на параллельные вычислительные системы научно-исследовательский вариант программного обеспечения.

Алгоритм позволяет рассчитывать сейсмоакустические поля в трёхмерных анизотропных средах, что делает возможным появление новых подходов к определению геологических свойств среды сейсмическими методами. С использованием разработанного программного обеспечения рассчитаны сейсмические волновые поля, которые переданы: специалистам ИНГГ СО РАН С.Б. Горшкалеву, В.В. Карстену и др. для разработки методики компенсации расщепления поперечных волн в верхней части разреза, в том числе защищена кандидатская диссертация Е.В. Афонинной по теме «Методика обработки данных 2D-3С отраженных PS-волн для компенсации их расщепления в азимутально-анизотропных слоях, залегающих выше целевого интервала исследований»; специалистам «Тюменского нефтяного научного центра» О.А. Литтау, А.В. Новокрещину.

Также численно исследована сходимость решений для разработанной и других известных конечно-разностных схем для моделей среды с разными типами границ разрывов параметров.

Материалы диссертации полностью изложены в 29 научных публикациях, из них 6 статей в научных журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, 21 – в материалах российских и международных конференций и симпозиумов, 2 зарегистрированные программы.

Основные публикации по теме диссертации:

В рецензируемых изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. Lisitsa V. Lebedev scheme for the numerical simulation of wave propagation in 3D anisotropic elasticity / V. Lisitsa, **D. Vishnevskiy** // Geophysical Prospecting. –

2010. – V. 58. – № 4. – P. 619-635.

На основе конечно-разностной схемы Лебедева соискателем лично разработан алгоритм численного моделирования волновых полей в трёхмерных анизотропных упругих средах; алгоритм реализован в научно-исследовательской версии программного обеспечения, работающей на многопроцессорных вычислительных системах; выполнены три численных эксперимента для однородной среды с трансверсально-изотропной анизотропией, которые показывают качественное совпадение рассчитанных и известных из теории волновых фронтов, что подтверждает работоспособность этого алгоритма.

Соискателем сравнительно исследованы численная устойчивость и численная дисперсия схемы Лебедева и схемы на повернутых сетках, результаты показывают, что использование для расчетов схемы Лебедева требует на 50% меньше компьютерной памяти.

2. Lisitsa V.V. On specific features of the Lebedev scheme in simulating elastic wave propagation in anisotropic media / V.V. Lisitsa, **D.M. Vishnevsky** // Numerical Analysis and Applications. – 2011. – V. 4. – № 2. – P. 125-135.

Лисица В.В. Об особенностях схемы Лебедева при моделировании упругих волн в анизотропных средах / В.В. Лисица, **Д.М. Вишневский** // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2011. – Т. 14. – № 2. – С. 155-167.

Методом дифференциального приближения соискателем показано, что первое дифференциальное приближение схемы Лебедева (вследствие чего и сама схема Лебедева), обладает большим набором решений, чем дифференциальные уравнения системы упругости: в случае трехмерной анизотропной среды количество решений в виде плоских волн увеличивается в четыре раза. При этом три четверти решений конечно-разностной задачи являются нефизическими, «паразитными» решениями. Для их устранения из решения конечно-разностной задачи построена аппроксимация начальных условий и правой части уравнений, при которой «паразитные» решения конечно-разностной задачи сходятся к нулю со вторым порядком сходимости.

Соискателем лично выполнены два численных эксперимента, подтверждающие полученные теоретические результаты.

4. Numerical study of the interface errors of finite-difference simulations of seismic waves / **D. Vishnevsky** [et al.] // Geophysics. – 2014. – V. 79. – № 4. – P. T219-T232.

Для численного исследования сходимости схемы на сдвинутых сетках для изотропной упругой среды, схемы на повернутых сетках и схемы Лебедева для анизотропной среды соискателем лично выполнена серия из 256 численных экспериментов на вложенных сетках с уменьшающимися шагами. Они выполнены для ряда моделей сред: однородной; с горизонтальной границей (проходящей по линиям сетки); с прямолинейной наклонной границей (не проходящей по линиям сетки); при сочленении в одной точке трех однородных сред.

Анализ численных результатов показывает второй порядок сходимости решений для всех трех схем для моделей однородной среды и среды с

горизонтальной границей, что подтверждает аналитически полученные результаты. Для двух других моделей сред анализ показывает первый порядок сходимости. Аналитически полученного результата для этого случая в публикациях не найдено.

5. Поляризионный анализ отраженных PS-волн в средах с переменным направлением трещиноватости / С.Б. Горшкалев, ... **Д.М. Вишневский** [и др.] // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 1. – С. 52-60.

С использованием научно-исследовательской версии программного обеспечения, реализующего конечно-разностную схему Лебедева, соискателем лично рассчитаны сейсмограммы площадной поверхностной системы наблюдений 4 x 4 км с центральным источником для слоистой упругой модели Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления, состоящие из 11 слоев, два из которых с трансверсально-изотропной анизотропией, имитирующие пласты с направленной трещиноватостью.

6. Анализ возможности изучения переменного направления трещиноватости коллектора по данным ВСП / С.Б. Горшкалев, ... **Д.М. Вишневский** [и др.] // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 1. – С. 44-51.

С использованием научно-исследовательской версии программного обеспечения, реализующего конечно-разностную схему Лебедева, соискателем лично рассчитаны сейсмограммы ВСП для 27 скважин и сейсмограммы площадной поверхностной системы наблюдений 3 x 3 км с центральным источником для слоистой упругой модели Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления, содержащей 11 слоев, два из которых с трансверсально-изотропной анизотропией с модифицированным параметрам Томсена.

7. Численное исследование возможностей построения изображений доюрского комплекса Томской и Новосибирской областей / М.И. Протасов, ... **Д.М. Вишневский** [и др.] // PRОнефть. Профессионально о нефти – 2021. – Т. 6. – № 4. – С. 71-80.

С использованием научно-исследовательской версии программного обеспечения, предназначенной для конечно-разностного моделирования волновых полей в трехмерных изотропных упругих средах, соискателем лично рассчитаны «синтетические» сейсмограммы для двух существенно трехмерных сейсмогеологических моделей доюрского комплекса в Томской области и доюрского комплекса в Новосибирской области. Эти модели построены соавторами на основании данных бурения и интеграции данных сейсморазведки с включением в модели структурных элементов, которые могут быть потенциальными объектами при поисках залежей нефти.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

1. **Вишневский Д.М.** Свидетельство о регистрации программы ЭВМ ElastAnis_LScheme / **Д.М. Вишневский**, В.В. Лисица // Св-во о регистр. прогр. 2021617444; RU; №2021615813, заявл. 22.04.2021, опубл. 14.05.2021.

2. **Вишневский Д.М.** Свидетельство о регистрации программы ЭВМ ElastAnis_RScheme / **Д.М. Вишневский**, В.В. Лисица // Св-во о регистр. прогр. 2021665499; RU; №2021664741, заявл. 23.09.2021, опубл. 27.09.2021.

Наиболее значимые доклады на конференциях:

1. Конечно-разностное моделирование процессов распространения волновых полей в анизотропных упругих средах / **Д.М. Вишневский**, В.В. Лисица // ГЕО-Сибирь-2009. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сб. материалов V Международного научного конгресса (Новосибирск, 20-24 апреля 2009 г.) – СГГА – Новосибирск – 2009. – Т. 2. – С. 166-171.

2. Traveltime and reflection coefficients accuracy of staggered-grid finite-difference simulation of seismic waves / О. Podgornova, V. Lisitsa, **D. Vishnevsky** // 72nd European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2010 - Incorporating SPE EUROPEC 2010 – Barcelona – 2010. – С. 522-526.

3. Some peculiarities of seismic waves propagation in anisotropic media, results of numerical simulation / V. Lisitsa, **D. Vishnevskiy** // KazGeo 2010 - 1st International Geosciences Conference for Kazakhstan: Where Geoscience Meets the Silk Road (Almaty, Kazakhstan, 15-17 November 2010): Proceedings – Almaty – 2010. – С. 73-77.

4. Моделирование волновых процессов в анизотропных упругих средах / Афонина Е.В., Вишневский Д.М. и [др.] // Вторая конференция и выставка "Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли" (Москва, 6-8 декабря 2011 г.): Тез. докл. – М. – 2011.

5. Два механизма образования взаимно ортогонально поляризованных поперечных волн по данным ВСП / И.А. Карпов, С.Б. Горшкалев, **Д.М. Вишневский** // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рожд. акад. Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г.) – Изд-во ИНГГ СО РАН – Новосибирск – 2014. – С. 49-54.

6. Особенности амплитуд отражения в лучевом приближении для анизотропных сред с различными типами симметрии [Электронный ресурс] / О.А. Литтау, **Д.М. Вишневский** [и др.] // Тюмень 2017: Геонауки - ключ к рациональному освоению недр: Материалы 5-ой научно-практической конференции (Тюмень, 27-30 марта 2017 г.) – Тюмень – 2017. – 07с.

7. Use of seismic modelling to develop optimal processing procedures for investigation of pre-jurassic formations / V. Lisitsa, **D. Vishnevsky** [et al.] // EAGE. Saint Petersburg 2020. Geosciences: Converting Knowledge into Resources (Saint Petersburg, Russia, 6-9 April 2020) – СПб. – 2020. – Т. 2. – С. 1-5.

Из вышесказанного следует, что диссертационная работа **Д.М. Вишневского** соответствует паспорту специальности **1.6.9 – геофизика по физико-математическим наукам**.

При экспертизе текста диссертации, публикаций, а также результатов проверки текста системой «Антиплагиат» установлено, что оригинальных блоков в диссертации – 96,74%, заимствованных источников в диссертации – 3,26%; цитирования – 0%; самоцитирования – 0 %. Соискателем сделаны ссылки на все источники заимствования материалов, фактов некорректного цитирования или

заимствования без ссылки на других авторов и соавторов в тексте диссертации и автореферате не обнаружено. Сведения, представленные соискателем об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны.

Тема диссертации утверждена на заседании Учёного совета ИНГГ СО РАН 12 января 2022 г., протокол № 1.

Диссертация Д. М. Вишневого – научно-квалификационная работа, в которой с использованием сетки Лебедева с частичным сдвигом по пространству и по времени компонент уравнений динамической системы теории упругости выведена новая конечно-разностная схема для анизотропной упругой среды и на ее основе разработан алгоритм расчета сейсмических волновых полей. Предложенный алгоритм позволяет повысить вычислительную эффективность расчетов в сравнении с известным алгоритмом на основе конечно-разностной схемы на повернутых сетках. С помощью созданного на основе разработанного алгоритма научно-исследовательского варианта параллельного программного обеспечения, использующего декомпозицию области для распараллеливания программы и прием построения слабоотражающих слоев М-РМЛ для ограничения расчетной области, выполнено моделирование волновых полей в прикладных задачах геофизики: при изучении амплитуд отражения для анизотропных сред с различными типами симметрии; определение параметров анизотропии в верхнем анизотропном слое слоистой модели Юрубчено-Тахомской зоны и компенсации анизотропии верхнего слоя для более точного определения параметров анизотропии нижнего анизотропного слоя.

Диссертация «Конечно-разностный алгоритм моделирования сейсмических волновых полей в анизотропных упругих средах» Вишневого Дмитрия Михайловича **рекомендуется к защите** на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 – геофизика.

Заключение принято на заседании Учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. На заседании присутствовало 28 человек. Результаты голосования: «за» – 28 чел., «против» – 0 чел., «воздержался» – 0 чел. протокол № 8 от 04 октября 2022 г.

Заключение оформил:

Учёный секретарь
к.т.н.



М.И. Шумскаяйте