

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа прикладной математики и информатики
Кафедра информатики и вычислительной математики

На правах рукописи

Стогний Полина Владимировна



**Развитие сеточно-характеристических
методов в задачах моделирования
гетерогенных геологических сред с явным
выделением неоднородностей**

Специальность 05.13.18 – Математическое
моделирование, численные методы и комплексы
программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2020

Работа выполнена на кафедре информатики и вычислительной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:

Хохлов Николай Игоревич,
кандидат физико-математических наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук

Защита состоится 19 января 2021 года в 14:00 на заседании диссертационного совета ФПМИ.05.13.18.0015 по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, МФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

<https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>.

Работа представлена 5 ноября 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук в соответствии с п. 3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В настоящее время существуют различные численные методы, используемые для решения динамических задач механики сплошных сред, среди них – разрывный метод Галеркина, метод конечных элементов, сеточно-характеристический метод, метод спектральных элементов, FDTD (Finite Difference Time Domain, метод конечных разностей во временной области) и др.

Сеточно-характеристический метод был предложен в 1969 году в работе академика РАН А.С. Холодова, доктора физико-математических наук Магомедова К.М. (Магомедов К.М., Холодов А.С. О построении разностных схем для уравнений гиперболического типа на основе характеристических соотношений. Журн. вычисл. матем. и матем. физики, т.9(2), с. 383-396, 1969). Этот метод применялся для решения задач аэродинамики, физики плазмы, лазерного термоядерного синтеза, задач медицины, механики деформируемого твердого тела, геофизики, сейсморазведки, задач безопасности железных дорог, а также задач аэрокосмического комплекса. Далее рассматривается применение сеточно-характеристического метода для задач сейсморазведки.

Задача сейсморазведки является задачей о распространении волн в гетерогенных многомерных геологических средах. Сигнал от источника распространяется по всей геологической структуре, после чего отраженные волны регистрируются на приемниках в виде сейсмограмм, представляющих собой зависимость скоростей на дневной поверхности геологической среды от времени прихода на приемник. Этот способ сейсморазведки в настоящее время распространен так же в Арктической зоне, где получение информации о залежах нефти и газа имеет определенные особенности (наличие морской среды, ледяных полей и крупных ледовых образований и др.). В дополнение, различные неоднородности, такие как трещины, антиклиналы, ледовые конструкции, газовые полости, вносят существенный вклад в сейсмограммы, что делает процесс их интерпретации еще более сложным. Математическое моделирование процессов сейсморазведки (с помощью сеточно-характеристического метода) позволяет более детально исследовать рассматриваемые геологические структуры, проводить расчеты с учетом различных неоднородностей с целью дальнейшей интерпретации полученных натуральных данных.

Сеточно-характеристический метод разработан для проведения расчетов как на гексаэдральных, так и на тетраэдральных сетках в 3D случае (прямоугольных и треугольных в 2D случае). В работе используется

сеточно-характеристический метод третьего порядка точности на структурных гексаэдральных расчетных сетках для решения прямых задач сейсморазведки в условиях Арктики с явным выделением контактных границ на поверхностях раздела сред. Результаты моделирования позволяют судить о характере неоднородностей в исследуемых геологических средах.

Цели и задачи работы

Целью данной работой является адаптация сеточно-характеристического метода к численному решению прямых пространственных задач сейсморазведки на гексаэдральных расчетных сетках, разработка подходов к расчету волновых процессов в гетерогенных геологических средах с решением задач контактного разрыва на поверхностях раздела сред, а также анализ и исследование пространственных расчетных волновых картин и сейсмограмм.

Задачами данной работы являлись:

1. Разработка модификации сеточно-характеристического метода для решения задачи контактного разрыва для трещиноватых сред с использованием модели Шонберга для моделирования распространения сейсмических волн при решении задач сейсморазведки.

2. Разработка механико-математических и расчетных моделей, описывающих волновые процессы для трещиноватых геологических сред с помощью модели двухбереговой бесконечно тонкой трещины, и исследование различных подходов к моделированию одиночных трещин, а также кластеров трещин.

3. Разработка механико-математических моделей геологических сред в условиях Арктического шельфа с учетом наличия крупных ледовых образований: ледовых полей, айсбергов, торосов; анализ их влияния на волновые процессы.

4. Постановка и численное решение задачи о распространении упругих волн в геологической среде с гидроразрывом пласта (ГРП). Адаптация сеточно-характеристического метода для решения задачи о распространении упругих волн в геологической среде с антиклинальными структурами. Проведено исследование влияния кратных волн на волновые поля и сейсмограммы, а также компенсация их влияния. Постановка, численное решение и адаптация сеточно-характеристического метода для решения задач безопасности буровых работ при наличии газовых полостей и обнаружение полостей с метаном ("метановые бомбы") в северных районах Российской Федерации.

5. Верификация расчетных данных, полученных с помощью разработанных подходов и алгоритмов, для решения задач о волновых процессах в условиях трещиноватых сред, газовых полостей, гидроразрыва пласта, а также в условиях Арктического шельфа.

6. Реализация разработанных методов и алгоритмов в виде программного комплекса.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан сеточно-характеристический метод расчета параметров геологической среды на границе трещины с помощью модели Шонберга (задача контактного разрыва) на структурированных расчетных сетках. Проведено тестирование и верификация.

2. Предложен подход к моделированию волновых процессов в геологических средах с наклонными трещинами на структурированных сетках.

3. Постановка и численное решение задачи о распространении сейсмических откликов, инициируемых микросейсмами, в однородной среде в присутствии трещины гидроразрыва пласта.

4. Проведена постановка задач, разработка моделей сред, адаптация сеточно-характеристического метода и получено численное решение задач сейморазведки в присутствии крупных ледовых образований: айсбергов, торосов, ледовых полей.

5. Исследовано влияние кратных волн в присутствии ледовых полей в задачах сейморазведки в Арктическом регионе; проведено численное исследование явления кратных волн в слое льда в задачах сейморазведки.

6. Проведена постановка задач и разработан алгоритм решения задач с помощью сеточно-характеристического метода для мониторинга территорий с газовыми полостями и метановыми бомбами на основе численного решения серии прямых динамических задач механики сплошных сред.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложенный метод расчета параметров геологической среды на границе трещины, описываемой моделью Шонберга (задача контактного разрыва) с использованием сеточно-характеристического метода на структурированных сетках позволяет решать широкий круг задач о распространении волн в гетерогенных геологических средах. Предложенная

методика решения задач сейсморазведки при наличии различных неоднородностей: трещин, ледовых образований (айсбергов, ледовых полей, торосов), газовых полостей (газовых карманов, "метановых бомб") – может найти практическое применение в реальных задачах, возникающих при проведении геологоразведочных и буровых работ в северных условиях.

2. Сеточно-характеристический метод адаптирован для решения важной практической задачи идентификации трещины гидроразрыва пласта с использованием микросейсмов.

3. Сеточно-характеристический метод адаптирован для решения важной прикладной задачи о безопасности буровых работ (обнаружение газовых полостей при буровых работах).

4. Разработаны механико-математические модели, адаптирован сеточно-характеристический метод и проведена постановка прямых задач сейсморазведки в Арктических условиях (при наличии крупных ледовых образований: айсбергов, ледовых полей, торосов).

5. На основе сеточно-характеристического метода предложена постановка задач и предложен алгоритм решения прямой задачи для обнаружения антиклинальных структур.

Работа поддержана рядом государственных грантов:

1. Грант РФФИ 14-11-00263. Разработка новых методов и алгоритмов для задач поиска и разведки углеводородов в условиях арктического шельфа с использованием высокопроизводительных вычислений. 2014-2016 г.

2. Грант РФФИ 17-71-20088. Разработка суперкомпьютерных технологий динамического анализа разрушений промышленных и гражданских объектов при интенсивных сейсмических воздействиях. 2017-2020 г.

3. Грант РФФИ 20-71-10028. Развитие гибридных численных методов и разработка комплексов программ для моделирования волновых полей в гетерогенных твердых деформируемых средах с целью явного выделения неоднородностей и учета топографии поверхности. 2020-2023 г.

4. Грант РФФИ 16-07-00233 А. Численное моделирование сейсмической разведки и взаимодействия оффшорных объектов с ледяными структурами в условиях Арктического шельфа. 2016-2018 г.

5. Грант РФФИ 16-29-02018 офи_м. Разработка нового численного метода совместной инверсии сейсмических и электромагнитных данных, включая нелинейную инверсию, и программного комплекса на его основе". 2016-2018г.

6. Грант РФФИ 16-29-15097 офи_м. Разработка численных методов и технологий высокопроизводительных вычислений для получения ин-

формации о нетрадиционных коллекторах углеводородов. 2016-2018 г.

7. Грант РФФИ 16-37-80038 мол_эв_а. Разработка алгоритма совместного обращения акустического и электромагнитного полей на основе приближённого решения уравнения Липпмана-Швингера на высокопроизводительной вычислительной системе. 2016 г.

8. Грант РФФИ 17-20-01096 офи_м_РЖД. Разработка методов численного моделирования для оценки воздействия на инфраструктуру поездов. 2017-2018 г.

9. Грант РФФИ 18-01-00526 А Численное моделирование динамического процесса разрушения многоэтажных конструкций в результате сейсмических воздействий. 2018-2020 г.

10. Грант РФФИ 18-31-20063 мол_а_вед. Разработка суперкомпьютерных технологий для моделирования и изучения волновых процессов в гетерогенных средах. 2018-2020 г.

11. Грант РФФИ 19-01-00281 А. Разработка численных методов для решения прямых задач сейсмической разведки трещиноватых зон. 2019-2021 г.

12. Грант РФФИ 19-07-00366 А. Разработка численных методов и параллельных алгоритмов для решения задач сейсмической разведки газовых карманов в условиях Северных регионов Российской Федерации. 2019-2021 г.

13. Грант РФФИ 20-02-00261 А. Численное исследование анизотропии сейсмических сигналов-откликов от трещиноватых геологических структур. 2020-2022 г.

14. Грант РФФИ 20-31-90034 Аспиранты. Разработка методов для явного выделения контактных границ неоднородностей в моделях гетерогенных геологических сред. 2020-2022 г.

Методология и методы исследования

В работе используется методология математического моделирования с применением сеточно-характеристического метода на структурированных гексаэдральных (в 3D случае) и четырехугольных (в 2D случае) сетках, методы вычислительной математики, линейной алгебры, механики твердых деформируемых тел, для исследования волновых процессов в гетерогенных средах в присутствии различных неоднородностей.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложен сеточно-характеристический метод расчета механических параметров на контактной границе для модели трещины Шонберга.

2. Разработан подход к моделированию геологических сред с наклонными трещинами на структурированных сетках.

3. Сформулирована постановка задачи и предложена адаптация сеточно-характеристического метода для численного решения задачи о распространении упругих волн, инициируемых микросейсмами, в геологической среде с гидроразрывом пласта.

4. Предложена постановка задач, механико-математическая модель и адаптация сеточно-характеристического метода для решения прямых задач сейсморазведки в условиях Арктического шельфа в присутствии крупных ледовых образований: айсбергов, торосов, ледовых полей; проведен сравнительный анализ их влияния на волновые поля и сейсмограммы.

5. Постановка и численное решение прямой задачи сейсморазведки в геологической среде с антиклинальными структурами.

6. Изучено влияние кратных волн в ледовом поле в Арктической шельфовой зоне на волновые поля и сейсмограммы (задачи сейсморазведки в условиях Арктики).

7. Разработан подход (проведена постановка задачи, адаптация сеточно-характеристического метода, разработан численный алгоритм) для численного решения проблемы мониторинга территорий с газовыми полостями и "метановыми бомбами" (проблема безопасности буровых работ) в условиях Севера Российской Федерации.

8. Проведена верификация расчетных данных, полученных с помощью разработанных подходов и алгоритмов, для решения задач о волновых процессах в условиях трещиноватых сред, газовых полостей, гидроразрыва пласта, а также в условиях Арктического шельфа.

9. Разработанные методы и алгоритмы реализованы в виде программного комплекса.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием численных методов, обладающих свойствами сходимости (аппроксимация устойчивости), прошедших широкую апробацию при решении многих научных и прикладных задач, а также сравнение результатов, полученных по разным моделям. Проведено сопоставление результатов на структурированных и неструктурированных расчетных сетках, а также с точным решением, полученным в Институте геофизики Национальной академии наук Украины.

Результаты по теме диссертационного исследования опубликованы в 28 научных работах, 4 из которых – в журналах, рекомендованных ВАК ([6] – [9]), 13 – в изданиях, индексируемых системой Scopus ([1] – [5], [10] – [15], [27] – [28]), 5 – в изданиях, индексируемых системой Web of Science ([2], [4],– [5], [14], [28]) , 25 – в изданиях, индексируемых системой РИНЦ ([4] – [26], [28]).

Основные результаты работы были доложены, обсуждены и получили одобрение специалистов на семинарах кафедры информатики и вычислительной математики МФТИ, а также на 15 конференциях, включая 10 международных и 4 всероссийских научных конференций:

1. 58-я, 59-я, 60-я, 61-я, 62-я научные конференции МФТИ. 2015-2019, г. Долгопрудный.
2. Quasilinear Equations, Inverse Problems and Their Applications (QIPA). Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny. 2016, 2017, 2019.
3. XVII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, г. Новосибирск, 2016 г.
4. XVII International Seminar Mathematical Models and Modeling in Laser Plasma Processes and Advanced Science Technologies. 28 May – 1 June, 2018 Budva, Montenegro.
5. The 3rd BRICS Mathematics Conference, 2019 г. Иннополис, г. Казань.
6. European Association of Geoscientists and Engineers. Conference Proceedings, Tyumen 2019, Mar 2019.
7. 81st EAGE Conference and Exhibition 2019, г. Лондон.
8. Международная конференция. Марчуковские научные чтения - 2019. Новосибирск.
9. 50 лет развития сеточно-характеристического метода. 2018. Долгопрудный.
10. Геомодель. 2018, 2019. Геленджик.
11. Международная конференция «Дегазация Земли: геология и экология – 2018», Москва.
12. Морские исследования и образование. (MARESEDU-2017) VI Международная научно-практическая конференция. 2017.
13. Научно-практическая конференция. Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение. 2017.
14. Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений 2017 (СПММОИИПВ-

2017). Международная научная конференция. 2017. Дивноморск.

15. Международная конференция по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 110 страниц. Список литературы содержит 115 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, описано текущее состояние и степень проработанности задач, сформулирована цель и поставлены задачи, описаны научная новизна и теоритическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, описаны положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию используемой в работе механико-математической модели сред: линейно-упругой среды и акустической среды. Определяющая система уравнений для линейно-упругой среды выглядит следующим образом:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma})^T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial t} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} + \mu(\nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^T), \quad (2)$$

где \mathbf{v} – вектор скорости, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений Коши, ρ – плотность геологической среды, t – время, λ и μ – параметры Ламе, определяющие свойства упругого материала.

Определяющая система уравнений для акустической среды представлена в следующем виде:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla \mathbf{p}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = -\rho c^2 (\nabla \cdot \mathbf{v}), \quad (4)$$

где ρ – плотность среды, p – давление, c – скорость звука в идеальной жидкости.

Вторая глава посвящена численному методу, который используется во всех расчетах представленной диссертационной работы. В разделе 2.1 описан сеточно-характеристический метод на структурированных прямоугольных и кубических сетках для двумерного и трехмерного случая, соответственно, который применялся для численного решения представленных задач. Рассмотрим метод для двумерного случая. Представим систему (1), (2) в виде:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} v_j = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma_{ij} = \lambda \left(\sum_k \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) I_{ij} + \mu (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i), i, j, k \in 1, 2, 3. \quad (6)$$

Запишем систему уравнений (5) – (6) в матричном виде:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_1} + \mathbf{A}_2 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_2} = 0, \quad (7)$$

где матрицы \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 составлены из коэффициентов системы (5) – (6), вектор \mathbf{q} состоит из двух компонент скорости и трех компонент тензора напряжений Коши:

$$\mathbf{q} = \{v_x, v_y, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}\}^T \quad (8)$$

Применим к уравнению (7) метод расщепления по пространственным координатам:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = \mathbf{A}_j \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_j}, j = 1, 2 \quad (9)$$

Каждая из систем (9) – гиперболическая, следовательно, обладает полным набором собственных векторов с действительными собственными значениями. Представим каждую из систем (9) в виде:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = \Omega_j^{-1} \Lambda_j \Omega_j \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_j}, \quad (10)$$

где Ω_j – матрица, столбцы которой – собственные векторы матрицы \mathbf{A}_j , Λ_j – диагональная матрица, элементы которой – собственные значения матрицы \mathbf{A}_j . Для всех j матрица Λ имеет вид:

$$\Lambda = \text{diag}\{\lambda_m\}_{m=1,\dots,5} = \text{diag}\{c_1, -c_1, c_2, -c_2, 0\}, \quad (11)$$

где $c_1 = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ – продольная скорость звука, $c_2 = \sqrt{\mu/\rho}$ – поперечная скорость звука в среде.

Делаем замену переменных $\boldsymbol{\nu} = \Omega \mathbf{q}$, $\boldsymbol{\nu} = \{\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4, \nu_5\}$, после чего каждая из систем (10) распадается на пять независимых уравнений переноса:

$$\frac{\partial \nu_m}{\partial t} + \lambda_m \frac{\partial \nu_m}{\partial x} = 0, \quad m = 1, \dots, 5. \quad (12)$$

Каждое из одномерных уравнений переноса (12) можно решить произвольной конечно-разностной схемой.

Затем, можно найти решение:

$$\mathbf{q}^{n+1} = \Omega^{-1} \boldsymbol{\nu}^{n+1} \quad (13)$$

В диссертации в параграфе 2.1 описан сеточно-характеристический метод для трехмерного случая. В параграфе 2.2 описан алгоритм вычисления точек на границе областей интегрирования, в параграфе 2.3 – алгоритм вычисления точек на контактной границе между линейно-упругой и акустической средой.

Третья глава посвящена исследованию сейсмических волновых полей в трещиноватых средах. Трещины вносят дополнительный вклад в сейсмические данные, полученные при проведении геологической сейсморазведки по поиску углеводородов, что необходимо учитывать при построении моделей с трещинами. В данной работе используются две модели трещины – модель трещины Шонберга (или Linear Slip Model,

сокращенно LSM) и модель двухбереговой бесконечно тонкой трещины (БТТ).

В параграфе 3.1 для модели Шонберга представлен разработанный алгоритм вычисления значений компонент вектора скорости и тензора напряжений в точках на границах трещины для линейно-упругой среды. Модель Шонберга характеризуется следующими граничными условиями, где индексы l и r относятся к узлам сетки слева и справа от трещины:

$$\sigma_{xx}^l = \sigma_{xx}^r, \quad (14)$$

$$\sigma_{xy}^l = \sigma_{xy}^r, \quad (15)$$

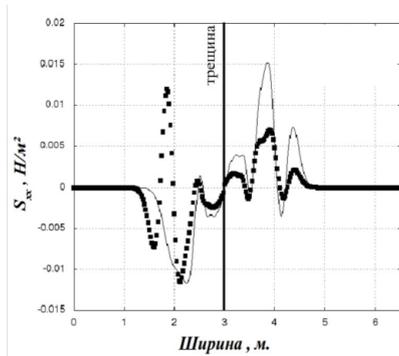
$$\frac{\sigma_{xx}}{\partial t} = K_T \cdot (v_x^r - v_x^l), \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_{xy}}{\partial t} = K_N \cdot (v_y^r - v_y^l). \quad (17)$$

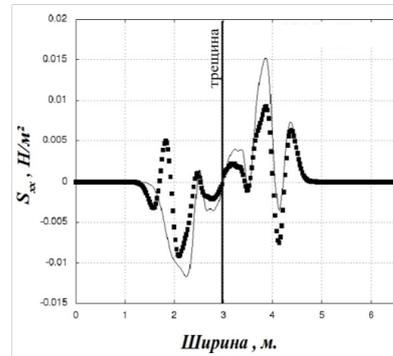
В уравнениях (14)-(15) обозначено равенство нормальной и касательной компонент тензора напряжений слева и справа от трещины, в уравнениях (16)-(17) – способ вычисления нормальной и касательной компонент тензора напряжений. K_N, K_T – так называемые параметры раскрытости трещины, характеризующие трещину. В работе условия (14)-(17) внедряются в сеточно-характеристический метод.

Также, проводится сравнение расчетов с использованием разработанного алгоритма на основе модели трещины LSM с расчетами с помощью модели двухбереговой бесконечно тонкой трещины (БТТ) с помощью сеточно-характеристического метода. Приводятся результаты расчета распространения сейсмических волн от точечного источника в однородной среде с трещиной. Для сравнения результатов расчетов по двум моделям, необходимо подобрать максимально приближенные параметры K_N, K_T к модели БТТ. Таким образом, параметры раскрытости для модели трещины LSM выбираются следующим алгоритмом. Значение параметра K_N равно нулю, чтобы тангенциальные компоненты тензора напряжений слева и справа от трещины были равны нулю. Значение параметра K_T должно стремиться к бесконечности, чтобы значения продольных компонент скорости были равны слева и справа от трещины. В проводимых расчетах по модели LSM значение параметра K_N равно нулю. Значение параметра K_T принимает ряд значений 100, 200, 400 для исследования соответствия модели трещины LSM и модели БТТ. На рис. 1а, рис. 1б, рис. 1в представлены результаты сравнения аномального волнового поля продольной компоненты тензора напряжений

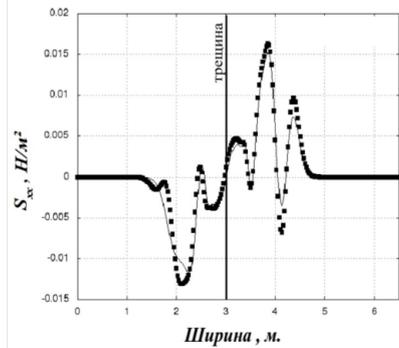
σ_{xx} для модели LSM при различных значениях K_T и трещины БТТ. Сплошной линией обозначен сейсмический отклик от трещины по модели БТТ, пунктирными точками — по модели трещины LSM. При увеличении параметра раскрытости трещины K_T графики качественно сближаются (рис. 1в). Это соответствует условию, описываемому уравнением (16). Результаты расчетов с использованием модели трещины LSM имеют хорошее совпадение с результатами расчетов по модели БТТ. Для максимального соответствия моделей необходимо устремить параметр раскрытости K_T к бесконечности.



а) Результат моделирования волнового отклика от трещины для $K_T = 100$ при $t = 0.5$ с.



б) Результат моделирования волнового отклика от трещины для $K_T = 200$ при $t = 0.5$ с.



в) Результат моделирования волнового отклика от трещины для $K_T = 400$ при $t = 0.5$ с.

Рис. 1: Результаты моделирования волнового отклика от трещины по модели трещины LSM и БТТ.

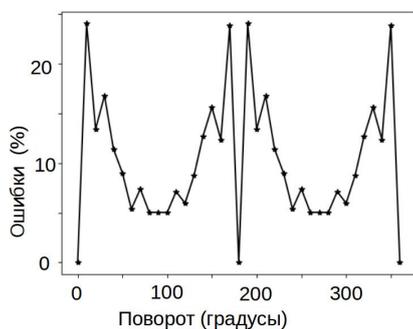
В параграфе 3.2 представлены результаты исследования сейсмических волн в трещиноватых средах с использованием модели двухбереговой бесконечно тонкой трещины с помощью численного моделирования.

Одна из серий расчетов рассматривает отклики от одиночной трещины. Рассматриваются два подхода к моделированию трещин. В первом случае трещина сонаправлена с границами ячеек сетки, во втором — не сонаправлена. Для моделирования трещины используется модель двухбереговой бесконечно тонкой трещины. Рассматриваются флюидонасыщенные трещины с заданной плотностью поверхностных сил на границе. Все представленные модели считались с помощью сеточно-характеристического метода 3-го порядка точности на прямоугольных структурированных сетках. Проводится серия расчетов для различной постановки приемно-излучающей системы с фиксированным положением трещины и серия расчетов для различного угла наклона трещины относительно неподвижной системы источник-приемники. Исследуется зависимость разницы между данными постановкам задач от частоты излучающего сигнала и размера шага по координате.

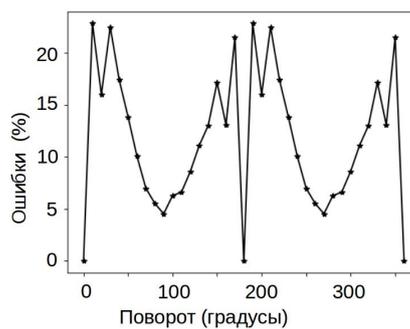
На рис. 2 изображена зависимость в процентах разницы между сейсмограммами в двух постановках задач от значения расчетного шага по пространству а) 0.5 м, б) 1 м, в) 2 м. По оси x представлен угол наклона трещины в градусах ($0 - 360$), по оси y — разница между двумя подходами в процентах. Из графиков на рис. 2 следует, что с уменьшением значения расчетного шага по пространству величина разницы между сейсмограммами для двух постановок задач уменьшается.

Аналогичные графики разницы между сейсмограммами в двух постановках задач представлены для зависимости от частоты сейсмического источника: 60 Гц, 30 Гц, 15 Гц, которые также демонстрируют уменьшение величины разницы между сейсмограммами для двух постановок задач с уменьшением частоты. В дополнение, представлены амплитуды сейсмических откликов от наклонной трещины и вертикальной трещины, которые демонстрируют хорошее совпадение. Также, в разделе приведены результаты сравнения результатов моделирования отраженных волн от одиночной наклонной трещины для расчетов на структурированных сетках с использованием сеточно-характеристического метода и для расчетов на неструктурированных сетках с использованием разрывного метода Галеркина. Результаты демонстрируют качественное и количественное совпадение волновых полей и значений скоростей на приемниках по различным методам.

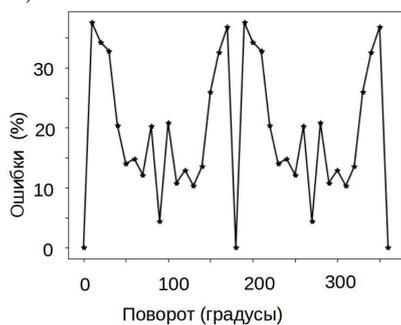
В параграфе 3.3 приведены результаты исследования волнового поля отражений от кластера параллельно расположенных трещин с помощью модели трещины БТТ. В первом случае, трещины расположены под углом 20° , система источник-приемники — параллельно границам расчетной сетки. Во втором случае, система источник-приемники расположена под углом 20° , трещины — параллельно границам расчетной области.



а) Расчетный шаг = 0.5 м.



б) Расчетный шаг = 1 м.



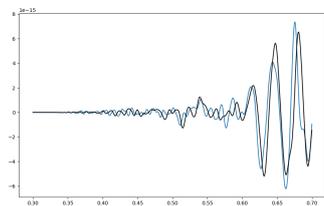
в) Расчетный шаг = 2 м.

Рис. 2: Зависимость ошибки разницы между расчетами от угла наклона приемников/трещины при расчетном шаге, равном а) 0.5 м ; б) 1 м ; в) 2 м.

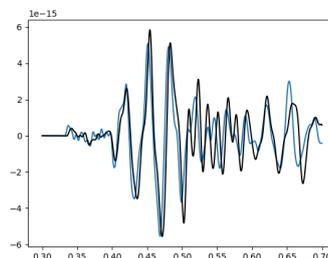
На рис. 3 а,б представлены графики значений компоненты скорости V_x и V_y , соответственно, которые получены на одном из приемников сигнала. Синей линией обозначена компонента скорости для случая трещин под углом 20° , черной линией – компонента скорости для случая системы источник-приемники под углом 20° . Из графиков следует хорошее количественное совпадение значений обеих компонент скорости.

Также, приводятся волновые поля и сейсмограммы для кластера наклонных трещин и вертикальных трещин. Результаты численного моделирования показывают, что представленный подход для моделирования наклонных трещин является применимым для моделирования распространения упругих волн в трещиноватых средах. Данный метод может быть использован в дальнейшем для интерпретации сейсмограмм в геологических средах со сложными трещиноватыми включениями, которые являются типичными для нефтяных и газовых резервуаров.

В параграфе 3.4 представлены результаты моделирования двумерной модели трещины гидроразрыва пласта (ГРП) в однородной среде с



а) График компоненты скорости V_x



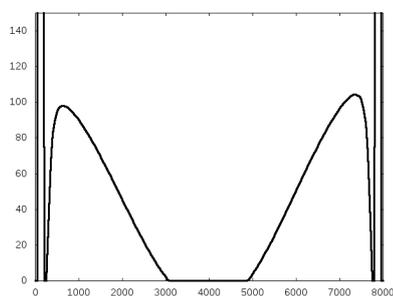
б) График компоненты скорости V_y

Рис. 3: Волновые картины откликов от кластера параллельных трещин: а) трещины – под углом 20° , б) источник и приемники – под углом 20°

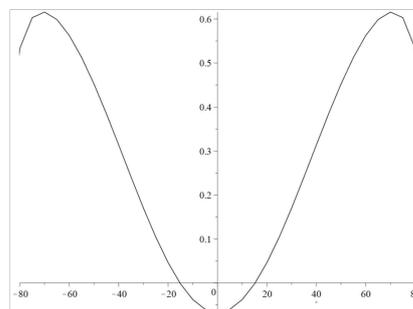
помощью сеточно-характеристического метода. Для моделирования трещины, используется модель БТТ из раздела выше. В дальнейшем, по полученным волновым картинам и сейсмограммам возможно решить обратную задачу – определить местонахождение подземного источника импульсов. Данная задача имеет применение в реальных работах сейсморазведки с целью использования природного источника сейсмических волн вместо искусственного.

В параграфе 3.5 представлены результаты сравнения численного решения с аналитическим решением задачи о распространении упругих волн в гетерогенной среде с кластером трещин. Приводятся сейсмограммы вертикальной компоненты скорости V_y для отраженной волны от кластера трещин. Также, представлены распределения амплитуд вертикальной компоненты скорости V_y в зависимости от расстояния между источником и приемником для отраженной волны от кластера трещин. На рис. 4а изображен график для численного решения задачи получения амплитуд отраженных волн от кластера трещин, на рис. 4б – аналогичный график для аналитического решения описанной задачи, полученное в Институте геофизики Национальной академии наук Украины. Графики качественно совпадают, что подтверждает применимость используемой модели бесконечно тонкой трещины в расчетных моделях.

Четвертая глава посвящена решению задач сейсморазведки для зоны Арктического шельфа, главной особенностью которого является наличие разнообразных ледовых образований. Ледовый покров, торосы, айсберги вносят существенный вклад в сейсмограммы, которые получают на выходе геологи в результате исследования территории на наличие нефтегазовых залежей. В данной работе приведены результаты численного моделирования распространения упругих волн в моделях с ледо-



а) График амплитуд для отраженной волны от кластера трещин, численное решение.



б) График амплитуд для отраженной волны от кластера трещин, аналитическое решение.

Рис. 4: Графики амплитудных значений, полученные на основе численного решения задачи распространения волн в гетерогенной среде с кластером трещин.

вым покровом, айсбергами и торосом. Для каждой модели представлены сейсмограммы и волновые картины, которые показывают возможность отличия сейсмических откликов от ледяных конструкций от остальных отраженных волн.

В **пятой главе** приведены результаты исследования влияния антиклинальных структур на сейсмические отклики. Антиклинали - вид геологических структур, в которых накапливаются углеводороды. Для исследования территорий с антиклиналями часто применяется методика многоканального непрерывного сейсмического профилирования (МН-СП), во время которой система из источника сейсмического сигнала и приемников перемещается в водной толще за бортом судна. Движение системы источник-приемники заменяется серией расчетов для статического случая расположения регистрирующей системы. В результате расчетов, получается серия сейсмограмм, которые позже обрабатываются методом общей срединной точки для получения общей картины расположения антиклинали (то есть решается обратная задача – определение местонахождения залежи по сейсмограммам).

Шестая глава посвящена исследованию способов подавления кратных сейсмических волн в ледовых полях. С целью подавления кратных волн, возникающих в слое льда, во время георазведочных работ выпиливается небольшое углубление на поверхности ледового поля. Предполагается, что таким образом уменьшаются и даже иногда полностью убираются продольные сейсмические волны в ледовом поле, получаемые на сейсмограммах. В работе представлены результаты численного моделирования геологических сред со вставкой из плохо проводящего сейсми-

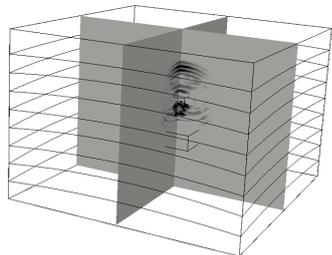
ческие волны материала и без вставки. Результирующие волновые поля, графики амплитуд продольных и поперечных компонент сейсмических скоростей и сейсмограммы показывают незначительную разницу между моделями со вставкой из плохо проводящего сейсмические волны материала и без нее. Также, полученные результаты демонстрируют хорошую возможность отличить отражения от границы лед-вода от других отражений.

В **седьмой главе** приводятся результаты исследования сейсмических волновых полей в северных морях при наличии газовых включений. Рассматриваются два типа газовых залежей – газовые полости и метановые бомбы.

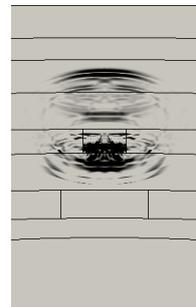
В параграфе 7.1 приводятся результаты исследования гетерогенных сред при наличии газовых полостей (или газовых карманов) для двумерного и трехмерного случая. Газовые карманы – залежи газа с аномально высоким пластовым давлением, вскрытие которых влечет за собой выбросы в атмосферу с возможным причинением ущерба объектам на поверхности. Поэтому важно своевременно проводить мониторинг территорий с данными газовыми залежами.

Приводятся результаты расчетов моделей с различным количеством газовых карманов – без газовых карманов, один, два и три газовых кармана, моделирующих распространение газа в слоистой структуре грунта для первого, второго, третьего и четвертого года, соответственно. На рис. 5а представлена разность волновых картин для третьего года расчета с 1-м годом в отсутствие газовых карманов для получения волновых откликов непосредственно от газовых карманов, на рис. 5б – аналогичная разность для двумерного случая. На волновых картинах градацией серого цвета изображены значения нормальных компонент скорости в геологических средах со значениями от 0 м/с (на рисунках - отсутствие линий) до 5.5 м/с (на рисунках - линии черного цвета) . Из рис. 5а, 5б следует, что газовые карманы приближаются к поверхности воды, что грозит скорым выбросом газа в атмосферу. Также, из рис. 5а, 5б следует качественное совпадение двумерных и трехмерных сейсмических откликов от газовых карманов, что является важным для ускорения расчетов с помощью дальнейшей замены трехмерных моделей двумерными.

В результате моделирования распространения сейсмических волн для двумерных и трехмерных моделей с газонасыщенными породами на криволинейных сетках методом сквозного счета, получаются волновые картины и сейсмограммы (включая аномальное поле от газовых залежей). Полученные результаты для трехмерных моделей хорошо совпадают с результатами аналогичных исследований для двумерных моделей, что в дальнейшем значительно упростит проведение подобных расчетов с по-



а) волновое поле отражений от газового кармана для третьего года расчета в 3D модели.



б) волновое поле отражений от газового кармана для третьего года расчета в 2D модели.

Рис. 5: Волновые картины сейсмических откликов от газовых карманов в 2D и 3D моделях для третьего года расчета в момент времени $t = 0,5$ сек.

мощью замены трехмерных моделей двумерными в похожих постановках задач.

В параграфе 7.2 исследуются сейсмические волновые поля в гетерогенных средах с метановыми бомбами. Метановые бомбы – один из разновидностей газовых полостей, представляющих опасность для наземных сооружений. Главное отличие метановых залежей от газовых карманов – низкая плотность, что требует иного подхода к моделированию. Так же, как и газовые карманы, важно уметь своевременно обнаруживать метановые бомбы и проводить постоянный мониторинг с целью принятия соответствующих мер безопасности в случае, если метан начнет устремляться к поверхности.

В работе приводятся результаты численного моделирования распространения сейсмических волн в моделях геологических сред с метановыми бомбами. Полученные результаты демонстрируют возможность отличия отраженных волн от метановых бомб от остальных волн, включая отражения от углеводородов.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Основные результаты диссертации

Основные результаты диссертации совпадают с положениями, выносимыми на защиту.

Публикации автора по теме диссертации

- [1] Стогний П.В., Петров И.Б. *Численное моделирование распространения сейсмических волн в моделях с ледовым полем в зоне арктического шельфа*, Компьютерные исследования и моделирование, 2020, т. 12, № 1, с. 73-82
- [2] Стогний П.В., Хохлов Н.И., Петров И.Б. *Численное моделирование волновых процессов в слоистых средах с газонасыщенными включениями: сравнение двумерных и трёхмерных моделей*, Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 489. - №4. - С. 351-354.
- [3] Стогний П.В., Хохлов Н.И., Петров И.Б. *Моделирование вертикальных трещин с помощью модели Шонберга на структурированных сетках сеточно-характеристическим методом*, РЭНСИТ, 2019, 11(3)351-356.
- [4] Polina V. Stognii, Dmitriy I. Petrov, Nikolai I. Khokhlov and Igor B. Petrov. *Simulation of seismic processes in geological exploration of Arctic shelf.*, Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, Volume 32, Issue 6, Pages 381–392.
- [5] Khokhlov N., Stognii P. *Novel approach to modeling the seismic waves in the areas with complex fractured geological structures.*, Minerals. Volume 10, Issue 2(122), 2020.
- [6] Стогний П. В. , Петров Д. И. , Хохлов Н. И. , Петров И. Б. *Численное моделирование сеточно-характеристическим методом влияния ледовых образований на сейсмические отклики* ., Математическое моделирование 2018. Том 30. номер 8 С. 107-115 [Электронный ресурс].
- [7] Стогний П. В. , Хохлов Н. И. *Численное моделирование распространения сейсмических волн в присутствии газовых карманов в зоне Арктического шельфа* , Neftegaz.ru. - 2018. - № 11. - С. 70 - 71.
- [8] Петров И.Б., Стогний П.В., Хохлов Н.И., Петров Д.И. *Исследование влияния антиклинальных структур в шельфовой зоне Арктики на сейсмические отклики сеточно-характеристическим методом* , Актуальные проблемы нефти и газа. Вып. 3(22) 2018
- [9] Петров И.Б., Стогний П.В., Хохлов Н.И. *Численное моделирование влияния ледовых образований на сейсмические отклики сеточно-характеристическим методом.*, Труды МФТИ. Т.7, №4(28). 2015 С. 38-48.

- [10] P. Stognii, N. Khokhlov and D. Grigorievii. *The Comparison of Two Approaches to Modelling the Seismic Reflection From the Fractured Media with the Help of Grid-Characteristic Method*, Publisher: European Association of Geoscientists and Engineers. Conference Proceedings, Tyumen 2019, Mar 2019, Volume 2019, p.1 - 4.
- [11] Stognii P., Khokhlov N, Zhdanov M. *Novel approach to modelling the elastic waves in a cluster of subvertical fractures*, 81st EAGE Conference and Exhibition 2019. Conference Paper.
- [12] Stognii P.V., Khokhlov N.I. *2D Seismic Prospecting of Gas Pockets*, In: Petrov I., Favorskaya A., Favorskaya M., Simakov S., Jain L. (eds) Smart Modeling for Engineering Systems. GCM50 2018. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 133. Springer, Cham.2019.
- [13] P. Stognii, A. Breus and N. Khokhlov. *Numerical Modelling of Seismic Waves Spread With the Presence of Gas Layers in the Arctic Region.*, Publisher: European Association of Geoscientists and Engineers. Source: Conference Proceedings, Geomodel 2018, Sep 2018, Volume 2018, p.1 - 5.
- [14] Stognii, P., Petrov, D., Khokhlov, N., Favorskaya, A. *Numerical modeling of influence of ice formations under seismic impacts based on grid-characteristic method*, Procedia Comput. Sci. 112, 1497–1505 (2017). DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.040
- [15] Stognii, P., Petrov, I., Favorskaya, A. *The influence of the ice field on the seismic exploration in the Arctic region.*, Conference Paper. Procedia Computer Science Volume 159, 2019, pp. 870-877. 23rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, KES 2019; Budapest; Hungary.
- [16] Стогний П.В., Хохлов Н.И., Петров И.Б. *Численное моделирование волновых процессов в геологических средах с газовыми карманами в зоне Арктического шельфа с помощью сеточно-характеристического метода.*, Труды Международной конференции. Марчуровские научные чтения - 2019. 2019
- [17] Голубев В.И., Петров И.Б., Маловичко М.С., Явич Н.Б., Стогний П.В. *Численное решение задач разведочной геофизики.*, Сборник статей первой международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, состоявшейся в рамках мероприятий Первого международного молодежного научно-практического форума "Нефтяная столица". 2018. С.: 64-69.

- [18] Голубев В.И., Фаворская А.В., Хохлов Н.И., Петров Д.И., Стогний П.В. *Влияние полярного климата на решение прямых и обратных задач сейсмической разведки.*, Полярная механика. Статья в журнале - материалы конференции. №4, 2018. С. 41-48 .
- [19] Стогний П.В., Хохлов Н.И., Петров И.Б. *Применение сеточно-характеристического метода для решения задачи сейсмического мониторинга.*, Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология – 2018». Актуальные проблемы нефти и газа. Вып. 4(23) 2018.
- [20] Петров Д.И., Стогний П.В. *Математические методы и прикладное программное обеспечение для решения ресурсоемких вычислительных задач в технологических и бизнес процессах нефтегазовой отрасли.*, Материалы научно-практической конференции. 2017. Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение. С.122-126. Статья в сборнике трудов конференции.
- [21] Стогний П.В., Петров Д.И., Хохлов Н.И., Петров И.Б. *Применение сеточно-характеристического метода к исследованию влияния антиклинальных структур и ледовых образований в шельфовой зоне Арктики на сейсмические отклики.*, Морские исследования и образование. (MARESEDU-2017) Труды VI Международной научно-практической конференции. 2017. С.352-355.
- [22] Стогний П.В., Петров Д.И. *Моделирование волновых процессов в Арктике в присутствии различных ледовых образований.*, Материалы научно-практической конференции. 2017. Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение. С.54-57. Статья в сборнике трудов конференции.
- [23] Стогний П.В., Петров Д.И. *Моделирование волновых процессов в зоне Арктического шельфа в присутствии торосов.*, Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений 2017 (СПММОИИПВ-2017). Труды Международной научной конференции. 2017. Статья в сборнике трудов конференции. С.261-263.
- [24] Petrov D., Khokhlov N., Petrov I., Stognii P. *Computer modeling of influence of ice structures on seismic replies in the Arctic.*, Supercomputing in scientific and industrial problems. Moscow, 2016.

- German-Russian Conference: abstracts. KIAM RAS. 2016. P.19-20. Тезисы доклада на конференции.
- [25] Stognii P. *The investigation of the ice field influence on the seismic prospecting works in the Arctic region.*, Computational mathematics and information technologies. V.1(1), 2020. P.31-36.
- [26] Стогний П.В., Хохлов Н.И., Петров И.Б. *Моделирование волновых процессов в геологических трещиноватых средах с использованием модели Шонберга* Прикладная математика и механика, 84(3), с.375-386, 2020.
- [27] P. Stognii, I. Petrov, V. Golubev, and A. Shevchenko. *The investigation of multiple waves in models with an ice field in the Arctic region with the help of the grid-characteristic method.*, Publisher: European Association of Geoscientists and Engineers. Source: Conference Proceedings, Geomodel 2019, Sep 2019, Volume 2019, p.1 - 5.
- [28] Stognii P.V., Khokhlov N.I., Petrov I.B. *Numerical modeling with a grid-characteristic method of elastic wave propagation in geological media with gas cavities.* Numerical Analysis and Applications, 13(3), p.271-281, 2020.