

На правах рукописи



Тыщенко Андрей Геннадьевич

**Численное моделирование распространения
широкополосных акустических сигналов в
мелком море с использованием модовых
параболических уравнений**

1.3.7 – Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток – 2025

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В настоящее время в акустике океана активно развиваются методы математического моделирования распространения звука в трёхмерных неоднородных волноводах и разрабатываются комплексы программ, основанные на данных методах.

Математическое описание таких эффектов как отражение, преломление, дифракция и рассеяние акустических волн в трёхмерном пространстве, то есть одновременно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, рассматриваются в литературе на протяжении нескольких десятилетий. Обзоры наиболее ранних работ представлены, например, в книге [1] и статье [2]. В дальнейшем были разработаны первые эффективные и достаточно точные методы численного моделирования распространения звука, например, основанные на трёхмерных параболических уравнениях. Необходимость учитывать трёхмерные эффекты также была экспериментально подтверждена в ряде работ 1990-2005 гг. [1, 2].

Немаловажно также отметить работы, посвящённые трёхмерным эффектам, возникающим в сложных природных акустических волноводах, например, из-за соляных клинов в устьях рек и нелинейных внутренних волн в областях континентального шельфа, и влиянию батиметрии на трёхмерную фокусировку, дефокусировку и дифракцию акустических волн.

Большое внимание в литературе уделяется исследованию точности и применимости различных современных методов моделирования распространения и рассеяния звука в трёхмерных океанических волноводах. Например, методы конечных элементов были рассмотрены в работе [3], где они были применены для моделирования акустического давления в скоплениях пузырьков, создаваемого вокализациями горбатых китов. Другая группа численных методов, основанных на методе параболического уравнения и впервые представленных в подводной акустике в 1973 году, в дальнейшем была развита в рабо-

те [4], в которой особое внимание уделено перекрёстным членам, содержащим производные по глубине и угловой координате и возникающим из квадратного корня при формальной факторизации уравнения Гельмгольца. Лучевая теория распространения звука была также применена для расчёта трёхмерных звуковых полей и была протестирована в ходе моделирования натуральных экспериментов в Восточно-Китайском море в работе [5]. Улучшению качества моделирования распространения звука в задачах с реальными внутренними волнами посвящена работа [6], в рамках которой был разработан комбинированный метод моделирования, включающий нелинейную модель внутренних волн в комбинированный метод моделирования акустических полей с учётом данных о скорости звука, полученных из региональной модели циркуляции океана. Также, в недавних работах внимание уделяется моделированию рассеяния, например, с использованием методов, основанных на явной численной схеме для решения интегрального уравнения Кирхгофа во временной области, методе кратковременных эквивалентных источников для задач широкополосного рассеяния, методах расчёта функции Грина для моделирования рассеяния на больших расстояниях, возникающего из-за объектов, расположенных на морском дне или погружённых в него.

Некоторые методы, описанные в литературе, также имеют открытую программную реализацию. Так, например, программы BELLHOP3D [5] и TRACEO3D [7] реализуют метод моделирования распространения звука, основанный на трассировке лучей и гауссовых пучков. В KRAKEN3D [8] реализовано вычисление акустических полей в рамках модового разложения. Также, моделирование путём решения трёхмерных параболических уравнений реализовано в CAPRE3D [9].

Настоящая диссертация посвящена широкоугольным модовым параболическим уравнениям, которые известны уже достаточно давно, однако до сих пор не получили широкого распространения. Несмотря на это, использование таких уравнений представляется перспективным, так как в сравнении с узкоугольными параболическими уравнениями они позволяют получать более

точные решения, при этом требуя лишь незначительного увеличения объёма вычислений. Так, самым трудоёмким этапом является решение акустической спектральной задачи, которое может быть выполнено заранее для изучаемой области, что значительно ускоряет процесс моделирования, так как само решение уравнения занимает существенно меньшее количество времени. В настоящей работе также предложено применение лучевых стартеров, которые являются более подходящими для решения широкоугольных параболически уравнений в сравнении с традиционно используемыми начальными условиями Гаусса и Грина.

Степень разработанности темы исследования.

Настоящая диссертация является законченным научным исследованием, в котором выполнены все шаги по разработке нового инструмента для моделирование акустических полей в волноводах мелкого моря: предложен алгоритм расчёта звукового поля точечного источника, выполнена его программная реализация и её всесторонняя валидация на модельных задачах, а также реальных задачах оценки уровней звукового воздействия сейсморазведочных импульсов и сигналов, связанных с прохождением одиночного судна.

Цели и задачи диссертационной работы.

Целью настоящей диссертации является разработка эффективного метода моделирования распространения широкополосных акустических сигналов в трёхмерном волноводе мелкого моря и комплекса программ на основе этого метода, позволяющего решать широкий класс задач за разумное время.

В ходе работы над диссертацией были решены следующие задачи.

- Разработать эффективный метод численного решения широкоугольных параболических уравнений для моделирования поля точечного источника звука с возможностью искусственного ограничения расчётной области.
- Разработать комплекс программ на языке программирования C++, позволяющий выполнять моделирование распространения звука в волноводах, имеющих произвольную структуру, путём задания батиметрии,

гидрологии и параметров слоёв дна.

- Выполнить всестороннюю валидацию комплекса программ путём решения серии модельных задач и его апробацию в ходе выполнения расчётов уровней антропогенных акустических сигналов в океане.

Научная новизна.

В работе имеются следующие элементы научной новизны

1. Разработан новый алгоритм численного решения начально-краевых задач для псевдодифференциальных модовых параболических уравнений с граничными условиями прозрачности и начальным условием, моделирующим точечный всенаправленный источник колебаний.
2. Разработан новый комплекс программ на языке программирования C++, реализующий предложенный алгоритм численного решения, имеющий возможность указания параметров волновода с использованием конфигурационных файлов и размещённый в открытом доступе.
3. Впервые выполнены расчёты широкополосного акустического поля на заданной акватории, обусловленного прохождением одиночного судна, с учётом трёхмерного характера распространения звука в мелком море с неоднородным рельефом дна.

Теоретическая и практическая значимость.

В диссертации предложен метод моделирования распространения звука в волноводах мелкого моря с использованием модовых параболических уравнений. Предложенный подход реализован в виде комплекса программ на языке программирования C++, размещённом в открытом доступе. Разработанная программа позволяет выполнять трёхмерное моделирование распространения звука, трассировку лучей, соответствующих вертикальным модам, вычисление временного ряда импульса звукового сигнала и уровня звукового воздействия. При этом параметры волновода, модели и вычислений задаются с использованием конфигурационного файла, что существенно упрощает

проведение моделирования, сокращая время, затрачиваемое на подготовку вычислений. Также, при разработке комплекса программ, существенное внимание было уделено возможности его использования в качестве заголовочной библиотеки. Реализованный таким образом метод решения параболического уравнения может быть интегрирован в другие программы на языке программирования C++.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что разработанный комплекс программ позволил исследовать ряд физических эффектов, в частности важность учёта именно эффектов горизонтальной рефракции при моделировании распространения звука в клиновидном волноводе мелкого моря поперёк наклона дна.

Методология и методы исследования.

Алгоритм численного решения псевдодифференциальных модовых параболических уравнений (ПДМПУ) является модификацией известного метода SSP (split-step Padé, метод расщепления Паде), к которому добавлены граничные условия прозрачности для искусственного ограничения расчётной области. При дискретизации дифференциального оператора по поперечной переменной в методе SSP использованы аппроксимации по методу конечных разностей. При задании начальных условий для ПДМПУ используется лучевое представление акустического поля на небольшом расстоянии от точечного источника.

Программная реализация алгоритма была выполнена на языке программирования C++ с использованием стандарта языка C++20. При разработке особое внимание уделялось возможности использования реализации предложенных алгоритмов в качестве сторонней заголовочной библиотеки, путём широкого использования методов объектно-ориентированного и шаблонного программирования. Библиотека boost была использована для упрощения реализации интерфейса командной строки. Для вычисления дискретного преобразования Фурье использовалась библиотека fftw. Оптимизация операций, связанных с линейной алгеброй, была выполнена с применением библиоте-

ки Eigen. Библиотека SAMBALA использовалась для вычисления модовых функций и соответствующих им волновых чисел. Автоматизация процесса сборки для разных платформ выполнена с использованием программного средства CMake.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод решения псевдодифференциальных модовых параболических уравнений с искусственным ограничением расчётной области путём постановки граничных условий прозрачности или добавления к ней согласованных поглощающих слоёв, а также с использованием лучевого стартера позволяет корректно моделировать распространение звука в трехмерных волноводах мелкого моря в адиабатическом приближении и обеспечивает высокую скорость расчетов благодаря использованию шагов сетки превышающих длину волны.
2. Комплекс программ AMPLE, основанный на данном алгоритме и разработанный на языке программирования C++, позволяет моделировать распространение тональных и импульсных сигналов в океане с возможностью учёта трехмерных неоднородностей дна, а также двумерного поля скорости звука и структуры слоёв дна.
3. Моделирование распространения сигналов, связанных с сейсморазведочными работами и судоходством, проведённое с использованием разработанного комплекса прикладных программ, позволяет добиться точности до 1 дБ при сравнении уровней звукового воздействия (SEL) с данными прямых измерений, а также позволяет адекватно воспроизвести при моделировании распределение энергии сигналов этих типов по частотам.
4. При моделировании распространения звука в клиновидном прибрежном волноводе мелкого моря для акустических трасс, ориентированных вдоль изобат, допустимо пренебрежение межмодовым взаимодействием, а полный учёт горизонтальной рефракции за счёт широкоугольного

модового параболического уравнения позволяет получить решение с высокой точностью.

Степень достоверности и апробация результатов.

Методы, описанные в работе, а также их программная реализация [A1], были протестированы на множестве модельных задач и на экспериментах с использованием натуральных данных, полученных с подводных акустических регистраторов. Достоверность результатов обуславливается хорошей их согласованностью с известными методами моделирования и результатами натуральных измерений. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: на конференции «Days on Diffraction» (Санкт-Петербург, 2019 [A2], дистанционно 2022 [A3]), на конференции «РАСОН» (Владивосток, 2019 [A4]) на сессиях Российского акустического общества (дистанционно 2022 [A5], 2023 [A6]), на конференции «Океанологические исследования» (Владивосток, 2023 [A7]). Работа, которая легла в основу Главы 4 диссертации, была отмечена в качестве лучшей работы 2024 г в области акустики океана Научным советом РАН по акустике.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 10 печатных работах, из них 5 в рецензируемых научных журналах [A8, A9, A10, A11, A12], включённых в перечень ВАК, а также индексируемых в международных библиографических базах данных Scopus ("Скопус") и Web of Science ("Сеть науки").

Личный вклад автора.

Значительная часть результатов диссертации получена в работах автора, выполненных в соавторстве с научным руководителем Петровым П.С. и другими коллегами из ТОИ.

В Главе 2 автором были выведены граничные условия прозрачности для псевдодифференциальных модовых параболических уравнений, обеспечивающие отсутствие отражения волн на границах расчетной области. Также автором лично проведено тестирование в модельных задачах различных стартеров и установлено, что именно лучевой стартер позволяет полностью рас-

крыть потенциал метода SSP путем использования шагов по эволюционной переменной, превышающих длину волны.

В Главе 3 комплекс программ полностью разработан и реализован лично автором диссертации. Также лично автором проведено его тестирование в модельных задачах распространения узкополосных и широкополосных сигналов в океане. В частности, лично автором установлено, что при распространении звука вдоль изобат в клиновидном волноводе в дальнем поле взаимодействием мод можно полностью пренебречь, и интерференционная картина полностью определяется горизонтальной рефракцией звука.

В Главе 4 автором было лично выполнено моделирование акустического сигнала сухогруза, а также предложен алгоритм корректировки параметров дна для рассматриваемой акватории. Вклад автора в моделирование распространения сейсморазведочных импульсов состоит в программной реализации возможности учёта спектра сигнала в точке опорного измерения для оценки эффективного спектра в источнике.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

Общий объём диссертации 160 страниц, из них 132 страницы текста, включая 38 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 153 наименования на 21 странице.

Благодарности.

Автор выражает неимоверную благодарность и признательность научному руководителю д.ф.-м.н. Петрову П.С. за возможность получить несоизмеримый опыт при работе над множеством задач, за многолетнее сотрудничество в научной работе, результатом которой стала настоящая диссертационная работа, а также поддержку в различных задачах и начинаниях. Автор также выражает благодарность коллективу лаборатории 3/2 за продуктивную и дружественную совместную работу.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе приводится краткий обзор некоторых классов задач акустики океана, для решения которых моделирование трёхмерных звуковых полей играет важную роль, в частности рассматриваются задачи акустического мониторинга и дальней акустической навигации. Кратко обсуждаются известные средства моделирования трёхмерных акустических полей и формулируются требования к модели, которая разрабатывается в настоящей диссертации.

Вторая глава посвящена описанию математической части поставленной задачи и методам её решения. В **разделе 2.1** описывается математическая постановка задачи. Звуковое поле ищется в форме модового разложения

$$p(x, y, z) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j(x, y) \varphi_j(z, x, y), \quad (1)$$

где $A_j(x, y)$ называются модовыми амплитудами и в адиабатическом приближении удовлетворяют уравнению горизонтальной рефракции

$$\frac{\partial^2 A_j(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_j(x, y)}{\partial y^2} + k_j^2(x, y) A_j(x, y) = -\delta(x) \delta(y) \varphi_j(z_s, 0, 0), \quad (2)$$

при этом модовые функции $\varphi_j(z, x, y)$ и соответствующие им волновые числа $k_j(x, y)$ являются решениями соответствующей спектральной задачи при фиксированных x и y . Далее в **разделе 2.2** решение уравнения горизонтальной рефракции сводится к решению псевдодифференциального модового параболического уравнения вида (в приближении однонаправленного распро-

странения)

$$A_j(x, y) = e^{ik_{j,0}x} \mathcal{A}_j(x, y), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathcal{A}_j(x, y)}{\partial x} = ik_{j,0} \left(\sqrt{1 + L_j} - 1 \right) \mathcal{A}_j(x, y), \quad (4)$$

$$k_{j,0}^2 L_j = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_j^2(x, y) - k_{j,0}^2. \quad (5)$$

В разделе 2.3 подробно рассматриваются аппроксимация псевдодифференциального оператора и дискретизация уравнения (4) по координате x с использованием аппроксимации Паде и метода Split-step Padé (SSP). Последний заключается в формальном решении уравнения на равномерной сетке $\Delta x = h$ в виде

$$\mathcal{A}_j^{n+1} = e^{ik_{j,0}h(\sqrt{1+L_j})} \mathcal{A}_j^n. \quad (6)$$

Затем аппроксимация Паде применяется к операторной экспоненте

$$e^{ik_{j,0}h(\sqrt{1+L_j})} \approx \frac{U_{l,m}(L_j)}{W_{l,m}(L_j)} = a_{l,m}^0 + \sum_{i=1}^{p=\max\{l,m\}} \frac{a_{l,m}^i}{1 + b_{l,m}^i L_j}. \quad (7)$$

Далее в разделе 2.4 проводится дискретизация оператора L_j на равномерной сетке $\Delta y = \delta$ и приводится численная схема решения уравнения (4)

$$\mathcal{A}_j^{n+1,q} = a_{l,m}^0 \mathcal{A}_j^{n,q} + \sum_{i=1}^p a_{l,m}^i \mathcal{B}_{j,i}^{n+1,q}, \quad (8)$$

$$(1 + b_{l,m}^i L_j^\delta) \mathcal{B}_{j,i}^{n+1,q} = \mathcal{A}_j^{n,q}, \quad i = \overline{1, p}, \quad (9)$$

$$\underbrace{\frac{b_{l,m}^i}{k_{j,0}^2 \delta^2} \mathcal{B}_{j,i}^{n+1,q-1}}_{\alpha_{j,i}} + \underbrace{\left(1 + \frac{b_{l,m}^i}{k_{j,0}^2} \left(k_j^2 - k_{j,0}^2 - \frac{2}{\delta^2} \right) \right)}_{\beta_{j,i}} \mathcal{B}_{j,i}^{n+1,q} + \underbrace{\frac{b_{l,m}^i}{k_{j,0}^2 \delta^2} \mathcal{B}_{j,i}^{n+1,q+1}}_{\gamma_{j,i}} = \mathcal{A}_j^{n,q}. \quad (10)$$

Таким образом решение уравнения может быть получено путём последовательного обращения трёхдиагональных матриц.

В разделе 2.5 рассматриваются методы искусственного ограничения расчётной области. В первую очередь рассматривается метод согласованных

поглощающих слоёв, заключающийся в расширении вычислительной области на ε с обеих сторон по координате y и замене оператора L_j на оператор L_j^{PML}

$$k_{j,0}^2 L_j^{PML} = \frac{1}{1 + i\beta(y)} \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{1 + i\beta(y)} \frac{\partial}{\partial y} + k_j^2 + k_{j,0}^2, \quad (11)$$

где $\beta(y)$ – некоторая гладкая функция, монотонно возрастающая при удалении от исходной области. Затем выводятся граничные условия прозрачности, имеющие следующий вид на правой границе области $q = Q$

$$\Psi_j^{n+1,Q} - \Psi_j^{n+1,Q-1} = \sum_{l=1}^{n+1} \mathbf{D}_j^{n+1-l} \Psi_j^{l,Q}, \quad (12)$$

где $\Psi_j^{n,q} = \left(\mathcal{A}_j^{n,q}, \mathcal{B}_{j,1}^{n,q}, \dots, \mathcal{B}_{j,1}^{n,q} \right)^T \in \mathbb{C}^{p+1}$. Вычисление коэффициентов \mathbf{D}_j подробно описано в тексте работы. Граничные условия на левой границе имеют аналогичную форму. Заметим, что согласованные поглощающие слои и условия (12) обеспечивают идеальную прозрачную границу для уравнения, то есть согласуются с численной схемой.

В разделе 2.6 кратко описывается лучевая теория распространения звука и численный метод трассировки горизонтальных лучей, соответствующих вертикальным модам. Далее в разделе 2.7 вводятся лучевые начальные условия, лучше удовлетворяющие широкоугольным свойствам аппроксимации Паде по сравнению с начальными условиями Гаусса и Грина. Условия ставятся на некотором небольшом расстоянии x_0 от источника в предположении $k_j = k_j(y)$, и имеют следующий вид

$$\mathcal{A}_j(x_0, y) = M_j(x_0, y) e^{ik_{j,0} S_j(x_0, y)}, \quad (13)$$

$$S_j(y(l, \alpha)) = \int_0^l n_j(y(l, \alpha)) dl, \quad (14)$$

$$M_j(y(l, \alpha)) = \frac{M_{j,0}}{n_j(y(l, \alpha))} \sqrt{\frac{\cos \alpha}{\partial y(l, \alpha) / \partial \alpha}}, \quad (15)$$

$$M_{j,0} = e^{i\pi/4} / \sqrt{8\pi k_{j,0}}, \quad n_j(y) = k_j(y) / k_{j,0}.$$

Так как расстояние x_0 является небольшим (несколько десятков метров), имеет место предположить однородность k_j по обеим координатам $k_j(x, y) \equiv k_{j,0}$, тогда

$$\begin{aligned} S_j(y) &= r(y), & M_j(y) &= M_{j,0}/r(y), \\ r(y) &= \sqrt{x_0^2 + y^2}. \end{aligned} \tag{16}$$

В разделе 2.8 рассматривается расчёт временных рядов в точках приёма при распространении импульсных акустических сигналов. Импульсный сигнал получается из построения спектра сигнала в приёмниках с использованием звукового давления для каждой рассматриваемой частоты и последующим применением обратного преобразования Фурье. При этом функция или спектр источника могут быть известны напрямую или рассчитаны через импульс или спектр в некоторой опорной точке волновода. В разделе 2.9 описывается вычисление уровня звукового воздействия (SEL), представляющего собой интеграл спектра сигнала на отрезке частот $[f_1, f_2]$. В разделе 2.10 приводится описание методики расчёта колебательных скоростей и ускорений, выражаемых через градиент звукового давления по пространственным координатам. Ввиду использования модового разложения возможен переход к градиенту медленно изменяющихся функций, частные производные которых по пространственным координатам могут быть численно получены с использованием простых конечных разностей.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A8, A10, A11].

В третьей главе приводится описание программной реализации [A1] описанных методов моделирования распространения звука, а также их валидации и тестирования на модельных задачах. Реализация комплекса программ была выполнена на языке C++20 и доступна в открытом доступе по адресу: <https://github.com/GoldFeniks/Ample>. Раздел 3.1 посвящён детальному описанию структуры проекта, а также интерфейсу взаимодействия с программой. Программа AMPLE позволяет вычислять поле звукового давления, модовые функции и волновые числа, траектории распространения горизонтальных лучей, уровни поля звукового воздействия, временные ряды в

точках приёма для данного сигнала, излучаемого источником, поле колебательных ускорений. Конфигурация программы задаётся текстовым файлом, содержащим информацию о параметрах среды, координатах приёмника и источника, виде начальных условий и параметрах численной схемы решения.

В разделе 3.2 рассматривается тестирование и валидация разработанного комплекса программ. В качестве одной из задач было рассмотрено моделирование распространения звука в стандартном клиновидном волноводе мелкого моря, которая часто используется для валидации методов моделирования [10] (см. Рисунок 1). Звуковое поле было вычислено с порядком аппроксимации Паде $p = 13$, результаты вычислений для частоты $f = 25\text{Гц}$ отображены на Рисунке 2. Было проведено сравнение полученного решения (SSP) с решением, использующим широкоугольную аппроксимацию Клаербота (WAMPE) [11], а также с решением методом изображений [12, 13]. Как показано на Рисунке 4, решения всех методов совпадают, несмотря на адиабатическую природу модовых параболических уравнений, при этом большая апертура SSP метода ещё сильнее приближает решение к решению методом изображений вдали от источника. Далее было проведено сравнение горизонтальных лучей, вычисленных с использованием программы AMPLE [A1], а также лучей, полученных из закона Снеллиуса (см. Рисунок 3).

Результаты третьей главы опубликованы в работах и представлены на конференциях [A9, A11, A13, A2].

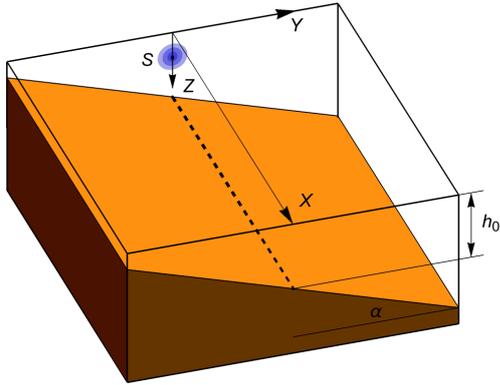


Рисунок 1 – Схематическое изображение подводного клина

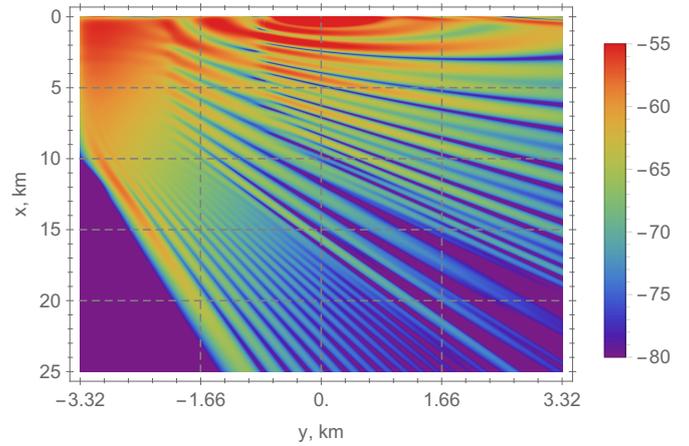


Рисунок 2 – Акустическое поле (в дБ отн. 1 м.) в клиновидном прибрежном волноводе мелкого моря $z = 30$ м.

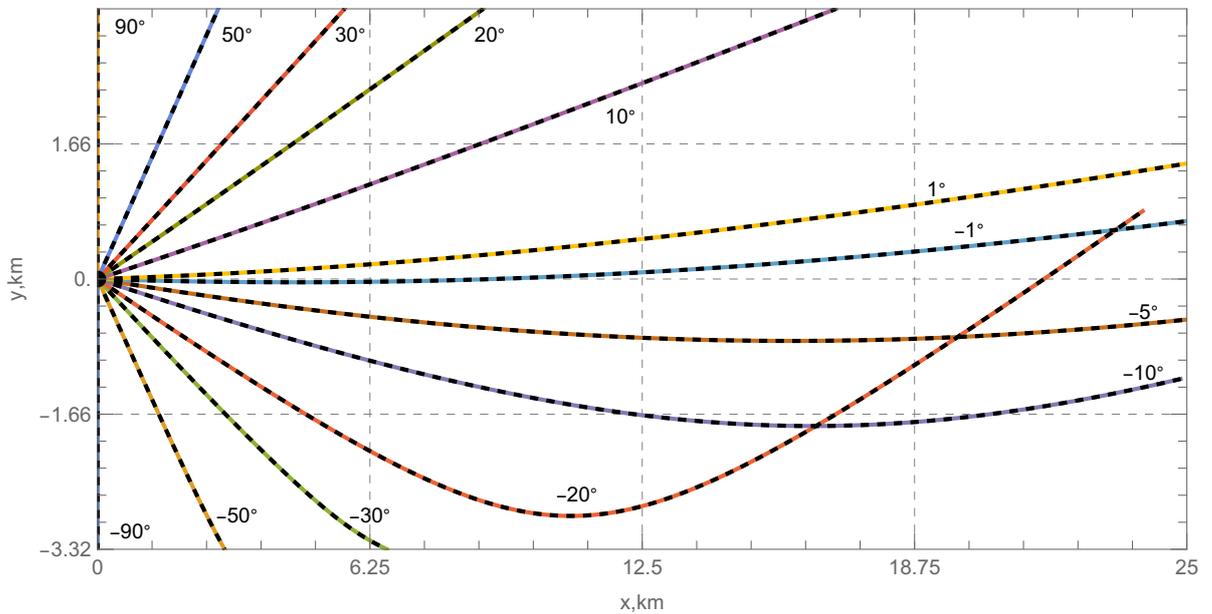


Рисунок 3 – Сравнение трассировки лучей с использованием программы AMPLE (сплошная кривая) и лучей, полученных из закона Снеллиуса (пунктирная кривая) для первой распространяющейся моды.

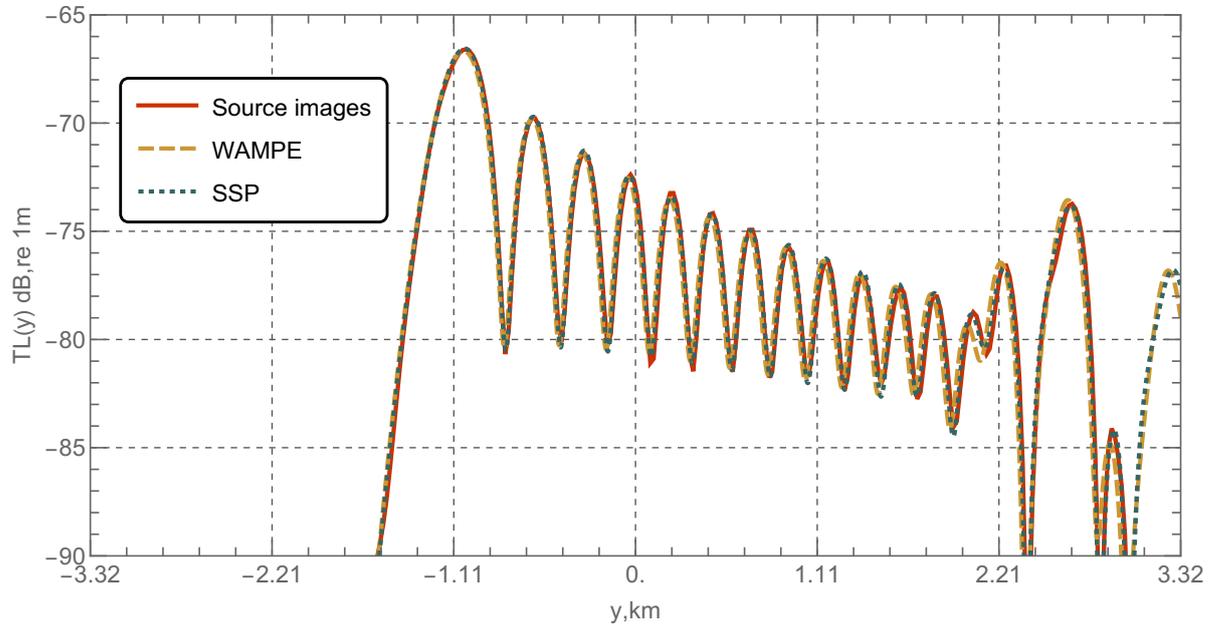
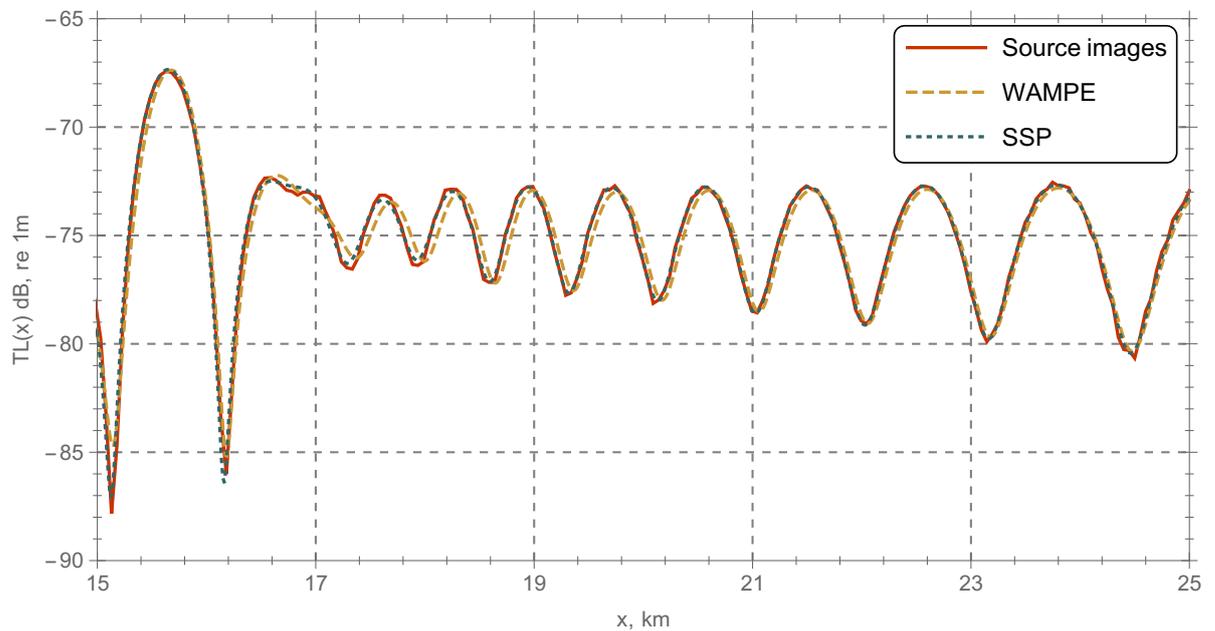
(a) $x = 25$ км(b) $y = 0$ км

Рисунок 4 – Сравнение результатов вычисления акустического поля (в дБ отн. 1 м.) в мелком море с подводным клином при $z = 30$ м.

Глава 4 посвящена моделированию акустических полей в задачах оценки уровней антропогенных сигналов в океане. В **разделе 4.1** рассматривается моделирование распространения акустических сигналов, создаваемых в результате прохода одиночного грузового судна. В рамках данного сценария требовалось построить распределение акустической энергии по децидекадным частотным полосам по всей траектории прохода судна. В рамках данной работы на примере поставленной задачи была исследована применимость предложенных в работе методов к задачам моделирования широкополосных сигналов на реальных данных в сложных трёхмерных волноводах и также предложен алгоритм оценки параметров среды, позволивший достичь существенного улучшения качества моделирования (ошибка не превышает 5 дБ для диапазона частот, в котором сосредоточена большая часть энергии сигнала). На Рисунках 5 и 6 отображены результаты моделирования в точке ближайшего прохода и на протяжении всей трассы соответственно, полученные с использованием исходных и оптимизированных параметров среды. В **разделе 4.2** рассматривается моделирование уровней звукового давления, связанных с прохождением сейсморазведочных импульсов в мелководной части северо-восточного шельфа острова Сахалин. Данная задача предполагает оценку уровней звукового воздействия во всей акватории, на основании импульсного сигнала, записанного в одной из точек акватории. Сравнение результатов моделирования проводится с результатами натурных измерений, а также результатами, полученными с использованием узкоугольного модового параболического уравнения с учётом междового взаимодействия. Из результатов моделирования (см. Рисунок 7) следует, что использование широкоугольных модовых параболических уравнений, даже с учётом адиабатического приближения, позволяет достичь существенно большей точности предсказания, по сравнению с узкоугольными аналогами, учитывающими взаимодействие мод.

Результаты четвёртой главы опубликованы в работах [A10, A12].

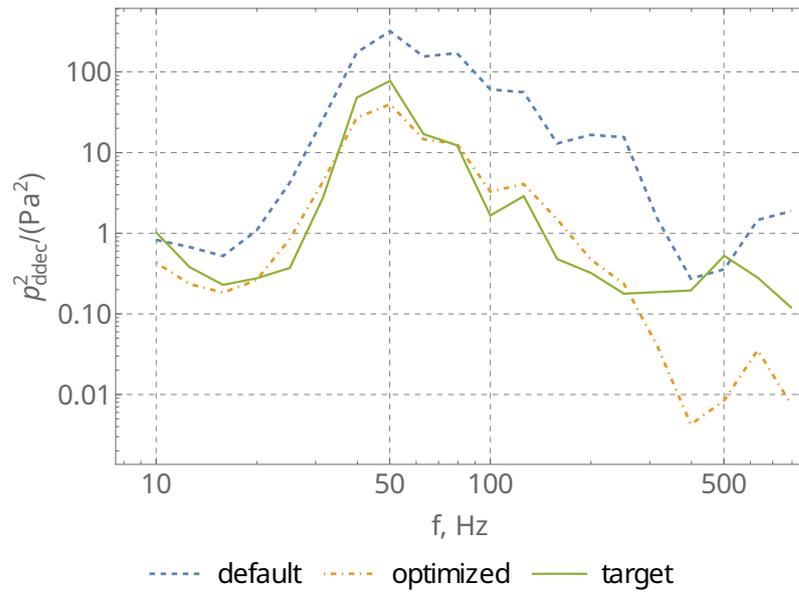
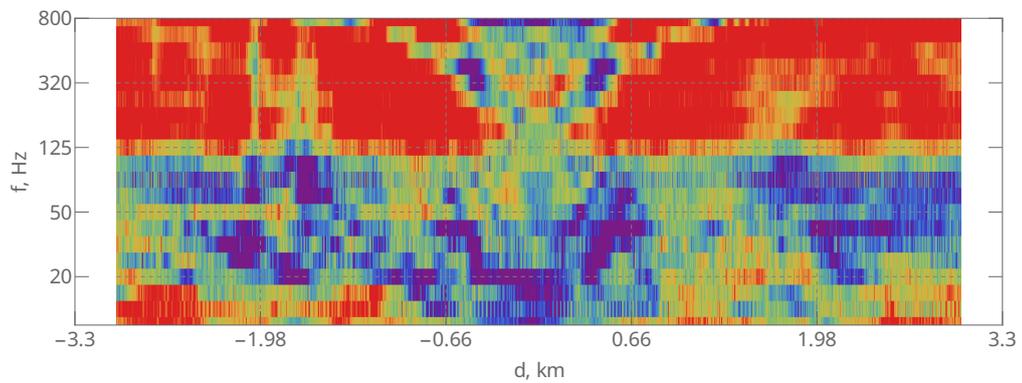
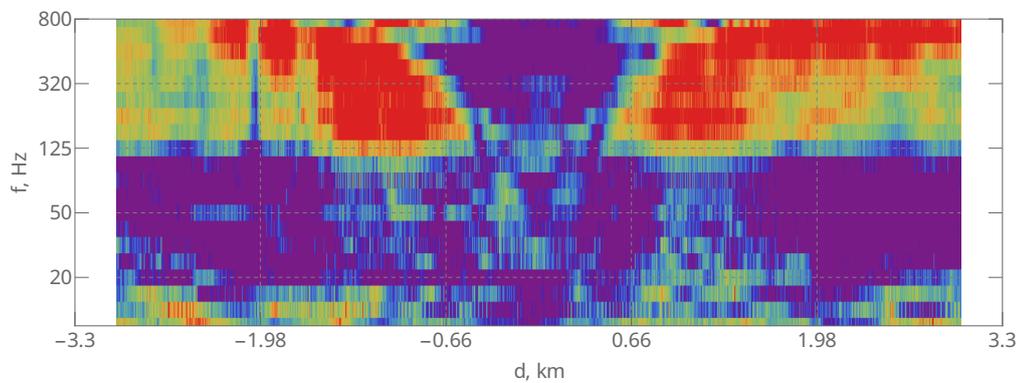


Рисунок 5 – График зависимости распределений уровней звукового давления от частоты в точке ближайшего прохода судна, полученных из данных измерений (сплошная линия), из результатов моделирования с использованием исходных (пунктирная линия) и оптимизированных (пунктирная линия с точками) значений параметров среды.



(a) Исходные параметры



(b) Оптимизированные параметры

Рисунок 6 – График точности моделирования уровней звукового давления с использованием исходных (a) и оптимизированных (b) параметров.

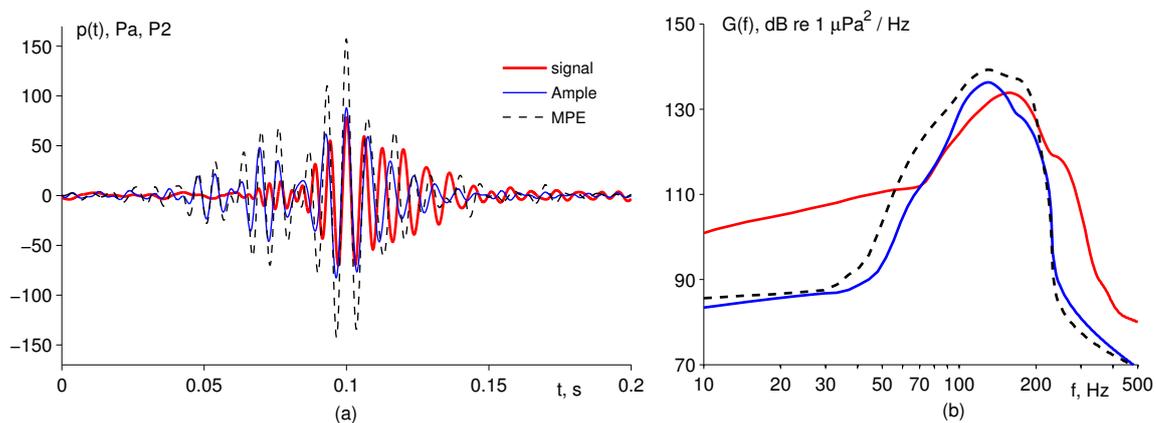


Рисунок 7 – Сравнение импульсных сигналов (а) и их спектров (b), полученные из данных измерений и результатов моделирования в точке наблюдения.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

- Разработана и апробирована методика численного решения псевдодифференциальных модовых параболических уравнений с искусственным ограничением расчётной области путём постановки граничных условий прозрачности или добавления к ней согласованных поглощающих слоёв.
- Разработан комплекс программ на языке программирования C++, который может быть использован для моделирования распространения тональных и импульсных сигналов, а также вычисления скалярных и векторных акустических полей антропогенных шумов в океане с возможностью учёта батиметрических и гидрологических данных, структуры слоёв дна, и ориентированный на максимальную производительность.
- Моделирование антропогенных шумов, связанных с сейсморазведочными работами и судоходством, проведённое с использованием разработанного комплекса прикладных программ, позволило добиться согласия уровней акустической экспозиции (SEL) с данными прямых измерений с точностью до 1 дБ и согласия значений распределения энергии в десятидекадных частотных полосах на различных расстояниях от источника шума с точностью до 5 дБ для диапазона частот, в котором сосредоточена большая часть энергии сигнала.

Цитированная литература

1. Lee D., Schultz M. H. Numerical Ocean Acoustic Propagation in Three Dimensions. — WORLD SCIENTIFIC, 1995.
2. TOLSTOY A. 3-D PROPAGATION ISSUES AND MODELS // Journal of Computational Acoustics. — 1996. — Vol. 04, no. 03. — P. 243–271.
3. Three-dimensional finite element simulation of acoustic propagation in spiral bubble net of humpback whale / X. Qing, P. R. White, T. G. Leighton, S. Liu, G. Qiao, Y. Zhang // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2019. — Oct. — Vol. 146, no. 3. — P. 1982–1995.
4. Ivansson S. Local accuracy of cross-term corrections of three-dimensional parabolic-equation models // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2019. — Oct. — Vol. 146, no. 3. — P. 2030–2040.
5. Porter M. B. Beam tracing for two- and three-dimensional problems in ocean acoustics // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2019. — Vol. 146, no. 3. — P. 2016–2029.
6. Multiscale multiphysics data-informed modeling for three-dimensional ocean acoustic simulation and prediction / T. F. Duda, Y.-T. Lin, A. E. Newhall, K. R. Helfrich, J. F. Lynch, W. G. Zhang, P. F. J. Lermusiaux, J. Wilkin // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2019. — Oct. — Vol. 146, no. 3. — P. 1996–2015.
7. Calazan R., Rodríguez O. TRACEO3D Ray Tracing Model for Underwater Noise Predictions //. — 03/2017. — P. 183–190.
8. Porter M. The KRAKEN normal mode program //. — 1992.
9. Duda T. F. Initial results from a Cartesian three-dimensional parabolic equation acoustical propagation code. — 2006.

10. Computational Ocean Acoustics / F. A. Jensen, W. Kuperman, M. Porter, H. Schmidt. — 2nd ed. — New York : Springer, 2011.
11. Тыщенко А. Г. Решение широкоугольного параболического уравнения с условиями прозрачной границы при моделировании распространения звука в трёхмерных волноводах мелкого моря : Выпускная квалификационная работа / Тыщенко А. Г. — Дальневосточный Федеральный Университет, 2019.
12. Deane G. B., Buckingham M. J. An analysis of the three-dimensional sound field in a penetrable wedge with a stratified fluid or elastic basement // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1993. — Vol. 93, no. 3. — P. 1319–1328.
13. On the Method of Source Images for the Wedge Problem Solution in Ocean Acoustics: Some Corrections and Appendices / J. Tang, P. Petrov, S. Piao, S. Kozitskiy // Acoustical Physics. — 2018. — Mar. — Vol. 64. — P. 225–236.

Список публикаций

- A1. Тыщенко А. Г. AMPLE [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/GoldFeniks/AMPLE> (дата обращения: 23.07.2024).
- A2. Tyshchenko A. G., Petrov P. S., Ehrhardt M. Wide-angle mode parabolic equation with transparent boundary conditions and its applications in shallow water acoustics // DAYS on Diffraction. — 2019. — P. 221.
- A3. Petrov P. S., Tyshchenko A. G. A numerical method for estimating anthropogenic acoustic noise levels using wide-angle Mode parabolic equations // Days on Diffraction. — 2022. — P. 48.

- A4. Tyshchenko A. G., Petrov P. S., Ehrhardt M. Wide-angle mode parabolic equation with transparent boundary conditions and its applications in shallow water acoustics // PACON-219. — 2019.
- A5. Тыщенко А. Г., Петров П. С. Комплекс программ для расчета акустических полей в мелком море на основе метода широкоугольных модовых параболических уравнений // XXXIV сессия Российского акустического общества. — 2022. — С. 656.
- A6. Тыщенко А. Г., Козицкий С. Б., Петров П. С. Метод расчёта векторных акустических полей на основе модовых параболических уравнений // XXXV сессия Российского акустического общества. — 2023. — С. 275.
- A7. Тыщенко А. Г., Козицкий С. Б., Петров П. С. Метод расчёта векторных акустических полей на основе модовых параболических уравнений // X конференция молодых ученых «Океанологические исследования». — 2023. — С. 70.
- A8. Wide-angle mode parabolic equations for the modelling of horizontal refraction in underwater acoustics and their numerical solution on unbounded domains / P. S. Petrov, M. Ehrhardt, A. G. Tyshchenko, P. N. Petrov // Journal of Sound and Vibration. — 2020. — Vol. 484. — P. 115526.
- A9. Комплекс программ для расчета акустических полей в мелком море на основе метода широкоугольных модовых параболических уравнений / А. Г. Тыщенко, О. С. Заикин, М. А. Сорокин, П. С. Петров // Акустический журнал. — 2021. — Июнь. — Т. 67, № 5. — С. 533—541.
- A10. Estimating Sound Exposure Levels Due to a Broadband Source over Large Areas of Shallow Sea / D. Manul'chev, A. Tyshchenko, M. Fer-

shalov, P. Petrov // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, no. 1. — P. 82.

- A11. Современные методы расчета акустических полей в океане, основанные на их представлении в виде суперпозиции мод / А. Г. Тыщенко, С. Б. Козицкий, М. С. Казак, П. С. Петров // Акустический журнал. — 2023. — Июнь. — Т. 69, № 5. — С. 620—636.
- A12. Petrov P. S., Tyshchenko A. G., MacGillivray A. O. Three-dimensional modeling of underwater noise produced by a bulk carrier vessel and estimation of its environmental impact // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2024. — June. — Vol. 155, no. 6. — P. 3702–3714.
- A13. The solution of sound propagation modeling problems for environment impact assessment by the mode parabolic equations method / A. G. Tyshchenko, M. A. Sorokin, S. B. Kozitskiy, P. S. Petrov // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2024. — Ноябрь. — Т. 156, № 5. — С. 3306—3319.

Научное издание

Тыщенко Андрей Геннадьевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Численное моделирование распространения широкополосных акустических сигналов в мелком море с использованием модовых параболических уравнений

Подписано в печать «_____» _____ 2025 г. Заказ № 128

Формат 60 × 90 1/16. Тираж 110 экз.

Отпечатано с авторского оригинал-макета в ТОИ ДВО РАН

690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.