

На правах рукописи



СИДОРОВ Данила Дмитриевич

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА
В МЕЛКОМ МОРЕ
С ВОДОПОДОБНЫМИ УЧАСТКАМИ ДНА**

1.3.7. – акустика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральный исследовательский центр Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» (г. Москва).

**Научный
руководитель:**

Луньков Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (г. Москва)

**Официальные
оппоненты:**

Петухов Юрий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории акустических методов в гидрофизике ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Дёмин Игорь Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры акустики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (г. Нижний Новгород)

**Ведущая
организация:**

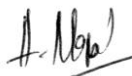
ФГБНУ «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук» (г. Владивосток)

Защита состоится «15» июня 2026 года в 14:00 ч на заседании диссертационного совета 24.1.238.03 при ИПФ РАН по адресу: 603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПФ РАН: www.ipfran.ru

Автореферат разослан «4» мая 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.238.03
канд. физ.-мат. наук



А. И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Диссертация посвящена вопросам распространения низкочастотного звука в планарных волноводах, нижняя граница которых характеризуется переменным акустическим импедансом. В качестве волновода выступает океанический шельф, где верхней границей является водная поверхность (однородная ровная и абсолютно отражающая граница), а нижней – дно (импедансная поглощающая граница). В реальности верхний слой дна является объемно неоднородной пористой средой, скелет которой состоит из твердых частиц различного размера, а пустоты заполнены водой или даже газом (песок, ил, глина и т. д.). Такой слой может считаться жидкой средой, где отсутствуют сдвиговые волны. По этой причине далее в тексте, когда говорится о скорости волн в верхнем слое дна, подразумевается именно скорость продольных волн.

В акустике мелкого моря большое внимание уделяется определению свойств дна и изучению их влияния на распространение звука в водном слое [1]. Если геометрические параметры мелководного волновода (рельеф дна) и профиль скорости звука в воде измерить относительно просто, то оценка параметров (таких как плотность, скорость распространения и затухание акустических волн) даже верхнего осадочного слоя представляется весьма сложной задачей, которая решается главным образом с помощью методов геоакустической инверсии [2] с параллельным анализом проб грунта в отдельных точках.

Существует ряд моделей волноводов различной сложности со специфическими условиями на нижней границе. Наиболее простым является волновод Пекериса [3], в рамках которого предполагается, что параметры водного слоя и дна характеризуются постоянными значениями. Однако такая упрощенная модель полезна лишь для «оценочных» расчетов и выводов, поскольку учитывает только усредненные параметры среды. Применяются и более сложные модели, где морское дно представляется в виде слоистой структуры: неконсолидированного или консолидированного осадочного слоя, лежащего на упругом полупространстве [4–8]. В этом случае свойства зависят от одной координаты – глубины. В то же время были предложены наиболее приближенные к реальности трехмерные модели морского дна, включающие зависимость параметров дна от глубины и двух горизонтальных координат [2, 9]. При этом вопрос горизонтальной изменчивости структуры дна и ее влияния на звуковое поле исследован недостаточно, в том числе в рамках модового описания акустического поля [10]. Подробная трехмерная модель волновода в сочетании с хорошо разработанным математическим аппаратом описания звукового поля предоставляет возможность изучения таких акустических

эффектов, как горизонтальная рефракция и аномальное затухание звука [11], связанных с неоднородной донной структурой.

Подробные модели позволяют не только получать численные оценки влияния структурных неоднородностей в дне на акустическое поле, но и предварительно оценивать эффективность работы гидроакустического оборудования. В работах [12–14] продемонстрировано, что при переходе от модели идеального волновода (коэффициент отражения звука от дна равен единице) к волноводу с однородным импедансным поглощающим дном происходит деформация диаграммы направленности горизонтальной приемной антенны. В работе [15] представлена специфика формирования шумового поля ветрового волнения в волноводе с неконсолидированным дном. Подобные исследования важны для предварительной оценки помехоустойчивости работы гидроакустических систем.

Основной причиной для акцентирования внимания на распространение звука в мелководном волноводе с неоднородным дном является востребованность крупномасштабного акустического мониторинга на арктическом шельфе России. Это связано как с экологическими задачами (требуется прогнозирование антропогенного шумового воздействия на представителей морской фауны под водой), так и с необходимостью разработки гидроакустических систем различного назначения, адаптированных для работы в этом мелководном регионе. Существенно, что в арктических шельфовых зонах сосредоточены рекордные запасы углеводородного сырья, и здесь же находятся важные транспортно-логистические узлы Северного морского пути. Разработка физических основ указанного мониторинга связана с исследованиями распространения звука на шельфе арктических морей. Подобные исследования актуальны и имеют свою специфику из-за сложной структуры дна в этом районе Мирового океана. Здесь существенны предварительные оценки характеристик звуковых полей в рамках численных экспериментов.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время достаточно полно изучено влияние рельефа дна на формирование акустических полей, например в работах [16–18]. В то же время вопрос учета влияния пространственных неоднородностей в донной структуре исследован в значительно меньшей степени. Среди последних экспериментальных исследований следует выделить комплексный эксперимент Mud patch experiment, проведенный на Атлантическом шельфе США в области с неоднородным грязеподобным дном [19–20]. Основное внимание было уделено оценке зависимости скорости звука и плотности от глубины в верхнем слое осадков. В результате были обнаружены участки дна, в которых скорость звука достигала значений скорости звука в воде (≈ 1464 м/с), хотя плотность

осадочных пород этих участков дна заметно отличалась от плотности воды. Именно такие участки дна определяются далее в тексте как «водоподобные»¹.

Области, в которых скорость звука в дне близка к скорости звука в водном слое, наблюдаются и в мелководной северо-восточной части шельфа о. Сахалин [21]. Здесь в рамках сейсморазведочных работ в 2015 году было подтверждено существование участков дна, приводящих к аномальной потере энергии сейсмоакустических сигналов. С использованием данных о распределении поля скорости звука продольных волн в донной структуре обнаружена пространственная область протяженностью около 1 км, в пределах которой скорость звука достигала значений близких или даже меньших, чем скорость звука в водном слое. Экспериментально показано, что при наличии такой области на акустической трассе потери при распространении увеличиваются на 13.6 дБ по сравнению с трассой, где такая особенность отсутствует. Для обоснования больших потерь при распространении проводилось численное моделирование методом модовых параболических уравнений с привлечением достаточно подробного распределения скорости звука в осадочном слое.

Особенно сложная структура донных осадков обнаружена на арктическом шельфе. Отметим, что наиболее исследованным с точки зрения подводной акустики морем, относящимся к арктическому шельфу РФ, является Баренцево море. Об особенностях распространения звука в других морях данного региона (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря) известно очень мало, но можно предположить, что именно этим мелководным морям будет свойственна максимально сложная структура дна, а следовательно, и звукового поля.

Инженерная сейсморазведка в Карском море [22] позволила получить трехмерное распределение скорости звука в верхнем слое донных осадков, которое выявило значительные неоднородности. В частности, были обнаружены обширные области водоподобных осадков протяженностью ≈ 5 км, граничащие с областями полуконсолидированных и консолидированных осадков, где скорость звука в дне заметно превышает скорость звука в воде. Имеют место диапироподобные структуры (куполообразные складки, возникающие путем выдавливания газом снизу высокопластичных пород). Наблюдаются узкие вертикальные каналы, связанные с выходами природных газов, с покмарками (кратерами) на границе вода-дно, палеодолины рек, заполненные материалом, отличающимся от вмещающих отложений. Следовательно, верхний осадочный слой представляет собой среду, характеризующуюся случайным

¹ Термин «водоподобность» согласуется с определением из книги «Общая акустика» (Исакович М. А. Общая акустика. – М. : Наука, 1973), где «водоподобность» среды означает, что модуль сдвига существенно меньше по сравнению с модулем всестороннего сжатия ($G \ll K$, коэффициент Пуассона $\nu \rightarrow 1/2$). В рамках настоящей диссертационной работы рассматривается частный случай таких сред, применительный к акустике мелкого моря, и накладывается дополнительное условие: скорость звука в «водоподобном дне» близка к скорости звука в водном слое.

пространственно-распределенным удельным акустическим импедансом. При этом толщина водного слоя остается примерно постоянной. При малой глубине волновода (несколько десятков метров) такие особенности могут оказывать существенное влияние на формирование акустического поля.

Теоретической и методологической базой настоящей работы послужили труды отечественных и зарубежных исследователей и их коллег в области разработки и реализации математических методов численного моделирования акустических полей, в частности М. Коллинза и К. В. Авилова (методы решения параболических уравнений), Л. М. Бреховских, Б. Г. Кацнельсона (математические методы в задачах подводной акустики). Существенный вклад в разработку трехмерных акустических моделей волноводов и оценки влияния объемных неоднородностей в структуре дна на распространение звука внесли В. Г. Петников, А. И. Белов, М. Баллард с соавторами. Настоящая диссертация является законченным научным исследованием, в котором представлено аналитическое и численное изучение влияния водоподобных участков дна на формирование акустических полей в мелководных волноводах, позволяющих решать задачи как фундаментальной науки, так и прикладные вопросы, связанные с дистанционным зондированием низкоскоростных участков дна.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью настоящей диссертации является изучение распространения узкополосных и широкополосных низкочастотных сигналов и шумов на мелководном шельфе с неоднородным дном, а также разработка методики оценки параметров неоднородностей верхнего слоя осадков на протяженных акустических трассах. Акцент делается на неоднородности структуры дна, а не на его рельефе. Используются аналитические методы расчетов и численное моделирование.

Для достижения поставленных целей в диссертационном исследовании были сформулированы следующие задачи:

1) определить, как крупномасштабные неоднородности структуры донных осадков влияют на потери при дальнем распространении звука в отдельных протяженных районах арктического шельфа с характерными размерами $\approx 35 \times 20$ км;

2) исследовать условия проявления и численно оценить пространственные вариации звукового поля, вызываемые горизонтальной рефракцией и межмодовым взаимодействием при дальнем распространении звука в волноводе с водоподобными участками дна;

3) оценить возможные ошибки при определении направления на источник звука при использовании горизонтальных линейных приемных антенн в таких волноводах;

4) предложить методики дистанционной диагностики водоподобных областей дна на протяженных акустических трассах;

5) построить модель акустических шумов ветрового волнения и шумов судоходства, учитывающую неоднородности дна на арктическом шельфе.

Объект исследования

Распространение низкочастотных (50–1000 Гц) акустических волн в мелководных волноводах с неоднородной структурой донных осадков в присутствии водоподобных участков дна.

Предмет исследования

Влияние неоднородностей дна на пространственную структуру звукового поля в водном слое и ее изменчивость.

Научная новизна

В рамках представленных в диссертации исследований впервые:

1) при статистическом анализе модельных данных по распространению звука на трассах фиксированной длины в мелководном волноводе с неоднородной структурой донных осадков (на примере Карского моря) обнаружена линейная зависимость усредненных по глубине потерь при распространении, выраженных в дБ, от суммарной протяженности водоподобных участков дна;

2) отмечено, что в мелком море с постоянной глубиной и неоднородным дном существуют ограниченные по размерам области, где затухание акустических волн в значительной степени зависит от направления распространения звука;

3) с помощью численного моделирования и аналитически продемонстрировано возникновение горизонтальной рефракции и межмодового взаимодействия на границе водоподобных областей;

4) получены оценки точности определения направления на источник звука с помощью горизонтальной приемной антенны в волноводе с неоднородной структурой дна;

5) показано, что присутствие водоподобных донных осадков на акустических трассах в мелком море может приводить к осцилляциям амплитуд волноводных мод как по частоте, так и по расстоянию;

6) продемонстрирована слабая анизотропия шумов поверхностного волнения в горизонтальной плоскости и сильная анизотропия в вертикальной плоскости в мелком море с неоднородным дном.

Практическая значимость работы

Полученные результаты могут быть использованы для

- 1) развития методов акустического мониторинга и оперативной океанологии шельфовых районов с существенной изменчивостью параметров дна, включая задачи обеспечения безопасного судоходства и добычи полезных ископаемых;
- 2) прогнозирования акустических ландшафтов и защиты от антропогенного шумового воздействия охраняемых видов морских животных в части определения границ безопасных зон с учетом трехмерных неоднородностей в структуре донных осадков.

Методология и методы исследования

Для анализа распространения звука в рассматриваемых волноводах с нижней неоднородной импедансной границей используются численное моделирование и результаты аналитических оценок. С помощью широкоугольного параболического уравнения рассчитываются комплексные амплитуды результирующего поля звукового давления с целью определения влияния низкоскоростных участков дна на энергетические характеристики указанных полей. Проводится сравнение с аналитическими зависимостями, полученными в рамках модового подхода. Комплексные амплитуды волноводных мод с учетом горизонтальной рефракции вычисляются путем решения широкоугольных модовых параболических уравнений. Для установления возможности дистанционного зондирования участков водоподобного дна применяется теория взаимодействующих мод, реализуемая в широкой полосе частот. В этом случае из полного акустического поля, рассчитанного с использованием широкоугольного параболического уравнения, применяя условие ортогональности, выделяются амплитуды отдельных мод и анализируются их частотный и пространственный спектры. С целью оценки влияния донной структуры на шумовое поле ветрового волнения используется подход, в рамках которого шумовые источники равномерно распределены в горизонтальной плоскости на глубине $\lambda/4$ (λ – длина звуковой волны).

В качестве характерных пространственных изменений в структуре неконсолидированных осадков (жидкие осадки) рассматриваются две модели:

- 1) упрощенная – скорость продольных волн в дне меняется только вдоль одной горизонтальной координаты от значений меньших, чем скорость звука в воде до величины, превышающей указанную скорость, и не зависит от глубины;
- 2) реалистичная – скорость продольных волн в дне получена в ходе инженерной сейсморазведки в одном из мелководных районов Карского моря и зависит от всех трех пространственных координат.

В обоих моделях присутствуют водоподобные участки дна, характеризующиеся значениями скорости звука, близкими или равными значению

в водном слое. Водный слой имеет постоянную скорость звука (может наблюдаться в Карском море в октябре), а толщина не превышает 50 м. Также в обоих случаях предполагается, что плотность дна и коэффициент затухания в дне, отнесенные к длине волны, изменяются с глубиной незначительно. Примерно постоянная плотность дна соответствует результатам пробного бурения в указанном районе.

Исследование проводилось для акустических трасс протяженностью до 10 км в частотном диапазоне сигналов от 50 до 1000 Гц.

Положения, выносимые на защиту

1. Усредненные по глубине потери при дальнем распространении низкочастотного звука и их анизотропия в мелком море с неоднородным дном существенно зависят от пространственных размеров водоподобных участков дна.

2. Водоподобные участки на трассе распространения звука в мелководном волноводе приводят к флуктуациям амплитуды акустического поля в частотной и пространственной области, объясняемым взаимодействием нормальных волн (мод). Указанный эффект может быть использован для оценки местоположения неоднородностей дна.

3. Протяженная водоподобная область дна, ориентированная вдоль акустической трассы, приводит к горизонтальной рефракции и смещению направления на источник звука, которое может определяться горизонтальной приемной антенной соответствующего волнового размера.

4. Неоднородная структура дна слабо влияет на средний уровень шума, вызванного ветровым волнением. В то же время размер области, занимаемой поверхностными источниками и влияющей на шум в точке расположения приемной акустической системы, сильно зависит от указанной структуры.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается строгостью используемых методов математической физики. В тех случаях, когда это возможно, закономерности, установленные в ходе работы над диссертацией, сопоставлялись с аналогичными закономерностями, полученными при использовании других методов и подходов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на ведущих отечественных и зарубежных научных конференциях: XXXIII (2020, дистанционно), XXXIV (2022, Москва), XXXV (2023, Москва), XXXVI (2024, Москва) сессиях Российского акустического общества; 5-й (2021, дистанционно) и 6-й (2023, Каламата, Греция) конференции «Underwater

Acoustics Conference & Exhibition»; «Days on Diffraction» (2021, дистанционно); 6-й (2021, Москва), 7-й (2022, Москва), 8-й (2023, Москва) и 9-й (2024, Москва) конференциях «Акустика среды обитания»; школе-конференции «Прохоровские недели» – 2022, 2023, 2024 (Москва, ИОФ РАН); «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (2024, Санкт-Петербург); «Комплексные исследования Мирового океана» (2024, Владивосток). Результаты, включенные в работу, докладывались на ученых семинарах НЦВИ ИОФ РАН, ТОИ ДВО РАН, кафедры акустики МГУ им. М. В. Ломоносова и ОГИ ИПФ РАН. Работа поддержана грантами РФФИ (19-02-00127-а) и РНФ (22-72-10121).

Автор удостоен диплома победителя Молодежного конкурса лучших публикаций ИОФ РАН (2025 г.) за результаты, изложенные в диссертации.

Публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертации изложено в 6 печатных работах [A1–A6], входящих в список ВАК.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор участвовал в выборе направления и постановке конкретных задач исследования, самостоятельно проводил численное моделирование и обработку результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 134 наименования на 13 страницах. Работа изложена на 135 страницах и иллюстрирована 50 рисунками и 6 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена обзору и современному состоянию создания геоакустических моделей и методов расчёта, применяемых для исследования распространения звука в присутствии неоднородностей в мелководном волноводе.

В **разделе 1.1** описаны используемые в работе модели волноводов: идеализированная (скорость звука в дне меняется от значения меньшего, $c_b = 1400$ м/с, до превышающего, $c_b = 1600$ м/с, скорость звука в воде $c_w = 1460$ м/с в пределах переходной области $\Delta y = 600 - 4000$ м с постоянной глубиной $H = 28$ м) и приближенная к реальности (трехмерное распределение скорости звука в дне). В обеих моделях неоднородности обусловлены изменением скорости продольных волн в дне, а поперечные волны не учитываются.

Наиболее сложная геоакустическая модель, основанная на данных инженерной сейсморазведки, относится к шельфовой области Карского моря (рис. 1, а). Данная область характеризуется медленным изменением толщины водного слоя (рис. 1, б). Здесь же присутствуют участки водоподобного дна, в которых скорость звука в дне приблизительно равна скорости звука в воде $c_b \approx c_w$. Однако при равенстве скоростей наблюдается скачок плотности между дном и водным слоем. Сдвиговые (поперечные) волны в таких областях во время проведения сейсморазведки практически не регистрировались. Более подробное описание модели волновода изложено в [A2].

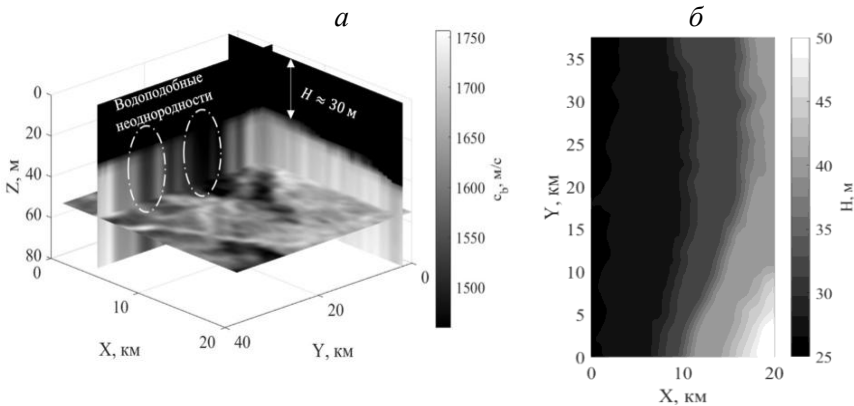


Рис. 1. Трехмерная структура поля скорости звука (а) в одном из мелководных районов Карского моря с указанием водоподобных областей дна; б – распределение глубин для исследуемого района Карского моря.

Также в рамках первой главы представлен теоретический обзор подходов описания акустического поля в неоднородных волноводах, а также методы математической физики для определения характеристик формируемого акустического поля в подобном типе волновода. Отдельное внимание уделяется условиям проявления таких акустических эффектов, как межмодовое взаимодействие и горизонтальная рефракция.

Во **второй главе** на основе результатов численного моделирования проводится статистический анализ средних по глубине потерь при распространении низкочастотного (50–1000 Гц) звука. Для одномодового режима строится аналитическая зависимость средних потерь от суммарной протяженности водоподобных осадков на трассе фиксированной длины. Скорость звука в водном слое постоянна и равна $c_w = 1460$ м/с. Отдельно вводится критерий водоподобности донных осадков. Выводы изложены в работе [A5].

В **разделе 2.1** проводится анализ статистических особенностей средних по глубине потерь при распространении на фиксированном расстоянии (1 и 5 км) от источника звука в присутствии неоднородностей в дне. Трассы распределены случайным образом по области, изображенной на рис. 1, а. Источник звука располагается на глубине 14 м. В результате получены гистограммы распределения потерь с аппроксимирующей функцией Берра XII типа и наиболее вероятными значениями средних по глубине потерь ≈ 47 дБ на 1 км и ≈ 59 дБ на 5 км на частоте 50 Гц. Особенностью подобранной аппроксимирующей функции является ненулевой «хвост», который соответствует присутствию водоподобных участков на акустических трассах различной протяженности.

В **разделе 2.2** проводится аналитическое исследование зависимости средних по глубине потерь при распространении от суммарной протяженности водоподобных осадков на трассе. Для аналитической оценки применяется метод нормальных волн (мод) в режиме одномодового распространения. Предполагается, что неоднородности акустической трассы обусловлены только неоднородной структурой дна, состоящей из чередующихся участков водоподобных и неводоподобных осадков. Имея в виду, что затухание первой моды в области водоподобного дна много больше затухания в области неводоподобного $\gamma_{wl} \gg \gamma_{nw}$ дна (см. рис. 3, б), оказывается справедливым выражение

$$\overline{TL} = \overline{TL}_0 + \Delta r_{wl}(10 \lg(e) \gamma_{wl}), \quad (1)$$

где \overline{TL}_0 – потери в отсутствие водоподобных осадков на трассе, Δr_{wl} – суммарная протяженность водоподобного участка дна. Из полученного выражения следует, что в случае распространения низкочастотного звука в одномодовом режиме средние потери \overline{TL} в дБ линейно зависят от протяженности водоподобных осадков Δr_{wl} .

В этом же разделе предлагается акустический критерий водоподобности дна, привязанный к особенностям волноводного распространения звука в мелком море

$$\frac{c_w}{\sqrt{1 + \frac{\hat{q}_1^2 c_w^2}{4\pi^2 f^2} \left(\left(\frac{\rho_b}{\rho_w} \right)^2 - 1 \right)}} < \langle c_b \rangle_\lambda < \frac{c_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_w}{4fH} \right)^2}}, \quad (2)$$

где c_w – скорость звука в водном слое, $\hat{q}_1 = (q_1^s + q_1^h)/2$ – полусумма действительных частей постоянной распространения первой моды для абсолютно жесткого q_1^h и мягкого q_1^s дна, f – частота источника звука, $\frac{\rho_b}{\rho_w}$ – отношение плотностей дна и водного слоя, $\langle c_b \rangle_\lambda$ – средняя по глубине λ скорость звука в дне, H – глубина волновода. Левая граница соответствует скорости в дне, при которой коэффициент затухания первой моды максимален. Правая отвечает скорости в дне, при которой первая мода становится вытекающей. Отметим, что на обоих границах присутствует связь с c_w , что подчеркивает привязку критерия (2) к скорости звука в водном слое.

С учетом введенного критерия (2) проводится регрессионный анализ результатов численного моделирования для 500 акустических трасс длиной 5 км на частоте излучения 50 Гц (см. рис. 2). Результаты подтверждают адекватность полученной формулы (1). Выпадение некоторых точек из тренда связано с тем, что водоподобные области имеют отличающиеся характеристики, а исследуемая мелководная область имеет перепады глубин от 25 до 50 м.

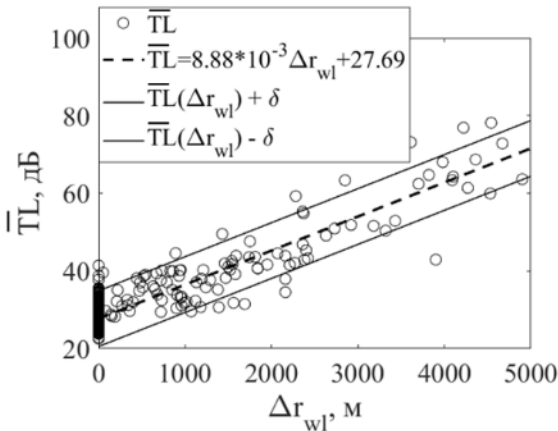


Рис. 2. Зависимость потерь при распространении \overline{TL} от протяженности водоподобных осадков Δr_{wl} в волноводе с однородным водным слоем с аппроксимирующей прямой (штриховая линия) и доверительным интервалом δ (сплошные линии) для вероятности 95%

В третьей главе рассматриваются особенности распространения волноводных мод, когда граница водоподобных осадков расположена поперек акустической трассы. Основное внимание уделяется аналитическому описанию и численному моделированию эффекта межмодового взаимодействия на водоподобных участках дна при фиксированной глубине волновода. Результаты опубликованы в работе [А4].

В разделе 3.1 анализируется зависимость постоянных распространения мод в мелководном волноводе фиксированной глубины от скорости звука в дне. Показано, что в области водоподобного дна, где скорость звука достигает значений скорости звука в воде $c_b \approx c_w$, наблюдается локальный минимум фазовой скорости моды V_m^{ph} . С ростом частоты глубина локального минимума фазовой скорости уменьшается, как и коэффициент затухания моды $\frac{\gamma_m}{2}$, что связано с меньшей глубиной проникновения звука в дно (см. рис. 3 для первой моды). Это свидетельствует о том, что даже в рамках идеализированной модели волновода с переходной областью шириной Δu , где скорость звука в дне меняется линейно от 1400 до 1600 м/с, при постоянной толщине водного слоя присутствует сильная пространственная изменчивость параметров мод.

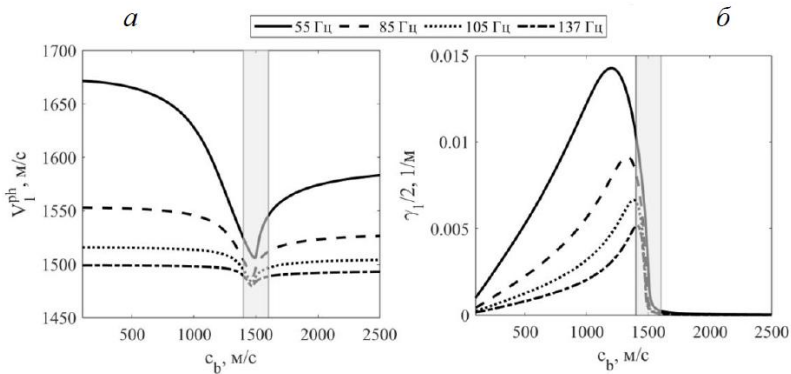


Рис. 3. Зависимость (а) фазовой скорости V_1^{ph} и (б) коэффициента затухания $\frac{\gamma_1}{2}$ первой моды от скорости звука в дне c_b для частот 55 Гц, 85 Гц, 105 Гц и 137 Гц. Вертикальными линиями (серая область) отмечены границы диапазона значений скорости звука в дне, который использовался для анализа межмодового взаимодействия и горизонтальной рефракции в Главе 3 и 4

В разделе 3.2 в рамках модовой теории определяется характер зависимости амплитуд отдельных мод от частоты при разной протяженности переходной области Δu . Пренебрегая обратным рассеянием и рассматривая взаимодействие между соседними модами ($l = 1$ и $m = 2$), квадрат модуля амплитуды первой моды на вертикальной приемной антенне на расстоянии R от источника в приближении однократного рассеяния имеет вид

$$|P_1(\omega, R)|^2 \approx |P_1^0(\omega, R)|^2 + \frac{2C_1^0(\omega, R)}{Rq_1(\omega; R)} D_{12}(\omega) \cos(\Delta q_{12}(\omega)r_s), \quad (3)$$

где $P_1^0(\omega, R)$ – амплитуда первой моды на приемнике на расстоянии R в адиабатическом приближении, $C_1^0(\omega, R)$ – коэффициент возбуждения первой моды в адиабатическом приближении, $\Delta q_{12}(\omega)$ – разность постоянных распространения,

$$D_{12}(\omega) = C_2^0(\omega, r_s + \Delta r) \exp(-\gamma_1(R - r_s - \Delta r)) \bar{B}_{12}(\omega), \quad (4)$$

где $C_2^0(\omega, r_s + \Delta r)$ – коэффициент возбуждения второй моды в адиабатическом приближении до начала водоподобной области r_s , определяемой (2); Δr – протяженность участка, где возникает межмодовое взаимодействие; $\bar{B}_{12}(\omega)$ – средний коэффициент взаимодействия первой и второй моды на участке $(r_s, r_s + \Delta r)$.

Выражение (3) описывает интерференцию на приемнике исходной первой моды $P_1^0(\omega, R)$, рассчитанной без учета взаимодействия на неоднородности, и побочной первой модой, порожденной второй модой на границе водоподобного дна. Второе слагаемое в (3) носит осциллирующий характер за счет множителя $\cos(\Delta q_{12}(\omega)r_s)$, а период осцилляций зависит от расстояния до неоднородности r_s .

Разность постоянных распространения $\Delta q_{12}(\omega)$ имеет вид

$$\Delta q_{12}(\omega) = q_1(\omega) - q_2(\omega) \approx \eta_{12} \omega^{-\frac{1}{\beta}}, \quad (5)$$

где η_{12} – константа, которая зависит только от номеров мод и параметров волновода; β – интерференционный инвариант. Для волновода с постоянной скоростью звука в воде $\beta \approx 1$, поэтому с учетом (5) период осцилляций второго слагаемого в (3) уменьшается с частотой ω и увеличивается с расстоянием r_s . Зная количество локальных максимумов L осциллирующей функции в рассматриваемом частотном диапазоне $\Delta\omega$ с центром на частоте ω_0 , можно выполнить оценку расстояния до водоподобного участка дна:

$$r_s \approx \frac{L}{\Delta\omega} \frac{1}{\eta_{12}} \omega_0^2. \quad (6)$$

В **разделе 3.3** проводится численное исследование межмодового взаимодействия с использованием широкоугольного параболического уравнения и модовой фильтрации для идеализированной модели волновода с постоянным значением скорости звука в воде $c_w = 1460$ м/с. При распространении звука в широкой полосе частот в волноводе с неоднородной структурой дна наблюдаются осцилляции амплитуды первой моды (см. рис. 4, а). Величина межмодового взаимодействия максимальна, когда скорость звука в дне близка к скорости звука в воде $c_b \approx c_w$. В отсутствие неоднородностей в дне зависимость амплитуды является практически монотонной функцией

частоты (штрихпунктирная кривая). При смещении переходной области шириной $\Delta y = 600$ м в сторону от источника частотный период осцилляций первой моды уменьшается (рис. 4, б), что соответствует выражению (7). Данный результат может быть использован для локализации водоподобного участка дна.

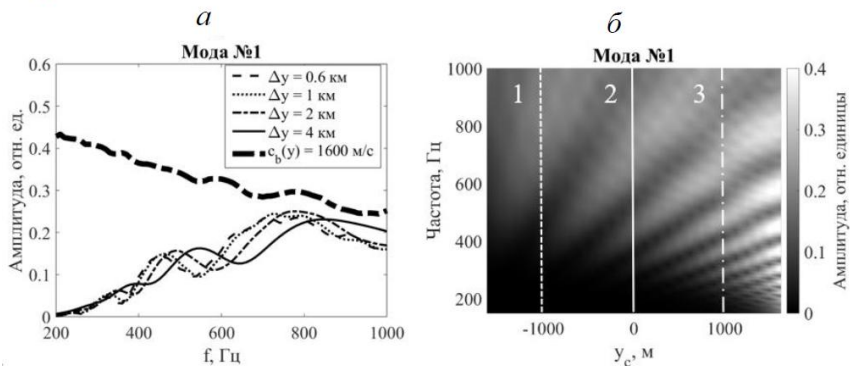


Рис. 4. Частотная зависимость амплитуды первой моды $|P_1|$ при различных размерах переходной области Δy (а); б – частотная зависимость амплитуды первой моды $|P_1|$ при смещении центра переходной области y_c ($\Delta y = 600$ м)

В разделе 3.4 рассматривается применимость приближения «рассеяния только вперёд», которое подразумевается в методе широкоугольного параболического уравнения и в методе взаимодействующих мод с использованием системы ОДУ (количество уравнений равно числу мод) первого порядка. Показано, что при моделировании распространения звука отражением энергии в обратном направлении от водоподобных неоднородностей в донной структуре можно пренебречь, поскольку коэффициент межмодового взаимодействия в обратном направлении отличается от прямого на несколько порядков.

В разделе 3.5 проводится моделирование для одной из акустических трасс в Карском море, содержащей водоподобный участок дна (рис. 5, а). Показано, что основной вклад в результирующее акустическое поле вносят первые три волноводные моды (рис. 5, б), а их амплитуды испытывают осцилляции, что согласуется с (3). При этом наибольшее взаимодействие наблюдается для мод соседних номеров. Противофазные осцилляции моды демонстрируют частичное «перетекание» энергии между модами (например, 2 и 3 в окрестности 500 Гц) вследствие их взаимодействия на водоподобном участке дна.

Также в разделе 3.5 рассматривается возможность получения характеристик водоподобных областей (локализация и протяженность) для трассы с учетом аналитических выражений (1) и (6) (раздел 2.2 и раздел 3.2). Для повышения точности локализации центра водоподобной области иссле-

дуются осцилляции первой моды в частотной области для двух встречных трасс. Оценивая протяженность водоподобного участка Δr_{wl} с помощью (1) и определяя количество локальных максимумов в прямом L и обратном L' направлениях в частотной области от 150 до 1000 Гц, возможно оценить расстояние до центра неоднородности с помощью выражения

$$r_s = \frac{r - \Delta r_{wl}}{1 + L'/L} + \frac{\Delta r_{wl}}{2}. \quad (7)$$

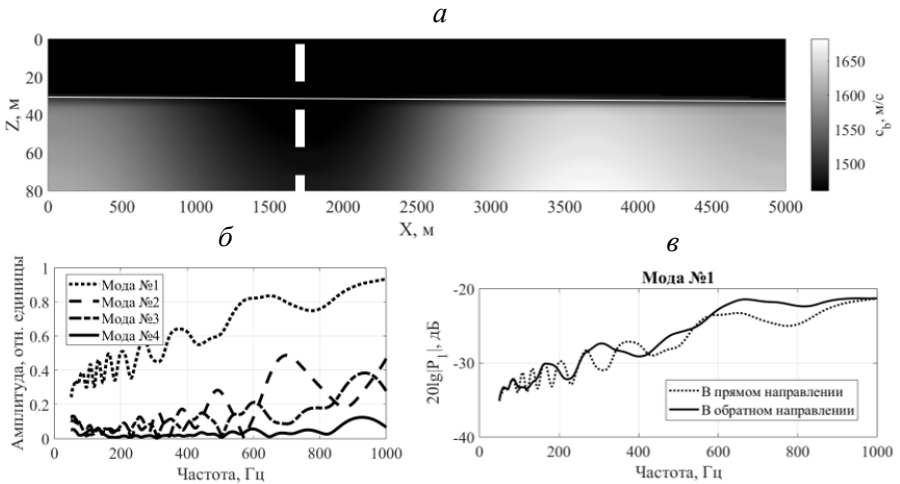


Рис. 5. Поле скорости звука (*a*) вдоль одной из акустических трасс в Карском море (сплошная линия – граница вода-дно; штриховая обозначает положение центра водоподобной области); *б* – частотная зависимость модовых амплитуд первых четырех мод в конце трассы на (*a*); *в* – частотные зависимости амплитуды первой моды на расстоянии 5 км при распространении звука в прямом (слева направо) и обратном (справа налево) направлении

Зависимость амплитуды первой моды от частоты в прямом и обратном направлениях для трассы на рис. 5, *a* представлена на рис. 5, *в*. Здесь $\frac{L'}{L} \approx 2$, а величина $\overline{TL} \approx 36$ дБ, что соответствует $\Delta r_{wl} \approx 1000$ м согласно рис. 2. В результате оценка расстояния до центра неоднородности составляет $r_s \approx 1833$ м.

Четвертая глава посвящена особенностям распространения звука, когда граница водоподобных осадков расположена вдоль акустических трасс. Основное внимание уделяется эффекту горизонтальной рефракции [A1–A4].

В **разделе 4.1** приводится аналитическое описание горизонтальной рефракции, причиной которой является линейное изменение скорости звука в дне от 1460 м/с до 1600 м/с в пределах области шириной Δu . Показано, что такое изменение приводит к искривлению модового луча в форме параболы.

Продемонстрировано, что величина угла горизонтальной рефракции модового луча первой моды β^1 (под углом горизонтальной рефракции понимается угол между прямой, соединяющей источник и приемник, и лучом, пришедшим на приемник) зависит от ширины переходной области Δy , расстояния r и частоты тонального источника звука ω :

$$\beta^1(r) \approx \frac{\cos \alpha \left(\frac{\kappa(\omega) - 1}{\kappa(\omega) + 1} \right) r, \quad (8)$$

где α – угол выхода луча из источника, $\kappa(\omega) = \frac{v_1^{ph}(c_b=1460 \frac{m}{c}; \omega)}{v_1^{ph}(c_b=1600 \frac{m}{c}; \omega)}$ – отношение фазовых скоростей первой моды. На рис. 6 представлены углы горизонтальной рефракции луча первой моды на расстоянии $r = 10000$ м и $\alpha = 0^\circ$ для разных частот от 50 до 250 Гц в зависимости от ширины переходной области Δy .

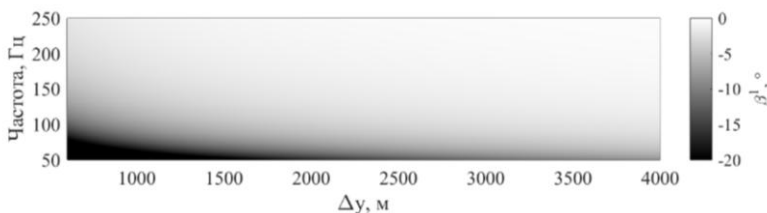


Рис. 6. Аналитическая зависимость угла горизонтальной рефракции луча первой моды от ширины переходной области Δy и частоты источника

В разделе 4.2 проводится численное моделирование горизонтальной рефракции в рамках идеализированной модели волновода постоянной глубины $H = 30$ м с постоянным значением скорости звука в воде $c_w = 1460$ м/с.

Показано, что при расположении источника вблизи водоподобной области (локального минимума фазовой скорости моды, как на рис. 7, а) наблюдаются наибольшие углы горизонтальной рефракции. При этом величина угла уменьшается с ростом частоты источника тонального сигнала (до 150 Гц) и с уменьшением номера моды. Как и для случая аналитического описания, продемонстрировано, что угол горизонтальной рефракции зависит от градиента изменения скорости звука в дне (ширины переходной области Δy).

С помощью подхода «вертикальные моды – горизонтальные лучи» показано, что искривление траектории модовых лучей (см. рис. 7, б) приводит к перераспределению энергии в горизонтальной плоскости. За счет горизонтальной рефракции происходит дополнительная засветка низкоскоростной части переходной области дна (см. рис. 7, в). Максимальное уменьшение средних по глубине потерь с учетом и без учета горизонтальной рефракции на частоте 55 Гц достигает $\Delta \overline{TL} = 22$ дБ. С ростом частоты эффект становится менее заметным, и на частоте 137 Гц максимальная разность потерь не превышает $\Delta \overline{TL} = 12$ дБ.

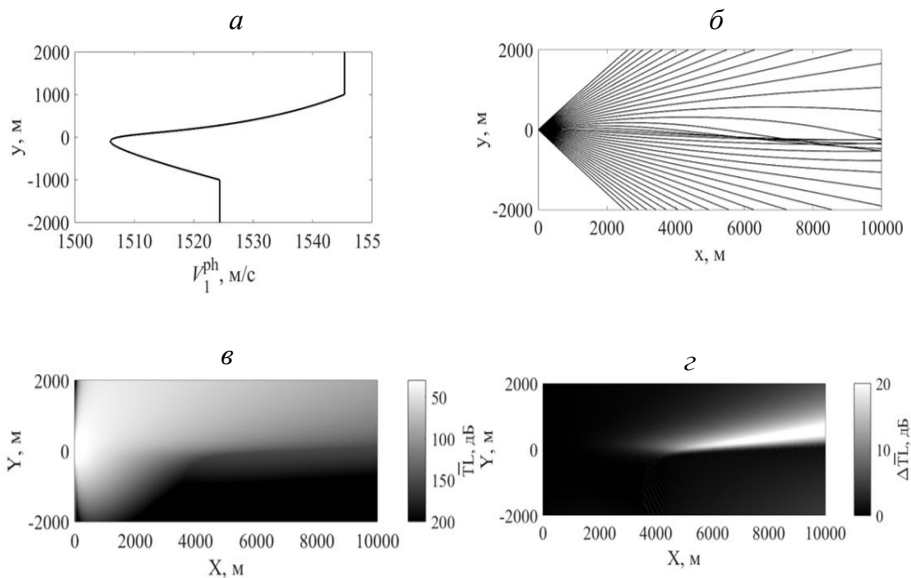


Рис. 7. Пространственная зависимость фазовой скорости первой моды (а); б – траектории модовых лучей в горизонтальной плоскости; в – двумерное распределение усредненных по глубине потерь при распространении ТЛ в горизонтальной плоскости; z – разность потерь ΔTL с учетом и без учета горизонтальной рефракции. Все результаты для частоты источника 55 Гц

Для импульсного сигнала в рамках идеализированной модели в полосе частот от 50 до 70 Гц выявлено, что при учете горизонтальной рефракции наблюдается повышение уровня звукового давления в точке приема сигнала. При наличии переходной области время распространения импульса увеличивается, поскольку сигнал движется по искривленной траектории.

В разделе 4.3 моделирование проводится для реалистичной модели волновода (Карское море, см. рис. 8, а). Для тонального источника на частоте 55 Гц показано, что разность потерь с учетом и без учета горизонтальной рефракции достигает $\Delta TL_{55} \approx 4$ дБ (см. рис. 8, в), а на частоте 137 Гц – $\Delta TL_{137} \approx 2$ дБ.

При рассмотрении влияния горизонтальной рефракции на распространение короткого импульса в полосе от 35 до 65 Гц повышение уровня звукового давления с учетом горизонтальной рефракции составляет ≈ 11 дБ и задержка времени прихода импульсного сигнала примерно равна 0,1 с на 10 км.

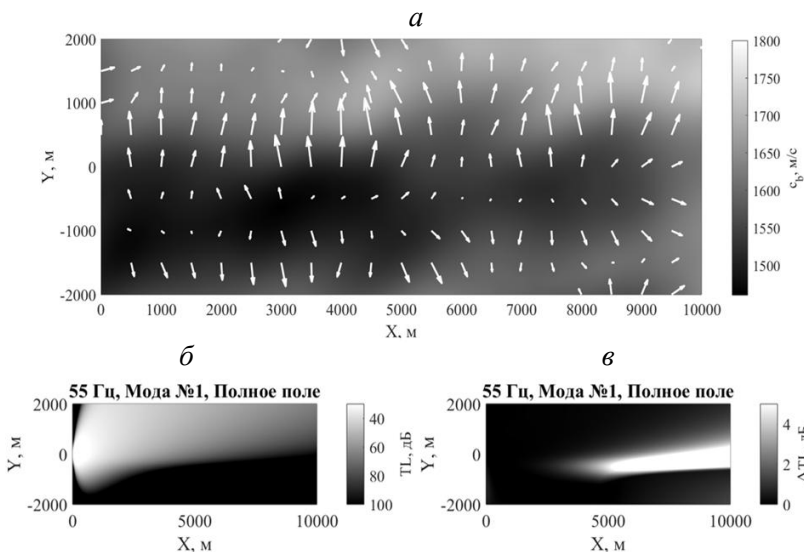


Рис. 8. Горизонтальный разрез поля скорости звука в мелководном районе Карского моря на глубине 55 м (а). Белыми стрелками обозначено распределение градиентов $\nabla_{x,y}c_B$; б, в – то же, что и на рис. 7, в, г, но для реалистичной модели

В разделе 4.4 оцениваются углы горизонтальной рефракции (см. табл. 1) в рамках численных экспериментов с применением развернутых горизонтальных антенн длиной 1000 м. Источник помещался в точку с координатами (0, -1000, 32) м. Наиболее сильное влияние горизонтальной рефракции на отклик антенны наблюдается при следующих условиях: присутствие областей водоподобных осадков; наличие выделенного направления для вектора градиента поля скорости звука в дне, составляющего угол, близкий к 90° , к волновому вектору акустических волн (см. рис. 8, а).

Таблица 1

Угол рефракции при различных положениях центра антенны

Положение центра антенны на рис. 8, а	55 Гц	137 Гц
-1000 м	+2,5°	+0,1°
0 м	-0,5°	-0,3°
1000 м	-3,4°	-0,3°

В пятой главе рассматривается формирование отдельных спектральных компонент шумового поля ветрового волнения (распределенные источники) и судоходства (движущийся сосредоточенный источник) в полосе 1 Гц при наличии неоднородностей в структуре дна. В рамках численного

моделирования для двух моделей волновода – идеализированной и приближенной к реальной – оценивается влияние неоднородной структуры верхнего осадочного слоя на интенсивность шума и форму его диаграммы направленности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости. В обоих случаях скорость звука в воде постоянна и равна $c_w = 1460$ м/с. В конце приводятся результаты численных экспериментов, где демонстрируются возможности локализации водоподобных областей по тональным компонентам шума движущегося судна в одном из районов Карского моря. Горизонтальная рефракция не учитывается. Результаты опубликованы в [А6].

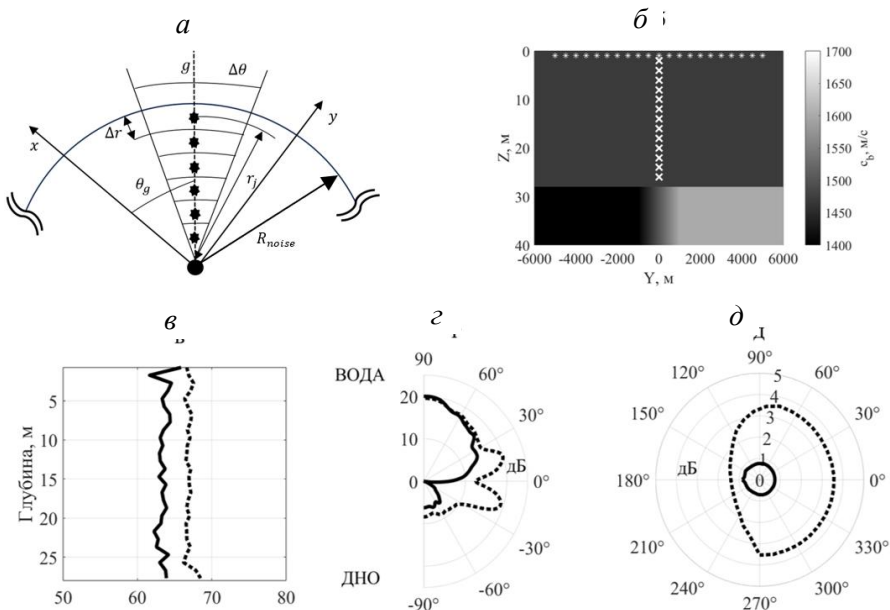


Рис. 9. Модель расчета шумового поля в горизонтальной плоскости (а); б – вертикальный разрез волновода с линейным изменением скорости звука в дне. Штриховая линия – шумовая область, звездочки – приповерхностные источники, крестики – гидрофоны на антенне; в – вертикальный профиль интенсивности, нормированные вертикальная (з) и горизонтальная (д) диаграммы направленности. Сплошная линия – на левой границе переходной области (приемная система в точке $Y = -1000$ на рис. 9, б), пунктирная – правой ($Y = 1000$)

В разделе 5.1 представлено описание модели шумового поля ветрового волнения, применяемой в настоящей работе. Для этого выбирается область поверхности моря радиусом R_{noise} (см. рис. 9, а), центр которой соответствует положению приемника. Круговая область разбивается на сектора $\Delta\theta = 10^\circ$. Каждый сектор делится на элементы с радиальным размером Δr . Каждому

элементу отвечает один j -й шумовой источник (общее число источников $J = \frac{R_{noise}}{\Delta r}$) (звездочка на рис. 9, *a*) на расстоянии r_j на глубине $\lambda/4$. Суммированием звуковых полей $P(r_j, z, \theta_g; f)$ находится случайная реализация комплексной спектральной амплитуды шумового поля:

$$P_{noise}(z; f) = \sum_{g=1}^G \exp(ia_g) \sum_{j=1}^J \exp(ib_j) (ns_{j,g}) \sqrt{S_j} \frac{P(r_j, z, \theta_g; f)}{P_0} \sqrt{\Delta t}, \quad (9)$$

где G – количество секторов, a_g и b_j – случайные величины в диапазоне от 0 до 2π , задающие случайное распределение фазы источников, $ns_{j,g}^2$ – интенсивность шумовых источников на единицу площади поверхности $S_j = 2\pi r_j \Delta r \Delta \theta$, P_0 – значение $P(r_j, z, \theta_g; f)$ на расстоянии 1 м от источника. Временной интервал $\Delta t = 1$ с. Моделировалось 100 случайных реализаций.

Перед моделированием шумового поля ветрового волнения в рамках неоднородного волновода определяется радиус области R_{noise} , с которой собирается шум, чему посвящен **раздел 5.1.1**. Для этого рассматривается волновод Пекериса с постоянными значениями скорости звука в дне $c_b = 1400$ м/с и $c_b = 1600$ м/с и частотой источников 500 Гц. Критерием определения R_{noise} является отличие средней интенсивности на источнике на 1 дБ от случая $R_{noise} = \infty$. Получено, что при $c_b = 1400$ м/с – $R_{noise} = 1$ км, при $c_b = 1600$ м/с – $R_{noise} = 5$ км. Таким образом, при дальнейшем моделировании шумового поля ветрового волнения $R_{noise} = 5$ км.

В **разделе 5.1.2** рассматривается влияние неоднородной структуры дна в рамках идеализированной модели волновода на формирование шумового поля ветрового волнения. Моделируется сигнал в полосе частот 1 Гц с центральной частотой 500 Гц. Приемная система расположена на границе переходной области со скоростями звука в дне $c_b = 1400$ м/с и $c_b = 1600$ м/с (сплошная и пунктирная линии на рис. 9, *в–д*). Показано, что влияние донной неоднородности на среднюю интенсивность (см. рис. 9, *в*) и на направленность шума распределенных источников в горизонтальной плоскости (см. рис. 9, *д*) является слабым. Вертикальная диаграмма направленности (см. рис. 9, *з*) в большей степени зависит от типа дна, что связано с «утеканием» энергии из водного слоя в дно в области водоподобных осадков.

Раздел 5.1.3 посвящен моделированию шумового поля ветрового волнения в рамках модели волновода, приближенной к реальной (см. рис. 10, *a*). Для определения влияния неоднородностей в дне на средние характеристики шумового поля были выбраны три области с разными типами дна, в центре которых размещена приемная система: водоподобное (Точка 1), акустически жесткое дно (Точка 3) и переходный тип дна (Точка 2) – отмечены на рис. 9, *a*. Результаты согласуются с оценками, полученными в рамках идеализированной модели волновода: сильная анизотропия в вертикальной плоскости и менее заметная в горизонтальной при фиксированной величине радиуса шумовой области; средний уровень шума может отличаться на величину до 3 дБ.

В разделе 5.2 рассмотрено формирование шумового поля сосредоточенным источником (шум судна). Показано, что при расположении источника в области водоподобного дна (Точка 2 на рис. 9, а) затухание акустических волн зависит от направления распространения и может варьироваться от 1,3 дБ/км до 14,4 дБ/км (см. рис. 10, б).

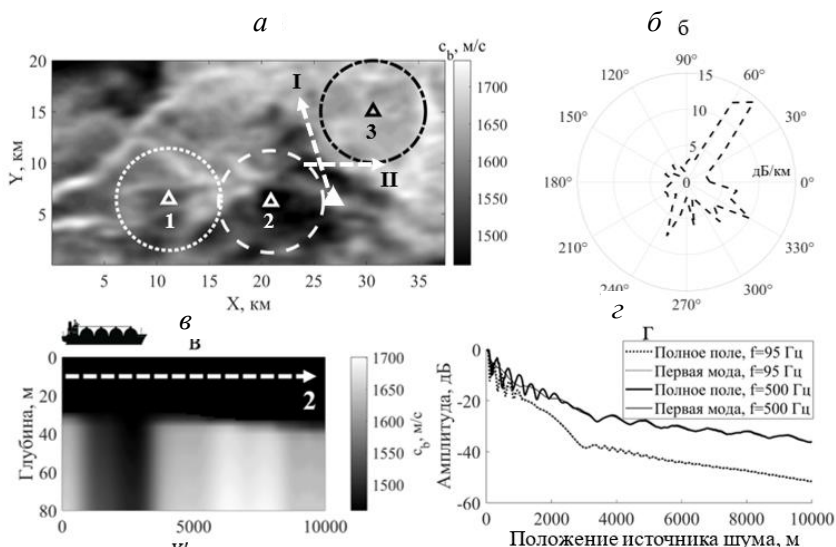


Рис. 10. Горизонтальный разрез поля скорости звука в дне Карского моря на глубине 70 м (а). Кругами отмечены области моделирования шума. Белые пунктирные стрелки с римскими цифрами обозначают траектории движения сосредоточенного источника. Сплошной треугольник – приемная система для записи шумов движущегося источника. б – коэффициент затухания звука в дБ/км в полярных координатах в области водоподобного дна на частоте 95 Гц. в – распределение скорости звука в вертикальной плоскости по стрелке II. г – амплитуда первой моды и полного поля при движении источника по трассе I

Также оценивается возможность регистрации водоподобных областей на основе записи шума движущегося источника. Показано, что наличие локального минимума интенсивности (см. рис. 10, в) при движении источника по трассе II (см. рис. 10, а) мимо приемника (сплошной белый треугольник), а также наличие пространственных осцилляций не только амплитуды первой моды, но и полного поля (см. рис. 10, г) при движении от приемника по трассе I может свидетельствовать о присутствии водоподобных осадков между источником и приемником.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исходя из имеющихся экспериментальных данных о трехмерном распределении скорости звука в донных осадках в Карском море, определено понятие водоподобного дна в мелком море и показана особая роль этого типа неоднородности в формировании акустических полей.

2. Для мелководной акватории (Карское море) с трехмерными водоподобными донными осадками продемонстрирована сильная пространственная изменчивость потерь при распространении низкочастотного (50–1000 Гц) звука, разброс значений которых достигает 30 дБ на 1 км и 60 дБ на 5 км.

3. Потери при дальнем распространении низкочастотного звука, выраженные в дБ, линейно зависят от суммарной протяженности водоподобных областей. Предложена оригинальная методика оценки протяженности низкоскоростных участков дна на основе этой линейной зависимости.

4. Обнаружено, что в районах с неоднородными водоподобными осадками наблюдаются характерные осцилляции амплитуд отдельных мод и полного звукового поля в частотной области от 150 до 1000 Гц, вызванные межмодовым взаимодействием. Разработаны методики обнаружения и локализации водоподобных участков дна на основе оценки периодов указанной модуляции;

5. Показано, что протяженные неоднородности верхнего слоя донных осадков со скоростью звука, близкой к скорости звука в воде, приводят к заметной горизонтальной рефракции акустических волн. На низких частотах (ниже 150 Гц) углы рефракции могут достигать $\approx 6^\circ$. Связанные с рефракцией аномалии в средних по глубине потерях при распространении составляют ≈ 4 дБ;

6. Установлено, что в мелком море площадь морской поверхности, определяющей характеристики шумового поля ветрового волнения в точке приема, существенным образом зависит от скорости звука в донных осадках и может изменяться почти на порядок. При этом уровень шума зависит от указанной площади в значительно меньшей степени, и его изменения составляют менее 3 дБ. Продемонстрировано, что неоднородная структура верхнего осадочного слоя приводит к слабой анизотропии шума ветрового волнения в горизонтальной плоскости и сильной – в вертикальной.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jensen F. B. et al. Computational ocean acoustics. – New York, NY: Springer New York, 2011. – 770 p.
2. Becker K. M., Goff J. Geoacoustic Inversion for the New Jersey Shelf: 3-D Sediment Model // IEEE J. Ocean. Eng. – 2010. – V. 35, no. № 1. – P. 28–42.
3. Pekeris C. L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water. – New York, NY, 1945.
4. Hamilton E. L. Geoacoustic modeling of the sea floor // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1980. – V. 68, no. 5. – P. 1313–1340.
5. Белов А. И., Кузнецов Г. Н. Оценка шумности движущихся источников на основе идентификации акустической модели морского дна // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59, no. 6. – С. 722–734.
6. Рутенко А. Н., Ущиповский В. Г. Оценки акустических шумов, генерируемых вспомогательными судами, работающими с нефтедобывающими платформами // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61, № 5. – С. 605–613.
7. Григорьев В. А., Петников В. Г., Шатравин А. В. Звуковое поле в мелководном волноводе арктического типа с дном, содержащим газонасыщенный осадочный слой // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, № 4. – С. 389–405.
8. Агеева Н. С., Крупин В. Д., Перельгин В. П., Студеничник Н. В. Построение геоакустической модели дна в мелком море // Акустический журнал. – 1994. – Т. 40, № 2. – С. 181–188.
9. Ohta K., Frisk G. V. Modal evolution and inversion for seabed geoacoustic properties in weakly range-dependent shallow-water waveguides // IEEE journal of oceanic engineering. – 1997. – V. 22, no. 3. – P. 501–521.
10. Кацнельсон Б. Г., Петников В. Г. Акустика мелкого моря. – М. : Наука, 1997.
11. Ballard M. S., Lin Y. T., Lynch J. F. Horizontal refraction of propagating sound due to seafloor scours over a range-dependent layered bottom on the New Jersey shelf // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2012. – V. 131, no. 4. – P. 2587–2598.
12. Елисеевнин В. А. Усредненный отклик горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акустический журнал. – 2004. – Т. 50, № 2. – С. 193–193.
13. Елисеевнин В. А. О работе горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акустический журнал. – 1983. – Т. 29, № 1. – С. 44–49.
14. Елисеевнин В. А. Отклик низкочастотной горизонтальной линейной антенны в свободном пространстве и в волноводе // Акустический журнал. – 1985. – Т. 31, № 6. – С. 805.
15. Deane G. B., Buckingham M. J., Tindle C. T. Vertical coherence of ambient noise in shallow water overlying a fluid seabed // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1997. – V. 102, no. 6. – P. 3413–3424.
16. Есипов И. Б. и др. Горизонтальная рефракция акустического сигнала на шельфе и в береговом клине Черного моря // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 6. – С. 833–838.
17. Казак М. С., Петров П. С., Кошель К. В. Исследование обратного рассеяния акустических мод на неоднородностях рельефа дна с использованием метода инвариантного погружения // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 2. – С. 76–81.

18. Комиссарова Н. Н. Анизотропия поля поверхностных источников шума в прибрежной области с произвольной формой дна и профиля скорости звука // Акустический журнал. – 2003. – Т. 49, № 4. – С. 519–528.

19. Lin Y.-T., Eleftherakis D., Goff J., Dosso S., Chapman R., Miller J., Potty G. Geoacoustic inversion on the New England Mud Patch using warping and dispersion curves of high-order modes // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2018. – V. 143, no. 5. – P. EL405–EL411.

20. Holland C. W., Dosso S. E., Dettmer J., Goff J. A. Depth-dependent geoacoustic inferences with dispersion at the New England Mud Patch via reflection coefficient inversion // IEEE J. Ocean Eng. – 2019. – V. 45, no. 1. – P. 69–91.

21. Рутенко А. Н. Моделирование аномальных эффектов, обнаруженных при распространении сейсморазведочных сигналов на шельфе // Акустика океана. – 2020. – С. 352–356.

22. Григорьев В. А., Петников В.Г., Рослякова А. Г., Терехина Я. Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 3. – С. 342–358.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Lunkov A., **Sidorov D.**, Petnikov V. Horizontal refraction of acoustic waves in shallow-water waveguides due to an inhomogeneous bottom structure // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Т. 9, № 11. – С. 1269.

A2. Petnikov V., Grigorev V., Lunkov A., **Sidorov D.** Modeling underwater sound propagation in an arctic shelf region with an inhomogeneous bottom // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2022. – Т. 151, № 4. – С. 2297–2309.

A3. Луньков А. А., Петников В. Г., **Сидоров Д. Д.** Использование линейных приемных антенн для наблюдения горизонтальной рефракции низкочастотного звука в мелком море с сильно неоднородным водоподобным дном // Акустический журнал. – 2022. – Т. 68, № 4. – С. 400–408.

Переводная версия: Lunkov A. A., Petnikov V. G., **Sidorov D. D.** Use of linear receiving arrays for observing horizontal refraction of low-frequency sound in shallow water with a strongly inhomogeneous waterlike bottom // Acoustical Physics. – 2022. – V. 68, no. 4. – P. 357–364.

A4. **Сидоров Д. Д.**, Петников В. Г., Луньков А. А. Широкополосное звуковое поле в мелководном волноводе с неоднородным дном // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69, № 5. – С. 608–619.

Переводная версия: **Sidorov D. D.**, Petnikov V. G., Lunkov A. A. Broadband acoustic field in a shallow-water waveguide with an inhomogeneous bottom // Acoustical Physics. – 2023. – V. 69, no. 5. – P. 699–709.

A5. **Сидоров Д. Д.**, Боджона С. Д., Петников В. Г., Луньков А. А. Оценка протяжённости областей водоподобного дна на акустических трассах в мелком море // Доклады Российской академии Наук. Физика, технические науки. – 2024. – Т. 516, № 1. – С. 85–90.

A6. Боджона С. Д., **Сидоров Д. Д.**, Петников В. Г., Луньков А. А. Характеристики низкочастотного окружающего шума в мелком море с неоднородной структурой дна // Акустический журнал. – 2025. – Т. 71, № 1. – С. 79–87.

Переводная версия: Bodjona S. D., **Sidorov D. D.**, Petnikov V. G., Lunkov A. A. Characteristics of low-frequency ambient noise in shallow water with a heterogeneous bottom structure // Acoustical Physics. – 2025. – V. 71, no. 1. – P. 62–70.

СИДОРОВ Данила Дмитриевич

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА
В МЕЛКОМ МОРЕ
С ВОДОПОДОБНЫМИ УЧАСТКАМИ ДНА**

Автореферат

Подписано к печати 08.04.2026 г.
Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 11 (2026).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
603951, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46