

На правах рукописи



Сорокин Михаил Андреевич

Исследование распространения звука с шельфа в глубокий океан методом нормальных волн

1.3.7 – Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН).

Научный руководитель: **Петров Павел Сергеевич**

д.ф.-м.н., г. н. с. лаборатории геофизической гидродинамики, ТОИ ДВО РАН

Официальные оппоненты: **Шуруп Андрей Сергеевич**

д.ф.-м.н., доцент кафедры акустики, физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Луньков Андрей Александрович

к.ф.-м.н., заведующий лабораторией гидрофизики, ФГБУН Федеральный исследовательский центр Институт общей физики РАН

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита состоится 2 октября 2026 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.1.214.01 при ФГБУН Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ТОИ ДВО РАН*, а также на сайте института по адресу: <https://www.poi.dvo.ru/ru/node/2820>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Отзывы и замечания по автореферату, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук



Костин Анатолий Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В настоящее время одним из важных направлений научной деятельности является исследование Мирового океана. Освоение его ресурсов – одна из приоритетных задач [1], стоящих перед человечеством, решение которой важно для поддержания устойчивого развития цивилизации в двадцать первом веке. В океане акустические волны являются единственным средством передачи информации на сотни и тысячи километров. В связи с этим акустика океана играет одну из ключевых ролей в освоении и мониторинге Мирового океана, изучая как распространение звука в воде и верхних слоях морского дна, так и взаимодействие антропогенных звуковых полей с физическими и биологическими объектами в морской среде. Перед учеными-акустиками стоит широкий спектр задач, например, зондирование как верхних слоев морского дна для обнаружения полезных ископаемых [2; 3], так и водного слоя для мониторинга биоресурсов [4; 5]. При помощи звуковых волн можно также получить информацию о расстоянии до объекта и направлении его движения [6; 7], что часто используется для решения задач акустической навигации и дальнометрии [8; 19]. Решение данного класса задач особенно актуально в связи с возрастающей ролью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [9] в исследованиях Мирового океана и освоении его ресурсов, при этом следует отметить, что специфические типы АНПА должны действовать в условиях большой удалённости от центров управления и связи. Обеспечение подводного позиционирования таких АНПА, по-видимому, представляется возможным лишь при помощи гидроакустических навигационных систем большой дальности (ГАНС-БД), представляющих собой совокупность источников навигационных сигналов (ИНС), расположенных в шельфовой зоне, и приемника, входящего в аппаратный состав АНПА. При такой конфигурации системы особый интерес представляют собой эффекты, возникающие при распространении сигналов из мелкого моря

в глубокий океан [10; 11], поэтому естественным образом возникает задача моделирования распространения звука для подобных сценариев. Во многих работах [12–14] данный сценарий рассматривался с позиций геометрической акустики [15; 16], которая, несмотря на весьма низкую вычислительную сложность, имеет достаточное количество ограничений: точка наблюдения (приёмник) не должен располагаться на каустике или в зоне акустической тени, профиль скорости звука должен быть достаточно гладким. Помимо этого, задача расчета лучей решается численно, и накапливающаяся ошибка геометрического приближения становится существенной [17] при распространении уже на десятки километров, что ставит под сомнения результаты расчётов на сотни и тысячи километров. В связи с этим возникает необходимость исследовать вопрос о распространении сигналов из мелкого моря в глубокий океан другими методами, прежде всего с целью установления связи между геометрией акустических трасс (например, соотношением длин глубоководного и шельфового участка, а также ориентацией трассы относительно изобат) и временами распространения сигналов.

Степень разработанности темы исследования. Настоящая диссертация является законченным научным исследованием, в котором представлено описание результатов натурных экспериментов и их математического моделирования при помощи комбинирования метода нормальных волн и лучевой теории. На основе результатов моделирования дано теоретическое обоснование двумерных и трехмерных эффектов, возникающих при распространении импульсных навигационных сигналов из мелкого моря в глубокий океан.

Цели и задачи диссертационной работы: Целью настоящей диссертации является разработка методики определения эффективных скоростей модальных компонент (модовых импульсов) акустических сигналов и их времен прихода в точку приема, для чего требуется исследование двумерных и трехмерных эффектов, возникающих при распространении звука из шельфовой зоны в глубокий океан.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании были

решены следующие задачи:

1. рассчитать времена прихода модальных компонент импульсных акустических сигналов в волноводах Японского моря;
2. разработать алгоритм расчёта эффективных скоростей модальных компонент акустического сигнала;
3. разработать методику оценки влияния трехмерных эффектов на времена прихода модальных компонент акустического сигнала.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Для моделирования распространения звука с шельфа в глубокий океан в адиабатическом приближении предложена и апробирована методика расчета эффективных скоростей модальных компонент акустического сигнала и времен их прихода в точку приема.
2. Установлено, что при распространении навигационных сигналов с шельфа в глубокий океан горизонтальная рефракция может вносить существенный вклад в зависимость задержек приходов модальных компонент от номера моды как за счет разницы удлинений собственных лучей, так и за счет дополнительной дисперсии сигналов, обусловленной прохождением разных модовых компонент через различные участки шельфа.
3. Впервые показано, что использование поля скорости звука, получаемого из моделей циркуляции океана при условии ассимиляции ими данных прямых гидрологических измерений, позволяет увеличить точность оценок эффективных скоростей и времен прихода модальных компонент в сравнении с прогнозами, получаемыми на основе разрозненных прямых измерений скорости звука. При этом ошибка определения дальности уменьшается на 0.02–0.03% от длины трассы.

Теоретическая и практическая значимость.

В диссертации предложена методика оценки времени прихода модальных компонент импульсного сигнала при их распространении из мелкого моря в глубокий океан, реализованная в виде комплекса программ в среде программирования MATLAB. Предложено и описано применение полей скорости звука, полученных из моделей циркуляции океана, в моделировании распространения импульсных сигналов. Описан и применен способ оценки влияния горизонтальной рефракции, возникающей вследствие наличия вдоль акустической трассы неоднородностей гидрологии и/или батиметрии. Результаты моделирования как в двумерном, так и в трехмерном случаях качественно согласуются с данными натурного эксперимента. Теоретическая значимость заключается в возможности адекватного прогнозирования групповых скоростей и времен прихода модальных компонент сигнала в задачах акустической дальнометрии при использовании достаточно разреженной сетки батиметрических и гидрологических данных. Практическая значимость заключается в том, что предложенная методика оценки эффективных скоростей и времен прихода модальных компонент акустического сигнала может быть использована на практике при организации гидроакустических навигационных систем большой дальности. Помимо этого, предложенный программный комплекс может служить прототипом для программной части перспективных гидроакустических навигационных систем большой дальности для ориентирования АНПА.

Методология и методы исследования. Моделирование распространения импульсных сигналов проводилось с использованием метода нормальных волн и теории горизонтальных лучей с привлечением данных модели циркуляции океана NEMO. Времена прихода модальных компонент акустического сигнала сравнивались с импульсной характеристикой волновода (ИХВ). Влияние горизонтальной рефракции оценивалось, как разность длины собственного луча и геодезической. Программная реализация изложенной методики выполнялась лично автором в среде программирования MATLAB в виде комплекса

программ [20—23].

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения.

1. Методика прогноза эффективных скоростей модальных компонент акустического сигнала, основанная на предположении об адиабатическом распространении звука с шельфа в глубокий океан, дает возможность получить корректную оценку времен прихода модальных компонент в точку приема даже в условиях интенсивного модового взаимодействия на континентальном склоне. Результаты расчетов времен прихода при помощи данной методики удовлетворительно согласуются с данными натурных экспериментов.
2. При моделировании распространения звука из мелкого моря в глубокий океан использование полей скорости звука, полученных из модели циркуляции океана NEMO с ассимиляцией натурных данных, позволяет заметно повышать точность расчетов времен прихода модальных компонент акустических сигналов, а также качественно воспроизводить эффекты, характерные для такого рода задач, например, явления, связанные с нерегулярностью подводного звукового канала, эффекты акустического оползня и рефракции в горизонтальной плоскости.
3. При распространении из мелкого моря в глубокий океан существенным фактором, определяющим характер дисперсии акустических сигналов, является горизонтальная рефракция. Вызванные этим фактором задержки времен прихода модальных компонент в значительной степени связаны с неоднородностью рельефа дна на шельфе, и в меньшей – с трехмерным распределением скорости звука в глубоком океане.

Достоверность. Достоверность результатов обуславливается использованием хорошо апробированных теоретических методов, а также их высокой

степенью качественной согласованности с результатами натурных измерений. Основные результаты диссертации докладывались на следующих ведущих отечественных и зарубежных научных мероприятиях по физике распространения волн и акустике: 26th international conference of Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON-2019) – 2019 (г. Владивосток), “Days on Diffraction” – 2020, 2021 (г. Санкт-Петербург, ПОМИ РАН), “Underwater Acoustics Conference and Exhibition” (UACE) – 2021 (г. Каламата, Греция), XVII Школа-семинар им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”, совмещенная с XXXIII сессией Российского акустического общества – 2020 (г. Москва), XXXIV сессия Российского акустического общества – 2022 (г. Москва), XXXV сессия Российского акустического общества – 2023 (г. Москва), X Всероссийская конференция молодых учёных “Океанологические исследования” – 2023 (г. Владивосток), “School on Acoustics: From Fundamentals to Frontiers – 2024” (г. Циндао, Китай), Международная конференция по дифференциальным уравнениям и динамическим системам – 2024 (г. Суздаль).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 18 печатных работах, из них 11 являются статьями в рецензируемых научных журналах [19; 24–33], (7 из которых индексируются в международных библиографических системах “Сеть науки” (Web of Science) и “Скопус” (Scopus)). Цикл работ, положенных в основу диссертации, был отмечен премией губернатора Приморского края за выдающиеся научные достижения. Помимо этого, были получены патенты на регистрацию 4 программ для ЭВМ [20–23], использованных в ходе моделирования.

Личный вклад автора. Автором была разработана методика оценки скоростей и времен прихода для сложного геоакустического волновода, соответствующего распространению звука с шельфа в глубокий океан с учетом вариаций батиметрии и гидрологии. Лично автором выполнена апробация методики на экспериментах по распространению звука с шельфа в глубокий океан в Японском и Охотском морях. Лично автором исследован характер влияния

горизонтальной рефракции на времена прихода и собственные лучи модальных компонент акустического сигнала. В работах по данной тематике [19; 24–26; 28–30; 33] автор лично проводил моделирование распространения импульсных сигналов, для чего был создан комплекс программ в среде программирования MATLAB. Значительная часть результатов получена в ходе совместной работы с научным руководителем, Петровым П. С. и коллегами из лаборатории акустической томографии Моргуновым Ю. Н. и Головым А. А..

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии.

Общий объем диссертации 130 страниц, из них 90 страниц текста, включая 51 рисунок. Библиография включает 148 наименований на 18 страницах.

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 теоретических и экспериментальных работ, охватывающий некоторые классы задач подводной акустики. В **разделе 1.1** представлена методика оценки времен прихода модальных компонент акустического сигнала, основанная на методе нормальных волн [16] и предположении об адиабатическом распространении звука. Введено понятие эффективной скорости $v_j^{eff}(s_i)$ распространения j -й модальной компоненты, позволяющее корректно усреднить вариации групповой скорости $v_j^{gr}(x, y)$ вдоль отрезка s_i акустической трассы между точками с координатами x_1, y_1 и x_2, y_2 :

$$v_j^{eff}(s_i) = \frac{v_j^{gr}(x_2, y_2) - v_j^{gr}(x_1, y_1)}{\ln \left(\frac{v_j^{gr}(x_2, y_2)}{v_j^{gr}(x_1, y_1)} \right)}. \quad (1)$$

Время прохождения j -й модальной компонентой интервала s_i можно вычис-

лить, как частное его длины и эффективной скорости, т. е. $t_j(s_i) = \frac{s_i}{v_j^{eff}(s_i)}$. При достаточно мелком разбиении акустической трассы на отрезки s_i можно получить усредненные оценки эффективных скоростей V_j^{eff} и времен прихода модальных компонент T_j вдоль всей трассы:

$$T_j = \sum_{i=1}^n t_j(s_i), \quad V_j^{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n v_j^{eff}(s_i)}{n}. \quad (2)$$

Для учёта горизонтальной рефракции используется лучевая теория [16], при помощи которой можно получить траектории горизонтальных лучей модальных компонент (**раздел 1.2**). Это требуется для оценки искривления луча и его удлинения ΔR_j относительно геодезической длиной R :

$$\Delta R_j = T_j V_j^{eff} - R. \quad (3)$$

Разделы 1.4 и 1.5 отведены для теоретического обоснования данной методики на основе моделирования распространения импульсных сигналов в регулярных волноводах. Продемонстрирована возможность получать корректные оценки времен прихода модальных компонент акустического сигнала. Результаты, изложенные в данной главе, были опубликованы в статье [32].

Вторая глава посвящена апробации методики определения эффективной скорости с привлечением данных натурного акустического эксперимента, проведённого усилиями ТОИ ДВО РАН в 2017 году. В **разделе 2.2** излагаются основные отличия поля скорости звука, образованного интерполяцией с экспериментальных ВРСЗ, и поля скорости звука, полученного из реанализа GLORYS12V1 модели циркуляции океана NEMO [18]. **Раздел 2.2.1** содержит в себе краткое описание применимости данных реанализа к моделированию распространения звука. Предлагается методика комбинирования гидрологических данных, в которой для шельфовых зон используются данные экспериментальных зондирований, а для глубоководной части – данные реанализа. **Раздел 2.3** интерпретирует результаты расчета времен прихода модальных компонент аку-

стического сигнала для поля, полученного из экспериментальных ВРСЗ (а,b) и для поля, составленного по данным реанализа (с,d) (Рис. 1).

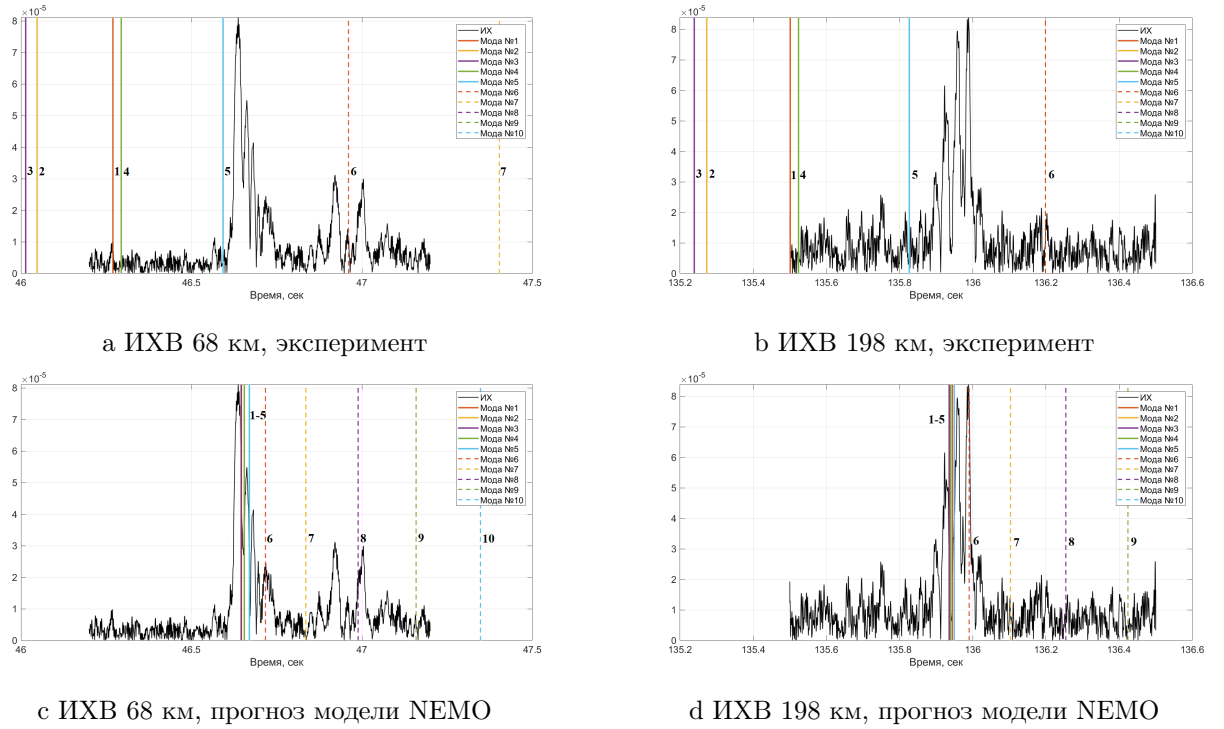


Рис. 1: Импульсная характеристика волновода (ИХВ), полученная в эксперименте, и времена прихода (вертикальные линии с номерами), соответствующие групповым скоростям различных мод, усредненным по трассе от ИНС до точки 68 км, рассчитанным с использованием (а) – данных натурных гидрологических зондирований и (с) – данных реанализа GLORYS12V1. Аналогичные графики для акустической трассы от ИНС до точки 198 км, с использованием (б) – данных натурных гидрологических зондирований и (д) – данных реанализа GLORYS12V1.

Как видно из Рис. 1 (а) и (б), использование малого количества гидрологических данных, полученных в ходе натурального эксперимента при моделировании распространения звука не позволяет спрогнозировать ни правильную структуру приходов, ни абсолютные значения соответствующих времен. В то же время поле скорости звука, полученное из данных реанализа GLORYS12V1, позволяет корректно воспроизвести основные закономерности, характерные для тако-

го типа распространения. Также времена прихода модальных компонент и их пучков можно ассоциировать с пиками ИХВ, поскольку разбег между ними в среднем не превышает 22 мсек, что сопоставимо с погрешностью использованной методики (ширина АКФ М-последовательностей равна 10 мсек). Также производится оценка межмодовой и внутримодовой дисперсии через расчет разностей времен прихода модальных импульсов и их уширения. Показано, что уширение модовых импульсов не является препятствием к их разрешению, и, следовательно, межмодовая дисперсия является более значимым фактором по сравнению с внутримодовой. В **разделе 2.4** обосновывается методика оценки эффективных скоростей при распространении из мелкого моря в глубокий океан. Применение данной методики основано на том факте, что глубоководный участок характеризуется минимальным различием групповых скоростей акустических мод, причем эта величина является стабильной, т. е. попавшие в ПЗК компоненты сигнала при распространении по крайней мере на несколько сотен километров все еще будут отделены друг от друга приблизительно так же, как в момент выхода с континентального склона. В связи с этим методику допустимо использовать для оценки эффективных скоростей модальных компонент акустических сигналов при распространении из мелкого моря в глубокий океан. Результаты моделирования времен прихода с использованием данных реанализа GLORYS12V1 находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Помимо этого, в **подразделе 2.4.1** изложены критерии применимости адиабатической теории. В **разделе 2.5** проводится сравнение метода нормальных волн с лучевой теорией в контексте задач дальнего распространения звука в океане. Результаты второй главы опубликованы в работе [26].

В **третьей главе** описано влияние горизонтальной рефракции, возникающей вследствие наличия гидрологических и батиметрических неоднородностей вдоль акустической трассы, на времена прихода модальных компонент акустического сигнала в точку приема. **Разделы 3.1 и 3.2** посвящены моделированию распространения звука в волноводах Охотского и Японского морей,

соответственно. **Раздел 3.1.1** кратко описывает проведение эксперимента в Охотском море, в **разделе 3.1.2** обсуждается использование данных реанализа GLORYS12V1 и методика расчета горизонтальных лучей, соответствующих вертикальным модам для центральной частоты сигнала, изображенных на Рис. 2.

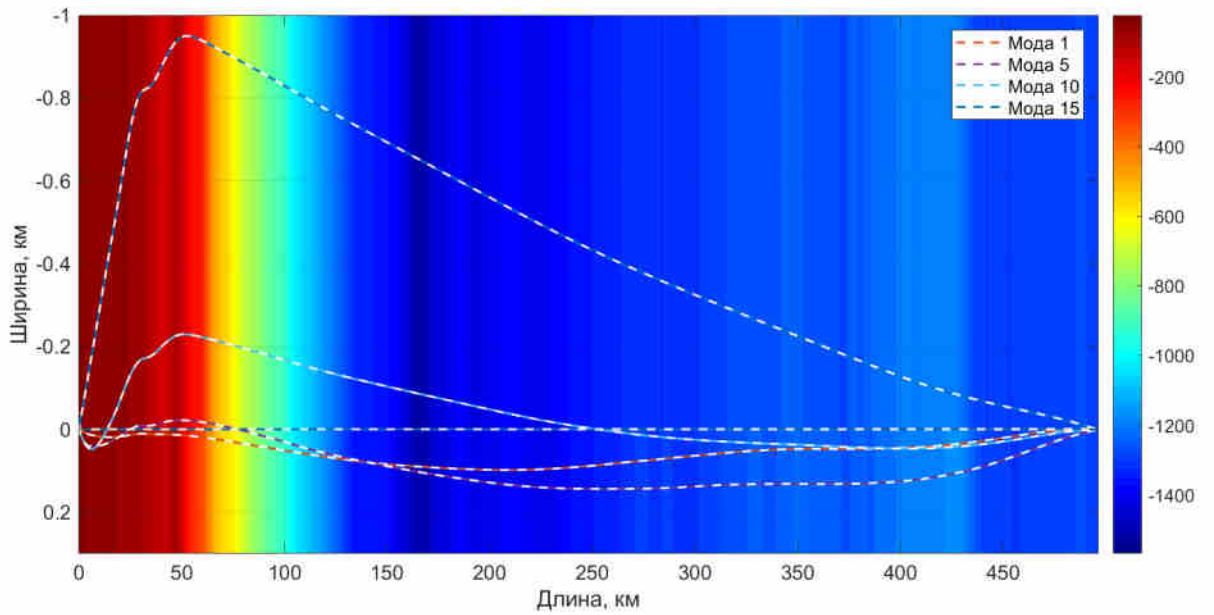


Рис. 2: Собственные лучи модальных компонент $j = 1, 5, 10, 15$, построенные для акустической трассы длиной 497 км. Заметно, что больший вклад в искривление лучей вносят неоднородности батиметрии, в особенности перепад глубин в зоне перехода из мелкого моря в глубокий океан.

Раздел 3.1.3 посвящен оценкам времен прихода и групповых скоростей модальных компонент акустического сигнала и их интерпретации. Сравнению подвергались эффективные скорости распространения модовых компонент и скорости прихода акустической энергии, которым сопоставлялись пики ИХВ (Рис. 3).

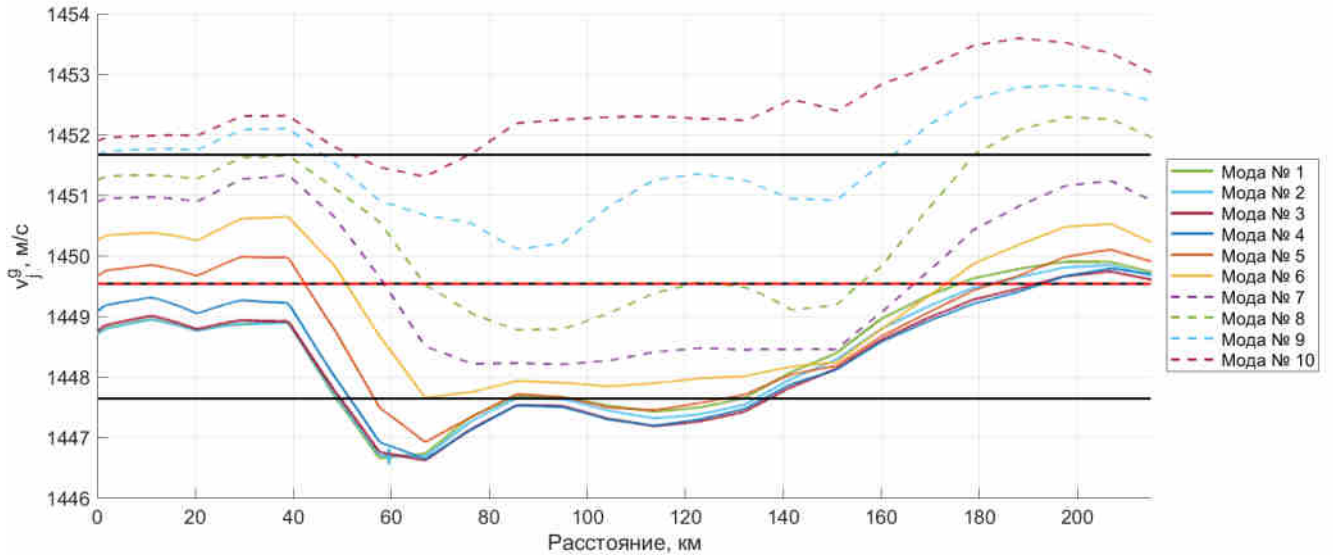


Рис. 3: Усредненные значения v_j^{gr} вдоль акустической трассы с наложенными экспериментальными оценками. Горизонтальные линии соответствуют скоростям, определяемым по главному и побочным максимумам ИХВ, наблюдаемым в эксперименте.

В данном случае не удастся ассоциировать отдельные максимумы ИХВ с модами или их группами, что объясняется отсутствием ассимиляцией моделью NEMO реальных гидрологических данные для Охотского моря. Тем не менее, показано, что основные закономерности дисперсии импульсного сигнала, наблюдаемые в эксперименте, хорошо воспроизводятся с помощью расчета групповых скоростей мод по изложенной методике. В **разделе 3.2** производится аналогичное моделирование распространения звука в акватории Японского моря. Ключевыми отличиями от ранее упомянутых экспериментов является протяжённость акустической трассы (1073 км) и её пересечение крупномасштабным синоптическим вихрем на расстоянии около 600 км от источника. Краткое описание экспериментальных данных и используемых при моделировании полей гидрологии дано в **разделе 3.2.1**. Результаты расчёта собственных лучей модальных компонент приведены в **разделе 3.2.2**, интерес представляют удлинения собственных горизонтальных лучей мод (Рис. 4).

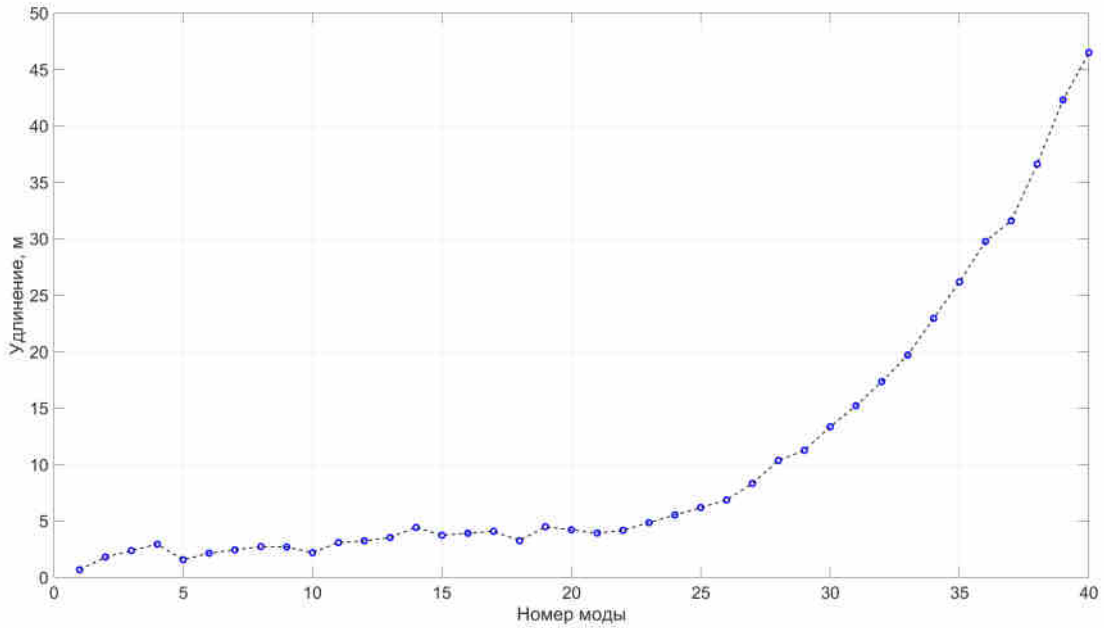


Рис. 4: Удлинения собственных лучей модальных компонент.

Заметно, что удлинения лучей первых двадцати мод не превосходят величину порядка 5 метров. Можно с уверенностью говорить о том, что ни неоднородности гидрологии, ни неоднородности батиметрии не оказывают существенного влияния на удлинение лучей при такой постановке задачи (протяженная трасса в сценарии “шельф-глубокий океан”). Тем не менее, интерес может представлять собой сценарий “шельф-глубокий океан”, в котором акустическая трасса будет находиться под углом к кромке шельфа, при этом проекция градиентов батиметрии и гидрологии на акустическую трассу будет ненулевой, и данный случай рассмотрен в **Разделе 3.3. Раздел 3.3.1** традиционно посвящен описанию проводившегося эксперимента, среди особенностей которого следует выделить уверенный приём сигнала на горизонтах до 914 м и образование второго пика ИХВ. В **разделе 3.3.2** приведены результаты двумерного расчета акустического поля и его разложения по модовым компонентам. В **разделе 3.3.3** изложены результаты расчета собственных лучей и времена прихода модальных компонент (Рис. 5).

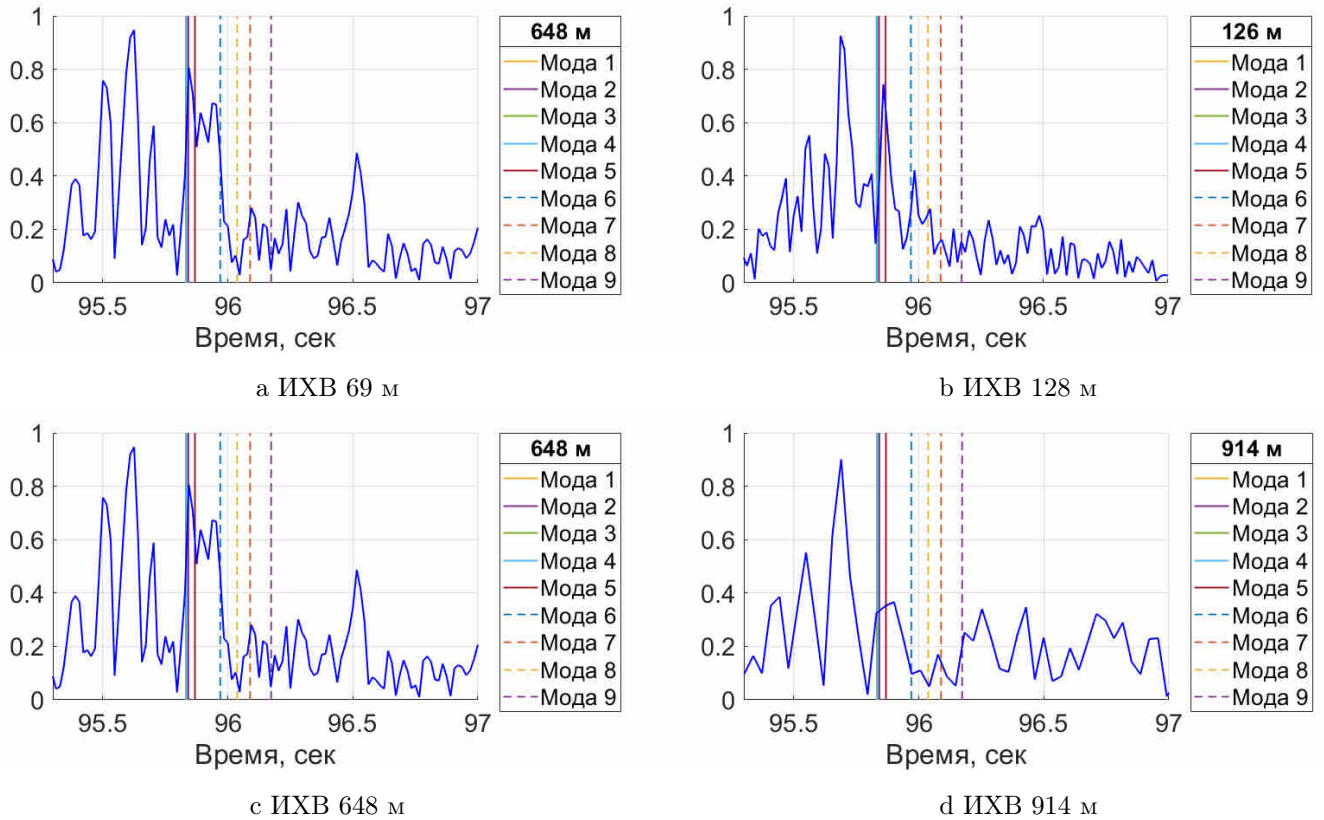


Рис. 5: Импульсные характеристики волновода, полученные по результатам корреляционной обработки сигналов, зарегистрированных на глубинах 69 (а), 128 (b), 648 (с) и 914 (d) метров с наложенными на них теоретическими оценками времен прихода модовых компонент акустического сигнала с первой по пятую (сплошные вертикальные линии) и с шестой по девятую (пунктирные горизонтальные линии).

Заметно типичное (для данного сценария) формирование пучка мод с первой по пятую, с которым можно отождествить пик ИХВ. При этом моды с шестой по девятую формируют ещё один пучок, локализованный в узком временном интервале (менее 0.4 сек). Отметим также, что модовые компоненты приходят в прямом порядке, что нехарактерно для дальнего распространения звука. Тем не менее, это можно объяснить тем, что глубоководная часть обладает недостаточной длиной для того, чтобы модовые компоненты перестроились в обратном порядке. Появление второго пучка можно объяснить своего рода дополнительной дисперсией, связанной с тем фактом, что лучи мод больших но-

меров в силу большей чувствительности к явлению горизонтальной рефракции захватывают гораздо более длинную часть континентального шельфа. Таким образом, в **главе 3** продемонстрирована работоспособность методики определения времен прихода в условиях наличия сложной комбинации гидрологических и батиметрических неоднородностей, в том числе обуславливающих горизонтальную рефракцию звука.

Результаты, изложенные в данной главе, были опубликованы в [28–31].

Глава 4 посвящена параметризации возмущения профиля скорости звука в Японском море синоптическим вихрем. В **разделе 4.2** описан эксперимент, в ходе которого были получены поля скорости звука, пересекающие синоптический вихрь вдоль параллели и меридиана. В **разделе 4.3** излагается способ параметризации профиля скорости звука с использованием квантовомеханических аналогий, т. е. аппроксимация величины $-\frac{\omega^2}{c(z)^2}$ потенциалом Морса. Показано, что такой способ параметризации обеспечивает хорошее качество аппроксимации типичных профилей скорости звука $c(z)$ для Японского моря в летне-осенний период. **Раздел 4.4** посвящен аналитическому расчету волновых чисел и модовых функций, который становится возможен благодаря соответствию между уравнениями Гельмгольца и Шрёдингера. После перенормировки возможно сразу выписать решения акустической спектральной задачи:

$$\begin{aligned}\phi_j(z) &= N_j \zeta^{\frac{\alpha_j}{2}} e^{(-\frac{\zeta}{2})} L_j^{\alpha_j} \zeta, \quad \zeta = 2\lambda e^{(-a(z-z_e))}, \quad 0 < \zeta < \infty, \\ k_j^2 &= -c_1 - D_e + \frac{\alpha_j^2 a^2}{4}, \quad j = 0, 1, \dots, [\lambda],\end{aligned}\tag{4}$$

где $L_j^{\alpha_j}(\zeta)$ – полиномы Лагерра, a – ширина потенциальной ямы z_1 – глубина оси подводного звукового канала, c_1 – значение потенциала на оси ПЗК, D_e – разность потенциалов на оси ПЗК и на бесконечности $[\lambda]$ – наибольшее целое число, меньшее λ , и:

$$N_j = \sqrt{\frac{j! \alpha_j a}{\Gamma(j + \alpha_j + 1)}}, \quad \alpha_j = 2\lambda - 2j - 1, \quad \lambda = \frac{\sqrt{D_e}}{a}.\tag{5}$$

В **разделе 4.5** предлагается математическая модель параметризации возмуще-

ния поля скорости звука вихрем:

$$\delta c(x, y, z) = -c_m e^{\left[-\frac{(x-x_0)^2}{r_x^2}\right]} e^{\left[-\frac{(y-y_0)^2}{r_y^2}\right]} \left(\frac{z-z_0}{r_z}\right) e^{\left[-\frac{\beta(z-z_0)^2}{r_z^2}\right]}, \quad (6)$$

Результат параметризации изображен на Рис. 6

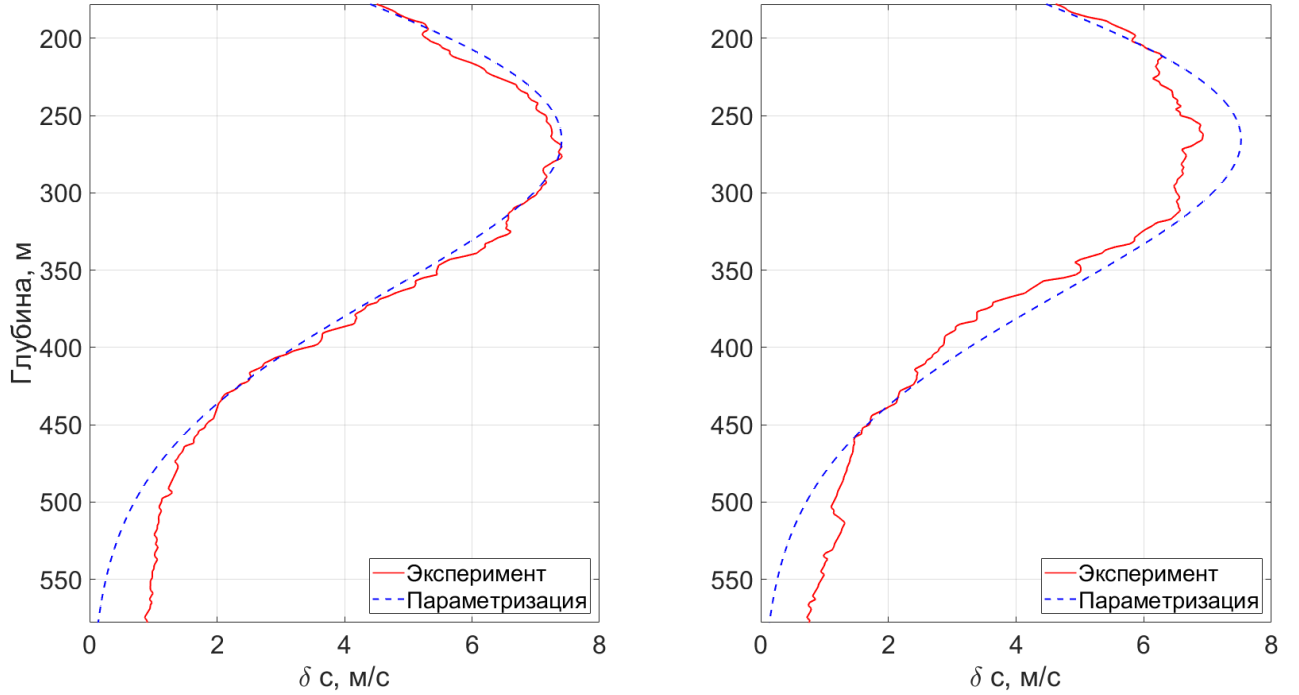


Рис. 6: Зависимость возмущения $\delta c(z)$ профиля скорости звука от глубины z в центре вихря для меридионального (левый подграфик) и зонального (правый подграфик) разрезов, наблюдаемая в эксперименте по сравнению с выделенным нами фоновым профилем (сплошная линия), а также полученная с помощью параметризации по формуле 6 (пунктирная линия).

Такая модель позволяет аппроксимировать возмущение поля скорости звука с точностью до 0.3 м/с. **Раздел 4.6** описывает расчет волновых чисел и модовых функций с использованием теории возмущений до второго порядка включительно. Показано, что ошибка вычислений не превышает 0.001 м^{-1} . В данной главе получены аналитические формулы для собственных функций и собственных чисел мод для типичных профилей скорости звука в Японском море, которые могут быть использованы в контексте задач акустической даль-

нометрии. Результаты исследования, изложенного в данной главе, были опубликованы в [31].

В Заключение подводятся итоги работы, которые можно кратко сформулировать следующим образом:

- разработана методика прогноза эффективных скоростей модальных компонент акустического сигнала, основанная на комбинации метода нормальных волн и лучевой теории;
- подтверждено на практических примерах, что при моделировании распространения звука в сценарии “шельф-глубокий океан” ключевую роль играет полнота информации о пространственном распределении поля скорости звука вдоль акустической трассы;
- показано, что явление горизонтальной рефракции является существенным фактором, определяющим характер дисперсии акустических сигналов при их распространении в сценарии “шельф-глубокий океан”.

Цитированная литература

1. Listening forward: approaching marine biodiversity assessments using acoustic methods / T. A. Mooney [et al.] // Royal Society open science. — 2020. — Vol. 7, no. 8. — P. 201–287.
2. Estimating oil concentration and flow rate with calibrated vessel-mounted acoustic echo sounders / T. C. Weber [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 2012. — Vol. 109, no. 50. — P. 20240–20245.
3. Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: Sensing bubbles controlled by variable currents / J. S. Von Deimling [et al.] // Limnology and Oceanography: Methods. — 2010. — Vol. 8, no. 5. — P. 155–171.

4. *Klemas V.* Fisheries applications of remote sensing: An overview // Fisheries Research. — 2013. — Vol. 148. — P. 124–136.
5. *Horne J. K.* Acoustic approaches to remote species identification: a review // Fisheries oceanography. — 2000. — Vol. 9, no. 4. — P. 356–371.
6. *Swezey M. M.* Ocean acoustic uncertainty for submarine applications : PhD thesis / Swezey M. M. — Massachusetts Institute of Technology, 2016.
7. Acoustic mine detection using the Navy’s CASS/GRAB model : tech. rep. / P. C. Chu [et al.] ; Naval Postgraduate School Monterey CA. — 2002.
8. Deep ocean long-range underwater navigation. / P. Mikhalevsky [et al.] // Journal of Acoustical Society of America. — 2020. — Vol. 147. — P. 2365–2382.
9. *Туфанов И. Е., Щербатюк А. Ф.* Разработка алгоритмов группового поведения анпа в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // Управление большими системами: сборник трудов. — 2012. — № 36. — С. 262–284.
10. Особенности распространения акустических волн на шельфе убывающей глубины / Г. И. Долгих [и др.] // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 470, № 1. — С. 95–98.
11. Экспериментальные исследования на шельфе залива Петра Великого с использованием низкочастотных гидроакустических излучателей / А. Н. Самченко [и др.] // Подводные исследования и робототехника. — 2019. — Т. 29, № 3. — С. 54–60.
12. Experimental Testing of the RAY Computational Program for Solving Acoustic Ranging Problems on Long Trajectories Including Shelves and Deep Seas / A. V. Burenin [et al.] // Acoustical Physics. — 2023. — Vol. 69. — P. 20–33.

13. Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях Японского моря / Ю. Н. Моргунов [и др.] // Акустический журнал. — 2017. — Т. 63. — С. 646—650.
14. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море / Ю. Н. Моргунов [и др.] // Акустический журнал. — 2016. — Т. 62. — С. 341—347.
15. *Brekhovskikh L. M., Lysanov Y. P. Fundamentals of Ocean Acoustics.* — Springer: New York, 2007.
16. *Computational ocean acoustics* / F. B. Jensen [et al.]. — Springer: New York, 2011.
17. Three-dimensional model benchmarking for cross-slope wedge propagation / O. C. Rodríguez [et al.] // *Proceedings of Meetings on Acoustics.* — 2017. — P. 070004.
18. *Madec G., Team N. NEMO Ocean Engine.* — Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), 2008.

Основные публикации по теме диссертации

19. Experimental and theoretical study on arrival times and effective velocities in the case of long-range propagation of acoustical pulses along the shelf edge in a shallow sea / P. S. Petrov [et al.] // *Acoustical Physics.* — 2020. — Vol. 66. — P. 20—33.
20. *Сорокин М. А., Петров П. С.* Расчёт скорости распространения акустического сигнала в слое дна и глубины его отражения. — 2018. — [Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU2018619569]. https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2018662269&TypeFile=html.

21. *Сорокин М. А., Петров П. С.* Батиметрическое профилирование вдоль акустической трассы. — 2019. — [Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU2019616507]. https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2019616507&TypeFile=html.
22. *Сорокин М. А., Петров П. С.* Программа для расчета коэффициентов в модальном разложении звукового поля в мелком море. — 2019. — [Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU2019661017]. https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2019661017&TypeFile=html.
23. *Сорокин М. А., Петров П. С.* Расчет и визуализация собственных лучей вдоль акустической трассы. — 2022. — [Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU2022664275]. https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2022664275&TypeFile=html.
24. The Results of Experimental and Theoretical Researches of Pulsed Signals Propagation in Shallow Sea Along the Edge of Continental Shelf / A. A. Golov [et al.] // Underwater Investigations and Robotics (in Russian). — 2020. — Vol. 44. — P. 36–41.
25. Исследование влияния синоптических вихрей на точность решения задач акустической дальнометрии / М. А. Сорокин [и др.] // Акустический журнал. — 2020. — Т. 4. — С. 53–60.
26. Predicting effective propagation velocities of acoustic signals using an ocean circulation model / M. A. Sorokin [et al.] // Acoustical Physics. — 2021. — Vol. 67. — P. 521–532.
27. Комплекс программ для расчета акустических полей в мелком море на основе метода широкоугольных модовых параболических уравнений / А. Г. Тыщенко [и др.] // Акустический журнал. — 2021. — Т. 67, № 5. — С. 533–541.

28. To the issue of theoretical and experimental estimates of the group velocity of the acoustic signal modal components on long tracks using ocean circulation models / M. A. Sorokin [et al.] // Underwater Investigations and Robotics (in Russian). — 2022. — Vol. 40. — P. 54–64.
29. Hydrological and acoustic research at ultra-long distances in the Sea of Japan / A. A. Golov [et al.] // Underwater Investigations and Robotics (in Russian). — 2023. — Vol. 44. — P. 83–92.
30. On the Effect of Horizontal Refraction Caused by an Anticyclonic Eddy in the Case of Long-Range Sound Propagation in the Sea of Japan / M. A. Sorokin [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — P. 1737.
31. The Parameterization of the Sound Speed Profile in the Sea of Japan and Its Perturbation Caused by a Synoptic Eddy / M. A. Sorokin [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — Vol. 12. — P. 2207.
32. The solution of sound propagation modeling problems for environment impact assessment by the mode parabolic equations method / A. G. Tyschenko [et al.] // Journal of Acoustical Society of America. — 2024. — Vol. 156. — P. 3306–3319.
33. Исследование времен прихода импульсных сигналов при распространении из мелкого моря в глубокий океан в волноводах Японского моря / М. А. Сорокин [и др.] // Акустический журнал. — 2025. — Т. 71. — С. 824–834.

Научное издание

Сорокин Михаил Андреевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Исследование распространения звука с шельфа в глубокий океан методом
нормальных волн

Подписано в печать 16.07.2026. Формат 60 × 90 1/16. Тираж 78 экз. Заказ 129.

Отпечатано с авторского оригинал-макета в ТОИ ДВО РАН 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43