

На правах рукописи



Манульчев Денис Сергеевич

**Методика моделирования антропогенных
акустических сигналов на шельфе на основе
экспериментальных измерений**

1.3.7 – Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток – 2024

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., заведующий лабораторией 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

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

Ведущая организация: ФГБУН Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Защита состоится 26 сентября 2024 года в 14:00 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/2129>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г..

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

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Костин А.Е.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В связи с активным освоением углеводородных месторождений, расположенных на континентальном шельфе, особую актуальность получили задачи прогнозирования уровней акустических полей, генерируемых производственной деятельностью людей в районах постоянного или сезонного обитания морских животных (далее МЖ), использующих акустические сигналы [1–3]. Известно, что интенсивные антропогенные сигналы генерируются в море во время проведения сейсморазведочных исследований [4], судовых операций [5], работ по строительству подводных трубопроводов, установки газо-нефтедобывающих платформ и их обслуживания, а также во время забивки на берегу и в море фундаментных свай [6]. При планировании таких работ нужны корректные оценки уровней антропогенных шумов и параметров акустических импульсов, которые будут формироваться в районах шельфа, являющихся важными для нагула МЖ во время проведения производственных работ.

Северо-восточный шельф о. Сахалин является важным районом летне-осеннего нагула охотско-корейской (*Western North Pacific*) популяции серых китов [7], занесенных в Красную книгу России и Красный список Международного союза охраны природы (МСОП). Известны случаи, когда на зиму киты уплывают на западное побережье США, достигая берегов Калифорнии, и возвращаются на о. Сахалин весной [8–10]. От мест нагула до зимовок кит может преодолевать до 11 тысяч км, а всего за год – до 25 тысяч км. Во время миграции киты живут за счет запасов подкожного жира, следовательно, если по каким-либо причинам во время нагула на шельфе о. Сахалин кит не наберет достаточную массу тела, ему не хватит энергии на осуществление такого перехода. Поэтому компании, являющиеся операторами нефтегазовых проектов в данном районе, ежегодно получают разрешение на проведение запланированных на текущий год работ и исследований в Министерстве природных ресурсов

РФ с учетом выполнения условий, обеспечивающих исключение существенного влияния на МЖ.

Наиболее шумными операциями являются морские сейсморазведочные работы, в которых применяются мощные пневмоизлучающие системы [4]. Энергия формируемых ими сейсмоакустических импульсов с затуханием распространяется в районы кормления серых китов, и поэтому при планировании этих исследований осуществляется предварительное моделирование параметров акустических импульсов, которые будут формироваться на границах ближайшего района кормления серых китов [11]. Для корректной оценки уровней звукового воздействия необходимо знать особенности распространения энергии сейсморазведочного сигнала в данной области северо-восточного шельфа о. Сахалин. Проведение акустического мониторинга в реальном времени [12] позволяет проводить корректировки предсказанного положения границ уровней параметров акустических импульсов, формируемых в заданной акватории сейсморазведочным судном, идущим по геоакустическому профилю. Эти поправки поступают наблюдателям за серыми китами, которые принимают решение об остановке и возобновлении излучения сейсморазведочным судном акустических сигналов при его движении по профилю.

Таким образом, практическая деятельность людей на шельфе с соблюдением экологических норм определяет актуальность прогнозирования распространения энергии акустических колебаний, учитывающего характер источника, батиметрические, гидрологические и геологические особенности рассматриваемого района.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической и методологической базой данной работы послужили труды отечественных и зарубежных исследователей в области разработки и реализации математических методов численного расчета акустических полей, в частности, М. Коллинза (метод решения параболических уравнений), М.Ю. Трофимова, П.С. Петрова (метод решения модовых параболических уравнений), Л.М. Бреховских, У. Купермана,

Б.Г. Кацнельсона (математические методы в задачах подводной акустики). Существенный вклад в исследование влияния акустического воздействия на морских млекопитающих и рыб внесли Б. Саутхолл, Д. Финнеран, У. Холлидей, К. Эрбе, А. Поппер и их коллеги. В основу экспериментальной базы настоящей диссертации легли результаты натурных исследований, проведенных на Морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН м. Шульца (Приморский край), а также результаты многолетней экологической программы по изучению серых китов на северо-восточном побережье о. Сахалин, акустическая часть которой была реализована под руководством А.Н. Рутенко. Настоящая диссертация является законченным научным исследованием, в котором представлено описание методики оценки уровней акустических шумов в мелком море от известного источника, позволяющей решать задачи как фундаментальной науки, так и прикладные вопросы, связанные с распространением звука и его воздействия на акваторию и её фауну.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью работы является разработка методики корректной оценки уровней акустических полей, которые формируются на шельфе во время проведения производственной и научной деятельности в море и на берегу.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнить экспериментальные исследования по распространению энергии тональных и импульсных сигналов в неоднородных геоакустических волноводах, характерных для шельфа.
2. Построить физико-математические модели трехмерных волноводов на основе многолетних натурных акустико-гидрофизических и батиметрических данных.
3. Разработать методики построения функции точечного источника, эквивалентного распределенному или групповому источнику, для корректного численного моделирования формируемого им акустического поля на шельфе.
4. Разработать и применить методики расчета пространственного распре-

деления уровней акустических шумов для прикладных задач – получение количественных оценок уровней акустического воздействия в точках реального или потенциального положений МЖ.

Научная новизна.

1. Применена модель модового параболического уравнения (далее МПУ) в приближении нормальных взаимодействующих мод в вертикальной плоскости и узкоугольного параболического уравнения в горизонтальной плоскости с учетом упругих свойств слагающих дно пород, а также адиабатического широкоугольного МПУ для численного моделирования акустических полей, формируемых тональными и импульсными источниками в море и на берегу в неоднородных геоакустических волноводах в районах континентального шельфа.

2. Распространение энергии звуковых колебаний рассмотрено в рамках новых акустических трасс на северо-восточном шельфе о. Сахалин и в заливе Посыета с включением береговых участков в обоих случаях.

3. Натурные исследования проведены с применением оригинальных автономных акустических измерительных средств, а в качестве источника низкочастотных импульсных сигналов применен оригинальный пневмоизлучатель, первоначально созданный для отпугивания акул.

4. Для достижения необходимой для практики точности численного моделирования применена новая методика построения эквивалентной точечной функции источника по результатам опорных измерений.

5. Спроектирована и реализована библиотека программ для MATLAB, представляющая собой оболочку для различных моделей расчета акустических полей. В библиотеку входят алгоритмы обработки акустических данных, формирование геофизических параметров волновода на основе экспериментальных баз данных, а также обработка результатов моделирования акустических полей до конечного вида.

Теоретическая и практическая значимость. В связи с ростом шумовой нагрузки шельфовой зоны, вызванной активной деятельностью человека

(добыча природных ископаемых, судовые перевозки, строительства и т.д.), повышается значимость проведения комплексного мониторинга состояния окружающей среды и контроля степени влияния индустриальной деятельности на нее. Одной из составляющих подобного рода экологических программ является акустический мониторинг, включающий в себя не только проведения натурных измерений шумовой обстановки в акватории, но и численного моделирования уровней формируемых шумов до и после проведения индустриальных работ в целях определения интегрального акустического воздействия на акваторию и морских обитателей в ней. Метод расчета уровней акустических шумов, изложенный в диссертации, был востребован в рамках комплексных экологических программ на северо-восточном шельфе о. Сахалин при моделировании акустических полей от забивки фундаментных свай на берегу (оператор *Exxon Neftegas Limited*, 2015 и 2019 гг.), при проведении геофизических исследований (ООО Сахалинская Энергия, 2022 г., АО Сахалинморнефтегаз-Шельф, 2023 г.), а также при исследовании акустической обстановки Обской губы в зоне потенциального воздействия проекта «Арктик СПГ–2» (ПАО Новатэк, ИЭПИ, 2020 г.).

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач подразумевает участие в планировании и реализации натурных исследований, в применении методов обработки цифровых сигналов (спектральный и корреляционный анализы), а также использование методов численного моделирования акустических полей в нерегулярных волноводах. Последнее подразумевает использование аналитических и асимптотических методов математической физики при решении трехмерного волнового уравнения, которое сводится к численному интегрированию параболических уравнений и расчету нормальных мод.

Положения, выносимые на защиту:

1. На основе экспериментальных акустико-гидрофизических и батиметрических данных и численного моделирования установлены параметры модельных геоакустических волноводов для акустических трасс в районах залива Посьета и северо-восточного шельфа о. Сахалин.

2. Разработана методика построения спектральной функции эффективного точечного источника и ее параметризации аналитическими функциями специального вида по опорным акустическим измерениям, выполненным одиночным гидрофоном в мелком море.

3. Предложена и апробирована методика моделирования трехмерных антропогенных звуковых полей на шельфе с использованием модовых параболических уравнений, которая совместно с эффективной функцией источника и корректных геоакустических параметров волновода обеспечивает точность вычислений уровня сигнала до 2 дБ.

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные результаты диссертационной работы основаны на многочисленных акустических экспериментах, проведенных с применением метрологически аттестованных акустических и гидрологических измерительных средств и апробированных методик (см. список публикаций автора). При численном моделировании применялись батиметрические и гидрологические данные, собранные на шельфе о. Сахалин в многолетних морских биолого-акустических экспедициях, проведенных на судах РАН. Достоверность результатов моделирования обусловлена согласованностью теоретических оценок с результатами натурных измерений и тем, что они не противоречат основным физическим законам. Используемые в диссертации математические методы и основанные на них комплексы прикладных программ прошли всестороннюю верификацию при решении модельных задач распространения звука.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 21 печатных работах, из них 11 статей в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК.

Личный вклад автора. Автор принимал активное участие в морских и прибрежных экспедициях и экспериментальных исследованиях, проведенных на шельфе Японского и Охотского морей, результаты которых частично представлены в диссертационной работе. Лично автором были запрограммированы

алгоритмы спектрального и корреляционного анализов импульсных акустических сигналов и программы-оболочки для моделирования акустических полей, которая позволяет осуществить полный вычислительный цикл от обработки данных опорных измерений до пересчета контуров уровней акустических шумов в заданной области.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 155 страниц, из них 135 страниц текста, включая 58 рисунков. Библиография включает 167 наименований на 20 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 обзор теоретических и экспериментальных работ по пассивному мониторингу акустических сигналов, формируемых как антропогенными источниками, так и морскими животными. Рассматриваются типы источников антропогенных шумов (суда, морские сейсморазведочные работы, забивка свай) и особенности формируемых ими акустических полей, а также приводится описание влияния антропогенного шума на морских млекопитающих, вводится взвешенная функция, определяющая восприятие звука различных групп животных на определенной частоте для оценки пороговых уровней воздействия на морское животное. Представлено описание применяемых технических средств, а также определены акустические величины, используемые для оценки параметров импульсных акустических сигналов, в том числе

уровень акустического воздействия на акваторию (*Sound Exposure Level*):

$$SEL(x, y, z) = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_0^T p^2(x, y, z, t) dt}{p_0^2 \cdot t_0} \quad [\text{дБ отн. } 1 \text{ мкПа}^2 \cdot \text{с}], \quad (1)$$

где $p(x, y, z, t)$ – вариации акустического давления в точке волновода (x, y, z) , $[0, T]$ – временной интервал сигнала, $p_0 = 1$ мкПа, $t_0 = 1$ с.

Особое внимание уделяется обзору методов моделирования волновых процессов в неоднородных геоакустических волноводах на основе решения параболических уравнений.

Во **второй главе** рассматриваются серии экспериментальных работ по исследованию особенностей распространения тональных и импульсных звуковых сигналов в сложных волноводах, характерных для шельфовой зоны. Показано, что на потери звука существенным образом влияют акустические параметры волновода, которые могут иметь сезонную изменчивость в водном слое (раздел 2.1), пространственную неоднородность в слое донных осадков (раздел 2.2), а также резкие скачки, обусловленные наличием береговой линии или сухопутных участков (раздел 2.3). Каждый эксперимент сопровождается численным моделированием акустических полей, опирающимся на натурные данные. Исследуются области применимости методов моделирования и соответствующего программного обеспечения.

В **разделе 2.1.1** по натурным данным эксперимента, проведенного на шельфе Японского моря в районе полуострова Гамова в осенний период, подтверждено явление «захвата» энергии звуковых колебаний («эффект оползня») на частоте 320 Гц придонным звуковым каналом при условии наличия наклонного дна с градиентом глубины 2,83 м/км, выраженного термоклина в водном слое, наблюдающегося вдоль трассы распространения, а также размещения источника звука вблизи дна. Впервые экспериментально и теоретически исследована вертикальная структура акустического поля при оползневом характере распространения звука вдоль наклонного дна. С помощью пакетов программ RAMs, MPE и RAM, удалось получить согласованные с экспериментальными

значениями потери звука и структуру интерференционной картины в семи точках приема звука вдоль акустической трассы длиной 18 км. Численное моделирование показало, что модель геоакустического волновода в приближении «жидкого» дна (MPE, RAM) дает значения акустического поля на 18 дБ больше, чем модель волновода с теми же параметрами, но учитывающая упругие свойства дна (RAMs). Существенное изменение потерь звука вызвано возбуждением в дне сдвиговых волн, наличие которых подтверждает выход горных пород в рассматриваемом районе.

Подобранная модель волновода позволила рассчитать акустические поля в различных гидрологических условиях для акустической трассы, продолженной до материкового склона и далее в Японское море. В летне-осенних гидрологических условиях при наличии термоклина, не смотря на значительные потери при распространении на шельфе, энергия акустических волн, генерируемая у берега, благодаря согласованному переходу низших акустических мод из придонного звукового канала в морской подводный канал, обеспечивает относительно однородное освещение вдоль оси канала при дальнейшем распространении звука в Японском море. В случае однородной холодной воды (зимние условия) энергия акустических волн на шельфе распространяется во всём водном слое и, соответственно, до кромки шельфа с меньшими потерями доходит значительно более богатый модовый состав акустических волн, в результате чего получены обширные (более 30 км) приповерхностные зоны тени и зоны конвергенции.

В рассмотренном в **разделе 2.1.2** сценарии распространения звука в сторону берега на относительно мелководном шельфе (10 – 30 м), характерном для северо-восточного побережья о. Сахалин, сезонный термоклин приводит к увеличению значений функции потерь на 6 – 20 дБ на частотах более 80 Гц. Потери звука минимальны, когда водный слой однородный и холодный. Сезонный термоклин увеличивает потери на распространение, поскольку акустические волны захватываются придонным звуковым каналом, и их энергия поглощается и рассеивается в дне. На распространение в прибрежную зону низкочастотных

тональных сигналов в диапазоне частот 8 – 80 Гц изменение гидрологических условий влияния практически не оказывает.

В разделе 2.2.1 приведено описание экспериментального исследования формирования импульсного поля в относительно глубоководной (30 – 40 м) бухте Витязь (Японское море). Натурные данные показали, что при распространении импульса в сторону моря гидрофоном у дна регистрировался «двойной» импульс с задержкой 0,2 с, оба импульса имели соизмеримые амплитуды и графики спектра. Была выдвинута гипотеза о том, что наличие одного из импульсов объясняется особенностями стратификации волновода, характерного для данной местности. Данная гипотеза была подтверждена теоретическим исследованием с использованием инструментов численного моделирования, основанного на методе узкоугольного модового параболического уравнения. Слой осадочных пород, имеющий толщину, соизмеримую с толщиной водного слоя, создает дополнительный канал распространения звука. Звук здесь фокусируется между дном и слоем горных пород, представленных преимущественно гранитом. Как показали модельные расчеты, энергия «прямого» (или водного) импульса переносится первой и частично второй модой, в то время как другой импульс распространяется в слое осадков за счет преимущественно второй моды.

В разделе 2.2.2 исследуется влияние объемной неоднородности донного слоя, вызванной выходом природного газа, на распространение низкочастотных импульсных сигналов. На рис. 1а приведена карта района шельфа о. Сахалин с пространственным распределением значений скорости звука продольной волны в дне на горизонте 50 м. Внутри района наблюдается «аномальная» область, в которой минимальное значение скорости звука достигает 1333 м/с. Методика исследования влияния этой области на потери энергии звука основана на оценке параметра SEL на множестве равноудаленных от приемника Odoptu-4 точек излучения (на рисунке обозначены белыми кружками) для расстояний 2,4 км и 4,6 км. В малом полукруге при $r = 2,4$ км неоднородности в донных осадках на

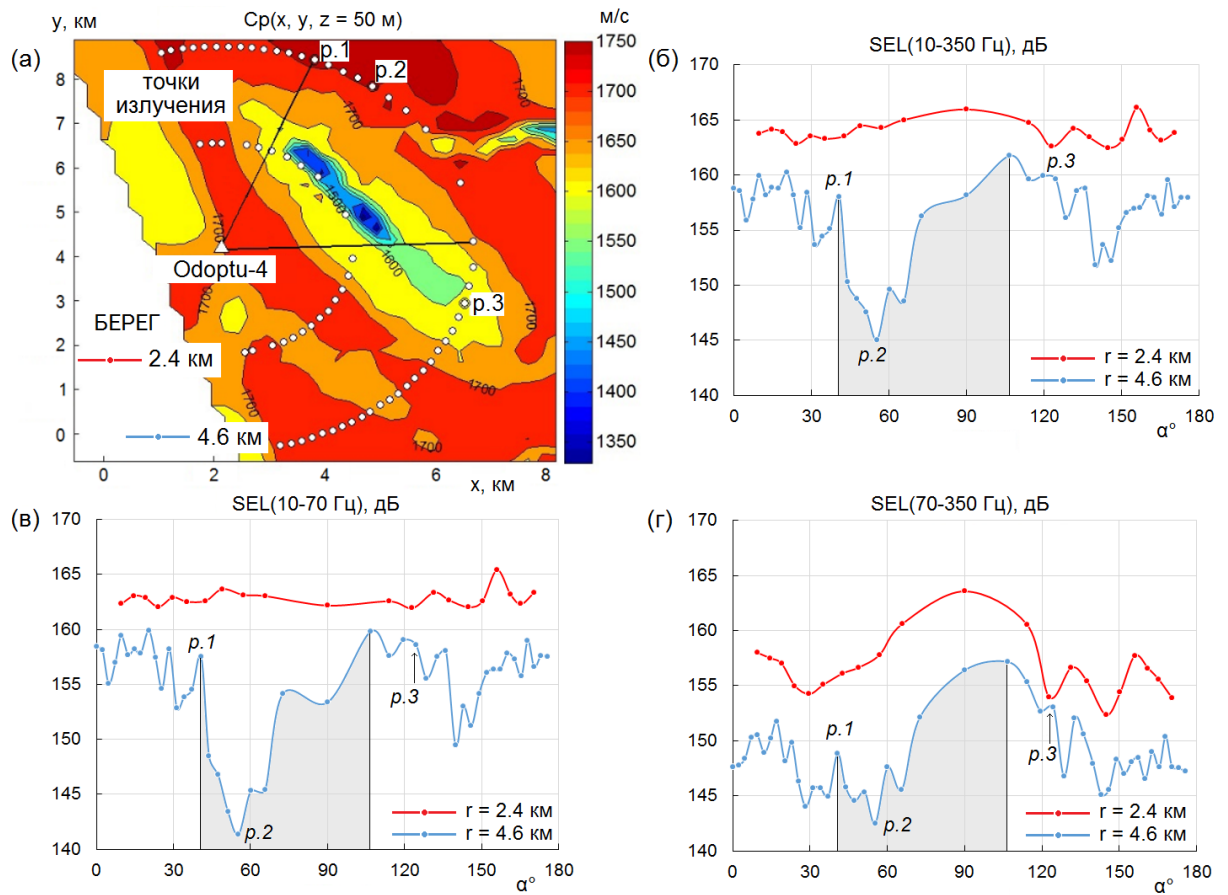


Рис. 1. Карта района с пространственным распределением скорости продольных волн в донном слое на горизонте 50 м; белыми кругами, в том числе p.1, p.2 и p.3, отмечены точки излучения импульсных сигналов; точка приема – Одопту-4 (а). Зависимость значений параметра SEL импульсных акустических сигналов, измеренных в точке мониторинга Одопту-4, от угла α и дальности r точек излучения в частотных диапазонах 10 – 350 Гц (б), 10 – 70 Гц (в) и 70 – 350 Гц (г).

протяжении трассы распространения звука отсутствуют, поэтому угловая зависимость акустической энергии, приносимой донными и донно-водными модами на частотах 10 – 70 Гц, незначительна, но заметна для энергии, приносимой водными модами на частотах 70 – 350 Гц. Это обусловлено, прежде всего, диаграммой направленности группы пневмоизлучателей на высоких частотах (см. рис. 1б-г). На большом полуокружении при $r = 4,6 \text{ км}$ наблюдается «аномальная» область со значениями скорости распространения продольных волн на 350 м/с меньше, чем в дне, и на 110 м/с меньше, чем в водном слое. Выраженная неод-

нородность в дне приводит к потерям значений $SEL(10 - 70 \text{ Гц}, r = 4,6 \text{ км}, \alpha)$ более, чем на 15 дБ (см. точки p.1 и p.2). Это могло произойти, например, из-за трансформации модовой структуры распространяющегося в данном геоакустическом волноводе звука с перекачкой энергии из низших мод в моды более высокого порядка, для которых потери на распространение, из-за поглощения в дне, значительно выше чем в водном слое.

С помощью численного моделирования показано, что пространственная неоднородность в распределении значений скорости распространения продольных волн в дне, по форме похожая на уединенную внутреннюю волну с основанием равным 400 м и высотой 75 м, существенно увеличивает потери при распространении сейсмоакустического сигнала в водном слое на 14,2 дБ в частотном диапазоне 10 – 250 Гц (см. рис. 2). Расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными не превышает 0,4 дБ. На частотах выше 70 Гц основная энергия сейсмоакустического импульса переносится за счет водных мод, и горизонтальная диаграмма в этом случае определяется, главным образом, особенностью конфигурации группы пневмоизлучателей.

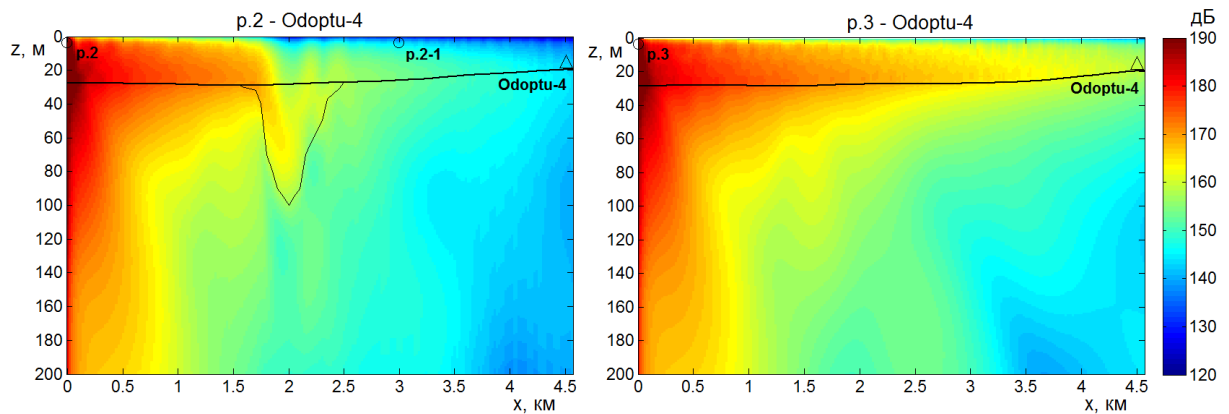


Рис. 2. Вертикальное поле модельных значений акустического воздействия $SEL(f = 10 - 250 \text{ Гц}, x, z)$ для акустических трасс p.2 – Odoptu-4 (с донной неоднородностью) и p.3 – Odoptu-4 (условно с горизонтально однородным донным слоем).

Раздел 2.3 посвящен изучению перехода звуковой волны из моря на сушу по результатам экспериментов в бухте Витязь и на мысе Шульца полуострова

Гамова. Установлено, что акустические поля от импульсных и тональных источников могут устойчиво регистрироваться на поверхности суши и в скважинах на довольно значительном расстоянии от береговой линии. Аппаратурный комплекс, используемый в экспериментах с волноводами, включающими сухопутные участки, обеспечивал проведение оперативных натурных измерений. Впервые проведено численное моделирование распространения звука в сложном волноводе, включающем в себя водный слой, дно, береговой участок и слой воздуха. Результаты моделирования согласуются с результатами экспериментальных исследований, что подтверждает адекватность предложенной методики вычисления поля в среде такого типа.

Результаты второй главы опубликованы в работах [14–20].

В **третьей главе** рассматривается моделирование нестационарных акустических полей, формируемых в нерегулярных волноводах сложными пространственно-разнесенными источниками (сейсморазведочные исследования и забивка свай на берегу). Основной проблемой при решении таких задач является отсутствие данных непосредственно в точке источника. Поскольку для расчетов требуется задание начальных условий для модовых параболических уравнений, необходимо на основе ближайшего к источнику гидрофона получить эффективную спектральную функцию точечного источника, являющегося эквивалентом реальному источнику.

В **разделе 3.1** предложена универсальная методика построения спектральной функции точечного источника и ее параметризации на примере распространения сейсморазведочного импульсного сигнала на северо-восточном шельфе о. Сахалин от группы пространственно-разнесенных пневмоизлучателей (см. рис. 3а). Расстояние от источника до опорного гидрофона Р1 составляет 650 м, что позволяет говорить о заметном изменении формы спектра распространяющегося импульса.

Модовое представление поля выражает решение прямой задачи о распространении звука и при переходе в частотную область позволяет вычислить аку-

стическое поле $\hat{p}(\omega, x, y, z)$, создаваемое точечным источником, который излучает сигнал формой $S(t)$ и спектром $\hat{S}(\omega)$:

$$\hat{p}(\omega, x, y, z) = \hat{S}(\omega) \sum_{j=1}^J A_j(x, y) \phi_j(z, x, y), \quad (2)$$

где $A_j(x, y)$ – модовые амплитуды, $\phi_j(z, x, y)$ – модовые функции.

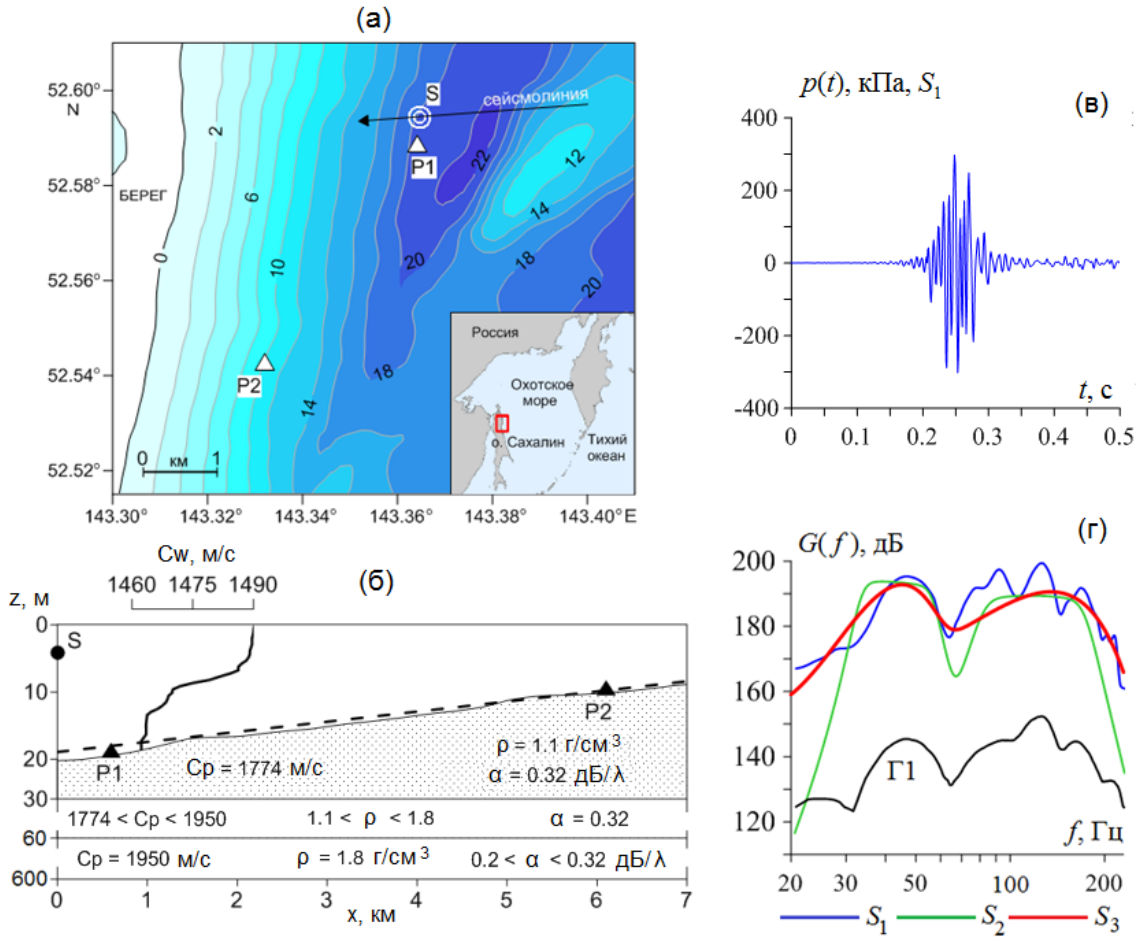


Рис. 3. Карта района с указанием точек приема акустических данных $P1$, $P2$ и точки излучения S акустического сейсморазведочного импульса (а). Модельный геоакустический волновод с указанием распределения геоакустических параметров (б). Эффективная функция точечного источника S_1 , построенная по методике (3) – (в) и ее спектральное сравнение с аналитическими функциями (4) и (5) – (г).

На практике форма сигнала источника $S(t)$ неизвестна и для ее оценки могут быть использованы эталонные измерения, выполненные с помощью одиночного гидрофона. При построении эквивалентного точечного импульсного источ-

ника в качестве опорного сигнала был взят акустический импульс, измеренный в точке $P1$ на расстоянии 650 м от источника. Функция источника строится путем расчета распространения в трехмерном модельном геоакустическом волноводе (рис. 3б) тональных компонентов опорного сигнала из точки излучения в точку приема. Далее производится коррекция на потери действительной и мнимой части комплексной величины, характеризующей акустическое поле, и строится акустический импульс с помощью обратного преобразования Фурье. Будем называть его модельной функцией эффективного точечного источника — $S_1(t)$:

$$\hat{S}_1(\omega) = \frac{\hat{p}_1(\omega)}{\sum_{j=1}^J A_j(x_1, y_1) \phi_j(z_1, x_1, y_1)}, \quad (3)$$

где $\hat{p}_1(\omega)$ — спектр вариации акустического давления $p_1(x_1, y_1, z_1, t)$ в точке расположения опорного гидрофона $P1$. Знаменатель в уравнении (3) вычисляется путем решения модовых параболических уравнений для дискретного набора частот, равномерно распределенных по заданному интервалу.

Альтернативный подход может состоять в параметризации точечного источника аналитической функцией. Следуя работе [13], в качестве аналитически заданной функции источника была применена производная от функции Гаусса:

$$p(t) = A(t - t_0) \cdot \exp\left(\frac{-4 \cdot (t - t_0)^2}{\tau^2}\right), \quad (4)$$

где τ , A — постоянные величины, отвечающие за спектр и энергию источника соответственно, t_0 задает положение импульса на временной оси.

График спектральной плотности мощности опорного экспериментального сигнала показывает, что энергию звуковых колебаний можно условно разделить на низкочастотную и высокочастотную составляющие. Энергия низкочастотных колебаний (6 – 70 Гц) распространяется преимущественно в толще донных пород, в то время как высокочастотные колебания (90 Гц и более) в основном переносят энергию сигнала в водном слое. Поскольку функция, заданная формулой (4), имеет один частотный пик с центральной частотой $f_0 = \frac{\sqrt{2}}{\pi \cdot \tau}$, то ана-

литическую функцию источника необходимо представить в виде суммы двух сигналов: $S_2 = p_1(t) + p_2(t)$, где p_1 вносит вклад в энергию импульса на центральной частоте 45 Гц, а p_2 на частоте 140 Гц. Чтобы локализовать энергию в узком диапазоне проводится операция полосовой фильтрации для каждой составляющей импульса с помощью полосового фильтра Баттеруорта четвертого порядка.

Для локализации функции как во времени, так и в частотной области предлагается использовать другую аналитическую функцию – функцию Морле, применяемую в вейвлет-анализе и заданную соотношением:

$$S_3(t) = P_{max} \cdot \exp\left(i\omega_0 \frac{t}{b}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2b^2}\right), \quad (5)$$

где параметр P_{max} [Па] является пиковым значением генерируемого импульса; ω_0 [рад] и b – параметры, регулирующие значение частоты пика спектральной плотности мощности $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi b}$ и его ширину соответственно. Функция точечного источника S_3 в этом случае также задается как сумма двух сигналов $p_1(t)$ и $p_2(t)$, каждый из которых определяется формулой (5) со своим набором параметров.

Таблица 1. Экспериментальные и модельные значения $SEL(\Delta f = 10 - 200 \text{ Гц})$ для импульсов, формируемых в точках мониторинга $P1$ и $P2$ излучающим комплексом сейсмостудна и тремя точечными эквивалентными источниками: расчетный подход по формуле (3) – S_1 , аналитический подход согласно (4) – S_2 и (5) – S_3 .

Точка	Расстояние до S, км	Глубина моря, м	$SEL_{imp}(\Delta f = 10 - 200 \text{ Гц}), \text{ дБ}$			
			Экспер.	Модель S_1	Модель S_2	Модель S_3
S	0	19	-	211,9	210,0	210,3
P1	0,65	10	167,5	167,4	167,0	167,3
P2	6,2	20	138,7	139,7	139,0	140,8

Качественное сравнение функций эквивалентного точечного источника, по-

лученных тремя вышеописанными способами, показано на рис. 3в, г. Результаты количественного сравнения параметров экспериментальных и модельных импульсов представлены в табл. 1, из которой видно, что в точке мониторинга Р2, удаленной от источника на 6,2 км, разность экспериментальных и модельных значений параметра SEL в частотном диапазоне 10 – 200 Гц не превышает 2,1 дБ.

В разделе 3.2 приведено сравнение результатов моделирования акустических полей, формируемых группой пневмоисточников, выполненного с помощью моделей узкоугольного (МРЕ) и широкоугольного (AMPLE) модового параболического уравнения по акустической трассе на рис. 3а. На рис. 4 представлены горизонтальные распределения параметра SEL (1) импульсного сигнала на горизонте $z = 9$ м, распространяющегося из точки S.

Сравнение результатов моделирования, полученных с использованием моделей AMPLE и МРЕ, демонстрирует относительно хорошее согласование моделей вдоль пути распространения звука (т.е. вдоль линии $y = 0$) и существенное различие значений поля SEL по краям области, превышающее 8 дБ. Большое различие является следствием ограниченности апертуры МРЕ в горизонталь-

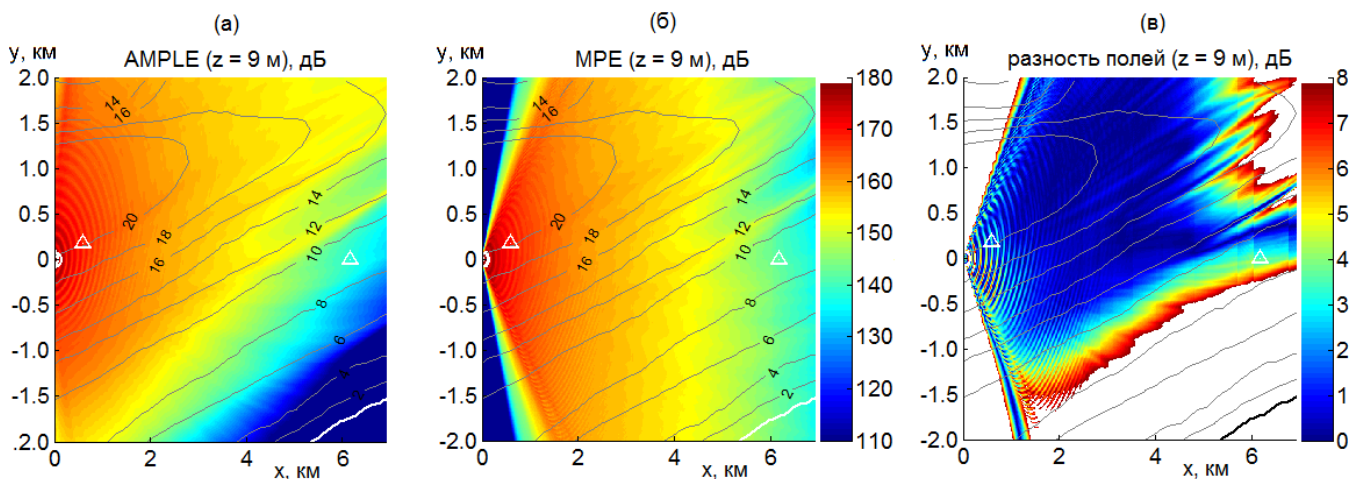


Рис. 4. Пространственное распределение параметра SEL на горизонте 9 м, рассчитанное моделями AMPLE (а) и МРЕ (б) для волновода с реальным дном, модуль их разницы (в). Треугольниками отмечены точки положения приемных гидрофонов.

ной плоскости, что позволяет сделать вывод о том, что AMPLE лучше воспроизводит эффект горизонтальной рефракции звука над наклонным дном. Как следствие, применение модели AMPLE в данном сценарии демонстрирует значительно лучшее согласие с экспериментом.

Раздел 3.3 посвящен моделированию распространения серии импульсных сигналов от забивки фундаментных свай на берегу. Сваи представляют собой цилиндрические стальные трубы, которые забиваются серией ударов молота по ее верхнему концу до проектной глубины (здесь 14 – 19 м). Время забивки одной сваи составляло 7 – 23 минуты. Период следования акустических импульсов от забивки сваи примерно равен 1,7 с.

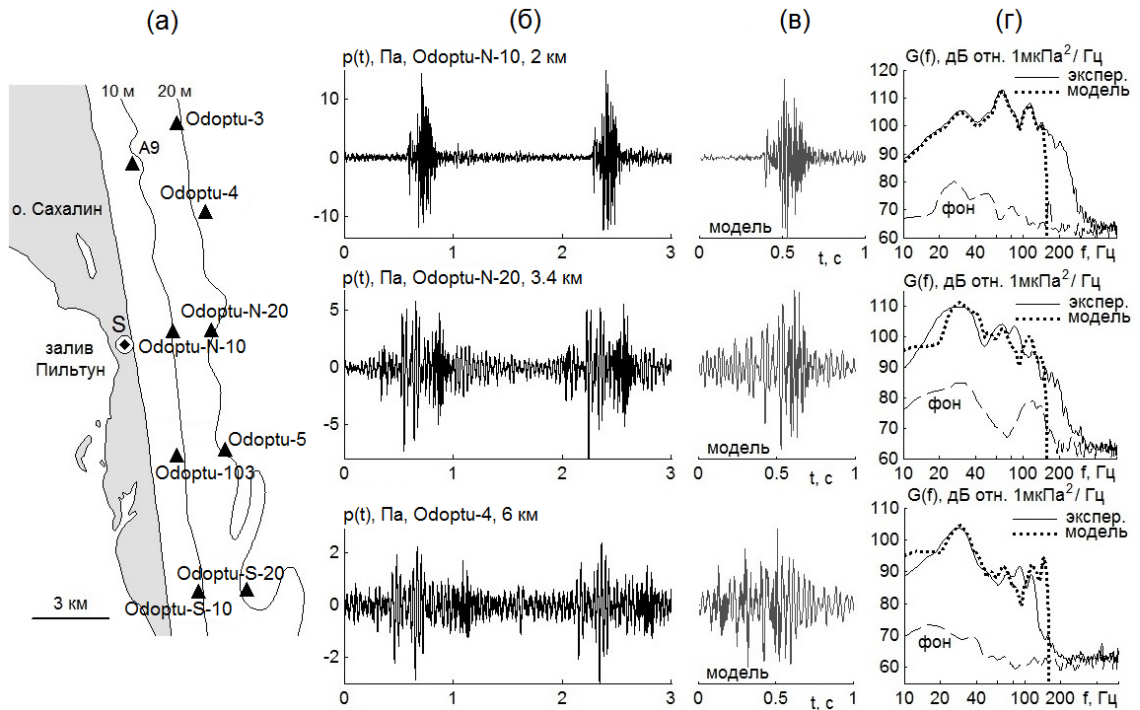


Рис. 5. Карта района исследований с указанием точек, в которых были измерены импульсные сигналы от работ по забивке свай в районе Одопту в точке S (а). Вариации акустического давления $p(t)$, измеренные у дна в указанных на карте точках Odoptu-N-10, Odoptu-N-20, Odoptu-4 акустического мониторинга во время забивки сваи (б), соответствующие им модельные импульсные сигналы (в) и их спектры (г).

Рассмотрим побережье о. Сахалин — район Одопту, где на берегу в 230 метрах от береговой линии на строительной площадке S проводилась забивка свай,

а в прибрежной зоне донные акустические станции регистрировали вариации акустического давления – рис. 5а. На том же рисунке (б) представлены графики вариаций акустического давления, измеренные в ближайших к источнику точках мониторинга, которые наглядно демонстрируют зависимость потерь при распространении звука от расстояния до строительной площадки Одопту. Методика построения функции эффективного точечного источника, описанная в разделе 3.1, позволила смоделировать форму и параметры акустических импульсов в точках мониторинга (рис. 5в-г). Расхождение экспериментальных и теоретических оценок уровня акустического воздействия не превысило 1,5 дБ.

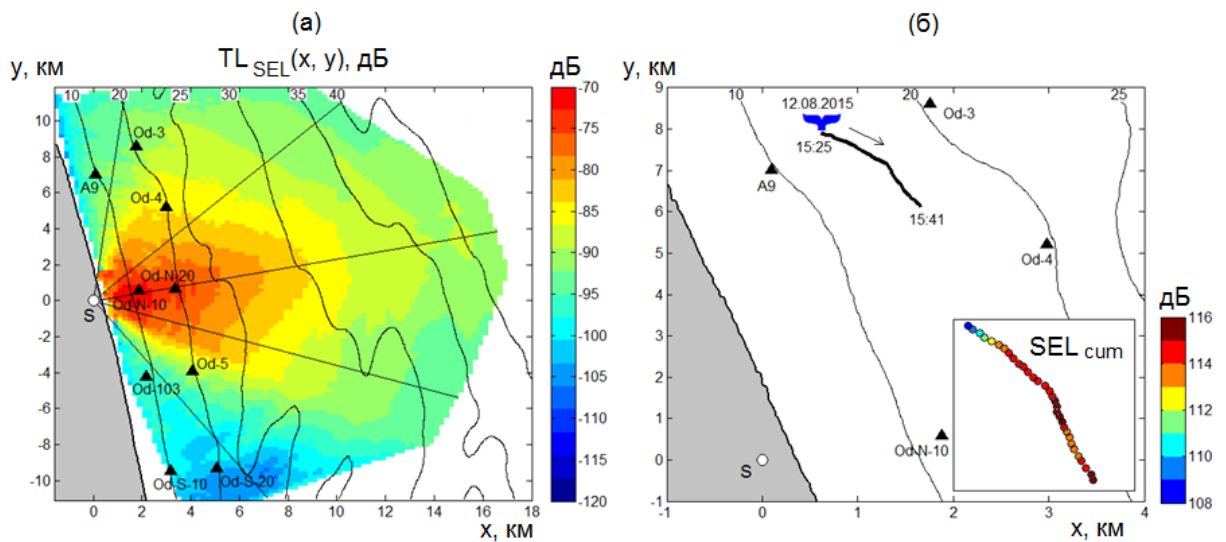


Рис. 6. Пространственное распределение потерь энергии импульсного сигнала во время забивки свай на берегу (а), суммарное акустическое воздействие, оказываемое на точки положения кита (б).

Основной задачей акустического мониторинга забивки береговых свай являлось получение оценки уровня шумовой нагрузки, оказываемой на всю акваторию вблизи источника шума. Кроме этого, необходимо было рассчитать акустическое воздействие, которое получает морское животное (серый кит), находясь в области акустической слышимости производственных работ. Положения китов отслеживалось биологами с помощью теодолита — оценивалось их местоположения и характер поведения. В данном разделе описывается методи-

ка выполнение этой задачи, а ее результат показан на рис. 6. Результаты численного моделирования в согласованном формате переданы биологам, которые используют их в многофакторном корреляционном анализе с целью комплексной оценки потенциального влияния промышленных работ на поведение серых китов, питавшихся в рассматриваемом районе.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [21–27].

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

Цитированная литература

1. Monitoring the gray whale sound exposure mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 4-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia / Racca R., Austin M., Rutenko A., and Bröker K. // *Endangered Species Research*. — 2015. — Vol. 29, no. 2. — P. 131–146.
2. Acoustic occurrence of baleen whales, particularly blue, fin, and humpback whales, off eastern Canada, 2015-2017 / Delarue J., Moors-Murphy H., Kowarski K., Davis G., Urazghildiiev I., and Martin S. // *Endangered Species Research*. — 2022. — Vol. 47. — P. 265–289.
3. Potential exposure of beluga and bowhead whales to underwater noise from ship traffic in the Beaufort and Chukchi Seas / Halliday W., Pine M., Citta J., Harwood L., Hauser D., Hilliard R., Lea E., Loseto L., Quakenbush L., and Insley S. // *Ocean & Coastal Management*. — 2021. — Vol. 204. — P. 105473.
4. Gisiner R. Sound and marine seismic surveys // *Acoust. Today*. — 2016. — Vol. 12, no. 4. — P. 10–18.
5. Scrimger P., Heitmeyer R. Acoustic source-level measurements for a variety of merchant ships // *the Journal of the Acoustical Society of America*. — 1991. — Vol. 89, no. 2. — P. 691–699.
6. Erbe C. Underwater noise from pile driving in Moreton Bay, Qld. // *Acoustics Australia*. — 2009. — Vol. 37, no. 3.

7. Yakovlev Y., Tyurneva O., Tombach W. Seasonal movements of western gray whales *Eschrichtius robustus* between the feeding areas on the northeast coast of Sakhalin Island (Russia) in 2002–2006 // *Asian Fisheries Science*. — 2009. — Vol. 22, no. 1. — P. 191–202.
8. Late-feeding season movements of a western North Pacific gray whale off Sakhalin Island, Russia and subsequent migration into the Eastern North Pacific / Mate B., Bradford A., Tsidulko G., Vertyankin V., and Ilyashenko V. // *International Whaling Commission-Scientific Committee*, Tromso, Norway. — 2011. — Vol. 7.
9. Movements of gray whales between the western and eastern North Pacific / Weller D., Klimek A., Bradford A., Calambokidis J., Lang A., Gisborne B., Burdin A., Szaniszlo W., Urbán J., Unzueta A., et al. // *Endangered Species Research*. — 2012. — Vol. 18, no. 3. — P. 193–199.
10. Gray whale southbound migration surveys 1967–2006: an integrated re-analysis / Laake J., Punt A., Hobbs R., Ferguson M., Rugh D., and Breiwick J. // *Journal of Cetacean Research and Management*. — 2012. — Vol. 12, no. 3. — P. 287–306.
11. Western gray whale behavioral response to seismic surveys during their foraging season / Gailey G., Sychenko O., Zykov M., Rutenko A., Blanchard A., and Melton R. // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 2022. — Vol. 194, no. Suppl 1. — P. 740.
12. Real-time acoustic monitoring with telemetry to mitigate potential effects of seismic survey sounds on marine mammals: a case study offshore Sakhalin Island / Rutenko A., Zykov M., Gritsenko V., Fershalov M., Jenkerson M., Racca R., and Nechayuk V. // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 2022. — Vol. 194, no. Suppl 1. — P. 745.
13. Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсморазведочных импульсов / Рутенко А. Н., Боровой Д. И., Гриценко В. А., Петров П. С., Ущиповский В. Г. и

Boekholt M. // Акустический журнал. — 2012. — Т. 58, № 3. — С. 356–369.

Список публикаций

14. Рутенко А. Н., Манульчев Д. С., Соловьев А. А. Исследование распространения энергии низкочастотных акустических и сейсмических волн на шельфе // Акустический журнал. — 2013. — Т. 59, № 3. — С. 363–377.
15. Рутенко А. Н., Манульчев Д. С. Распространение низкочастотных волн через мыс Шульца // Акустический журнал. — 2014. — Т. 60, № 4. — С. 384–394.
16. Рутенко А. Н., Козицкий С. Б., Манульчев Д. С. Влияние наклонного дна на распространение звука // Акустический журнал. — 2015. — Т. 61, № 1. — С. 76–89.
17. Рутенко А. Н., Манульчев Д. С., Jenkerson M. Исследования распространения энергии сейсморазведочных сигналов на шельфе // Труды XIV всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". — 2018. — С. 369–372.
18. Рутенко А. Н., Манульчев Д. С., Козицкий С. Б. Исследование распространения акустических сигналов из моря на сушу // Акустический журнал. — 2019. — Т. 65, № 3. — С. 343–352.
19. Рутенко А. Н., Манульчев Д. С., Ущиповский В. Г. Влияние гидрологии на потери при распространении акустических сигналов на шельфе // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. — 2020. — С. 463–466.
20. Манульчев Д. С., Рутенко А. Н. Исследование распространения импульсного сигнала в бухте Витязь Японского моря на основе экспериментальных и модельных данных // Подводные исследования и робототехника. — 2021. — № 37. — С. 90–96.
21. Мониторинг антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных исследований / Рутенко А. Н., Гаврилевский А. В., Пу-

- тов В. Ф., Соловьев А. А. и Манульчев Д. С. // Акустический журнал. — 2016. — Т. 62, № 3. — С. 348–362.
22. Методика оценки параметров измеренных на Сахалинском шельфе акустических импульсов для многофакторного анализа их влияния на серых китов / Рутенко А. Н., Гриценко В. А., Ковзель Д. Г., Манульчев Д. С. и Фершалов М. Ю. // Акустический журнал. — 2019. — Т. 65, № 5. — С. 662–674.
23. Estimating Sound Exposure Levels Due to a Broadband Source over Large Areas of Shallow Sea / Manul'chev D., Tyshchenko A., Fershalov M., and Petrov P. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, no. 1. — P. 82.
24. Манульчев Д. С. 3-D моделирование импульсного акустического поля, формируемого сейсморазведочным судном // Труды XIII всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики- / Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук". — 2016. — № 13. — С. 267–270.
25. Манульчев Д. С. Построение функции источника для 3-D моделирования импульсного акустического поля, формируемого на шельфе излучающим комплексом сейсморазведочного судна // Докл. XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана". — 2016. — С. 72–75.
26. Пространственная оценка уровня воздействия импульсного акустического поля, формируемого на шельфе забивкой фундаментных свай на берегу / Манульчев Д. С., Нечаюк В. Е., Рутенко А. Н. и Jenkerson M. // Труды XIV всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". — 2018. — С. 400–403.
27. Измерение и моделирование импульсного акустического поля, формируемого на шельфе забивкой свай на берегу, для оценки уровня акустического облучения наблюдаемого с берега серого кита / Манульчев Д. С., Рутенко А. Н., Нечаюк В. Е. и Jenkerson M. // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана". — 2018. — С. 81–84.

Научное издание

Манульчев Денис Сергеевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Методика моделирования антропогенных акустических сигналов на шельфе
на основе экспериментальных измерений

Подписано в печать «_____» _____ 2024 г.. Заказ №

Формат 60 × 90 1/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ТОИ ДВО РАН.