

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 534.2



Манульчев Денис Сергеевич

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

1.3.7 – Акустика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н.

Петров Павел Сергеевич

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Обзор средств и методов акустического мониторинга и численного моделирования	11
1.1. Пассивный акустический мониторинг: обзор	11
1.2. Источники антропогенных шумов	16
1.3. Влияние акустических шумов на морских млекопитающих	22
1.4. Технические средства для проведения акустического мониторинга	27
1.5. Акустические величины	31
1.5.1. Оценки параметров импульсных акустических сигналов	32
Временная область	32
Спектральная область	34
1.5.2. Непропорциональные частотные полосы	37
1.6. Математические модели распространения звука	38
1.6.1. Постановка задачи	38
1.6.2. Параболическое уравнение с аппроксимацией Паде (РАМ)	40
1.6.3. Модовое параболическое уравнение	42
Узкоугольное МПУ с взаимодействием мод (МРЕ)	43
Широкоугольное адиабатическое МПУ (AMPLE)	45
1.7. Модель геоакустического волновода	47
1.8. Выводы к первой главе	50
Глава 2. Экспериментальные и численные исследования распространения звука в сложных волноводах, характерных для шельфа	51
2.1. Влияние гидрологических условий	51
2.1.1. Распространение тонального звука над наклонным дном	51

2.1.2.	Потери звука при распространении в условиях термокли- на и однородной воды	61
2.2.	Волновод с пространственной неоднородностью осадочного слоя	67
2.2.1.	Импульсное акустическое поле, формируемое в бухте с осадочным грунтом	67
2.2.2.	Донный слой с газонасыщенными осадками	77
2.3.	Геоакустических волновод с участками суши	85
2.4.	Выводы ко второй главе	98
Глава 3. Методика оценки уровней акустических сигналов от иден- тифицированного источника		
3.1.	Функция точечного источника для моделирования распростране- ния импульсных акустических сигналов	103
3.2.	Сравнение с результатами расчетов широкоугольного МПУ	115
3.3.	Расчет акустического поля, формируемого источником на берегу	119
3.4.	Выводы к третьей главе	131
Заключение		134
Список литературы		136

Введение

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. Во время миграции киты живут на запасах 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 корректного моделирования 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, учитывающее 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 и их коллег 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. Брехов-

ских, 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 распространения 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-

деление уровней акустических шумов для прикладных задач – получение количественных оценок уровней акустического воздействия в точках реального или потенциального положения 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 и 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.).

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 вы-

числений 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. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: на всероссийских симпозиумах «Физика геосфер» ТОИ ДВО РАН (м. Шульца, 2013, 2017), на школах-семинарах акад. Л.М. Бреховских, совмещённые сессиями Российского Акустического Общества (Москва, 2016, 2018, 2020), на V международной конференции PRUAC (Владивосток, 2015), на всероссийских конференциях «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2016, 2018, 2020).

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, построения трехмерных геоакустических волноводов с использо-

ванием батиметрических и гидрологических баз данных, а также программы-оболочки для пакетов программ моделирования акустических полей RAMs, MPE и AMPLE, имеющей широкий функционал использования. Данные алгоритмы были реализованы в виде библиотеки прикладных программ на языке MATLAB, которые позволяют осуществить полный вычислительный цикл от обработки данных опорных измерений до пересчета контуров уровней акустических шумов в заданной области. Результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором, либо на равных правах с соавторами публикаций.

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.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность и признательность первому научному руководителю д.ф.-м.н. Рутенко А. Н. за неоценимый вклад в формирование научно-исследовательских навыков и способностей диссертанта, а также за многолетнее сотрудничество, результатом которого является настоящая диссертационная работа. Автор выражает благодарность второму научному руководителю д.ф.-м.н. Петрову П. С. за ценные советы и поддержку при написании диссертации, а также всему коллективу, принимавшему активное участие в представленных экспериментальных и теоретических работах.

Глава 1

Обзор средств и методов акустического мониторинга и численного моделирования

Первая глава диссертационной работы посвящена общему обзору задач и средств акустического мониторинга на шельфе. В разделе 1.1 приводится литературный 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 (раздел 1.2), а также приводится описание влияния антропогенного шума на морских млекопитающих, вводится взвешенная функция, определяющая восприятие звука различными группами животных на определенной частоте для оценки пороговых уровней воздействия на морское животное (раздел 1.3). Далее в настоящей главе представлено описание технических средств (раздел 1.4) и акустических величин (раздел 1.5), которые легли в основу исследований, выполненных в настоящей диссертации. Особое внимание уделяется обзору методов моделирования волновых процессов в неоднородных геоакустических волноводах на основе решения параболических уравнений (раздел 1.6, 1.7).

1.1. Пассивный акустический мониторинг: обзор

Пассивный акустический мониторинг (ПАМ) быстро набирает популярность в экологических исследованиях, поскольку стремительное развитие индустриальной деятельности человека на шельфе (морское судоходство, морская сейсморазведка, ветряные электростанции и т.д.) приводит к вопросам сохранения фауны прилегающих территорий. Работы, связанные с темой акустического

мониторинга в контексте контроля условий среды, в которой обитают морские животные, не многочисленны, и основная доля статей приходится на последние двадцать лет [13]. По мере роста спроса на акустические исследования активно развивались технические возможности для проведения ПАМ: разрабатывались акустические регистраторы со все большим временем автономной работы, в более глубоководных районах и с возможностью регистрации более широкого частотного диапазона сигналов [14].

Ориентируясь на работы по теме, можно выделить два основных направления задач ПАМ. Первое – обнаружение присутствия морских животных в районах проведения мониторинга [15–18], видовая идентификация [19], классификация звуков [20, 21], а также локализация морских животных [22, 23]. Последнее становится возможным с применением численных моделей распространения звука в геоакустическом волноводе на частотах, используемых морскими животными для коммуникации и эхолокации. На практике ПАМ является дополнением к ранее существовавшему методу наблюдения за морскими животными с моря или с берега. Стоит отметить, что мониторинг присутствия морских животных только с помощью визуальных наблюдений имеет ряд недостатков (например, наблюдения могут проводиться только в светлое время суток, при достаточной видимости, при нахождении морского животного на поверхности моря и т.д.), что делает ПАМ в некоторых случаях более предпочтительным [24].

В работе [15] акустический мониторинг, проводимый в Чукотском море у берегов Аляски, позволил получить уникальную информацию о времени и распределения белух во время миграции. Оценку численности кашалотов на обширной территории Северного Ледовитого океана (море Бофорта) удалось выполнить с помощью группы гидрофонов, буксируемых на глубине 100 м вдоль трассы протяженностью 14,5 км [16]. Короткие щелчки, издаваемые китами, были зарегистрированы на расстоянии до 37 км. Акустические методы существенно увеличили число обнаруженных кашалотов за счет увеличения дальности обнаружения сигналов и возможности проведения мониторинга в ночное

время. Успешное акустическое исследование было проведено у побережья мыса Барроу (Аляска) в рамках учета популяции гренландских китов и их миграции [17]. В результате было обнаружено, что в период миграции около 86% вокализирующих животных находились в пределах 4 км от прибрежной кромки льда.

Вторым направлением исследований является мониторинг акустического состояния окружающей среды и оценка степени воздействия антропогенных шумов на морских животных. Результаты исследований позволяют качественно связать влияние разных типов источников шума на поведение морского животного [25, 26], оценить дальность слышимости антропогенного источника и опасных зон, в пределах которых может быть нанесен вред слуховой системе животного [27, 28], а также количественно спрогнозировать кумулятивный уровень воздействия шума на точку потенциального или реального положения морского животного [29, 30].

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост производительности компьютеров и, как следствие, разрабатываются и внедряются новые модели и алгоритмы распространения звука под водой. Работы, связанные с акустическим мониторингом антропогенных шумов и численности морских животных, все чаще сопровождаются численным моделированием распространения акустических сигналов в широком частотном диапазоне. С точки зрения теоретической основы, большинство моделей основаны на четырех подходах [31, 32]: лучевой метод (программы BELLHOP, FeyRay, Ray5, PlaneRay и др.), метод интегрального представления поля (программы FFP, OASES, SAFARI и др.), нормальные волны (KRAKEN, COUPLE, ORCA, NORMOD3 и др.) и теория параболических уравнений (RAM/RAMs/RAMGEO (см. Глава 1, раздел 1.6.2), MONM [33] и др.). Дальнейшее разделение может быть проведено в соответствии с возможностью модели учитывать зависимость параметров среды от дальности (двумерные модели) и азимутального угла (трехмерные модели). Каждый подход имеет ограниченную область применимости, которая опреде-

ляется главным образом частотой звука и сложностью волновода. Отметим, что последние две модели (теория нормальных волн и теория параболических уравнений) являются наиболее распространенным инструментом при решении прикладных задач для оценки потерь при распространении звука.

В работе [3] исследована корреляция между смоделированным подводным шумом от судового трафика в арктических районах (море Бофорта и Берингова пролива) и данными распределения белух и гренландских китов в период с 2015 по 2017 гг., полученными с использованием спутниковой телеметрии. Потери при распространении рассчитаны в частотном диапазоне до 1,6 кГц с помощью модели RAMsGeo для разных классов судов, а затем применены к реальным трекам по данным АИС (автоматическая идентификационная система). Было установлено, что с августа по сентябрь наблюдается среднее и сильное перекрытие областей с высоким уровнем подводного шума с распределением морских животных. Это связано с миграцией животных через районы с высоким уровнем судового трафика, и, как следствие, они подвергаются большему акустическому воздействию.

Реакция морских животных на антропогенный звук часто оценивается относительно одного наиболее интенсивного источника шума, например [1, 28], однако в некоторых случаях морские млекопитающие могут подвергаться акустическому воздействию от нескольких динамических или стационарных источников. В работе [25] проиллюстрирована методика моделирования акустического поля, формируемого девятью стационарными антропогенными источниками (в том числе судовые шумы, морские и прибрежные сейсморазведочные работы), и оценка его воздействия на популяцию гренландских китов во время их ежегодной миграции через море Бофорта на Аляске. Для расчета распространения звука использовалась модель MONM (*Marine Operations Noise Model*) [33], позволяющая вычислять трехмерное поле на центральной частоте каждой треть-октавной полосы от 10 до 2000 Гц методом решения широкоугольного параболического уравнения акустической волны с учетом упругих свойств

дна. Основным алгоритмом MONM заключается в вычислении функции потерь при распространении звука вдоль радиальных трасс, исходящих из каждой точки в заданном наборе акустических источников ($N \times 2D$). Программное обеспечение MONM использует базы данных с географической привязкой для автоматического получения батиметрических и акустических параметров окружающей среды вдоль каждой исследуемой трассы. При моделировании акустического поля на больших дистанциях программа увеличивает угловую плотность сегментов, тем самым обеспечивает более эффективное покрытие области. Уровни акустических полей, рассчитанные с помощью модели MONM, согласовались с экспериментальными данными во многих сценариях распространения звука на шельфе [34–37], см. также серию работ [1, 12] и др.

Источники акустических сигналов в море могут быть как антропогенного (см. Глава 1, раздел 1.2), так и природного происхождения (морские животные, рыбы, беспозвоночные и т.д.). При моделировании параметров акустического поля необходимо знать спектральный портрет, уровень, диаграмму направленности и пространственное положение источника. При моделировании уровней антропогенных шумов положение источника, как правило, определено (например, по данным АИС), в то время как первые три параметра остаются неизвестными. Оценить спектральный портрет судовых шумов удастся при помощи акустических приемников на некотором удалении от судна, учитывая особенности распространения сигнала в рассматриваемой акватории [26, 38, 39]. В случае использования в качестве источника пневмоизлучателей, отсутствие информации об акустических характеристиках генерируемого акустического сигнала может быть заменено модельным прогнозированием с помощью специализированных программ [40–43]. Результатом является расчет формы и спектра импульсного сигнала на расстоянии 1 м, формируемого группой пространственно-разнесенных пневмоизлучателей. В работе [1] для прогнозирования уровней шумов на шельфе о. Сахалин при проведении сейсморазведочных исследований использовалась модель AASM (*Airgun Array Source Model*) [40], основанная на физиче-

ских свойствах колебаний и излучений воздушных пузырей пневмоизлучателя. Используя расчетную функцию источника, авторы смоделировали уровни *SEL* (описание акустических величин, приведенных здесь и далее, см. в разделе 1.5) акустического поля вокруг каждой точки излучения. Сравнение модельных и экспериментальных данных, полученных в режиме реального времени, показало, что в некоторых случаях модель расходилась с экспериментом более чем на 5 дБ, что объяснялось некорректной оценкой некоторых боковых лепестков расчетной диаграммы направленности сейсмоизлучателя, а также использованием упрощенной модели дна, не учитывающей пространственную неоднородность, которая на самом деле имеет место.

В основном описанные методы рассчитаны на двумерные или псевдотрехмерные задачи распространения звука, однако шельфовая зона подразумевает наличие трехмерных неоднородностей водного слоя, батиметрии и осадочного слоя, что в совокупности существенным образом влияет на формирование акустического поля. Используемая в настоящей диссертации математическая модель, основанная на решении модовых параболических уравнений (см. раздел 1.6.3), позволяет: 1) получить практически неограниченную апертуру поля в горизонтальной плоскости, тем самым учесть трехмерные особенности рельефа дна (например, горизонтальную рефракцию при распространении импульсных сигналов вдоль шельфа [44]); 2) проводить вычисления за разумное время при распространении как тональных, так и импульсных сигналов; 3) получить необходимую точность вычислений в частотном диапазоне многих источников антропогенного шума (до 500 – 1000 Гц).

1.2. Источники антропогенных шумов

В связи с широкомасштабным освоением шельфа, прилегающие акватории подвергаются нарастающему антропогенному воздействию. Среди основных источников звука можно выделить судовые шумы, чей вклад в общую шумовую

обстановку моря растет с каждым годом. Согласно исследованиям Венца [45] суда генерируют шум в широком частотном диапазоне 10 Гц – 10 кГц. На уровень судового шума оказывают влияние размер судна, мощность его двигателей, загруженность и скорость перемещения [5, 46]. Низкочастотными источниками (до 100 Гц) являются винты двигателей, а также вспомогательное оборудование, установленное на борту судна в зависимости от его назначения. На частотах 10 – 100 Гц формируется акустический портрет судна, с помощью которого его можно идентифицировать. Звук на частотах выше 100 Гц формируется преимущественно за счет гидродинамических процессов, среди которых можно выделить течение за корпусом судна и нестабильность кавитационных пузырьков от гребного винта. Спектральная плотность мощности судового шума на частотах выше 100 Гц, как правило, убывает с увеличением частоты звука f по закону $-20 \cdot \log_{10} f$ (в децибелах).

В период 1960 – 2010 гг. количество коммерческих судов во всем мире увеличилось примерно вдвое, а суммарный показатель вместимости судов (*gross registered tonnage* – GRT) возрос в четыре раза. Уровень глубоководного шума к западу от Калифорнии за 40 лет вырос на 10 – 12 дБ, и основной вклад этого шума составляет судоходство [47]. Постоянный рост судового трафика наблюдается и в полярных районах, где исторически судоходство менее развито по причине труднопроходимости. Однако изменение климата приводит к тому, что морской лед в арктических районах тает раньше и формируется позже, становится тоньше и содержит меньше многолетнего льда [48]. Это, в свою очередь, увеличивает потенциальный доступ к судовым маршрутам, что приводит к удлинению сезона активности. Согласно [49], судоходство в Арктике за последние несколько десятилетий существенно увеличилось и по прогнозам будет продолжать расти по мере освобождения трансарктических морских маршрутов ото льда [50]. В результате шумовая нагрузка в районах активного судоходства увеличивается, что имеет важные последствия для морской биоты.

Другим серьезным источником антропогенного происхождения является

импульсные сигналы, генерируемые в ходе проведения сейсморазведочных исследований. В настоящее время сейсморазведка является главным инструментом для поиска и оконтуривания залежей нефти и газа на морском шельфе. Основным принципом поиска углеводородных месторождений является зондирование дна интенсивными звуковыми волнами для получения двумерной или трехмерной структуры дна, в том числе поверхностей раздела сред с различными геоакустическими параметрами в его толще. Морские сейсморазведочные исследования на шельфе проводятся с помощью специализированного судна, которое буксирует акустический источник — массив пространственно-разнесенных пневматических источников, излучающих короткие импульсные низкочастотные сигналы [4, 51].

Отдельные пневмоисточники представляют собой контейнеры объемом от 1,15 до 4,75 л, в которые компрессором нагнетается воздух до рабочего давления, а затем в пунктах возбуждения происходит резкий выхлоп сжатого воздуха в воду. Из-за резкого роста воздушного пузыря и его последующих пульсаций в водной среде образуется упругая волна сжатия, а затем разрежения в виде короткого импульса. Эта звуковая волна распространяется в воде, затем в слоях донных осадков, отражается от их границ и возвращается в воду, где и регистрируется гидрофонами кос, буксируемых за кормой судна на горизонте 5 – 8 м. Энергия импульса одиночного источника сосредоточена в частотном диапазоне до 3 кГц с максимумом в полосе 5 – 200 Гц. Среднеквадратичные уровни звукового давления одиночного источника SPL_{rms} составляют около 150 – 200 дБ отн. 1 мкПа на расстоянии 1 м.

Для увеличения амплитуды звукового давления в импульсе, снижения частоты и подавления вторичных пульсаций, а также увеличения направленности излучения в сторону дна, отдельные пневмоисточники объединяются в кластеры и массивы. Например, при проведении геофизических работ на северо-восточном шельфе о. Сахалин в 2015 и 2019 годах использовались два массива пневмоисточников, каждый из которых состоял из 24 элементов (14 активных

и 10 запасных), общим объемом 39,2 л или 2400 куб. дюйма. Элементы были организованы в кластеры по два пневмоисточника, а кластеры в свою очередь располагались на двух линиях длиной 15 м, буксируемых с интервалом 10 м. Рабочее давление пневмоисточников составляло 137,9 бар. Источники инициировались с шагом 18,75 м в заранее запланированных точках (пунктах возбуждения), расположенных на геофизических профилях. Среднеквадратичные уровни звукового давления массива пневмоисточников, также приведенные к расстоянию 1 м от эквивалентного точечного источника, составляют около 250 дБ отн. 1 мкПа. Основная энергия импульса от акустического источника в виде батареи источников находится в полосе частот 5 – 120 Гц (с максимумом в полосе 10 – 80 Гц), а полный размах амплитуды импульса (от положительного до отрицательного максимума) пропорционален суммарному объему источников, но зависит, также, от их расположения в группе и глубины буксировки.

Часть энергии импульса, генерируемого массивом пневмоисточников распространяется в направлениях, отличных от вертикального. Это приводит к акустическому освещению прилегающей акватории, которая может быть местом обитания или нагула морских животных, пользующихся подводной акустикой. Для построения корректных модельных оценок акустической экспозиции, связанной с прохождением акустических/сейсморазведочных сигналов в заданном районе, необходимо учитывать не только особенности и потери при распространении их энергии на шельфе со сложным профилем дна, но и характеристики диаграммы направленности излучающего комплекса в водном слое в горизонтальной плоскости. В настоящее время существует несколько моделей, позволяющих спрогнозировать энергию источника и диаграмму направленности системы пневмоизлучателей. Широко применяемая модель AASM (*Airgun Array Source Model*) [40] основана на физических свойствах колебаний и излучений воздушных пузырей пневмоизлучателя, описанных в [52]. В рамках модели выполняется решение дифференциальных уравнений, описывающих колебания пузырьков. Кроме того, учитываются влияния нелинейного давления меж-

ду различными пневмоизлучателями, дросселирование портов, гашение колебаний пузырьков и рабочие характеристики пневмоизлучателя. Модель AASM включает четыре эмпирических параметра, настройка которых обеспечивает соответствие полученных результатов моделирования рабочим характеристикам пневмоизлучателя. Помимо модели AASM используются другие модели: Gundalf [41], Cagam [42] и AGORA-2 [43]. Сравнение результатов различных моделей источников на тестовых примерах, представленных на международном семинаре по моделированию сигналов пневмоизлучателей в Дублине в 2016 году [53], показало качественное согласие в диапазоне низких частот (менее 200 Гц), но большое рассогласование на высоких частотах (более 1 кГц) [54]. В значительной степени это связано с тем, как модели источника описывают начальный рост давления в течение первых нескольких миллисекунд сигнала.

На рис. 1.1 показаны теоретические уровни источников энергии в горизонтальной плоскости для центральных частотах в треть-октавных полосах в виде функции от азимутального угла $D(f_i, \phi)$, рассчитанные моделью AASM. Направленность источника особенно выражена в частотном диапазоне от 40 до 320 Гц.

По результатам пространственных акустических измерений [55], проведенных на относительно мелководном (10 – 30 м) северо-восточном шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных исследований в 2015 г., построены оценки диаграммы направленности излучающего комплекса сейсморазведочного судна в горизонтальной плоскости для дистанций 1,2, 2,4 и 4,6 км в трех частотных диапазонах 10 – 350, 10 – 70 и 70 – 350 Гц. Согласно полученным результатам, в водном слое в горизонтальной плоскости диаграмма направленности не имеет зависимости от угла на частотах ниже 70 Гц. При толщине водного слоя меньше 30 м на этих частотах акустическая энергия переносится донными модами. На частотах больше 70 Гц, возбуждаются водные моды, и построенная по результатам натурных измерений диаграмма имеет выраженную направленность близкую к теоретической, рассчитанной для глубокого моря (рис. 1.2).

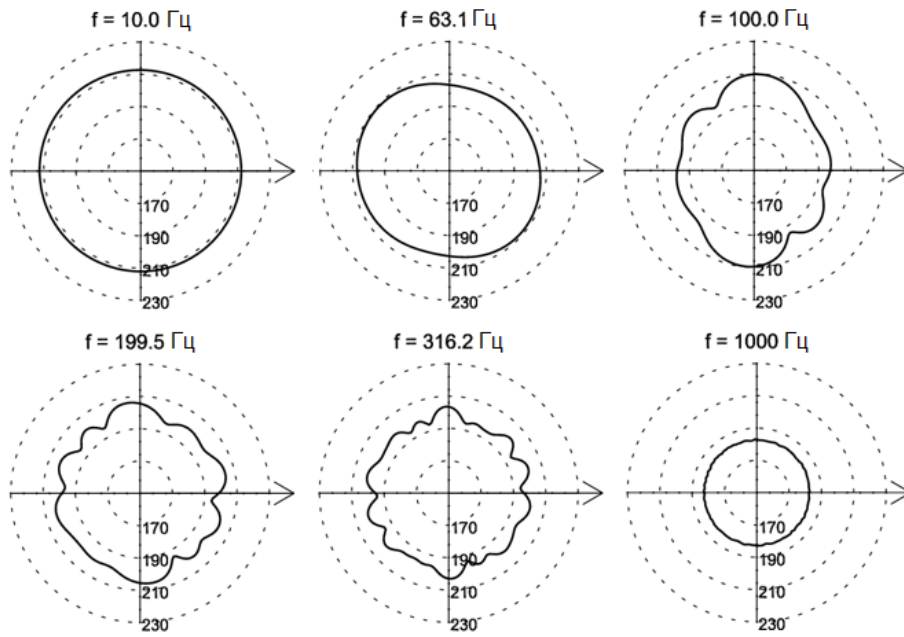


Рис. 1.1. Теоретические диаграммы направленности прогнозируемых уровней источника энергии в горизонтальной плоскости для пневмоисточников общим объемом 2400 куб. дюйма. Уровни источника энергии представлены в виде функции от азимута для некоторых центральных частот треть-октавного спектра. Направление вектора геофизического профиля – слева направо.

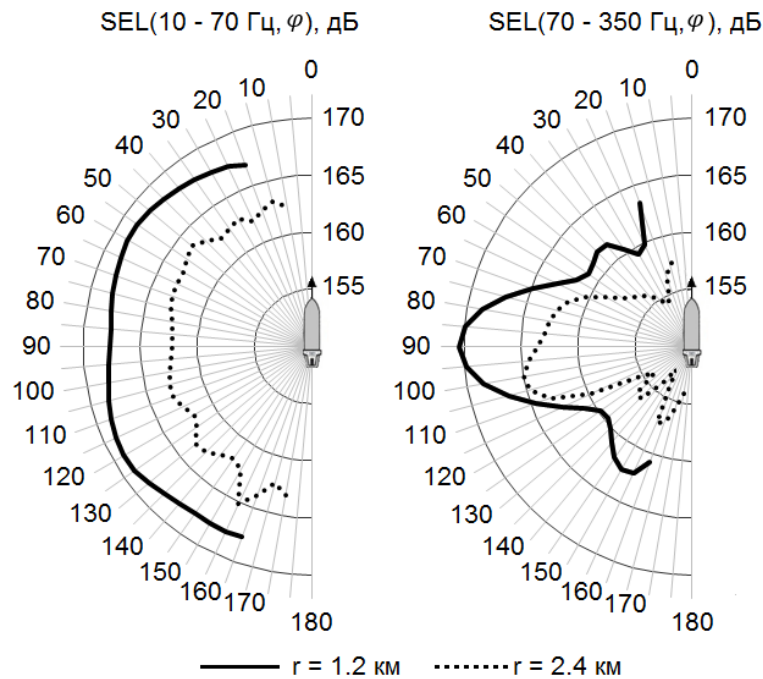


Рис. 1.2. Зависимость значений параметра $SEL_{\Delta T=3c}^{imp}(\Delta f, \phi, r)$ импульсных акустических сигналов от азимутального угла ϕ и расстояния r от группы пневмоисточников для двух частотных диапазонах 10–70 Гц и 70–350 Гц.

Существенный вклад в акустическую обстановку на акватории вносят шумы от забивки свай в море и на берегу во время строительных работ. Установка свай на берегу производится в несколько этапов. Вначале в грунте бурится скважина диаметром незначительно больше диаметра устанавливаемой сваи. Глубина скважины варьируется в пределах 3 – 6 м. Затем в скважину устанавливают сваю и путем серии ударов молотом по концу сваи забивают ее до проектной глубины в зависимости от длины сваи. Наиболее сильные шумы формируются на последнем этапе установки сваи – при ее забивке. Уровень шума зависит от длины и диаметра сваи, энергии и типа молота (гидравлический, паровой или дизельный), свойств осадочного слоя, а также локальных факторов, таких как наличие слоя вечной мерзлоты. Последовательные удары молота генерируют серию коротких импульсных сигналов. Как правило, энергия и амплитуда таких сигналов растет по мере углубления сваи в грунт [6]. Сваебойные работы характеризуются широким спектром частот (20 Гц – 20 кГц) с максимумом энергии в диапазоне 10 – 200 Гц [56]. Так, при забивке свай диаметром от 208 мм до приблизительно 4 м шум от источников изменялся от 192 до 261 дБ отн. 1 мкПа на расстоянии 1 м [57].

Другими источниками индустриального шума на шельфе могут быть работы по бурению скважин [58], дноуглубление [59], работа ветряных турбин [57] и приливных электростанций.

1.3. Влияние акустических шумов на морских млекопитающих

Морские млекопитающие и рыбы получают значительный объем информации об окружающем мире, воспринимая звуки как естественного, так и антропогенного происхождения. Естественные шумы происходят от абиотических (природные звуки не биологического происхождения – звуки волн, дождя, геологических процессов) и биотических (звуки морских животных, рыб, беспо-

звоночных и т.д.) источников. Уровень таких шумов чаще всего значительно меньше уровня звуковых волн, генерируемых в результате индустриальной деятельности человека: геофизические работы, забивка свай, судовые операции, дноуглубительные работы и т.д. (см. раздел 1.2). Доказано, что антропогенный шум может оказывать потенциальное воздействие на морских млекопитающих и рыб, приводя к поведенческим или патологическим изменениям [60–62]. Это происходит в том случае, когда частотный диапазон источника акустических волн пересекается с частотным диапазоном слуха морского животного. Кроме этого, в случае высоких уровней звукового давления может быть нанесен физический вред морскому животному не только за счет восприятия звука, но и в результате баротравмы.

Воздействия шума на морских животных зависит от акустических характеристик создаваемого шума (форма сигнала, уровень энергии и пиковых значений давления, продолжительность, куртозис, периодичность и т.д.), параметров среды распространения, а также вида рассматриваемого животного. Для каждого источника антропогенного шума можно выделить пять зон потенциального воздействия на морских животных (рис. 1.3). Дальняя зона – область слышимости морскими животными. Границей области условно является кривая, вдоль которой уровень шума находится либо ниже уровня окружающих шумов, либо ниже порога слышимости морских животных (U-образная кривая диапазона чувствительности звука у морских млекопитающих [63] и рыб [64]). Границы зоны слышимости могут быть весьма большими (десятки километров [65]) в особенности при распространении звука на низких частотах.

Область поведенческой реакции, как правило, значительно меньше, чем область слышимости. Морские животные, попавшие в эту зону, могут изменить направление своего движения, скорость, время погружения, время нахождения на поверхности воды, а также двигаться от источника шумов. Поведенческая реакция также зависит от рассматриваемой особи: возраста, половой принадлежности, здоровья и текущих действий. Национальная служба морского ры-

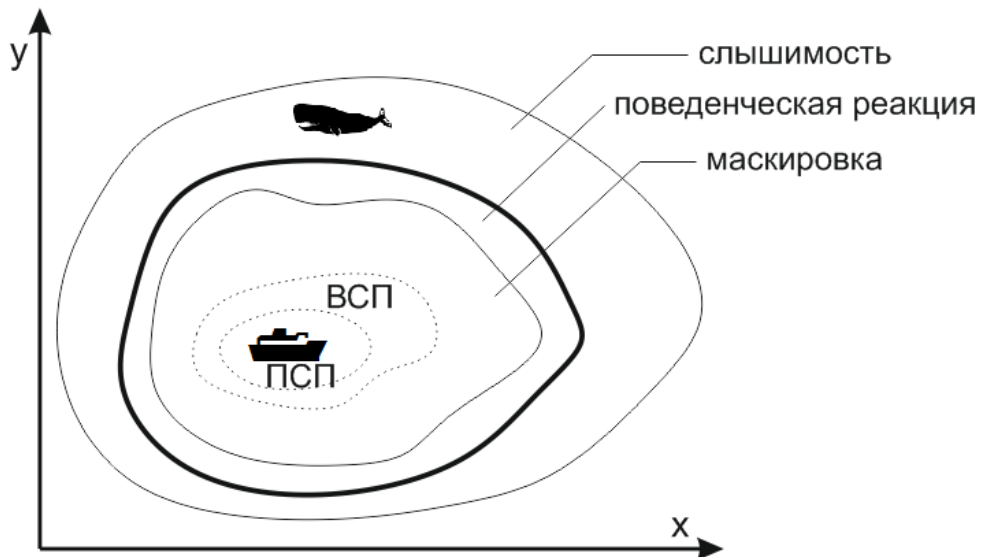


Рис. 1.3. Зоны потенциального воздействия на морских животных от источника шума.

боловства США (NMFS, ныне NOAA Fisheries) установила, что около половины популяции китообразных проявляют поведенческие реакции на уровне $SPL_{rms} = 165$ дБ отн. 1 мкПа, а более 90% животных меняют свое поведение на уровне 175 дБ. Согласно исследованиям [66] у 10% питающихся серых китов наблюдается поведенческая реакция на акустическое воздействие импульсного характера при уровне $SEL = 156$ дБ (или $SPL_{rms} = 163$ дБ отн. 1 мкПа). Этот уровень является референсом при моделировании границ области потенциального воздействия антропогенного акустического поля на серых китов, реализованного автором и его коллегами на шельфе о. Сахалин.

Область маскировки характеризуется перекрытием частотного диапазона антропогенного шума с коммуникационными и эхолокационными сигналами морских животных, что приводит увеличению порога слышимости животных на частотах маскирования. Две последние области (первые со стороны источника) могут воздействовать на морское животное на физиологическом уровне. Для оценки чувствительности органов слуха различных морских животных была предложена взвешенная функция $W(f)$, определяющая восприятие звука животным на определенной частоте [63]:

$$W(f) = C + 10 \cdot \log_{10} \frac{(f/f_1)^{2a}}{[1 + (f/f_1)^2]^a \cdot [1 + (f/f_2)^2]^b}, \quad (1.1)$$

где $W(f)$ – амплитуда весовой функции (дБ) на частоте f (кГц). f_1 и f_2 представляет собой соответственно нижнюю и верхнюю частоты, при которых амплитуда функции начинает меняться от плоской центральной части кривой к краям. Безразмерные коэффициенты a и b определяют скорость снижения амплитуды весовой функции на низких и высоких частотах соответственно. Постоянная величина C показывает вертикальное положение кривой и задается так, что максимальная амплитуда весовой функции равна 0 дБ.

Согласно [63] взвешенные функции определены для следующих групп морских млекопитающих с различными особенностями восприятия звука:

- китообразные, воспринимающие диапазон низких частот – НЧК. В данную группу входят все усатые киты (мистицеты);
- китообразные, воспринимающие средние частоты (афалины, обыкновенные дельфины, кашалоты, косатки) – СЧК;
- китообразные, воспринимающие высокие частоты (океанические и речные дельфины, карликовые кашалоты, морские свиньи) – ВЧК;
- сирены;
- ластоногие, обитающие в воде и в воздухе (тюлени, морские львы и моржи).

В табл. 1.1 представлены параметры, определяющие взвешенную функцию для различных групп морских млекопитающих, а на рис. 1.4 приведены соответствующие кривые частотного взвешивания. Отметим, что для китообразных, воспринимающих низкие частоты, горизонтальный участок кривой значительно шире, чем для взвешенных кривых других групп млекопитающих.

При определенных уровнях шума и его продолжительности у морских млекопитающих могут быть повреждены волосковые клетки внутреннего уха, что может привести к временному повышению слухового порога (временный сдвиг

Таблица 1.1. Параметры для взвешенной функции восприятия звука [63].

Группа морских животных	f_1 , кГц	f_2 , кГц	a	b	C , дБ
Китообразные, НЧ	0.2	19	1	2.0	0.13
Китообразные, СЧ	8.8	110	1.6	2	1.20
Китообразные, ВЧ	12.0	140	1.8	2	1.36
Сирены	4.3	25	1.8	2	2.62
Ластоногие (в воде)	1.9	30	1.0	2	0.75

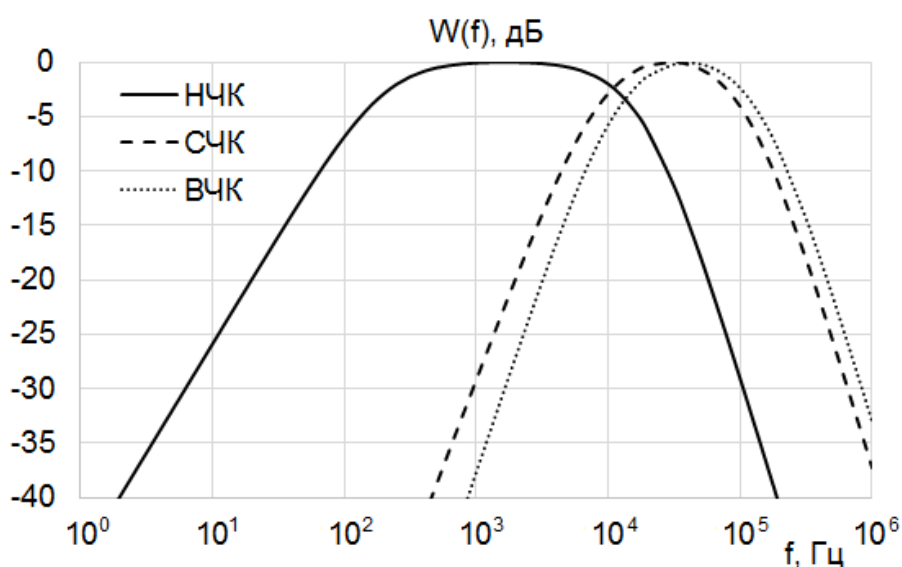


Рис. 1.4. Взвешенная функция восприятия звука для трех групп морских млекопитающих (китообразные).

порога – ВСП). Величина сдвига ВСП зависит от уровня шума, времени воздействия, спектральной характеристики источника шума. В этом случае порог слышимости возвращается к нормальным значениям через некоторое время (минуты – дни). Согласно работам Саутолла [63] временный сдвиг у групп китообразных НЧ, СЧ и ВЧ происходит на уровне $SPL_{peak} = 224$ дБ отн. 1 мкПа или для взвешенного уровня $SEL_{weighted} = 183$ дБ отн. 1 мкПа²·с, в зависимости от того, что произойдет раньше. Для ластоногих в воде $SPL_{peak} = 212$ дБ отн. 1 мкПа или $SEL_{weighted} = 171$ дБ. Если после акустического воздействия

слуховой порог не полностью возвращается к нормальным значениям слуха, то оставшийся сдвиг является постоянным сдвигом слухового порога (постоянный сдвиг порога – ПСП), что является слуховой травмой.

Существуют многочисленные меры по смягчению акустического воздействия антропогенных источников на морских млекопитающих и рыб. Некоторые меры связаны с модификацией источника звука: использование альтернативного оборудования и технологий (например, применение в сейсморазведке пневмоисточников взамен взрывов), уменьшение уровня источника шумов, изменение спектральных характеристик. Сдвиг времени шумных работ в течение дня или сезона, а также перемещение производственных локаций за пределы зон обитания и кормления морских животных также приводит к существенным снижениям акустического воздействия на морских животных [67]. Кроме этого, вблизи источников могут устанавливаться специальные оборудования для уменьшения уровней шумов (например, пузырьковая занавеса вблизи забивки свай [68, 69]). Визуальный мониторинг наблюдателями на борту судна и на берегу позволяет вовремя обнаружить кита в потенциально опасной зоне шумовых работ и предпринять соответствующие меры [70].

1.4. Технические средства для проведения акустического мониторинга

Представленные в диссертационной работе акустические измерения в море проводились с помощью цифровых автономных подводных акустических регистраторов (АПАР) [71], разработанных в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН. Корпус АПАР изготовлен из титанового сплава и может применяться для акустических измерений на глубинах до 1 км (в старой модификации до 2015 года – до 50 м). Акустическая станция обеспечивает непрерывные стационарные измерения у дна вариаций акустического давления $p(t)$ в частотном диапазоне 2 Гц – 15 кГц продолжительностью не менее 54 суток. Ре-

зультаты измерений записываются на съемные твердотельные устройства энергонезависимой памяти типа SD-card в форме цифрового кода. Измерительные цепи АПАР основаны на 24-разрядном сигма-дельта АЦП, которое обеспечивают динамический диапазон 140 дБ (в 1 Гц окне преобразования Фурье) и максимальную частоту дискретизации 31 кГц. С выхода АЦП данные по последовательному интерфейсу SPI поступают на микроконтроллер, который управляет работой АЦП, а также осуществляет преобразование форматов данных, их буферизацию и обработку. В составе АПАР применяются цилиндрические гидрофоны типа ГИ-50 со встроенными предварительными усилителями, изготовленными специально для применения на мелководном (до 10 м) северо-восточном шельфе о. Сахалин характеризуемом сильными приливными течениями. Все гидрофоны проходили калибровку их чувствительности во ВНИИФТРИ (п. Менделеева, Московская обл.).

При установке АПАР в море на долгий срок станция оснащалась встроенным акустическим модемом [72], назначением которого является дистанционный контроль состояния установленных в море или в реке акустических станций без прерывания их работы, а также поиск станций, по каким-либо причинам сместившихся с точки постановки. Дистанция, на которой осуществляется связь модема АПАР с палубным телекомандным устройством (ТКУ), зависит от условий распространения звука и может достигать десятки километров.

Перед экспедициями или экспериментальными работами в лабораторных условиях проводились контрольные измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), динамического диапазона и собственных шумов АПАР. Это делается для подтверждения их соответствия спецификациям. Сквозная АЧХ строится на основе АЧХ аналогового тракта и чувствительности гидрофона на разных частотах и применяется для приведения измеренных акустических данных к абсолютным значениям звукового давления в частотном диапазоне 2 Гц – 15 кГц.

Кроме этого, для подтверждения правильности лабораторных измерений

аналогового тракта, сохранения гидрофонами параметров метрологической проверки их чувствительности и соответственно подтверждение сквозных амплитудно-частотных характеристик всех акустических измерительных средств ежегодно проводится кросс-калибровка. С 2013 года кросс-калибровка проводится на экспериментальной морской базе мыс Шульца ТОИ ДВО РАН. Сочетание относительно глубоководного пирса и лабораторного помещения на берегу позволяет оптимально разместить необходимые для формирования в море тональных низкочастотных и относительно высокочастотных акустических сигналов излучающие комплексы и успешно провести кросс-калибровку. Данная процедура производится путем сравнения спектров синхронно записанных акустическими измерительными устройствами широкополосных и тональных сигналов, генерируемых излучателями. Значения всех спектров корректируются в соответствии со сквозными АЧХ данных измерительных устройств, т.е. результаты измерений приводятся к абсолютным значениям акустического давления в заданных частотных диапазонах.

На рис. 1.5 показана стандартная схема постановки акустической измерительной станции в море. Гидрофон фиксируется в центре металлической рамы пирамидальной формы с помощью резиновых амортизаторов, обеспечивающих его наилучшую изоляцию от воздействия морского дна. С целью предотвращения искажения акустического поля за счет дифракции или затенения, вызываемых контейнером АПАР в диапазоне высоких частот, на удалении 10 – 15 метров от пирамидки устанавливается основное измерительно-регистрационное устройство – АПАР (1). На расстоянии примерно 70 м от контейнера устанавливается якорь с акустическим размыкателем и всплывающим поплавком с намотанным на нем фалом (2). Якорь соединяется со станцией вторым фалом, снабженным дополнительным якорем для гашения вибраций фала и дополнительным поплавком. Такая постановка снижает вероятность несанкционированного подъема АПАР и «изолирует» гидрофон от влияния поверхностных волн. В случаях акустического мониторинга в режиме реального времени (на-

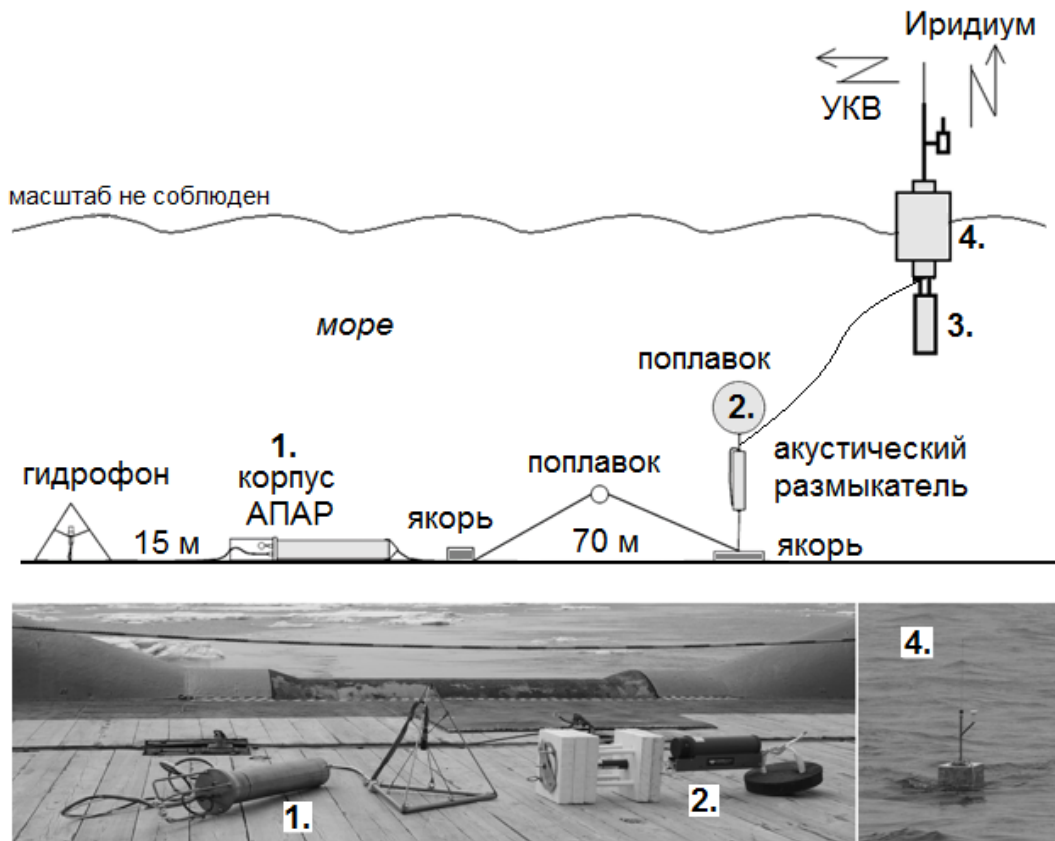


Рис. 1.5. Схема постановки радио-гидроакустической станции в море. Обозначение: 1 – контейнер с автономным подводным акустическим регистратором (АПАР) и двумя блоками питания, 2 – акустический размыкатель, 3 – контейнер с двумя блоками питания, 4 – радиобуй с одним блоком питания.

пример, [73]) акустическая станция дооснащается цифровым радиобуем (4) [74], цель которого состоит в синхронной передаче части акустических данных на береговой пост в режиме реального времени через УКВ-ЧМ и спутниковым *Иридиум* радиотелеметрическими каналами [75].

Для генерирования низкочастотных акустических импульсов применялся оригинальный пневмоизлучатель [76], свешиваемый на горизонт 6 – 10 м с борта дрейфующего судна (см. рис. 1.6а). Основной принцип работы пневмоисточника заключается в резком высвобождении сжатого воздуха из корпуса излучателя через резиновую мембрану, в следствие чего формируется короткий ($\sim 0,2$ мс) импульсный сигнал с энергией в полосе частот 10 – 250 Гц.

При исследовании распространения тонального звука вдоль акустических трасс применялся автономный резонансный излучатель электромагнитного ти-

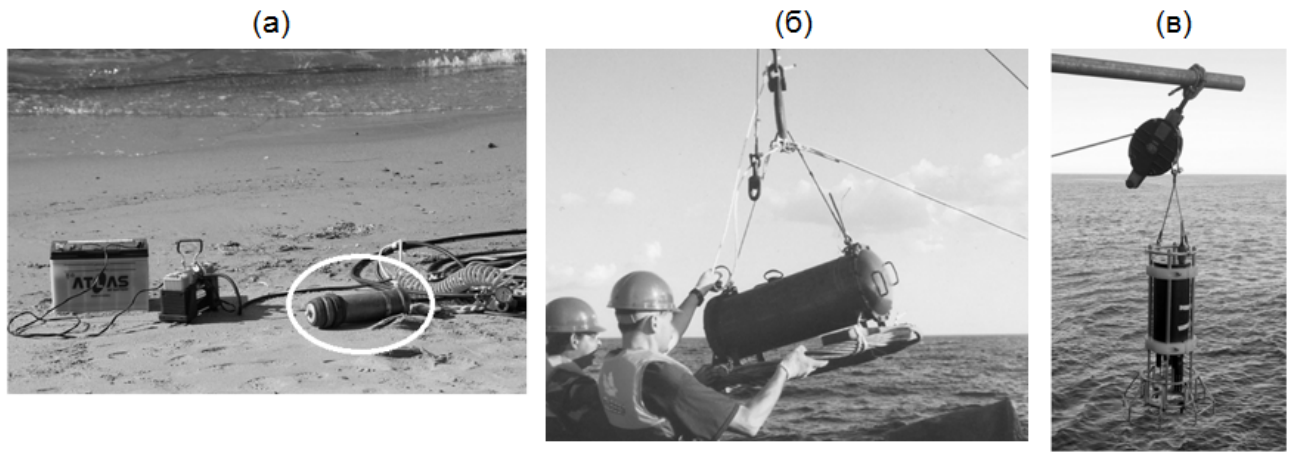


Рис. 1.6. Пневмоизлучатель – (а), автономный резонансный излучатель – (б), гидрологический зонд – (в).

па [77] (см. рис. 1.6б). Излучатель расположен в герметизированном цилиндрическом контейнере с излучающей диафрагмой с одной стороны и состоит из передающего устройства (с электромагнитным преобразователем), усилителя мощности и трансформатора; стабильный генератор гармонического сигнала построен на базе кварцевого резонатора и аккумуляторной батареи. При использовании аккумулятора емкостью 100 Ампер-часов излучатель может передавать сигнал заданного акустического уровня в течение 72 часов. Излучатель формирует непрерывный тональный сигнал мощностью 10 Вт на центральной частоте, которая может регулироваться в частотном диапазоне 290 – 392 Гц путем закрепления на диафрагме массивных дисков.

Гидрологические исследования проводились с помощью автономного комбинированного зонда «MIDAS-CTD+500» (см. рис. 1.6в) фирмы Valeport (Великобритания), который обеспечивал в режиме вертикального зондирования измерения гидростатического давления (глубины), скорости звука, температуры, электропроводности (солености), концентрации кислорода и мутности.

1.5. Акустические величины

Акустический сигнал при распространении в морской среде теряет энергию вследствие различных механизмов потерь (поглощения и затухания) [78].

В подводной акустике стандартной величиной, определяющей изменения мощности сигнала с дальностью распространения, является функция потерь TL (*Transmission Loss*). Значение функции потерь при распространении звука в заданном неоднородном геоакустическом волноводе, главным образом, зависит от частоты и расстояния, является отрицательной величиной и определяется следующим соотношением:

$$TL(f, r) = RL(f, r) - SL(f, r = 1 \text{ м}), \quad (1.2)$$

где $RL = 10 \cdot \log_{10} G(f, r)$ – уровень спектральной плотности мощности импульса в точке приема акустических колебаний (*Receiver Level*) – будет определен далее формулой (1.13), $SL = 10 \cdot \log_{10} G(f, r = 1 \text{ м})$ – уровень спектральной плотности мощности импульса в точке на расстоянии 1 м от излучателя (*Source Level*).

Одной из задач исследования потерь звука при распространении заключается в оценке уровней значений TL вдоль заданных акустических профилей. Это позволяет с большей точностью количественно определить особенности распространения акустических сигналов в исследуемой области, а также выполнить калибровку акустической модели волновода.

1.5.1. Оценки параметров импульсных акустических сигналов

При исследовании параметров нестационарных акустических сигналов (например, импульсный сигнал, генерируемый пневмоисточником) во временной и частотной областях используются физические величины и обозначения, соответствующие принятым стандартам [79].

Временная область

Пусть $p(t)$ – вариации акустического давления, измеренные единичным гидрофоном, в единицах мкПа с нулевым средним значением. На практике полезный сигнал определяется на конечном временном интервале $[0, T]$. Для функции $p(t)$ задается дискретная формула в виде $p_n = p(n \cdot \Delta t)$, где $n =$

$0, 1, 2, \dots, N-1$ – отсчеты значений акустического давления за время T , $\Delta t = \frac{1}{F_d}$ – время одного отсчета [с], F_d – частота дискретизации сигнала [Гц], $T = N \cdot \Delta t$ – время сигнала [с].

Тогда определим следующие параметры:

- **Пиковое акустическое давление** (*peak sound pressure*) показывает максимальное по модулю значение акустического давления за указанный интервал времени:

$$p_{peak} = \max |p(t)| \quad [\text{мкПа}], \quad (1.3)$$

дискретная формула: $p_{peak} = \max |p_n|$,

уровень величины: $SPL_{peak} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p_{peak}}{p_0}$ [дБ отн. 1 мкПа], где $p_0 = 1$ мкПа.

Пиковый уровень звукового давления импульса не учитывает продолжительность сигнала и является неполным показателем влияния на акустическую обстановку в акватории.

- **Акустическая экспозиция** (*sound exposure*) имеет физический смысл энергии сигнала. Определяется как интеграл по времени квадрата звукового давления за указанную длительность импульсного сигнала:

$$E = \int_0^T p^2(t) dt \quad [\text{мкПа}^2 \cdot \text{с}], \quad (1.4)$$

дискретная формула: $E = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} p_n^2$,

уровень величины: $SEL = 10 \cdot \log_{10} \frac{E}{p_0^2 \cdot t_0}$ [дБ отн. 1 мкПа²·с], где $t_0 = 1$ с.

Отметим, что формула (1.4) учитывает энергию не только полезного сигнала, но и энергию шума, входящего в рассматриваемый интервал времени. Величина SEL для сигнала с вычитом шума можно определить по формуле:

$$SEL_{signal} = SEL_{[0,T]} - SEL_{noise}. \quad (1.5)$$

- **Кумулятивная акустическая экспозиция** (*cumulative sound exposure*).

Расчет величины SEL может производиться в течение длительного интервала времени, например, при продолжительном единичном событии или в течение периода с несколькими акустическими событиями. Общая акустическая экспозиция может быть рассчитана путем суммирования (в линейных единицах) SEL для N отдельных импульсов:

$$SEL_{cum} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{SEL_i}{10}} \right). \quad (1.6)$$

- **Мощность сигнала** рассчитывается как отношение энергии сигнала к интервалу времени, на котором определен сигнал:

$$\bar{p}^2 = \frac{E}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad [\text{мкПа}^2], \quad (1.7)$$

дискретная формула: $\bar{p}^2 = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{N-1} (p_n^2 \cdot \Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_n^2$.

- **Среднеквадратичное звуковое давление** (*root mean square pressure*):

$$p_{rms} = \sqrt{\bar{p}^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad [\text{мкПа}], \quad (1.8)$$

дискретная формула: $p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_n^2}$,

уровень величины: $SPL_{rms} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p_{rms}}{p_0}$ [дБ отн. 1 мкПа].

Спектральная область

Для описания зависимости спектральной плотности мощности акустических шумов от частоты используется акустический спектр. Для этого строится

периодограмма с помощью прямого преобразования Фурье:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t) \cdot e^{2\pi i \cdot f \cdot t} dt, \quad (1.9)$$

дискретная формула: $F_k = \sum_{n=0}^{N-1} p_n \cdot e^{-2\pi i \cdot \frac{k}{N} n}$,

результат: $\text{Re}(F_k) = a_k$, $\text{Im}(F_k) = b_k$, для частот $f = -\frac{F_d}{2}, \dots, \frac{F_d}{2}$ с разрешением $\Delta f = \frac{F_d}{N_{fft}}$, где N_{fft} – число точек сигнала для быстрого преобразования Фурье (БПФ).

По коэффициентам преобразования Фурье можно определить амплитудный $\widehat{A}(f)$ и фазовый спектры $\Phi(f)$:

$$\widehat{A}(f) = \frac{2}{N_{fft}} \cdot |F(f)| \quad [\text{Па/Гц}], \quad (1.10)$$

$$\Phi(f) = \arg(F(f)) \quad [\text{рад}], \quad (1.11)$$

соответствующие дискретные формулы: $\widehat{A}_k = \frac{2}{N_{fft}} \cdot |F_k| = \frac{2}{N_{fft}} \cdot \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$,
 $\Phi_k = \arg(F_k) = \arctan\left(\frac{b_k}{a_k}\right)$.

Коэффициент $\frac{2}{N_{fft}}$ в формулах в спектральной области является нормировочным. Двойка в числителе связана с компенсацией отбрасывания зеркальной части спектра после преобразования Фурье.

Параметры импульсного акустического сигнала SEL (1.4) и SPL_{rms} (1.8), определенные во временной области, можно получить и в спектральной области:

- **Спектральная плотность энергии** определяет значение звукового воздействия на 1 Гц-полосу:

$$E(f) = \frac{2}{N_{fft}} \cdot |F(f)|^2 \cdot \Delta t \quad [\text{Па}^2 \cdot \text{с/Гц}], \quad (1.12)$$

дискретная формула: $E_k = \frac{2}{N_{fft}} \cdot |F_k|^2 \cdot \Delta t = \frac{2\Delta t}{N_{fft} \cdot (a_k^2 + b_k^2)}$,

уровень величины: $E_k = 10 \cdot \log_{10} \frac{E_k}{E_0}$ [дБ отн. $1 \text{ мкПа}^2 \cdot \text{с} / \text{Гц}$].

- **Спектральная плотность мощности** определяется в полосе частот 1 Гц. Этот термин относится только к звукам с непрерывным частотным спектром:

$$G(f) = \frac{E(f)}{T} = \frac{2}{N_{fft} \cdot N} \cdot |F(f)|^2 \quad [\text{Па}^2/\text{Гц}], \quad (1.13)$$

дискретная формула: $G_k = \frac{E_k}{T} = \frac{2}{N_{fft} \cdot N} \cdot (a_k^2 + b_k^2)$,

уровень величины: $G_k = 10 \cdot \log_{10} \frac{G_k}{G_0}$ [дБ отн. 1 мкПа²/Гц].

Преимуществом цифрового анализа в спектральной области является возможность вычисления представленных выше величин в заданной частотной полосе:

- **Дисперсия** сигнала в частотной полосе $\Delta f = f_2 - f_1$:

$$D(\Delta f) = \int_{f_1}^{f_2} G(f) df \quad [\text{Па}^2], \quad (1.14)$$

уровень величины: $D(\Delta f) = 20 \cdot \log_{10} \frac{D_{\Delta f}}{p_0^2 \cdot \Delta f_0}$ [дБ отн. 1 мкПа²], где $\Delta f_0 = 1$ Гц.

- **Среднеквадратичное отклонение** акустического давления в частотной полосе $\Delta f = f_2 - f_1$:

$$p_{rms}(\Delta f) = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} G(f) df} \quad [\text{Па}], \quad (1.15)$$

уровень величины: $SPL_{rms}(\Delta f) = 20 \cdot \log_{10} \frac{p_{rms} \Delta f}{p_0^2 \cdot \sqrt{\Delta f_0}}$ [дБ отн. 1 мкПа].

- **Звуковое воздействие** в частотной полосе $\Delta f = f_2 - f_1$:

$$E(\Delta f) = T \cdot \int_{f_1}^{f_2} G(f) df \quad [\text{Па}^2 \cdot \text{с}], \quad (1.16)$$

уровень величины: $SEL(\Delta f) = 10 \cdot \log_{10} \frac{E_{\Delta f}}{p_0^2 \cdot t_0}$ [дБ отн. 1 мкПа² · с]

Оценка параметров акустических импульсов в частотной области позволяет исключить из анализа интенсивные вариации акустического давления на низких и высоких частотах, которые не связаны с изучаемым импульсом, а также дает возможность произвести коррекцию спектра на сквозную АЧХ измерительно-регистрационного тракта.

Многолетняя практика оценки параметров низкочастотных акустических импульсов, измеренных на шельфе Охотского моря во время геофизических работ, показала относительную стабильность значений функций $SPL_{peak}(r)$, $SEL(\Delta f, r)$ и разброс в значениях $SPL_{rms}(\Delta f, r)$, где r – расстояние от точки излучения до точки приема. Разброс в значениях параметра SPL_{rms} обусловлен определением временного интервала, на котором оценивается мощность импульсного акустического сигнала. Данный вывод справедлив в случае длительной продолжительности зарегистрированного акустического импульса, учитывая низкочастотный предвестник и водную часть импульса. В случае 1-секундного временного окна оценки параметров импульсного сигнала $SPL_{rms}^{1s} = SEL^{1s}$.

1.5.2. Непропорциональные частотные полосы

Разделение спектра на полосы частот с постоянной шириной (часто 1 Гц) не позволяет понять, каким образом звук воспринимается морскими животными. Поскольку животные воспринимают скорее экспоненциальные, а не линейные повышения частоты, анализ спектра сигнала с нелинейной шириной полосы дает более корректное представление о реальном акустическом воздействии на морских животных. В практических задачах, например, при оценки уровня воздействия акустических шумов на акваторию используют непропорциональные частотные полосы, ширина которых растет с увеличением частоты.

В задачах подводной акустики наиболее распространено использование треть-октавных полос, ширина которых определена как $1/3$ ширины октавы, т.е. каждая октава разделяется на три равных в логарифмической шкале полосы. Следуя [80], для n -ой полосы нижняя f_{low} и верхняя f_{up} граничные частоты

определяются следующим соотношением:

$$\log_2 \frac{f_{up}(n)}{f_{low}(n)} = \frac{1}{3}. \quad (1.17)$$

Центральная частота f_c для n -ой треть-октавной полосы находится по верхней или нижней граничной частоте соотношением:

$$f_c = 2^{1/6} \cdot f_{low} = 2^{-1/6} \cdot f_{up}. \quad (1.18)$$

Величина $\Delta f = f_{up} - f_{low}$ называется шириной полосы, при этом f_{up}/f_{low} – величина постоянная. При увеличении номера треть-октавы ширина полосы становится больше, однако на логарифмической шкале по основанию 2 расстояние между полосами частот остается равными.

Помимо треть-октавных частотных полос, выделяют октавные, декадные и 1/10-декадные полосы, однако они в настоящей работе не используются.

1.6. Математические модели распространения звука

1.6.1. Постановка задачи

Рассмотрим трехмерный волновод (x, y, z) , где $-\infty < x < \infty$, $-\infty < y < \infty$ – горизонтальные координаты, $0 \leq z \leq H$ – глубина волновода. Акустические свойства среды определяются пространственным распределением поля скорости звука $c = c(x, y, z)$ и плотностью $\rho = \rho(x, y, z)$. Предполагается, что вдоль вертикальной оси могут находиться несколько границ раздела сред, имеющих форму гладких поверхностей, на которых может быть разрыв функций скорости звука и плотности. В задачах акустики мелкого моря важную роль играет граница раздела «вода-дно» $z = h(x, y)$, поэтому для простоты формулировки задачи ограничимся этой поверхностью. Акустическое давление $\tilde{p}(x, y, z, t)$ в таком волноводе удовлетворяет трехмерному однородному волновому уравнению в декартовой системе координат, полученному из системы основных уравнений

гидродинамики (уравнения движения, непрерывности и состояния) [81]:

$$\rho \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p} \right) - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial t^2} = 0, \quad (1.19)$$

где $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right\}$ – дифференциальный оператор частных производных по координатам x, y и z . Для упрощения записи здесь и далее заменим частные производные на нижние индексы по соответствующим координатам. Предположим, что плотность среды является постоянной в горизонтальном направлении величиной и зависит только от глубины, тогда волновое уравнение (1.19) примет вид:

$$\tilde{p}_{xx} + \tilde{p}_{yy} + \rho \left(\frac{1}{\rho} \tilde{p}_z \right)_z - \frac{1}{c^2} \cdot \tilde{p}_{tt} = 0. \quad (1.20)$$

Далее пусть гармонический точечный источник звука частотой f расположен в точке с координатами $(0, 0, z_s)$. В этом случае поле акустического давления может быть представлено в виде:

$$\tilde{p}(x, y, z, t) = p(x, y, z) \cdot e^{-i\omega t}, \quad (1.21)$$

где ω – круговая частота рассматриваемого гармонического процесса, при этом $\omega = 2\pi f$, p – амплитуда скалярного поля $\tilde{p}(x, y, z, t)$. После подстановки (1.21) в волновое уравнение (1.20) получим трехмерное уравнение Гельмгольца, описывающее распространение гармонических звуковых волн в неоднородной среде:

$$p_{xx} + p_{yy} + \rho \left(\frac{1}{\rho} p_z \right)_z + \frac{\omega^2}{c^2} p = -\delta(x)\delta(y)\delta(z - z_s), \quad (1.22)$$

где $\delta(*)$ – функция Дирака (дельта-функция).

Уравнение Гельмгольца (1.22) дополняется условием мягкой границы на поверхности моря и условием Неймана на нижней границе волновода (может быть также заменено на нулевое условие Дирихле):

$$p(x, y, 0) = 0, \quad p_z(x, y, H) = 0. \quad (1.23)$$

На границе раздела вода-дно $z = h(x, y)$ выполняются условия непрерыв-

ности акустического давления и колебательной скорости:

$$p \Big|_+ = p \Big|_-, \quad \left(\frac{1}{\rho} p_z \right)_z \Big|_+ = \left(\frac{1}{\rho} p_z \right)_z \Big|_-, \quad (1.24)$$

где индексы $+$ и $-$ указывают на значение переменных ниже и выше границы раздела $h(x, y)$ соответственно.

1.6.2. Параболическое уравнение с аппроксимацией Паде (РАМ)

Введем цилиндрическую систему координат (r, ρ, ϕ) , при этом среда рассматривается однородной для азимутального угла ϕ (приближение несвязанных азимутов). При моделировании акустического поля в пространственно-неоднородной среде волновод разбивается на регулярные участки, в каждом из которых справедливо уравнение Гельмгольца (1.22):

$$p_{rr} + \frac{1}{r} p_r + \rho \left(\frac{1}{\rho} p_z \right)_z + k_0^2 n^2 p = 0 \quad (1.25)$$

где $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$ – отсчетное волновое число, $n(r, z) = \frac{c_0}{c(r, z)}$ – индекс рефракции звука, характеризующий среду. Коэффициент затухания в осадочных слоях, слагающих дно, здесь и далее учитывается в виде малой добавки к скорости звука [31]:

$$c = \frac{c_0(x, y)}{1 + i\eta\beta(x, z)}, \quad (1.26)$$

где $\eta = (40\pi \cdot \log_{10} e)^{-1}$ – постоянная величина, β – затухание гармонических волн, распространяющихся в среде [дБ/λ], λ – длина волны.

Решение уравнения (1.25) будем искать в виде:

$$p(r, z) = \psi(r, z) H_0^{(1)}(k_0 r), \quad (1.27)$$

где $H_0^{(1)}(k_0 r)$ – функция Ханкеля первого рода, представляющая собой решение уходящей волны в цилиндрической системе координат и являющаяся решением уравнения Бесселя, $\psi(r, z)$ – огибающая звукового давления. После подстановки (1.27) в уравнение (1.25) получим:

$$\psi_{rr} + 2ik_0\psi_r + \rho \left(\frac{1}{\rho} \psi_z \right)_z + k_0^2(n^2 - 1)\psi = 0, \quad (1.28)$$

Введем вспомогательный дифференциальный оператор X :

$$k_0^2 X = \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 - k_0^2, \quad (1.29)$$

тогда после факторизации уравнения (1.28) и допустив, что энергия, распространяющаяся по пространственной оси, преобладает над энергией обратного рассеяния, получим следующее параболическое уравнение

$$\psi_r = ik_0(\sqrt{1+X} - 1)\psi. \quad (1.30)$$

Один из подходов аппроксимации оператора квадратного корня, учитывающий широкие углы распространения звука, является использование ряда Паде, предложенное Клаэрбаутом и реализованное Коллинзом [82]:

$$\sqrt{1+X} - 1 \cong \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_{j,n} X}{1 + \beta_{j,n} X}. \quad (1.31)$$

Увеличение количества слагаемых в ряде Паде (1.31) приводит к увеличению точности решения, однако при этом требуется больше вычислительных мощностей. В работе [82] показано, что большинство задач подводной акустики могут быть решены при включении до пяти слагаемых ряда Паде.

Решение параболического уравнения (1.30) с использованием аппроксимации Паде оператора квадратного корня (1.31) является эффективным инструментом для решения пространственно-неоднородных акустических задач, что легло в основу создания программ для моделирования двумерных акустических полей RAM (*Range-dependent Acoustic Model*) и RAMs, учитывающее упругие свойства дна [83]. Программа RAM реализована на алгоритме пошагового расщепления параболического уравнения с аппроксимацией Паде экспоненты оператора квадратного корня SSP (*split-step Pade algorithm*) [84]:

$$\psi(r + \Delta r) = e^{ik_0 \Delta r (\sqrt{1+X} - 1)} \psi(r), \quad (1.32)$$

где $\psi(r)$ – известная функция для всех значений z на расстоянии r от источника, Δr – шаг сетки. Для получения начальных (стартовых) условий приме-

няется точечный и эффективный подход *self-starter* [85]. При переходе к пространственной неоднородности необходимо учесть сохранение потока энергии в вертикальных плоскостях между регулярными сегментами, для этого используется коррекция сохранения энергии [86].

Алгоритм RAM способен обрабатывать сложные среды с пространственно-неоднородным распределением (r, z) акустических параметров для двухслойных (вода-дно) волноводов. В качестве решения программа выдает функцию потерь в зависимости от расстояния от источника на выбранном горизонте. Точность и сходимость решения определяется выбором пространственной сетки и количеством слагаемых в ряде Паде (1.31). Алгоритм показал высокую эффективность и точность вычисления при решении акустических задачи с наклонным дном в моделях «жидкого дна» [87] и с учетом упругих свойств осадочного слоя [88]. В данной диссертационной работе программы RAM(s) использовались автором при решении акустических задач, описанных в разделе 2.1 и работах [89–91].

1.6.3. Модовое параболическое уравнение

При рассмотрении сценариев распространения звука в трехмерных волноводах, краевая задача для уравнения (1.22) с краевыми условиями (1.23) и условиями на границе раздела (1.24) может быть решена в виде суперпозиции нормальных волн (акустических мод):

$$p(x, y, z) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j(x, y) \cdot \phi_j(z), \quad (1.33)$$

где $\phi(z)$ – модовая функция, являющаяся решением спектральной задачи Штурма-Лиувилля [31], заданной в виде:

$$\rho \left(\frac{1}{\rho} p_z \right)_z + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - k_{rj}^2 \right) \phi_j = 0 \quad (1.34)$$

с граничными и краевыми условиями:

$$\phi_j(0) = 0, \quad \phi_{j,z}(H) = 0, \quad \phi \Big|_+ = \phi \Big|_-, \quad \frac{1}{\rho} \frac{d\phi_j}{dz} \Big|_+ = \frac{1}{\rho} \frac{d\phi_j}{dz} \Big|_-, \quad (1.35)$$

где k_{rj} – горизонтальное волновое число (собственное значение), соответствующее волновой функции ϕ_j (собственный вектор). Вертикальное волновое число определяется из дисперсионного соотношения $k_{zj} = \frac{\omega^2}{c^2} - k_{rj}^2$. Собственные функции мод ϕ_j образуют полную ортогональную систему функций в вертикальном сечении точки волновода с координатами (x, y) . На практике ряд бесконечного числа модовых функций в уравнении (1.33) может быть ограничен частичной суммой, включающей в себя первые M распространяющихся мод (при $k_m^2 > 0$). Коэффициенты $A_j(x, y)$ при этом называются модовыми амплитудами. Основная задача формулируется в нахождение модовых амплитуд через решение модовых параболических уравнений (МПУ).

Узкоугольное МПУ с взаимодействием мод (МРЕ)

В рамках подхода МПУ, разработанного М.Ю. Трофимовым и др. [92], модовые амплитуды в разложении поля могут быть представлены в виде произведения осциллирующего множителя $e^{i\theta(x)}$ и огибающей гладкой функции $\mathcal{A}(x, y)$:

$$A_j(x, y) = e^{i\theta_j(x)} \mathcal{A}_j(x, y), \quad \theta_j(x) = \int_0^x k_j(x) dx, \quad (1.36)$$

где фаза θ получена путем интегрирования горизонтального волнового числа. Следуя стандартной процедуре метода многомасштабных разложений, система узкоугольных ПУ для огибающей $\mathcal{A}_j(x, y)$ может быть записана [93]:

$$2ik_j \mathcal{A}_{jx} + ik_{jx} \mathcal{A}_j + \mathcal{A}_{jyy} + \alpha_{jj} \mathcal{A}_j + \sum_{m=1, m \neq j}^J \alpha_{jm} \mathcal{A}_j e^{i(\theta_m - \theta_j)} = 0, \quad (1.37)$$

где значение α определяется соотношением:

$$\alpha = \int_0^H \frac{1}{\rho} v \phi_j^2 dz + \int_0^H \frac{1}{\rho} (n_0^2 - k_j^2) \phi_j^2 dz - \int_0^H \frac{1}{\rho} (\phi_{jz})^2 dz + \left\{ h_1 \phi_j \left[\left(\left(\frac{1}{\rho} \phi_{jz} \right)_z \right)_+ + \left(\left(\frac{1}{\rho} \phi_{jz} \right)_z \right)_- \right] - h_1 \frac{1}{\rho_0^2} (\phi_{jz}^2) [(\rho)_+ - (\rho)_-] \right\} \Big|_{z=h_0}. \quad (1.38)$$

В адиабатическом приближении модовые параболические уравнения могут быть решены отдельно друг от друга для количества N_m модовых функций ϕ_j спектральной задачи (1.34)–(1.35), после чего трехмерное акустическое поле может быть вычислено по формуле:

$$p(x, y, z) = \sum_{j=1}^{N_m} \mathcal{A}_j(x, y) \phi_j(x, z) \exp \left(i \int_0^x k_j(x) dx \right). \quad (1.39)$$

На основе рассмотренного алгоритма был создан программный комплекс МРЕ (*Mode Parabolic Equation*), позволяющий моделировать распространение тональных и импульсных акустических сигналов в неоднородных геоакустических волноводах, содержащих произвольное количество слоев (например, воздух-вода-дно).

Решение задачи Штурма-Лиувилля (1.34)–(1.35) реализуется с помощью метода конечных разностей. Как было сказано ранее, при расчетах акустических полей учитываются только распространяющиеся моды (т.е., у которых $k_j^2 > 0$). В некоторых случаях бывает удобно пренебречь распространяющимися модами с достаточно высокими номерами $j > N_m$ и, соответственно, достаточно малыми k_j . Таким образом, физически ограничивается апертура источника в вертикальной плоскости. Для достаточно больших частот приемлемо принимать во внимание только водные акустические моды, тем самым существенно увеличив производительность вычислений без уменьшения качества решения. После решения семейства спектральных задач для всех точек трассы по горизонтальной оси, происходит вычисление коэффициентов (1.38), реализация которой представляет собой интегрирование по методу трапеции для первых

трех членов в (1.38) и суммирование по всем границам раздела для двух последних членов. Наконец, завершающим этапом является решение параболического уравнения (1.37) с использованием конечно-разностного метода Крэнка-Николсона.

При моделировании распространения импульсного сигнала используется подход на основе БПФ, позволяющего представить импульс в виде суммы тональных компонент, распространение которых моделируется в приближении МПУ. В этом случае амплитуда каждой из тональных компонент вычисляется при помощи МПУ в точке приемника, а затем итоговый импульсный сигнал собирается обратно из тональных компонент с использованием процедуры обратного БПФ.

Широкоугольное адиабатическое МПУ (AMPLE)

Хотя метод узкоугольного МПУ (см. выше) успешно применялся для решения многих практических задач, например, [94, 95] и др., было ясно, что он не способен справиться с горизонтальной апертурой источника более 15° . Этот факт подтверждает решение стандартной задачи по распространению звука вдоль поперечного клина. Другой способ расчета модовых амплитуд A_j в формуле (1.33), обеспечивающий корректное решение при гораздо более широкой апертуре распространения звука в горизонтальной плоскости, основан на псевдодифференциальных параболических уравнениях и методе SSP.

Как и в предыдущем разделе, выделяя главную осцилляцию модовых амплитуд и введя отсчетное значение горизонтального волнового числа $k_{j,0}$, рассчитанное, например, в точках источника $k_{j,0} = k_j(0, 0)$:

$$A_j(x, y) = e^{ik_{j,0}x} \mathcal{A}_j(x, y), \quad (1.40)$$

получаем следующее псевдодифференциальное параболическое уравнение для огибающей $\mathcal{A}_j(x, y)$ [96, 97]:

$$\mathcal{A}_{jx} = ik_{j,0}(\sqrt{1 + L_j} - 1)\mathcal{A}_j, \quad (1.41)$$

где оператор L_j определяется соотношением $k_{j,0}^2 L_j = \partial_y^2 + k_j^2 - k_{j,0}^2$. Уравнение (1.41) называется псевдодифференциальным, поскольку в правой его части содержится радикал дифференциального оператора L_j . На малых интервалах длины $\Delta x = h$ уравнение (1.41) может быть решено как:

$$\mathcal{A}_n^{n+1} = \exp\left(ik_{j,0}h(\sqrt{1+L}-1)\right)\mathcal{A}^n, \quad (1.42)$$

где $\mathcal{A}^n(y) = \mathcal{A}(x_n, y)$; считаем, что по x введена равномерная сетка $x_{n+1} - x_n = h$.

Экспоненту в правой части последнего уравнения можно представить в виде аппроксимации Паде порядка (q, p) , представляющей собой дробно-рациональную функцию оператора L , числитель которого есть полином Q_q степени q , а знаменатель – полином P_p степени $p \geq q$ (обычно $q = p$ или $q = p - 1$):

$$\exp\left(ik_{j,0}h(\sqrt{1+L}-1)\right) \approx \frac{Q_q(L)}{P_p(L)} = \left(1 + \sum_{s=1}^p \frac{\tilde{a}_{q,p}^s L}{1 + \tilde{b}_{q,p}^s L}\right). \quad (1.43)$$

Функции $\mathcal{A}^n(y)$, составляющие приближенное решение уравнений (1.41) на равномерной сетке, могут рассчитываться одна за другой с помощью маршевой численной схемы:

$$\mathcal{A}_n^{n+1} = \left(\sum_{s=1}^p \frac{\tilde{a}_{q,p}^s L}{1 + \tilde{b}_{q,p}^s L}\right)\mathcal{A}^n. \quad (1.44)$$

Рассмотренный метод решения широкоугольного МПУ реализован в комплексе программ AMPLE (*Ample-Angle Mode ParaboLic Equation*) [98]. Параметры расчета задаются в конфигурационном файле .json, представленном в виде списка пар ключ/значение. В файле конфигурации описываются параметры геоакустического волновода, расчетные границы, параметры вычислительной сетки, гидрологические данные, частота источника, его вид, параметры начальных условий и др. Выходными данными AMPLE могут быть значения уровня акустического поля (SEL для импульса или TL для тона), начальные условия, модовые функции ϕ_j и соответствующие им волновые числа k_j . Результаты сохраняются в папке, указанной при запуске программы. Многомерные данные

записываются в файл в виде текста или в двоичном формате отдельно для каждой частоты, а сведения о его размерах сохраняются в json-файле независимо для каждого типа вывода.

Расчеты модовых функций и волновых чисел на заданной вычислительной сетке проводятся путем многократных численных решений спектральной акустической задачи (1.34)–(1.35) для точек волновода (x, y) . Для этого используется специально разработанная программа CAMBALA (*Coupled Acoustic Modes with Bottom Attenuation in Linear Acoustic*), реализованная на языке C++ [99].

1.7. Модель геоакустического волновода

Под геоакустическим волноводом понимается приближенная к реальности модель толщи воды и морского дна с экспериментально измеренными, экстраполированными или предсказанными распределениями геофизических параметров водного и донных слоев, влияющих на распространение звука. Согласно общей геологической модели мелководных районов [100, 101], волновод представляет собой водный слой, ограниченный абсолютно мягкой поверхностью «вода-воздух» и лежащий на многослойном дне. Верхний слой дна, как правило, состоит из осадочного слоя, за которым следуют коренные породы (базальт, гранит). Осадочный слой с некоторой долей условности можно поделить на верхний слой неконсолидированных осадков, представленный донными отложениями типа ила, и слой, состоящий из более плотных пород – полуконсолидированных осадков. Для первого слоя характерно отсутствие сдвиговых волн («жидкое дно»), присутствие резких случайных неоднородностей (например, вертикальные каналы, связанные с выходами газов [102], или слой вечной мерзлоты [103]), наличие сильного поглощения продольных волн. Слой полуконсолидированных осадков может быть представлен крупным песком, валунной глиной и др. Здесь модуль сдвига отличен от нуля, что приводит к возможности распространения поперечных волн. За осадочным слоем следует так называемый

мый акустический фундамент, представленный выходом коренных пород. Он характеризуется большой скоростью как продольных, так и поперечных волн, и низким значением коэффициента затухания звуковой волны. Рассмотренная четырехслойная модель волновода схематично представлена на рис. 1.7. На практике данная модель может быть упрощена в том случае, когда два последних слоя слабо влияют на распространение звука на высоких частотах. Иногда используется и более сложная модель, когда обнаруживаются существенные для распространения звука особенности внутренней структуры дна (см. серию работ по распространению звука в море с газонасыщенным дном [104]). Кроме этого, на практике нижний слой волновода задается с повышенным коэффициентом затухания звуковой волны для того, чтобы исключить искусственное отражение акустических волн от нижней границы волновода.

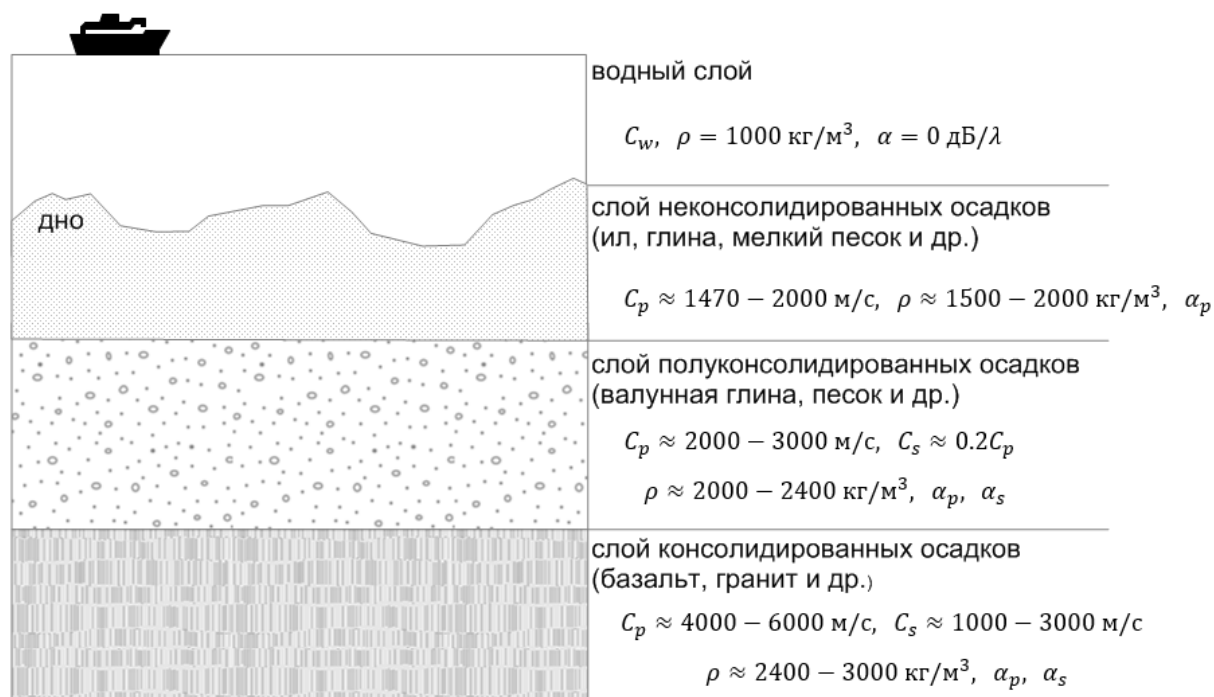


Рис. 1.7. Модель геоакустического волновода, характерная для мелководных районов.

Таким образом, начальный этап моделирования акустического поля предполагает формирование модели геоакустического волновода, включающей характерную для рассматриваемого района неоднородность батиметрии и пространственное распределение геоакустических параметров слоев, определяю-

щихся наборами линейных градиентов следующих акустических величин: скорость звука продольной C_p и поперечной C_s волны (м/с), коэффициенты их затухания α_p и α_s (дБ/λ, где λ – длина волны) соответственно и плотность среды ρ (г/см³ или кг/м³). В процессе поиска оптимальных значений параметров дна должны использоваться реальные сведения об исследуемом волноводе, полученные в условиях полевых работ. С помощью судового эхолота проводится замер глубин вдоль путей распространения звука, после чего выполняется интерполяция на трехмерную область модельного волновода. Помимо данных батиметрии большое значение имеет гидрологические условия на акватории, преимущественно распределение скорости звука в водном слое, которое зависит от времени года и местоположения точки зондирования. Донное полупространство волновода является областью, в которой акустические параметры неизвестны и поиск их значений, а также глубина залегания отдельных пород является нетривиальной задачей. Одним из способов определения параметров осадочного слоя является метод геоакустической инверсии, основанный на использовании данных, полученных с приемных антенн или даже с помощью одиночного гидрофона [105]. В последнем случае вместо информации о фазе, полученной с помощью разнесенных в пространстве датчиков, используется информация о волноводной дисперсии сигнала. Как известно [106], модовая дисперсия в волноводе мелкого моря с постоянной глубиной связана с акустическими параметрами слоев дна, а значит времена прихода различных мод на разных частотах могут использоваться в качестве исходных данных для геоакустической инверсии. Альтернативно поиск параметров дна можно реализовать с помощью подбора соответствующих значений, ориентируясь на согласование экспериментальных измеренных значений потерь при распространении акустических колебаний с соответствующими модельными значениями при распространении звука на различных частотах.

1.8. Выводы к первой главе

1. Интенсивными источниками антропогенного шума на шельфе являются суда и операции, связанные с ними, морские сейсморазведочные исследования, а также забивка свай в море и на берегу. Судовые шумы характеризуются широкополосным звуком, два других формируют серии низкочастотных импульсных сигналов. Рассмотрены особенности формирования акустического поля группой пневмоисточников, которые будут учтены при моделировании распространения сейсмоакустического сигнала в мелком море.

2. При исследовании влияния антропогенных акустических шумов на МЖ необходимо принимать в расчет взвешенную функцию $W(f)$ (1.1), определяющую восприятие звука конкретным видом животного на определенной частоте. Референсным значением параметра SEL , при котором у 10% охотско-корейской популяции серых китов наблюдается поведенческая реакция на шум, является уровень 156 дБ отн. 1 мкПа²·с.

3. Определены параметры акустических тональных и импульсных сигналов во временной и спектральной областях, описывающих акустическое поле. В случае распространения серии импульсных сигналов (например, при проведении сейсморазведочных работ) наибольшую стабильность проявляют пиковое акустическое давление SPL_{peak} и акустическое воздействие SEL .

4. Рассмотрены математические модели распространения звука и расчета функции потерь $TL(x, y, z, f)$ в неоднородных волноводах, обобщенная модель для мелкого моря которого представлена на рис. 1.7. Для достижения поставленных в диссертационной работе задач выбраны следующие модели: метод параболического уравнения с аппроксимацией Паде – RAM(s), метод узкоугольного МПУ с возможностью учета взаимодействия мод – MPE и широкоугольного МПУ в адиабатическом приближении – AMPLE.

Глава 2

Экспериментальные и численные исследования распространения звука в сложных волноводах, характерных для шельфа

В данной главе рассматривается ряд экспериментов 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 в виде островов, мысов и т.д. (раздел 2.3). Каждый эксперимент, рассмотренный в настоящей главе диссертации, сопровождается численным моделированием акустических полей, опирающимся на натурные данные. Исследуются области применимости методов моделирования, рассмотренных в разделе 1.6, и соответствующего программного обеспечения.

Материал, описанный в данной главе, опубликован в следующих работах автора [89–91, 107–110].

2.1. Влияние гидрологических условий

2.1.1. Распространение тонального звука над наклонным дном

Интерес к распространению звука в нерегулярных акустических волноводах, характерных для шельфа, обусловлен существенным влиянием дна, от которого многократно переотражаются звуковые волны, и неоднородностью водного слоя, параметры которого существенным образом зависят от времени го-

да. Например, в работах [111–113] показано, что благодаря наклонному дну и сезонному термоклину, формирующему в водном слое вблизи дна отрицательный градиент в вертикальном распределении скорости звука, образуется придонный звуковой канал, обеспечивающий на кромке шельфа согласованный переход энергии акустических волн из мелководной области шельфа в морской подводный звуковой канал. Последний может быть расположен на глубине 100 – 200 м в Японском море [111] и на глубине 800 м вблизи Гавайских островов [113]. Данный эффект получил название «эффекта оползня» (*mudslide effect*, термин впервые был введен Ф. Таппертом с соавторами в работе [113]) по аналогии с физическим явлением смещения масс горных пород по склону под воздействием силы тяжести. В данном случае наблюдается «сползание» акустической энергии вдоль наклонного дна под малыми углами от излучателя до тех пор, пока она не будет захвачена подводным звуковым каналом глубокого моря, где звук распространяется вблизи его оси на дистанции, превышающие 350 км. Данный эффект играет ключевую роль для методов акустической навигации, развитых в работах коллектива под руководством д.т.н. Моргунова Ю. Н. [44, 114–116], что подчеркивает практическую значимость его изучения.

В данном параграфе приводится результат специального экспериментально-теоретического исследования, целью которого являлось изучение влияния рельефа дна и гидрологических условий на распространение вдоль наклонного дна энергии тонального сигнала с частотой 320 Гц. По результатам натурных измерений выполнено согласованное моделирование формируемого акустического поля с помощью пакетов программ RAMs, основанного на теории широкоугольных параболических уравнений для водного слоя и упругого дна, а также его упрощенной модели RAM, не учитывающей упругие свойства дна (см. раздел 1.6.2) и пакета MPE, основанного на решении модовых параболических уравнений в приближении «жидкого» дна (см. раздел 1.6.3).

Эксперимент проводился на шельфе Японского моря в районе полуострова Гамова в осенний период (октябрь 2013 года). На рис. 2.1 приведена карта

района с указанием положения акустической трассы $S - p.1, \dots, p.7$, ориентированной перпендикулярно шельфу с перепадом глубины от 34 м до 85 м при удалении от источника на 18 км, т.е. дно имеет средний уклон равный 2,83 м/км. На этой трассе проводились натурные измерения с помощью тонального автономного резонансного излучателя электромагнитного типа частотой 320 Гц, установленного на дне в точке, отмеченной на карте как S . В точках $p.1, \dots, p.7$ акустические измерения проводились с помощью автономного акустического регистратора, объединенного с автономным зондом, опускаемых с борта дрейфующего научно-исследовательского судна «Малахит» (см. раздел 1.4).



Рис. 2.1. Карта района с указанием положения источника сигнала частотой 320 Гц – S и точек приема $p.1, \dots, p.7$.

В семи точках вдоль исследуемой трассы $p.1 - \dots - p.7$ были проведены измерения вертикального распределения интенсивности акустического поля, формируемого тональным автономным донным излучателем, установленным в точке S . На рис. 2.2а показаны графики вертикального распределения скорости звука $C_w(z)$ – кривая 1 и интенсивности акустического поля $I_w(z)$ – кривая 2, измеренные в точках $p.5, p.6$ и $p.7$. На рис. 2.2б показано пространственное

распределение значений функции потерь $TL(r, z)$, полученное с помощью модернизированной программы RAMs в модельном геоакустическом волноводе, параметры которого показаны на этом же рисунке.

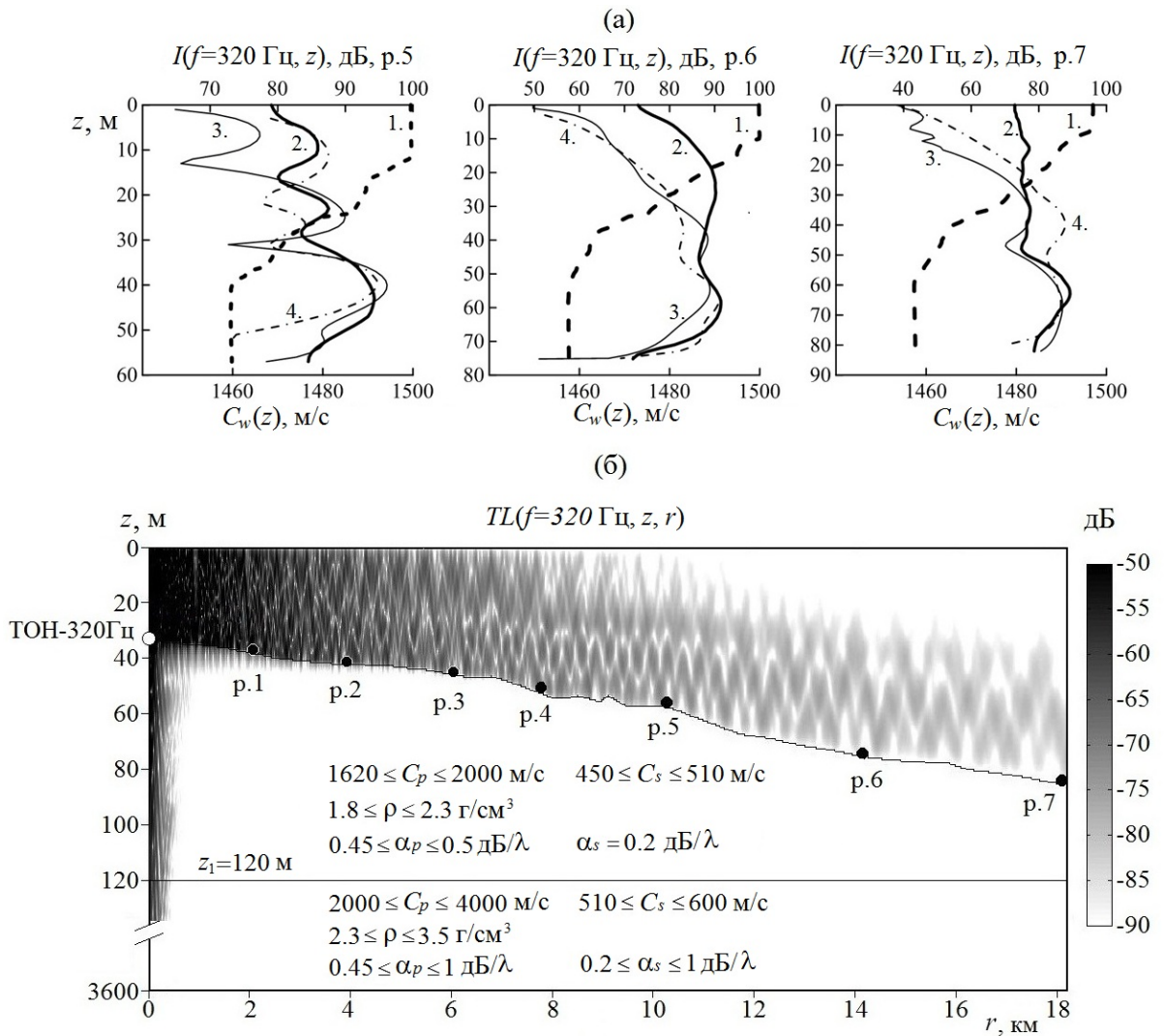


Рис. 2.2. Профиль скорости звука $C_w(z)$ – 1, вертикальное распределение значений измеренной интенсивности акустического поля $I_i^{exp}(z)$ – 2 и интенсивности модельных акустических полей $I_i^{model}(z)$ – 3 (RAMs) и 4 (МРЕ), формируемых эквивалентным точечным источником S на частоте 320 Гц (а). Геометрия и акустические параметры модельного геоакустического волновода, а также пространственное распределение функции потерь $TL(f = 320 \text{ Гц}, r, z)$ тонального акустического сигнала, генерируемого в точке S (б).

На рис. 2.2 видно, что значения геофизических параметров являются функцией от z в соответствии с вертикальным градиентом данной физической величины. В водном слое $C_p = C_w$, а в дне $C_p = 1620 + 3,17H \text{ м/с}$, где H – глубина моря. Глубже горизонта 120 м градиент становится равным $0,57 \text{ с}^{-1}$. Отметим,

что коэффициент поглощения α_p для продольных волн в дне до горизонта 120 м имеет отрицательный вертикальный градиент равный $-0,0004$ (дБ/λ)/м, где λ – длина волны, а глубже 120 м он становится положительным. Геоакустические параметры пород, слагающих дно, подобраны с помощью согласования модельных значений, рассчитанных с помощью программы RAMs, показанных на рис. 2.2а (кривая 3), с натурными значениями $I^{exp}(z)$ для точек р.5, р.6 и р.7 (кривая 2). Корректность подобранных значений скоростей звука продольных и поперечных волн, плотности и глубин осадочных слоев дна подтверждается цифровой геоакустической моделью залива Посьет, построенной по данным сейсмоакустических исследований и геологического опробования дна трубками и дночерпателями [117, 118]. Представленная модель прошла апробацию в серии гидроакустических экспериментов с использованием низкочастотных гидроакустических излучателей, а в качестве приема – берегового лазерного деформографа [119, 120] и трехкомпонентного виброметра [121]. Также отметим, что в модельном геоакустическом волноводе, пересекающем бухту Витязь, при изменениях значений C_p на ± 100 м/с искажалась только интерференционная картина, а при изменениях C_p на ± 200 м/с изменения усредненных значений потерь на частоте 52 Гц достигали 5 дБ [90].

Интенсивность модельного точечного источника эквивалентного автономному излучателю была получена с помощью натуральных измерений и численного моделирования, проведенных на расстоянии 2 км в точке р.1, и соответствует значению $I_{src}^{model}(r = 1 \text{ м}) = 168$ дБ. На рис. 2.3 видно, что уровень акустических шумов от дрейфующего судна «Малахит» с выключенным двигателем на частоте 320 Гц примерно равен 73 дБ, поэтому графики $I_i^{exp}(z)$, показанные на рис. 2.2а, не могут опуститься ниже этого значения. При этом модельный график $I_i^{model}(z)$ такого ограничения не имеет, и поэтому при приближении к поверхности моря в точках приема значение интенсивности может уменьшаться до нулевой амплитуды ввиду постановки на поверхности условия мягкой границы (нулевое условие Дирихле).

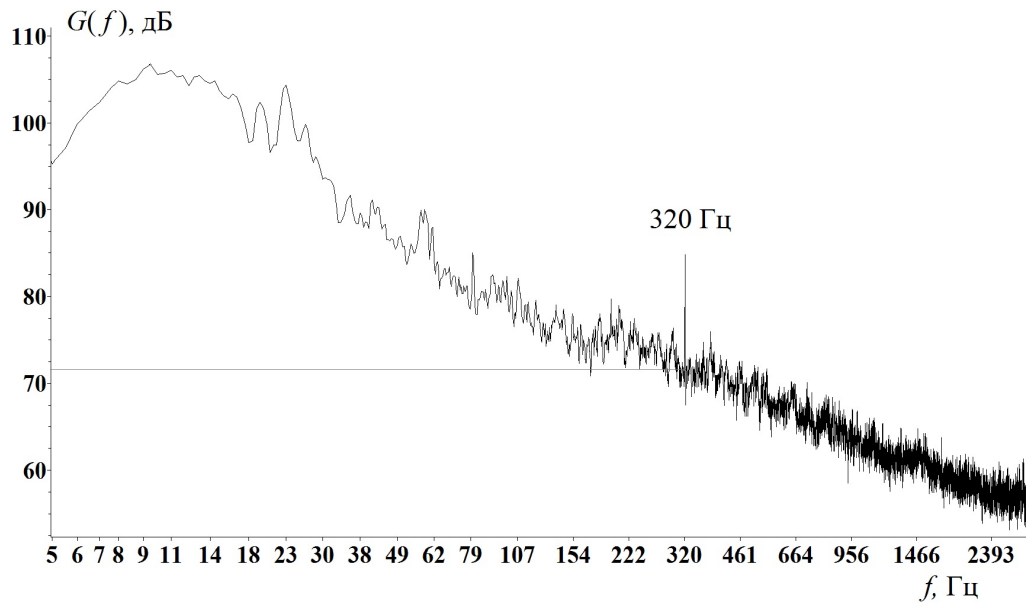


Рис. 2.3. Спектр акустических шумов, формируемых судном «Малахит» в море глубиной 82 м (около р.7) на горизонте 70 м в режиме дрейфа с неработающим двигателем.

Для сравнения на рис. 2.2а приведены модельные значения $I^{model}(z)$ (кривая 4), рассчитанные с помощью МРЕ для данного геоакустического волновода в приближении «жидкого дна». В точках р.6 и р.7 модельные значения I^{model} – кривые 3 и 4 подобны и согласуются по величине, если положить $I_{src}^{model}(r = 1 \text{ м}) = 150 \text{ дБ}$, т.е. на 18 дБ меньше, чем при моделировании, проведенном с помощью RAMs. Можно предположить, что увеличение потерь при распространении на шельфе звука с частотой 320 Гц, проведенное с помощью программы RAMs, обусловлено возбуждением в дне поперечных волн, и это согласуется с результатами экспериментальных и модельных исследований потерь при распространении низкочастотного звука, проведенных в этом районе шельфа Японского моря.

При согласовании модельных значений функции потерь с экспериментальными относительно произвольной является величина коэффициента поглощения $\alpha_p(z)$, позволяющая учесть отток энергии из распространяющихся продольных волн в поперечные волны. На рис. 2.4 представлены экспериментальный и три модельных графика значений $I(z)$, рассчитанные для эквивалентного точечного источника $I_{src}(r = 1 \text{ м}) = 168 \text{ дБ}$, расположенного в модельном гео-

акустическом волноводе в точке S. На этом рисунке видно, что при одинаковых значениях акустических параметров пород, слагающих дно, интенсивность модельных полей, рассчитанных в приближении «жидкого» дна в программах MPE и RAM в среднем на 18 дБ выше, чем с учетом «упругих» свойств дна.

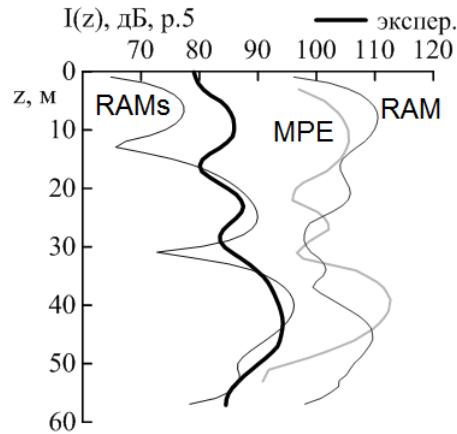


Рис. 2.4. Вертикальные распределения экспериментально измеренной интенсивности акустического поля $I^{exp}(z)$ в точке р.5 и интенсивности модельных акустических полей $I^{model}(z)$, рассчитанных с помощью программы RAMs, программы МПУ и программы RAM для эквивалентного точечного источника $I_{src}^{model}(r = 1 \text{ м}) = 168 \text{ дБ}$, расположенного в точке S.

На рис. 2.5 приведены результаты гидрологических и акустических измерений, проведенных в четырех точках акустической трассы S – р.7, удаленных от излучателя на 2, 4, 6 и 18 км. Видно, что на относительно мелководном 35 – 40 м участке акустической трассы толщина приповерхностного однородного слоя воды со значением скорости звука $C_w \approx 1498 \text{ м/с}$, равна $\approx 21 \text{ м}$. Толщина сезонного пикноклина с вертикальным градиентом скорости звука $3,4 \text{ с}^{-1}$ равна $\approx 10 \text{ м}$. При удалении от берега и увеличении глубины моря толщина однородного приповерхностного слоя уменьшается до 10 м (см. рис. 2.2а), а толщина слоя сезонного пикноклина увеличивается до 50 м с соответствующим уменьшением в нем вертикального градиента скорости звука до $0,8 \text{ с}^{-1}$.

Графики $I^{exp}(z)$, представленные на рис. 2.2а и 2.5, а также интерференционная картина модельного акустического поля, формируемого точечным источником звука, расположенным у дна в начале данной акустической трассы качественно и количественно характеризуют эффект «захвата» распростра-

ющейся в сторону Японского моря энергии акустических волн придонным звуковым каналом. На рис. 2.5 видно, что в точке р.7 глубина моря равна 82 м, максимальная интенсивность сигнала наблюдается на горизонте 64 м, а согласно гидрологическим измерениям в этой точке глубже горизонта 58 м начинается придонный однородный слой со значением приблизительно равным 1458 м/с.

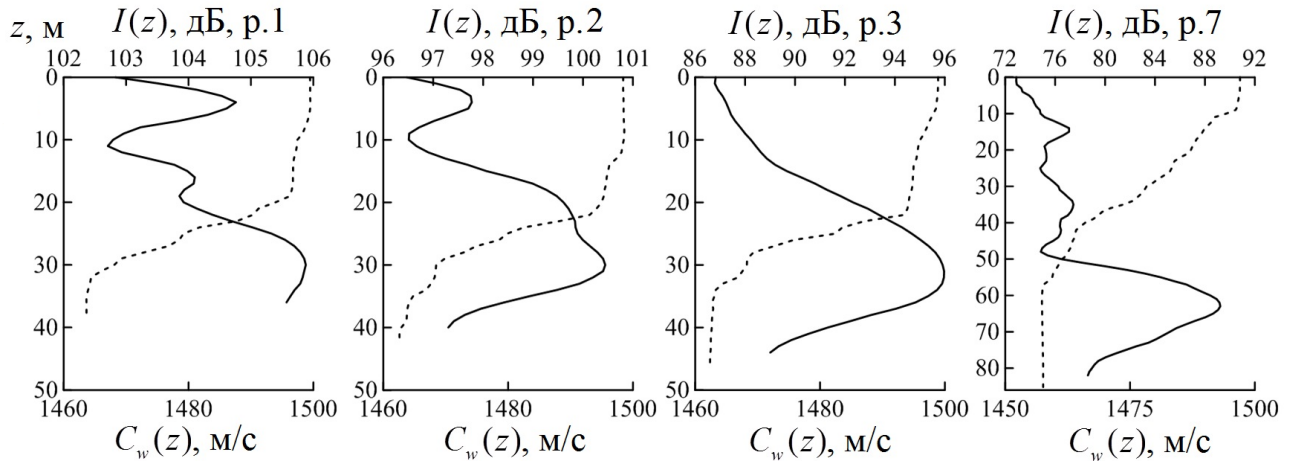


Рис. 2.5. Вертикальные распределения значений скорости звука $C_w(z)$ в водном слое – штриховая линия и экспериментально измеренной интенсивности акустического поля $I^{exp}(z)$ – сплошная линия, формируемого на акустической трассе S – р.7 стационарным излучателем.

Поскольку удалось подобрать модель геоакустического волновода, позволяющую с помощью программы RAMs для тонального акустического сигнала рассчитывать формируемое им на данном участке шельфа Японского моря акустическое поле, параметры которого согласуются с результатами натурных измерений, то представляет интерес сравнить результаты моделирования на акустической трассе, продолженной до материкового склона и далее в Японское море для летне-осенних и зимних гидрологических условий. При построении пространственного распределения значений $C_w(r, z)$ на таком акустическом профиле предположено, что на дистанциях больше 18 км вертикальный профиль $C_w(z)$ сохраняется неизменным до горизонта 90 м, а в слое 90 – 350 м его значения соответствуют измерениям, представленным в работе [111]. Глубже горизонта 350 м, из-за увеличения плотности, в вертикальном профиле появляется положительный градиент, равный $0,0167 \text{ с}^{-1}$. Благодаря зимним конвективным

процессам, водный слой на шельфе и в море становится примерно однородным со средним значением $C_w = 1460$ м/с. На рис. 2.6 представлены соответствующие этим моделям вертикальные распределения $C_w(z)$.

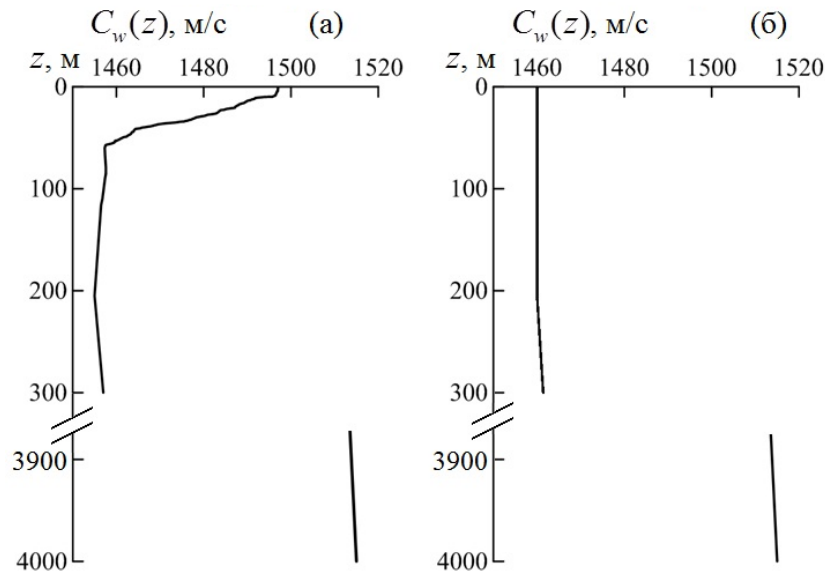


Рис. 2.6. Модельные вертикальные распределения значений скорости звука $C_w(z)$ в водном слое для летне-осенних (а) и зимних (б) гидрологических условий.

Результаты расчетов пространственных значений функции потерь $TL(r, z)$, проведенных для распределений $C_w(z)$, показанных на рис. 2.6, представлены на рис. 2.7. В летне-осенних гидрологических условиях, 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. Данный результат согласуется с эффектом, описанным в работе [111]. В зимних гидрологических условиях 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, и в этом случае, согласно рис. 2.7б, в море формируются обширные (более 30 км) приповерхностные зоны тени и зоны конвергенции.

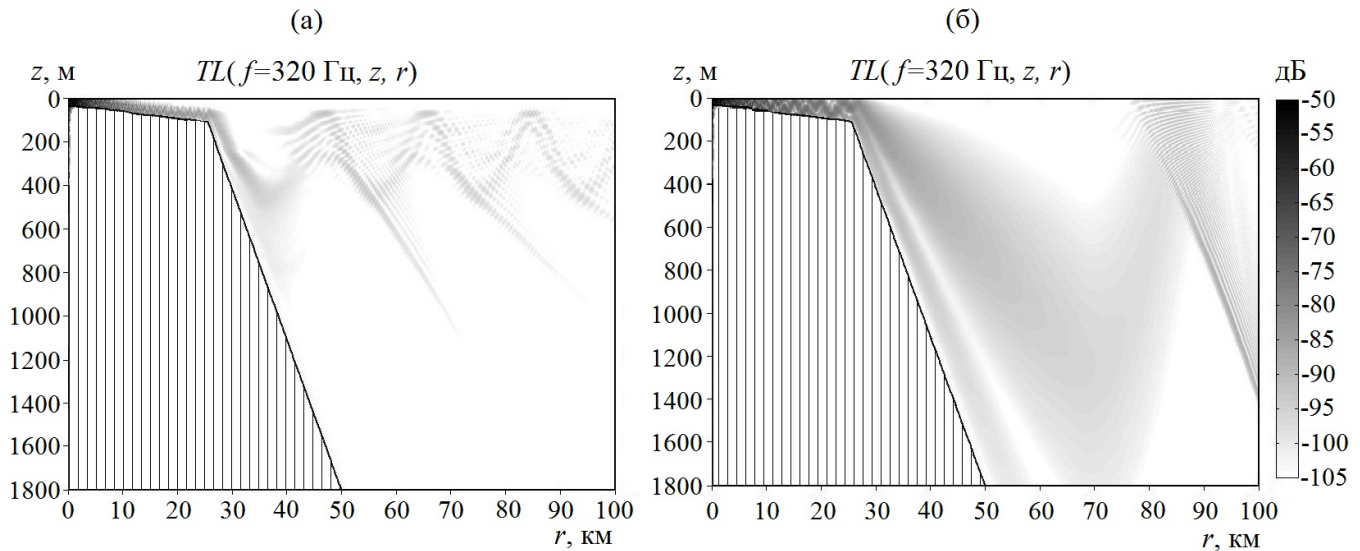


Рис. 2.7. Модельное распределение значений функции потерь для акустического поля, формируемого тональным источником расположенным у дна в мелководной области шельфа в летне-осенних (а) и зимних (б) гидрологических условиях.

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы. Экспериментально подтверждено явление захвата энергии звуковых колебаний на частоте 320 Гц придонным звуковым каналом при условии наличия наклонного дна с градиентом 2,83 м/км, выраженного термоклина в водном слое, наблюдающегося вдоль трассы распространения, а также размещение источника звука вблизи дна. С помощью пакетов программ RAMs, MPE и RAM удалось получить согласованные с экспериментальными значениями потери звука и структуру интерференционной картины на расстоянии 18 км от источника в семи точках приема звука. Вычисления показали, что модель геоакустического волновода в приближении «жидкого» дна дает значения акустического поля на 18 дБ больше, чем модель волновода с теми же параметрами, но учитывающая упругие свойства дна. Естественно предположить, что существенное изменение потерь звука вызвано возбуждением в дне сдвиговых волн, наличие которых подтверждает выход горных пород в рассматриваемом районе. Кроме этого, численные расчеты позволили теоретически предсказать поведение звука при удлинении акустической трассы до материкового склона и далее в Японское море для различных гидрологических условий. В результате расчетов был об-

наружен и качественно исследован «эффект оползня» для звука частотой 320 Гц в летне-осенних гидрологических условиях. Важно выделить, что 1) «оползень» наблюдается в тех же условиях, что и в работе [111], и не наблюдается в других условиях; 2) впервые выполнено качественное и количественное исследование пространственной структуры акустического поля при оползневом характере распространения звука вдоль шельфа, причем структура, обнаруженная в эксперименте, объяснена с помощью моделирования как методом параболического уравнения (РАМ(s)), так и методом нормальных волн (МРЕ).

2.1.2. Потери звука при распространении в условиях термоклина и однородной воды

Известно, что распространяющиеся на шельфе акустические волны взаимодействуют с пространственными неоднородностями поля скорости звука C_w , формируемыми в водном слое гидродинамическими процессами: поверхностными и внутренними волнами [122–126], фронтальными образованиями [127, 128], приливом [129, 130], случайными флуктуациями скорости звука в водном слое [131–133]. В большинстве случаев рефракция и рассеяние распространяющихся акустических волн на неоднородностях поля скорости звука приводит к флуктуациям параметров формируемого в таком волноводе акустического поля, например, к вариациям интенсивности $I(t)$ и фазы $\phi(t)$ в стационарной точке приема тонального сигнала [122, 134, 135], к частотным смещениям интерференционных максимумов волнового поля [136, 137].

Сравнение акустических полей, формируемых тональным излучателем в мелководной части акватории в разных гидрологических условиях, удалось получить в специальных исследованиях, проведенных на северо-восточном шельфе о. Сахалин. В описанном ниже эксперименте приводятся результаты натуральных измерений и численного моделирования, опирающегося на опорные экспериментальные данные в типовых трехмерных геоакустических волноводах. Тональные акустические сигналы с частотами 15 – 5000 Гц генерировались с

помощью резонансного излучателя электромагнитного типа и широкополосного излучателя пьезокерамического типа [77], свешиваемых на горизонт 10 м с борта стоящего на якоре судна.

Параметры дна модельного геоакустического волновода, используемого в численных расчетах, имеют максимальное приближение к реальной структуре донных слоев за счет уникальных данных о пространственных распределениях значений продольной скорости звука в дне, построенные по результатам сейсморазведочных исследований нефтегазодобывающей компании *Exxon Neftegas Limited* в 2015 году (подробнее см. раздел 2.2.2). С учетом этих данных удалось согласовать модельные значения функции потерь $TL(x, z, f)$ с экспериментальными.

На рис. 2.8а показана карта района северо-восточного шельфа о. Сахалин, где в августе 2007 г. были проведены исследования функции потерь $TL(x, f)$ на акустических трассах «G — Odoptu-N-10» (9,5 км), «G — A9» (12,7 км) и «G — Odoptu-S-10» (12,6 км). Излучение тональных сигналов происходило в точке G, прием звука осуществлялся у дна в точках Odoptu-N-20 на 20-метровой изобате и A-9, Odoptu-N-10 и Odoptu-S-10 вблизи 10-метровой изобаты. На рис. 2.8б и 2.8в показаны распределения в вертикальной плоскости водного слоя значений поля скорости звука $C_w(x, z)$, соответствующие гидрологическим условиям на данной акустической трассе 3 августа (21:52 – 23:39) — *alpha* и 8 августа (15:55 – 18:55) — *beta*. Поскольку акустические и гидрологические измерения проводились 3 и 8 августа, то согласно рис. 2.8 мы можем сравнить потери при распространении тональных акустических сигналов вдоль трасс, показанных на рис. 2.8а, в условиях однородной гидрологии, сформированной апвеллингом (*alpha*), и выраженного сезонного термоклина (*beta*), простирающегося на глубине 5 – 15 метров от точки излучения G, в которой глубина моря равна 31 м, до точки приема Odoptu-N-10 (толщина водного слоя равна 11 м).

Результаты экспериментальных исследований значений функции потерь TL , усредненных в треть-октавных полосах на акустических профилях «G —

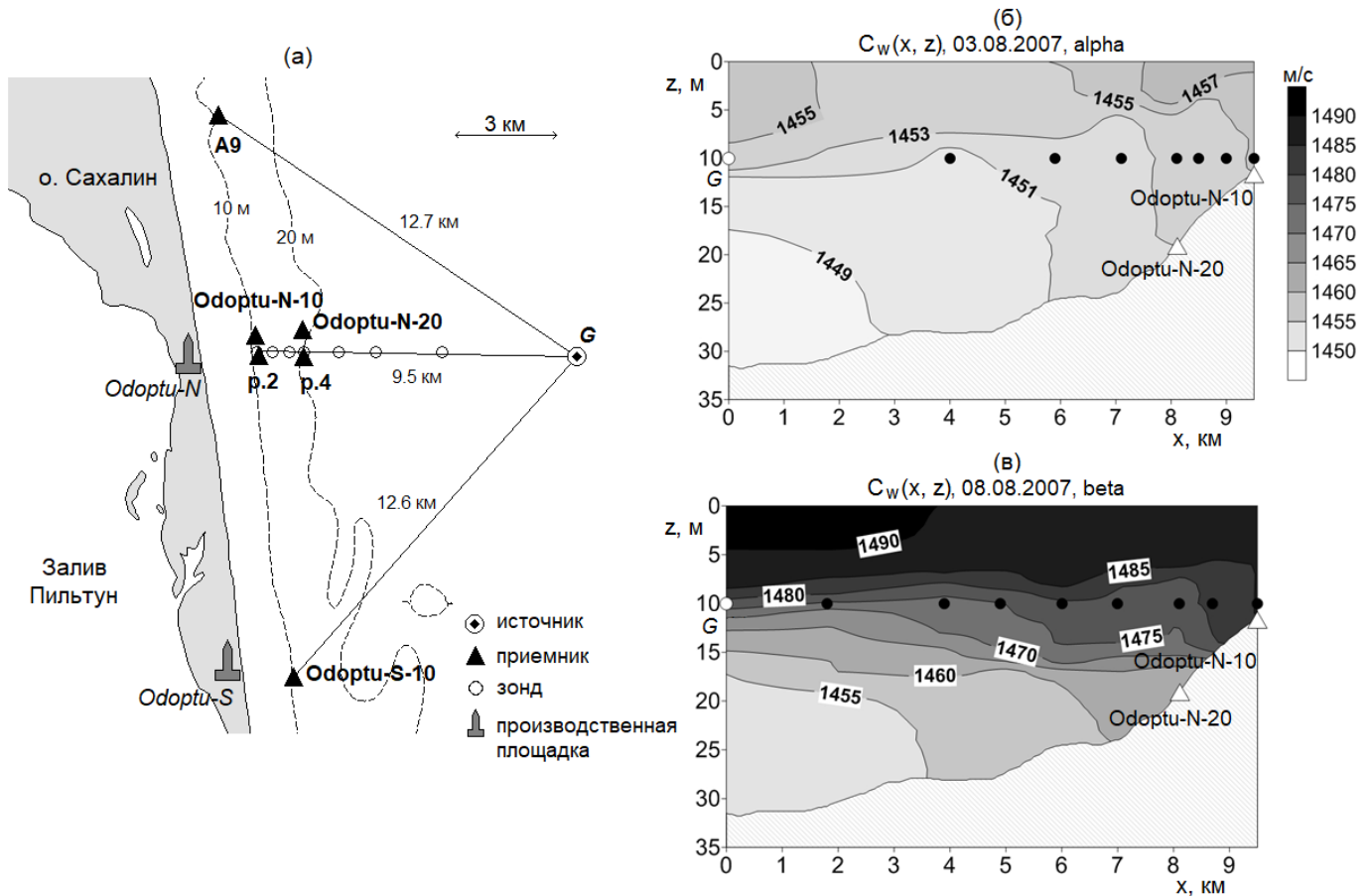


Рис. 2.8. Карта района исследований с указанием точки излучения G, точек приема акустических сигналов, и точек, в которых были выполнены гидрологические зондирования (а), а также приведены вертикальные распределения значений скорости звука в водном слое, измеренные 3 августа (б) и 8 августа (в).

Odoptu-N-10 (р.2)» и «G – Odoptu-N-20 (р.4)» в разных гидрологических условиях, представлены на рис. 2.9.

Согласно графикам $TL(f)$ для точек акустических измерений Odoptu-N-10 и р.2, расположенных на 10 м изобате, при однородной гидрологии на частотах больше 90 Гц потери на распространение вдоль акустической трассы протяженностью 9,5 км и ориентированной перпендикулярно берегу на 6 – 10 дБ меньше, чем при выраженном термоклинe. При распространении звука от источника G до 20 метровой изобаты в точках акустических измерений Odoptu-N-20 и р.4 при однородном водном слое на частотах больше 100 Гц потери меньше, примерно, на 6 дБ. Данное явление имеет следующее физическое объяснение. При однородном водном слое звук распространяется во всем водном слое, а при на-

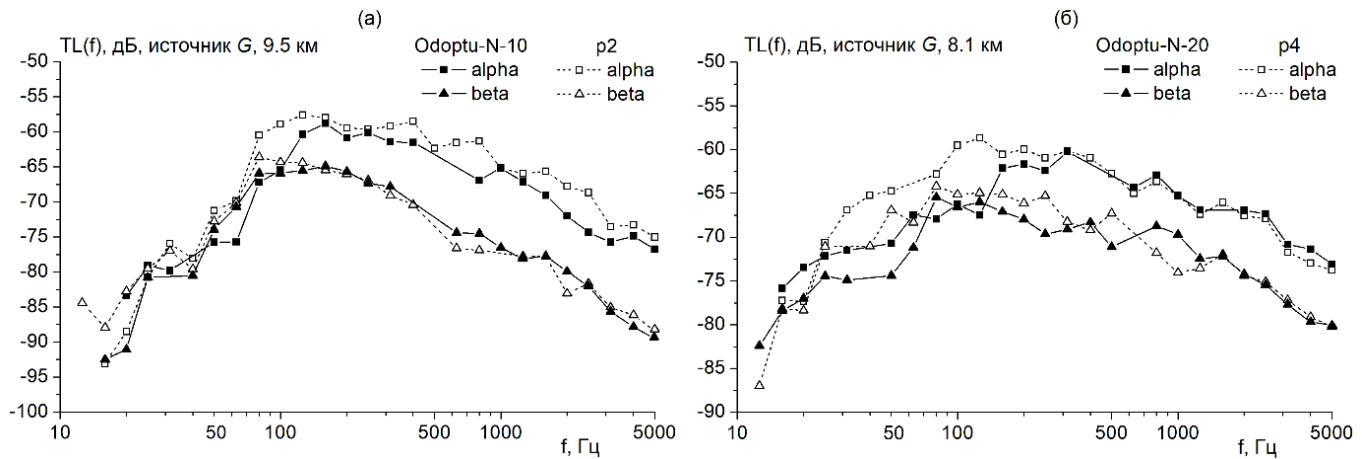


Рис. 2.9. Экспериментальные значения $TL(f)$ для точек Odoptu-N-10, p.2 (а) и Odoptu-N-20, p.4 (б) для однородной воды $alpha$ и термоклина $beta$.

личии сезонного термоклина распространяющийся звук концентрируется в придонном звуковом канале и в большей степени рассеивается и поглощается дном. На частотах меньше 80 Гц изменение гидрологических условий практически не оказывает влияния на потери при распространении звука на данных акустических трассах. Ниже (раздел 2.2.2) будет показано, что на значение потерь на частотах меньше 70 Гц могут оказывать существенное влияние пространственные неоднородности поля значений скорости распространения продольных волн в дне, т.е. потери могут изменяться при смещении вдоль берега трассы распространения звука.

Перейдем к рассмотрению результатов измерений, проведенных на двух трассах «G – A9» и «G – Odoptu-S-10» с подобными батиметрическими и геометрическими параметрами, показанными на рис. 2.10а. На рис. 2.10б приведены экспериментальные оценки значений потерь при распространении тональных акустических сигналов с частотами 15 – 5000 Гц. В данном случае влияние термоклина на значение функции потерь подобно наблюдавшемуся при измерениях, проведенным на трассе «G – Odoptu-N-10». На частотах выше 200 Гц потери в волноводе с термоклинном на 10 дБ и более превышают потери звука при распространении в волноводе с однородной водой, а на частотах выше 1000 Гц меньше на 20 дБ. На частотах до 100 Гц влияние гидрологии не заметно, но

на трассе «G – A9» в диапазоне 20 – 100 Гц в среднем потери на 5 дБ меньше, чем на трассе «G – Odoptu-S-10», что, по всей видимости, связано с наличием неоднородностей в поле скорости звука в дне вдоль трассы распространения.

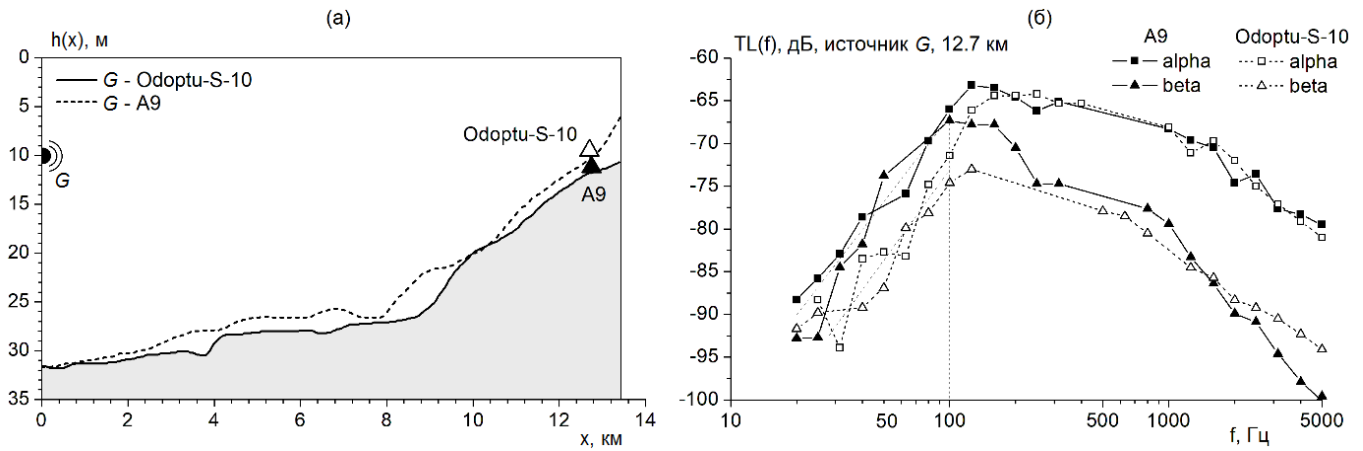


Рис. 2.10. Профиль дна на акустических трассах «G — A9» и «G — Odoptu-S-10» (см. рис. 2.8а) (а) и экспериментальные значения $TL(f)$, измеренные в однородных ($alpha$) и в неоднородных ($beta$) гидрологических условиях (б).

На рис. 2.11 к экспериментальным данным добавлены результаты численного моделирования, проведенного с помощью МРЕ для трехмерного геоакустического волновода с вертикальными распределениями значений основных акустических параметров, показанных на рис. 2.12. На графике профиля скорости звука в дне $C_p(z)$ серым цветом отображено множество разрезов данных сейморазведочного профилирования вдоль акустической трассы. Модельный профиль $C_p(z)$ построен по аппроксимации экспериментальных разрезов до горизонта 120 м.

Расчеты были проведены для двух вертикальных профилей значений скорости звука в воде C_w , соответствующих натурным измерениям, выполненным 3 и 8 августа (см. рис. 2.8б и в). Параметры расчетной сетки, ширина и глубина модельного волновода, а также число моделируемых распространяющихся нормальных акустических мод, зависящие от частотного диапазона, приведены в табл. 2.1.

Экспериментально и теоретически показано, что при распространении на

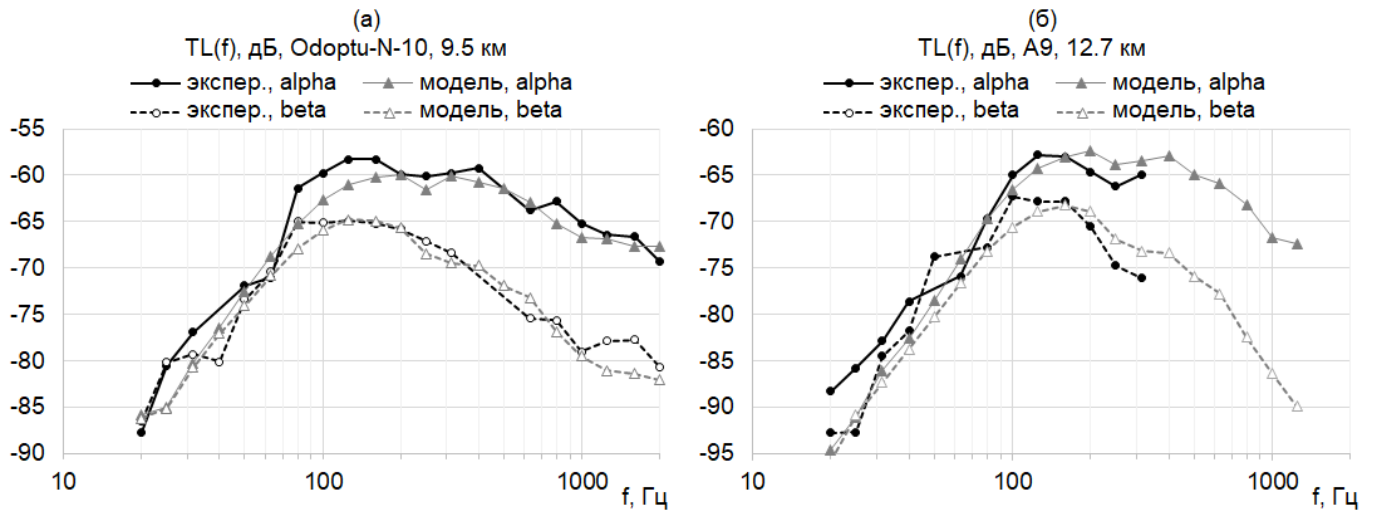


Рис. 2.11. Экспериментальные и модельные значения потерь $TL(f)$ при распространении тональных сигналов вдоль акустических трасс «G – Odoptu-N-10» и «G – A9» в разных гидрологических условиях.

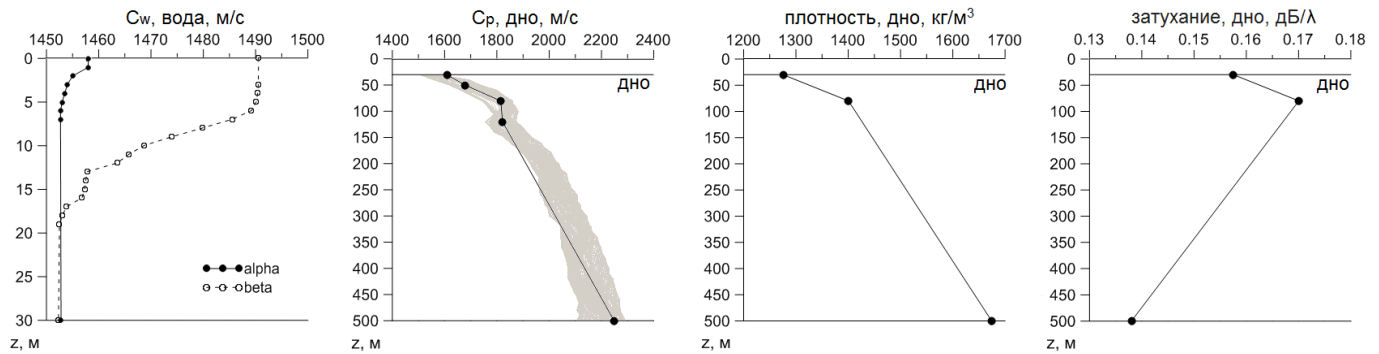


Рис. 2.12. Акустические параметры модельного геоакустического волновода.

Таблица 2.1. Параметры моделирования $TL(x, y, z, f)$. Y_{max} — ширина волновода, Z_{max} — глубина волновода.

Δf , Гц	Моды	Шаг сетки, м	Размеры, км
20–160	1–3	$\Delta r = 2, \Delta y = 1, \Delta z = 1$	$Y_{max} = 4, Z_{max} = 1$
200–315	1–3	$\Delta r = 1.8, \Delta y = 0.5, \Delta z = 0.5$	$Y_{max} = 4, Z_{max} = 0.5$
400–630	1–5	$\Delta r = 1.8, \Delta y = 0.2, \Delta z = 0.2$	$Y_{max} = 2, Z_{max} = 0.1$
800–1200	1–15	$\Delta r = 1.8, \Delta y = 0.1, \Delta z = 0.1$	$Y_{max} = 0.2, Z_{max} = 0.08$
1600–2000	1–20	$\Delta r = 1.8, \Delta y = 0.05, \Delta z = 0.05$	$Y_{max} = 0.01, Z_{max} = 0.05$

относительно мелководном 10 – 30 м шельфе в сторону берега из-за влияния поля скорости звука в водном слое на частотах более 80 Гц потери могут изменяться на 6 – 20 дБ. Потери звука при распространении перпендикулярно в сторону берега минимальны, когда водный слой однородный и холодный. Сезонный термоклин (точнее пикноклин, поскольку распресненная стоком Амура поверхностная вода теплее соленой Охотоморской воды) 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. Результаты численного моделирования, полученные с помощью трехмерной программы MPE, показали согласие с результатами экспериментальных измерений и поэтому могут быть применены для селективной оценки эффектов от пространственных неоднородностей в поле значений скорости звука в водном слое, которые формируются известными гидродинамическими источниками: внутренними волнами [124], внутренним приливом [138], движущимися фронтальными образованиями [135].

2.2. Волновод с пространственной неоднородностью осадочного слоя

2.2.1. Импульсное акустическое поле, формируемое в бухте с осадочным грунтом

Практическая деятельность людей на шельфе часто сопровождается производственными работами, которые могут увеличивать шумовую нагрузку на прилегающую территорию. В результате таких работ генерируются низкочастотные сейсмоакустические сигналы, энергия которых распространяется не только в водном слое, но и в осадочных слоях, слагающих дно, а также в ко-

ренных породах. Кроме того, на распространение акустических колебаний в шельфовой зоне могут влиять пространственные неоднородности береговой линии, выступающие мысы и острова, а также слой накапливаемого осадочного грунта, характерный для обособленных водных зон типа бухт.

Ниже обсуждаются результаты экспериментальных исследований, проведенных в мае 2013 г. на шельфе Японского моря в районе полуострова Гамова в относительно глубоководной бухте Витязь (залив Посъета). Бухта окружена пологими берегами с песчаными и гравийными пляжами. На выходе из бухты располагаются три небольших скалистых острова Таранцева. Бухта характеризуется сложным рельефом дна с накапливаемым осадочным слоем, который формируется за счет течений, впадающих в бухту ручьев и дождевых стоков. Целью эксперимента являлось натурное и численное изучение влияния осадочного грунта, накапливаемого над коренными породами в бухте, на формирование низкочастотного акустического поля.

На рис. 2.13 приведена карта района с указанием точки постановки донной станции – R , а также равноудаленных относительно R точек излучения низкочастотного импульсного сигнала $r.1$ — из бухты и $r.2$ — со стороны моря. Протяженность акустических трасс составляет 2 – 2,2 км. Глубина моря в точке приема R равна 36 м.

В рассматриваемом эксперименте стационарные измерения вариаций акустического давления у дна проводились в частотном диапазоне 2 – 2000 Гц с помощью гидрофона типа ГИ-50 и цифрового радиобуя — ЦРБ. Акустический низкочастотный импульсный сигнал генерировался пневмоизлучателем, свешиваемым с борта дрейфующего катера на горизонты 5 – 10 м (описание излучателя и способ постановки акустической станции приведено в разделе 1.4). Опорные акустические измерения проводились с помощью гидрофона ЦРБ, опускаемого с борта катера на глубину источника на удалении около 18 м от пневмоизлучателя. Цифровые радиотелеметрические каналы от ЦРБ, установленного в море, и опорного ЦРБ, расположенного на излучающем катере, принимались

на береговом посту, расположенном на мысе Шульца, и синхронно вводились в ЭВМ с помощью АЦП.

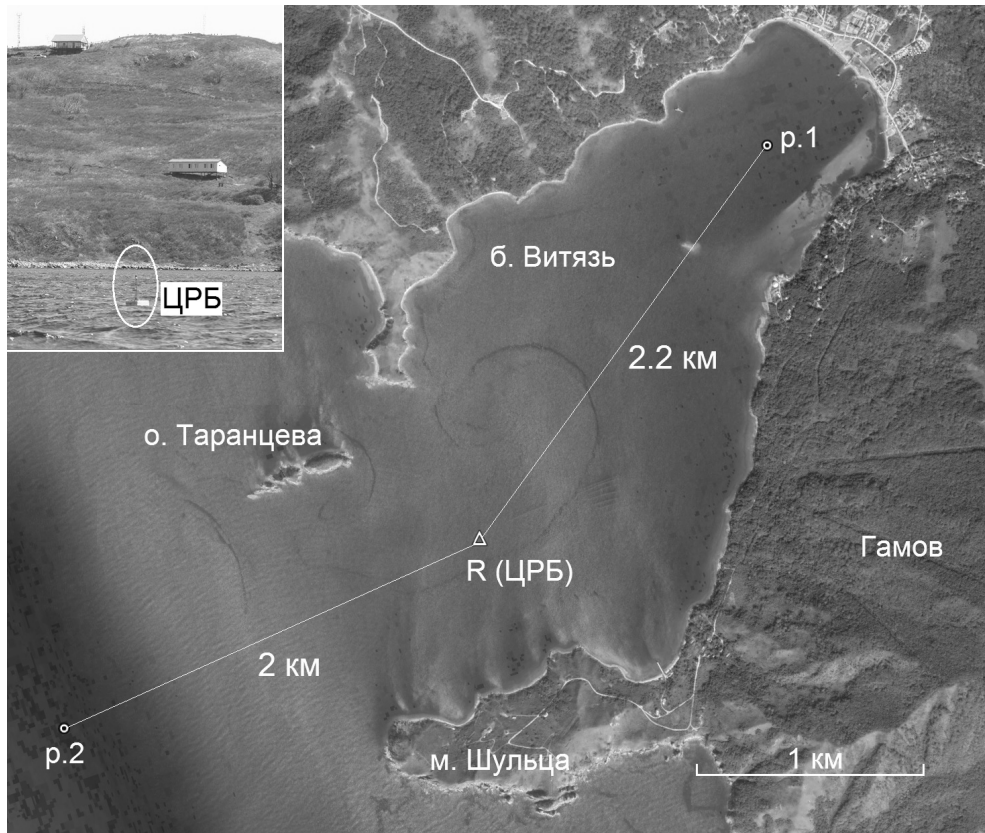


Рис. 2.13. Спутниковый снимок района б. Витязь (залив Посьета, Японское море) с указанием точки приема R и точек излучения в бухте р.1 и в море р.2, фотография поплавка ЦРБ на фоне м. Шульца.

В районе точки р.1 серия излучения импульсных сигналов была проведена в радиусе 150 м с разных горизонтов 3 – 10 м. В результате излучаемая акустическая мощность для всех точек была разной. Согласно [139], отношение акустических мощностей при наличии поверхности воды W и в безграничном пространстве W_0 для частоты звука 60 Гц ($\lambda = 24$ м) при расположении источника на горизонте 3 м составляет $W/W_0(z_s = 3\text{ м}) = 0,36$, на горизонтах 5 м и 10 м соответственно: $W/W_0(z_s = 5\text{ м}) = 0,8$ и $W/W_0(z_s = 10\text{ м}) = 1,17$. При излучении на горизонтах 8 м и 10 м происходила максимальная отдача энергии сжатого воздуха пневмоизлучателя в воду, и, как следствие, в точку R приходили импульсы с наибольшей амплитудой. Изменения амплитуды принятых сигналов, наблюдаемых в эксперименте, происходили за счет глубины положе-

ния пневмоизлучателя, а не за счет смещения точки излучения. На рис. 2.14 показаны вариации акустического давления опорного гидрофона (а) и донного гидрофона R (б) при излучении из точки p.1 на горизонте 8 м. Из графиков видно, что пиковая амплитуда опорного сигнала превышала значения 400 Па, длительность сигнала составила 0,2 с. В точке R акустический сигнал был принят в виде двух разделенных импульсов с примерно равными амплитудами, не превышающих 10 Па. На некоторых записях после второго импульса наблюдались затяжные «хвосты».

Протяженность акустической трассы p.2 — R составляет 2 км. Трасса ориентирована с моря в сторону бухты и имеет небольшой перепад глубин с 33 м в точке источника до 36 м в точке приема R без выраженных неоднородностей батиметрии вдоль трассы. При исследовании распространения импульсного сигнала из точки p.2 эффекта двойного импульса не наблюдалось. На рис. 2.14 показаны опорный и принятый сигналы при излучении на горизонте 5 м из точки p.2. Во временной области виден прямой импульс с пиковой амплитудой 7 Па и последующие хвосты, пиковая амплитуда которых не превышала 1 Па. Отметим, что показанные на рис. 2.14 импульсные сигналы были сгенерированы в точках p.1 и p.2 на разных горизонтах, по этой причине пиковая амплитуда импульса в точке p.2 меньше, чем в точке p.1.

Для определения временной задержки между фронтами приходящих импульсов были рассчитаны функции автокорреляции (АКФ) и взаимной корреляции (ВКФ) опорного сигнала и сигнала, принятого в точке приема:

$$B(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^T [p_t^{ref} \cdot p_{t+\tau}^R]}{\sqrt{\sum_{t=0}^T (p_t^{ref})^2 \cdot \sum_{t=0}^T (p_{t+\tau}^R)^2}}, \quad (2.1)$$

где p_t^{ref} и p_t^R — значения звукового давления, измеренные опорным гидрофоном вблизи пневмоизлучателя и в точке приема R соответственно; T — временной

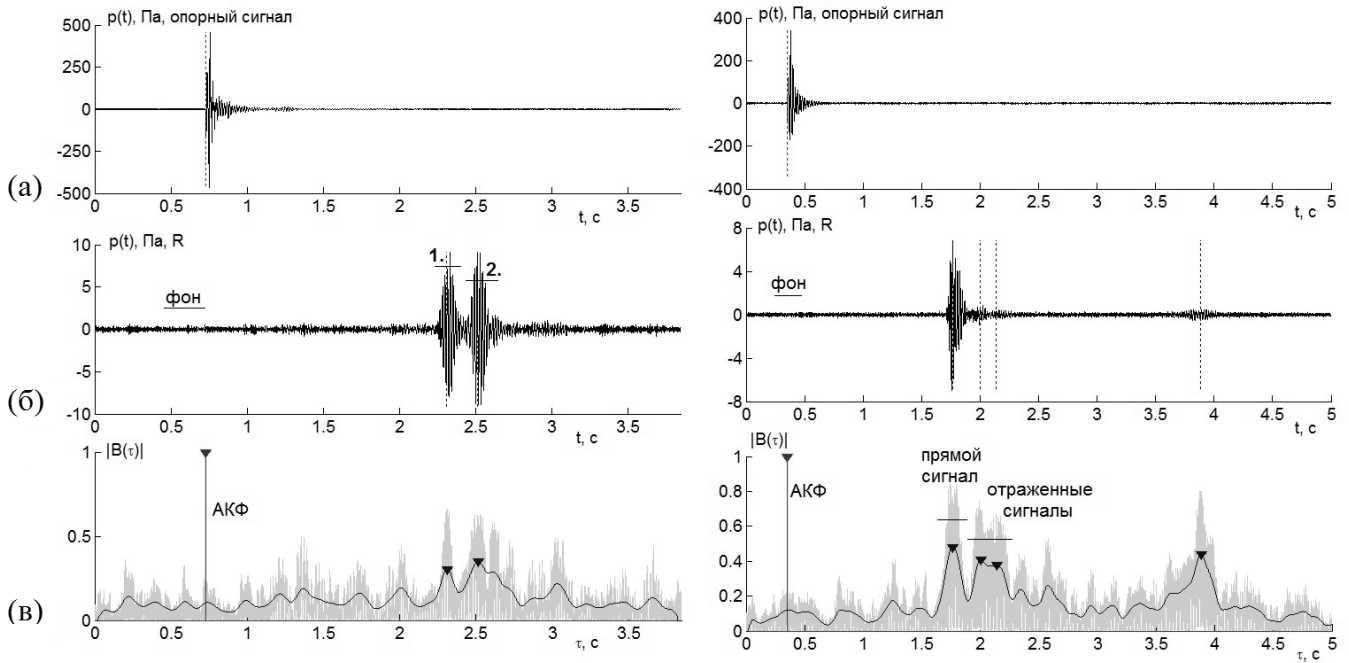


Рис. 2.14. Опорные сигналы при излучении из точек p.1 (левый столбец) и p.2 (правый столбец) (а), принятые сигналы в точке R (б), значения модуля нормированной автокорреляционной и взаимной корреляционной функций (в).

интервал опорного импульса. Результат корреляционного анализа для двух акустических трасс показан на рис. 2.14в в виде значений функции $|B(\tau)|$ после сглаживания на временном интервале равном 48 мс. Также отмечены пики корреляционной функции, соответствующие порогу срабатывания «сходства» опорного импульса с принятым сигналом. Для трассы p.2 – R наибольшее значение функции $|B(\tau)|$ соответствует времени прихода «прямого» водного импульса, затем наблюдаются импульсы, которые согласно расчетам, являются отражениями, в том числе от островов Таранцева. Последний зафиксированный корреляционной функцией импульс имеет задержку 3,53 с и значение нормированной корреляционной функции равным 0,8, что говорит о его высокой степени сходства с излученным сигналом.

Наибольший интерес представляет природа разделения импульсов при распространении вдоль бухты низкочастотного сигнала из точки p.1. Корреляционная функция показала, что разность времени прихода первого и второго импульса составила 0,204 с. Оба импульса имеют почти равные коэффициен-

ты сходства с опорным сигналом и равные пиковые амплитуды акустического давления. На рис. 2.15 приведены графики спектральной плотности мощности $G(f)$, рассчитанные по данным опорного сигнала, зарегистрированного на расстоянии 18 м от точки излучения р.1, и по временным интервалам 1. и 2., показанных на рис. 2.14б. Основная энергия генерируемого сигнала приходится на частотный диапазон 40 – 70 Гц, а также наблюдается энергия колебаний на частотах 80 – 200 Гц, которая с потерями 30 – 40 дБ распространяется от р.1 до точки приема R. С наименьшими потерями распространяется акустическая энергия в диапазоне частот 50 – 54 Гц. Заметим, что каждый из разделенных импульсов имеет почти одинаковые уровни спектральной плотности мощности.

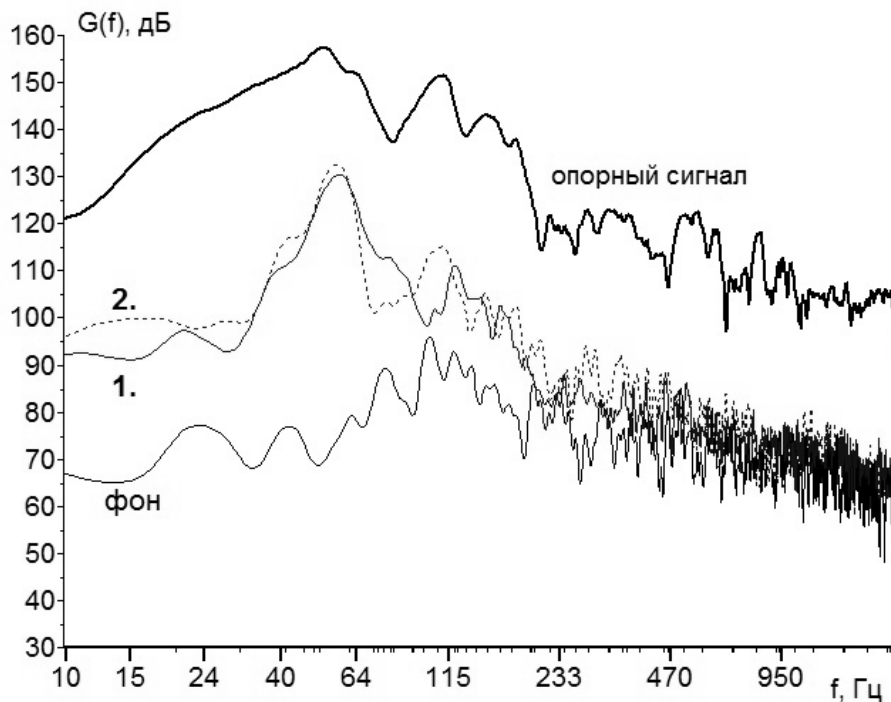


Рис. 2.15. Спектры акустических сигналов, рассчитанные по опорным измерениям в точке р.1 и временным интервалам 1. и 2. принятого сигнала, показанного на рис. 2.14б.

Объяснить наличие двух импульсов, формируемых вдоль акустической трассы р.1 — R, основываясь на отражении излученного сигнала от берегов бухты Витязь, сложно. Экспериментальные исследования согласно работе [90] показали, что пространственные неоднородности скалистого берега под водой эффективно отражают звук до 70 Гц и рассеивают на частотах от 100 Гц. Подоб-

ное отражение акустических колебаний мы видим при излучении импульсного сигнала из точки р.2. Как было сказано выше, бухту Витязь окружают преимущественно пологие берега с песочными и галечными пляжами без выраженных скалистых образований (см. фото на рис. 2.13). Звук на низких частотах, распространяясь в сторону берега, в следствие уменьшения глубины будет затухать, поэтому любые отражения должны приводить к резким уменьшениям амплитуды отраженного импульсного сигнала, что противоречит наблюдениям. Отражение звука от скалистых островов Таранцева также не объясняет разделение импульсов, поскольку в этом случае временная задержка между приходом импульсов должна быть существенно большей. По всей видимости, приход в точку приема разделенных импульсов связан не с отражением звука от какой-либо части берега, а с особенностями стратификации геоакустического волновода. Наличие между водой и скальными породами подложки из осадочного материала (ил, песок) может сформировать дополнительный канал распространения энергии акустических колебаний, толщина которого будет соизмерима с толщиной водного слоя. Таким образом, на относительно небольших глубинах низкочастотный звук может захватываться водным слоем и в то же время слоем осадков, отражаясь от акустического фундамента (преимущественно гранита) и границы раздела «вода–дно». Проверим данную гипотезу с помощью численного моделирования.

Представленные ниже численные расчеты основываются на приближении модового параболического уравнения (МПУ), полученного с помощью метода многомасштабных разложений для слоистой среды с произвольным количеством слоев [93]. Модельные расчеты проводятся в неоднородном геоакустическом волноводе, в котором известен пространственный профиль дна и распределение скорости звука в водном слое. Акустическое поле рассчитывается в вертикальной плоскости с помощью распространяющихся взаимодействующих вертикальных нормальных мод, а в горизонтальной плоскости в секторе, определяемом узкоугольным параболическим уравнением.

Используемый в расчетах модельный геоакустический волновод имитирует акустическую трассу $p.1 - R$ и представляет собой трехслойную среду (вода – осадочный грунт – слой с твердыми породами) с профилем дна, близкой к реальной батиметрии (рис. 2.16а). Толщина осадочной подложки уменьшается при удалении от берега. Свойства дна задаются линейным распределением геоакустических параметров донных пород – скорость звука продольной волны, плотность грунта и коэффициент затухания. Скорость звука в воде не измерялась, но была оценена по времени прихода водного импульса и данным GPS (*Global Positioning System*). Источник звука располагается на горизонте 8 м. Прием акустических колебаний осуществляется в точке R, расположенной вблизи дна (20 см от дна) на горизонте 36 м и на удалении 2,2 км от источника. При моделировании акустического поля расчеты проводятся с учетом первых двух мод без взаимодействия, тем самым фактически ограничивая углы распространения лучей. Мы предполагаем, что основная энергия звуковых колебаний распространяется в водном слое и в слое осадочного грунта, который состоит из песка мелкой фракции. Полагаем, что скорость сдвиговых волн в этом слое мала, и слой можно рассматривать в приближении «жидкого» дна. Функция источника строилась путем умножения опорного сигнала на коэффициент, подобранный таким образом, чтобы модельный импульс согласовывался с натурными измерениями в точке опорного гидрофона. Длительность модельного сигнала составляла 1 с.

Построение первых трех модовых функций на частоте звука 50 Гц показали, что первая мода является водной. Вторая мода переносит часть энергии акустических колебаний в воде, но большая часть энергии фокусируется в осадочном слое. Третья мода является донной и уносит часть энергии в нижний слой (гранит). Звук на более низких частотах может рефрагировать благодаря наличию градиента в нижнем слое и возвращаться в воду в виде низкочастотных «предвестников». Первые две распространяющиеся моды приведены на рис. 2.16б.

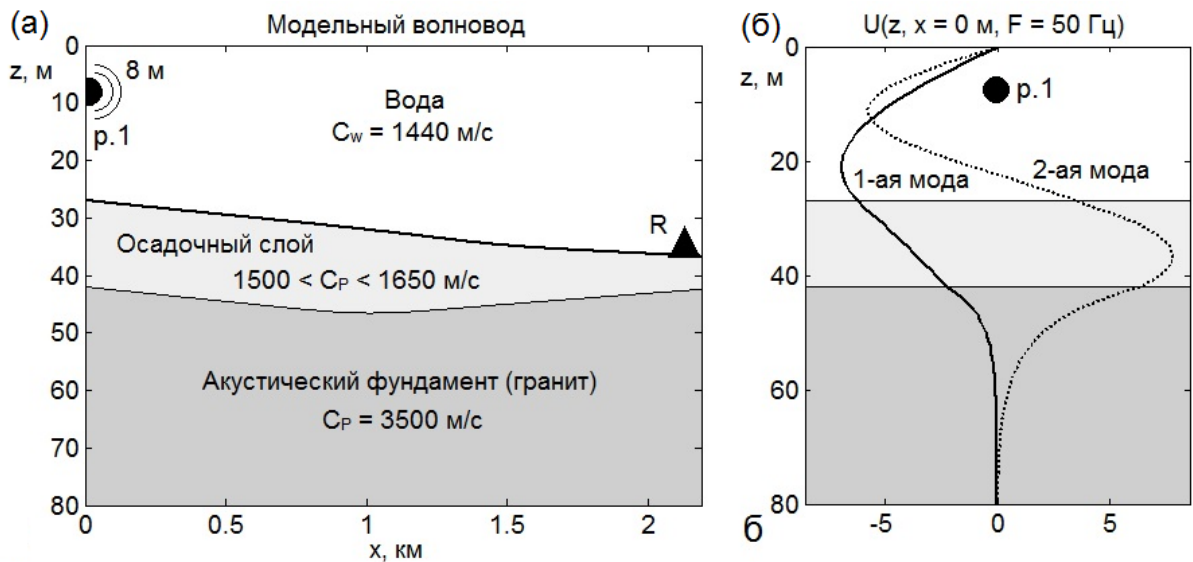


Рис. 2.16. Стратификация модельного геоакустического волновода (а), первые две модовые функции на частоте звука 50 Гц в точке источника (б).

Рис. 2.17 иллюстрирует результаты численных расчетов. На графиках временной области модельных импульсных сигналов видно, что импульс, рассчитанный в точке приема R в приближении двух мод, имеет форму похожую на форму экспериментального сигнала. Запаздывание второго импульса от первого в модельном сигнале составляет 0,21 с (согласно экспериментальным данным – 0,204 с). Время распространения фронта модельного сигнала из точки р.1 до R составило 1,54 с. Если в расчетах учитывать только первую моду, то второй импульс, распространяющийся в слое осадков, пропадает, а амплитуда первого импульса уменьшается. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что вторая мода вносит вклад в энергию первого водного импульса и полностью формирует импульс, распространяющийся в слое осадочного грунта. Для оценки энергии акустических колебаний использовался параметр SEL , рассчитанный по формуле (1.4). На рис. 2.17б приведен график пространственного распределения величины SEL модельного импульса, на котором наблюдается фокусировка энергии акустического колебания в водном слое и в слое осадков.

Согласно натурным данным при распространении низкочастотного акустического импульсного сигнала вдоль бухты Витязь в сторону моря гидрофоном

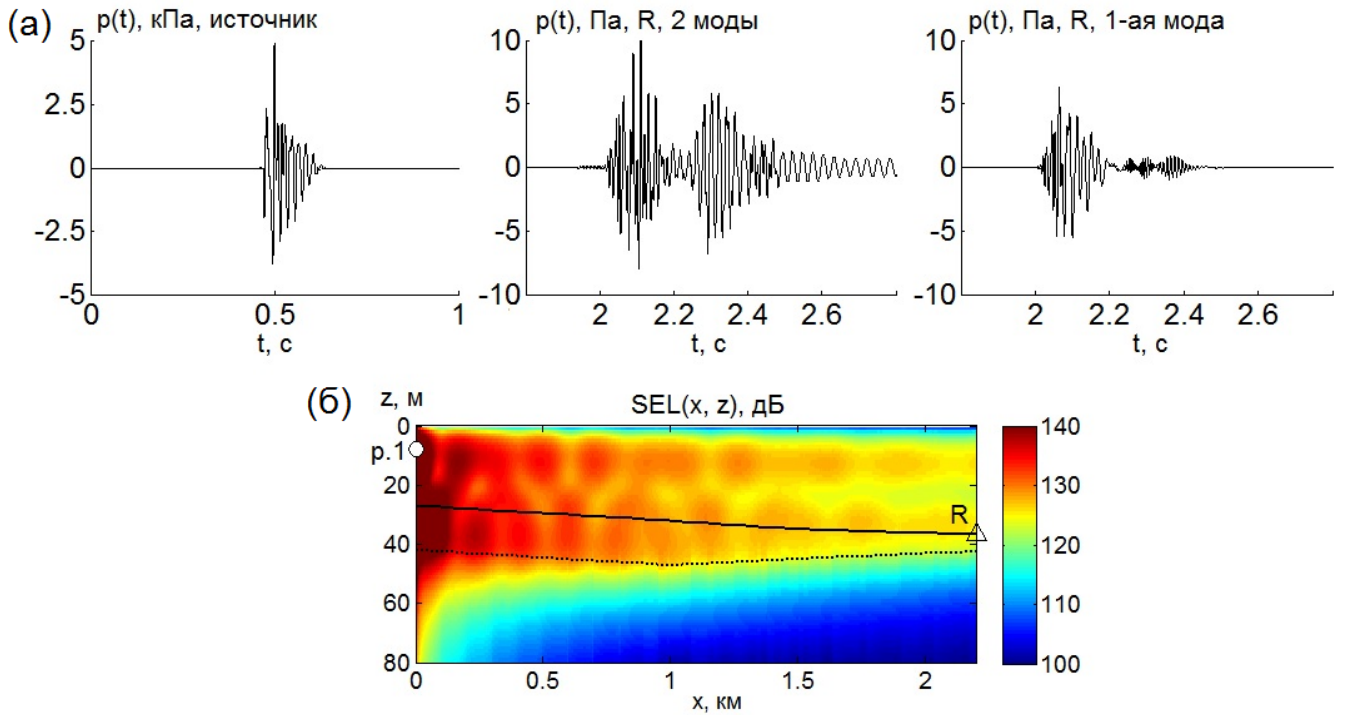


Рис. 2.17. Модельные импульсные сигналы во временной области в приближении двух мод и одной моды (а) и пространственное распределение параметра SEL модельного импульсного сигнала в приближении первых двух мод (б). На последнем графике: сплошная линия соответствует границе «вода-дно», пунктиром отмечена граница «осадочный слой-акустический фундамент».

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. Слой осадочных пород, имеющих толщину, соизмеримую с толщиной водного слоя (рис. 2.16а), 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. Изменение толщины осадочного слоя, а также его геофизических параметров позволяет регулировать время задержки между импульсами, а также отношение их амплитуд. Опираясь на экспериментальные данные, можно проводить более

точную томографию дна в мелководных бухтах.

2.2.2. Донный слой с газонасыщенными осадками

В разделе 1.7 первой главы отмечено, что верхний слой океанического шельфа, как правило, представляет собой слой неконсолидированных осадков, в которых могут присутствовать различного рода случайные неоднородности. Так в районах газовых месторождений могут наблюдаться вертикальные каналы, связанные с выходом природных газов, или куполообразные складки, сформированные выдавливанием газом снизу высокопластичных пород [103]. Интерес к исследованию таких процессов обусловлен значительной эмиссией природного газа (метана) с морского дна, и поскольку метан наравне с углекислым газом вызывает парниковый эффект, это приводит к проблемам, связанным с процессом глобального потепления. Также установлено, что пространственные неоднородности донных слоев оказывают существенное влияние на распространение акустических сигналов в водном слое. Это вызвано тем, что пространственные характеристики поля скорости распространения продольных волн C_p в дне на шельфе в районах углеводородных месторождений характеризуются повышенной изменчивостью и пространственными образованиями, в которых значение скорости звука может быть равной или меньше, чем в водном слое. В серии работ [140–142] показано, что при распространении низкочастотного звука в волноводе арктического типа наблюдается резкое увеличение потерь (более 10 дБ) при скоростях звука в донных осадках, близких к значениям скорости звука в воде. При этом изменения в затухании зависят от эффективной скорости звука в дне (в случае случайно-неоднородного верхнего осадочного слоя) и заметны даже при небольших расстояниях от источника (порядка нескольких километров).

Стоит отметить, что в настоящее время существуют акустические методы, позволяющие оценить содержание природного газа и толщину газового слоя в поверхностных осадках. Метод, основанный на измерении коэффициента отра-

жения акустического сигнала на низких и средних частотах от границы раздела «вода – осадки», успешно применялся в глубоком субтропическом озере Киннерет (Израиль) для оценки среднего содержания газа на определенной площади водоема [143–145]. Масштабную пространственную карту распределения неоднородностей в дне дают сейсморазведочные исследования, использующий метод отраженных волн [146].

Экспериментальное подтверждение существенного влияния неоднородностей в донных осадках получено при анализе акустических данных во время сейсморазведочных работ, проводимых в летне-осенний период 2015 года компанией *Exxon Neftegas Limited*, являющейся оператором проекта «Сахалин-1» по освоению углеводородных месторождений на северо-восточном шельфе о. Сахалин [147]. На некоторых участках шельфа были обнаружены аномальные потери энергии сейсмоакустических сигналов на пути их распространения [107]. Гипотеза о наличии пространственных неоднородностей в осадочном слое, вызывающих значительные потери энергии звуковых колебаний, подтвердилась после получения и сопоставления данных о пространственном распределении поля скорости продольной волны в донных осадках на глубинах до 1 км. Геофизические исследования в районе показали, что верхний слой донных отложений на морском шельфе содержит различного рода случайные неоднородности, простирающиеся вдоль и поперек береговой линии, а также выраженные пространственные палеодолины рек, заполненные материалом, отличающимся от окружающего осадочного слоя (см. рис. 2.18).

На рис. 2.19а рассмотрена область вблизи точки акустического мониторинга Oдоptu-4, расположенной на 20-метровой изобате. По акустическим данным этой точки проанализировано влияние донной неоднородности на распространение сейсмоакустических импульсов путем оценки круговой диаграммы акустической экспозиции в разных частотных диапазонах. Методика построения диаграммы в горизонтальной плоскости водного слоя основана на множестве равноудаленных от точки приема точек излучения сейсморазведочных сигналов [55].

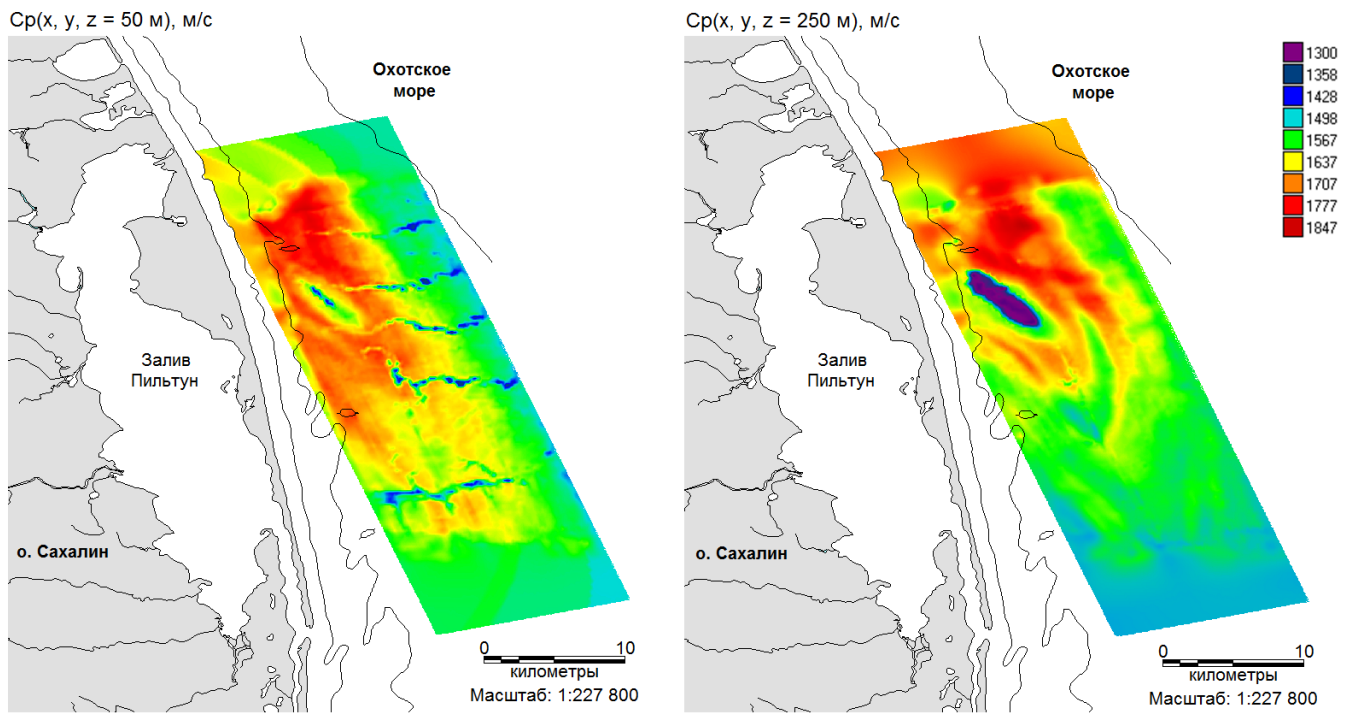


Рис. 2.18. Карта пространственного распределения значений скорости продольных волн в дне на горизонтах 50 м и 250 м в северо-восточной части шельфа о. Сахалин.

Соответственно, энергия акустического импульса распространяется вдоль радиуса-вектора r , который направлен от излучателей к приемнику. На рисунке множество точек излучения обозначено в виде белых кружков, равноудаленных от точки приема $O_{\text{доп}}-4$. Значение угла α между радиусом r и курсом судна меняется практически от 0° до 180° . Для оценки акустической экспозиции удобно использовать энергетический параметр импульса SEL (1.4) на временном интервале $\Delta T = 3$ с. Расчет SEL производится не по временному ряду, а по спектру сигнала в диапазоне частот 10 – 350 Гц, что позволяет снизить влияние низкочастотных псевдошумов обтекания гидрофона и шумов с частотами больше 350 Гц. Учитывая, что толщина водного слоя на трассах распространения 20 – 30 м, мы можем отдельно рассмотреть акустическую энергию, формируемую на шельфе донными, водно-донными модами с частотами $\Delta f = 10 - 70$ Гц и водными модами с частотами $\Delta f = 70 - 350$ Гц (рис. 2.19б-г). Таким образом, предлагаемая методика позволяет построить экспериментальные оценки горизонтальных диаграмм направленности на низких частотах с учетом влия-

ния пород, слагающих дно и на частотах больше 70 Гц для акустических волн распространяющихся в основном в водном слое.

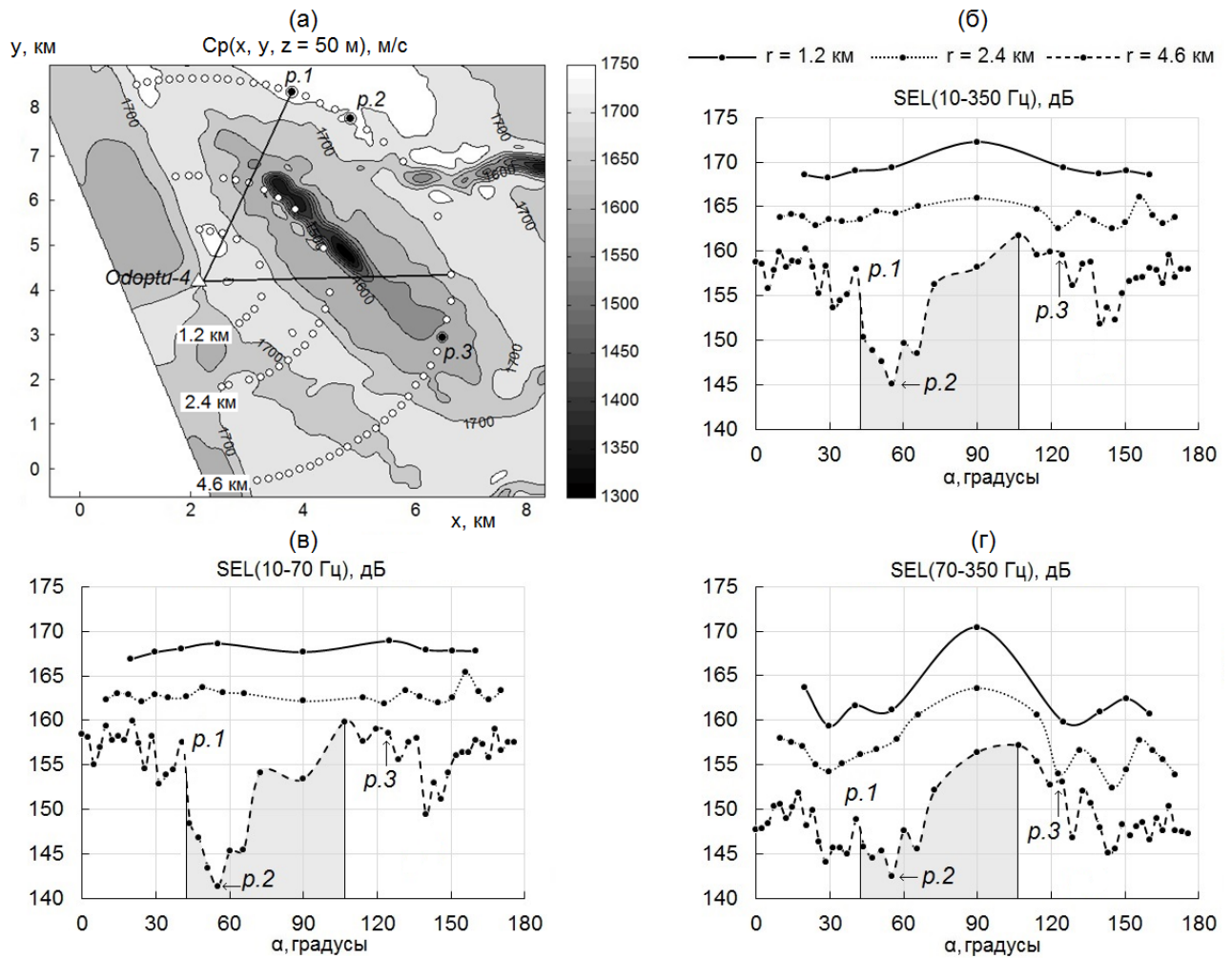


Рис. 2.19. Карта района с пространственным распределением скорости продольных волн в донном слое на горизонте 50 м; белыми кругами, в том числе p.1, p.2 и p.3, отмечены точки излучения импульсных сигналов; точка приема – Одопти-4 (а). Зависимость значений параметра SEL_{3s}^{imp} импульсных акустических сигналов, измеренных в точке мониторинга Одопти-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).

Согласно представленным диаграммам, для $r = 2,4 \text{ км}$ угловая зависимость $SEL_{3s}^{imp}(\alpha)$ выражена слабо. Поскольку на пути распространения сейсмоакустических сигналов отсутствуют неоднородности в донных осадках, угловая зависимость энергии, приносимой донными и донно-водными модами с частотами 10 – 70 Гц, практически отсутствует, но заметна для энергии, приносимой водными модами с частотами 70 – 350 Гц. Это обусловлено, прежде всего, диа-

граммой направленности группы пнемоизлучателей на высоких частотах [51]. Для $r = 4,6$ км выражено влияние пространственных неоднородностей пород, слагающих дно, на распространение донных и водно-донных мод. На рис. 2.19 видно, что значения $SEL(10 - 70 \text{ Гц}, r = 4,6 \text{ км}, \alpha)$ могут отличаться на более 15 дБ (точки р.1 и р.2). Столь существенные различия значений параметров сейсмосигналов в этом случае обусловлены наличием пространственной аномалии в распределении $C_p(x, z)$, по форме похожей на солитон, в котором значение скорости распространения продольных волн меньше, чем в воде (рис. 2.19). Данная неоднородность дна привела к значительному увеличению потерь при распространении, по сравнению с трассами р.1 – Odoptu-4 и р.3 – Odoptu-4. 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. Данное явление хорошо известно для внутренних волн, причем трансформации акустических мод на пространственных неоднородностях поля скорости звука, формируемых внутренними волнами из пикноклина, могут принимать резонансный характер когда $k_{iw} = |k_n - k_m|$, где k_{iw} – волновое число внутренней волны, а k_n, k_m – волновые числа акустических мод с номерами n и m . В нашем случае пространственная неоднородность образована резкими изменениями акустических свойств пород, слагающих дно, и представляет собой линзу со значениями скорости распространения продольных волн на 350 м/с меньше, чем в дне, и на 110 м/с меньше, чем в водном слое.

На рис. 2.20а показаны вертикальные распределения значений скорости продольных волн в дне $C_p(x, z)$ вдоль двух трасс распространения энергии сейсморазведочных сигналов. На этом рисунке видно, что трассы имеют одинаковую протяженность, равную 4,6 км, и примерно равные глубины, но если трасса р.3 – Odoptu-4 имеет примерно горизонтально однородную структуру дна и распределение значений C_p в дне в модельном волноводе можно представить

одним слоем, то на трассе р.2 – Odoptu-4 присутствует выраженная пространственная неоднородность в виде «солитоноподобного» участка со значениями скорости звука ниже, чем в воде. «Солитон» имеет высоту 75 м, основание 400 м и минимальное значение звука 1333 м/с. Подобная неоднородность в моделировании акустического поля учитывается либо путем усреднения донного слоя с эффективным значением скорости продольных волн [102], либо путем введения в модель дополнительного слоя, на границах которого скорость звука изменяется скачком (рис. 2.20б). Поскольку программный пакет MPE позволяет учитывать горизонтальную неоднородность параметров волновода, то модельный волновод, соответствующий трассе р.2 – Odoptu-4, представляется трехслойным: водный слой и два слоя в дне, один из которых имеет ненулевую толщину в месте донной неоднородности и нулевую вне ее. Профили скорости звука $C_p(z)$ для слоев **2** и **3** на рис. 2.20б получены путем усреднения значений C_p вдоль соответствующих трасс за исключением «аномальных» зон. Другие геоакустические параметры осадочных пород для слоев **2** – **3** приведены в табл. 2.2. Расчеты проводились до глубины 1000 м, однако для упрощения модели из рассмотрения были исключены пространственные неоднородности дна, расположенные глубже 160 метров. Моделирование распространения импульсного акустического сигнала осуществляется в частотном диапазоне 10 – 250 Гц, на которых переносится основная энергия генерируемого сейсморазведочного импульса. При численных расчетах учитывались упругие свойства дна и взаимодействие мод.

Функция эквивалентного точечного источника, расположенного на горизонте 5 м, рассчитана с помощью МПУ по опорному акустическому сигналу, соответствующему излучению сейсморазведочного судна, когда оно проходило точку р.2-1 (см. рис. 2.20а). Расстояние от точки излучения р.2-1 до акустической станции Odoptu-4 составило 1,65 км. (Методика построения функции эквивалентного точечного источника описана в разделе 3.1 Главы 3). Для трассы р.3 – Odoptu-4 модельное значение SEL_{model} , равное 157,9 дБ, получено для

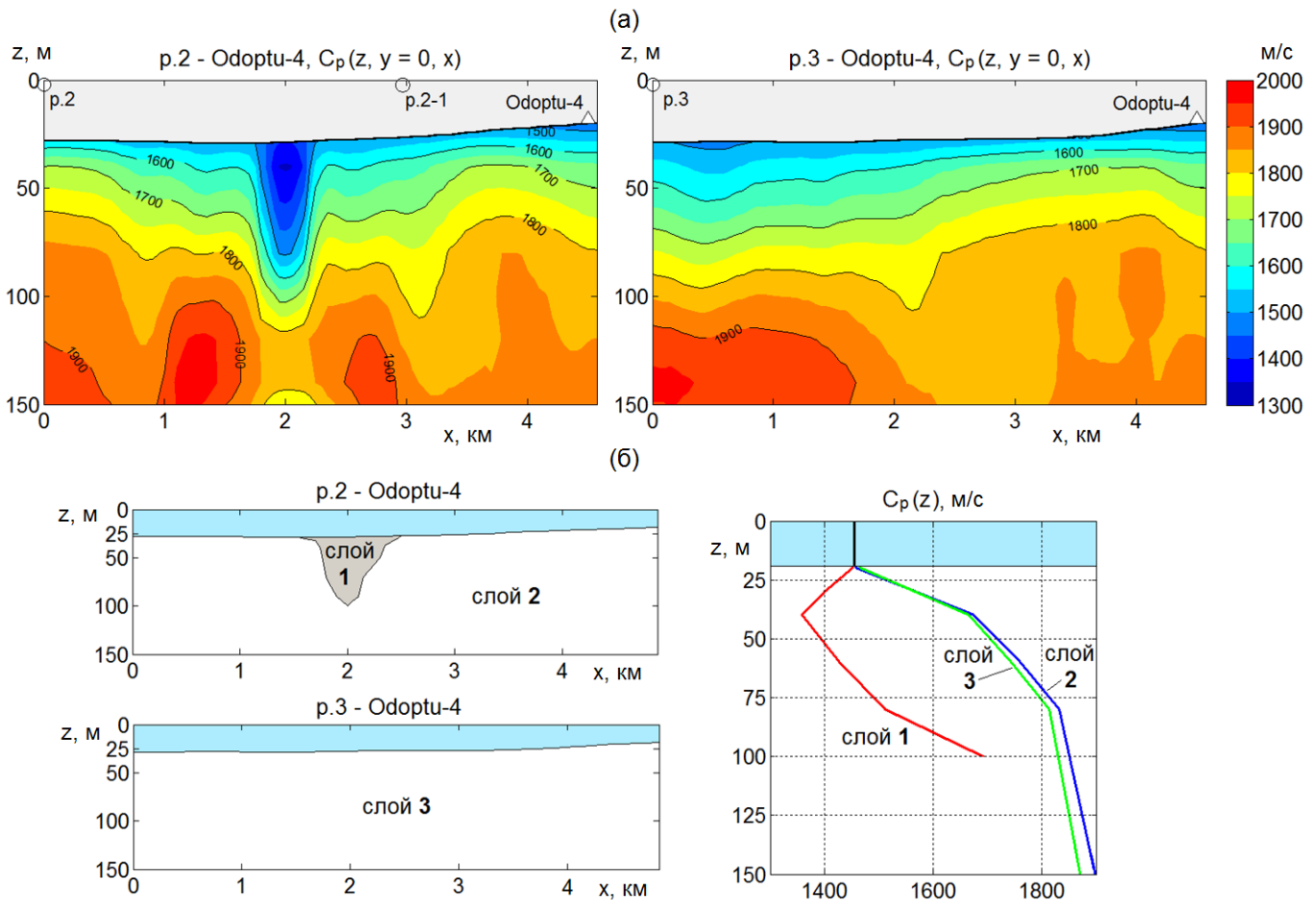


Рис. 2.20. Вертикальное поле значений скорости продольных волн $C_p(x, z)$ вдоль трасс, соединяющих точки излучения сейсморазведочного сигнала р.2 и р.3 и точку мониторинга Odoptu-4 (см. рис. 2.19) (а). Профили скорости звука в соответствующих модельных волноводах, учитывающих пространственную неоднородность в дне (б).

Таблица 2.2. Геоакустические параметры модельных волноводов, представленных на рис. 2.20б.

Слой	z , м	C_s , м/с	α_s , дБ/λ	α_p , дБ/λ	ρ , кг/м ³
2	0	400	0.1	0.4	1200
	1000	600	0.1	0.2	2000
3	0 – 1к	-	-	0.5	1100

точечной эквивалентной функции источника с энергией $SEL = 230,4$ дБ. Соответствующее экспериментальное значение равно $158,23$ дБ и отличается от мо-

дельного на 0,3 дБ. Для трассы с пространственной аномалией в распределении скорости распространения продольных волн в дне р.2 – Odoptu-4: $SEL_{exp}(10 - 250 \text{ Гц}) = 144,1 \text{ дБ}$, а $SEL_{model}(10 - 250 \text{ Гц}) = 143,7 \text{ дБ}$. На этой трассе мы так же видим достаточную для практики точность моделирования, а значительное увеличение потерь при распространении иллюстрирует рис. 2.21, на котором показано распределение значений $SEL_{model}(f = 10 - 250 \text{ Гц}, x, y = 0 \text{ м}, z)$ в рассмотренных трехмерных геоакустических волноводах. На этом рисунке видно как продольные волны переходят из водного слоя в пространственную акустическую неоднородность и с существенно меньшей энергией возвращаются в водный слой, поэтому значение акустической экспозиции в этом волноводе на 14,2 дБ меньше, чем для волновода р.3 — Odoptu-4 (табл. 2.3).

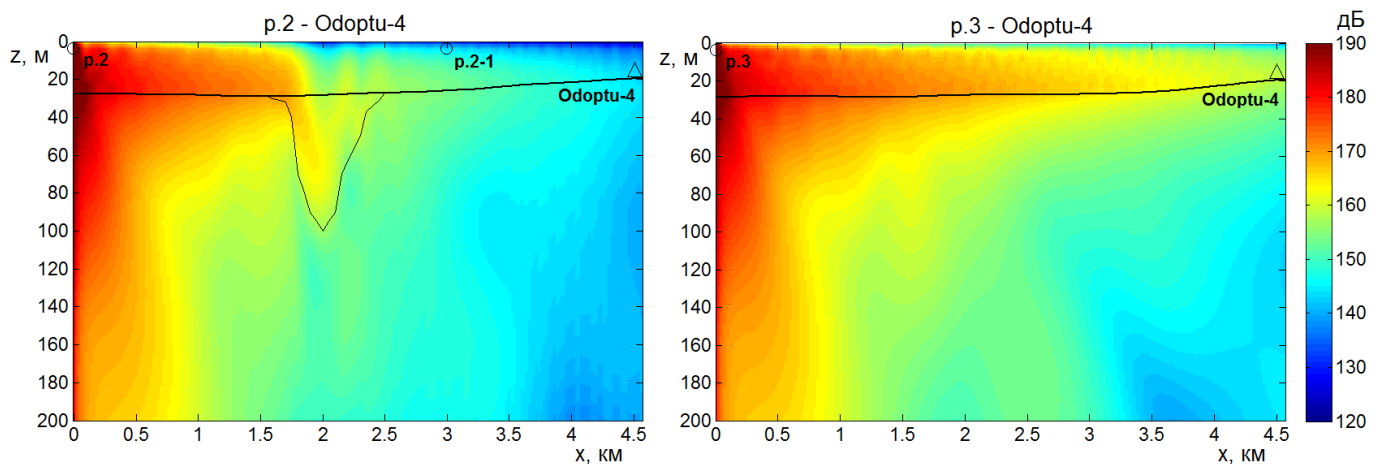


Рис. 2.21. Вертикальное поле модельных значений акустической экспозиции $SEL(f = 10 - 250 \text{ Гц}, x, z)$ для акустических трасс р.2 – Odoptu-4 (с донной неоднородностью) и р.3 – Odoptu-4 (условно с горизонтально однородным донным слоем).

Таким образом, согласно измерениям, проведенным на шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных испытаний, зависимость $SEL_{imp}(\alpha)$ на частотах возбуждения донных и водно-донных мод может существенно варьироваться за счет пространственных донных неоднородностей, глубина залегания которых может находиться в широких пределах. С помощью численного моделирования показано, что пространственная акустическая неоднородность в распределении значений скорости распространения продольных волн в дне по форме похожая

Таблица 2.3. Экспериментальные и модельные значения параметра $SEL_{1s}^{imp}(10 - 250 \text{ Гц})$.

Точка	$SEL_{\text{экспер.}}, \text{ дБ}$	$SEL_{\text{модель}}, \text{ дБ}$
источник	-	230.4
Odoptu-4 (опора)	165.6	165.6
Odoptu-4 (р.2)	144.1	143.7
Odoptu-4 (р.3)	158.3	157.9

на уединенную внутреннюю волну с основанием равным 400 м и высотой 75 м, в которой значение C_p на 350 м/с меньше, чем в дне и на 110 м/с меньше, чем в водном слое, существенно увеличивает потери при распространении сейсморазведочного сигнала в водном слое на 14,2 дБ в частотном диапазоне 10 – 250 Гц. На частотах выше 70 Гц основная энергия сейсмоакустического импульса переносится за счет водных мод и горизонтальная диаграмма в этом случае определяется особенностью конфигурации группы пневмоизлучателей.

2.3. Геоакустических волновод с участками суши

Теоретические исследования перехода звуковой волны из моря на сушу показали, что звук может быть зарегистрирован в нескольких километрах от уреза воды при наличии приповерхностного осадочного слоя, играющего роль канала для захвата акустических колебаний [87]. Также сигналы в области низких частот на границе «вода-дно» могут распространяться в виде поверхностных волн рэлеевского типа и быть доминирующим механизмом переноса акустической энергии из шельфовой зоны моря на сушу [148]. Экспериментальные исследования распространения низкочастотных акустических колебаний в заливе Посьета (Приморский край) [148–150] с использованием лазерного деформографа как регистратора сейсмоакустических сигналов на берегу установили, что около 1% излученной акустической энергии гидроакустическим излучателем

трансформируется в энергию упругих волн Рэлея [149]. Регистрация волн такого типа дает возможность определения направления и дальности (до 290 км) движущегося низкочастотного источника [150]. Точность оценки параметров, помимо чувствительности лазерного деформографа, определяется особенностями трансформации гидроакустических волн на границе «вода-дно» и преобразования их энергии в энергию волн рэлеевского типа и становится тем выше, чем точнее определена структура и профиль морского дна.

Для экспериментального изучения трансформации акустических сигналов через береговые участки шельфа был проведен ряд опытов на шельфе Японского моря в бухте Витязь и на мысе Шульца полуострова Гамова, целью которых было изучение особенностей и потерь при распространении в сторону мыса Шульца энергии акустического тонального и импульсного сигналов, генерируемых в море и принимаемых на берегу.

Низкочастотный тональный акустический сигнал генерировался в море с помощью свешиваемого с борта судна резонансного излучателя электромагнитного типа [151], а низкочастотные импульсные сигналы генерировались оригинальным пневмоизлучателем, свешиваемым с носа заякоренного судна на глубину 8 – 10 м (см. описание оборудования в разделе 1.4 Главы 1). Измерения вариаций акустического давления проводились в частотном диапазоне 2 – 2000 Гц с помощью гидрофонов типа ГИ-50 трех цифровых радиобуев – ЦРБ. Опорные акустические измерения проводились с помощью гидрофона P_0 , закрепленного на расстоянии 1 м от центра резонансного излучателя электромагнитного типа, опускаемого с кормы судна «Малахит» на глубину 10 м, расстояние между этим гидрофоном и пневмоизлучателем составляло 18 м.

На берегу акустические измерения проводились гидрофоном P_1 , опущенным на заданный горизонт в заполненную водой скважину глубиной 90 м, а также с помощью гидрофона P_2 , установленного в 5-литровой пластиковой бутылке, заполненной водой. Вместо P_2 к ЦРБ мог быть подключен геофон типа А0515, который обеспечивал измерение вертикальной компоненты колебатель-

ной скорости V_z в частотном диапазоне 0,1 – 100 Гц. Геофон устанавливался на поверхности грунта. Цифровые радиотелеметрические каналы от трех ЦРБ обеспечивали на береговом посту синхронный ввод в ЭВМ измеряемых сигналов, их визуализацию и последующий спектральный и корреляционный анализы.

На рис. 2.22 приведена карта-фотография района исследований с указанием точек излучения тональных и импульсных акустических сигналов в море. В этих точках судно «Малахит» становилось на якорь, и с его кормы на горизонт 10 м опускался резонансный излучатель электромагнитного типа, который генерировал низкочастотный тональный сигнал частотой 27 Гц, уровень излучения мог достигать 180 дБ отн. 1 мкПа²/Гц. Кроме того, с борта этого судна в районе носа в воду опускался импульсный излучатель пневматического типа. Его акустический сигнал также контролировался с помощью опорного гидрофона P_0 , установленного на корпусе тонального излучателя.

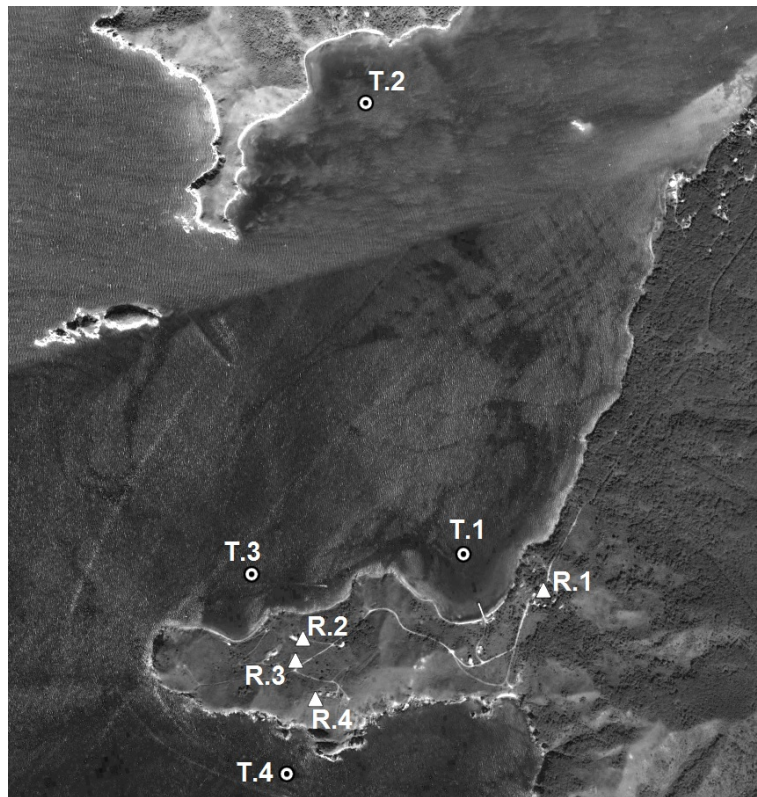


Рис. 2.22. Карта-фотография района исследований с указанием точек излучения акустических сигналов в море и точек на берегу, в которых эти сигналы принимались.

Первый эксперимент был проведен в июле 2014 года. В нем низкочастотные импульсные сигналы, излученные в точках Т.2, Т.3 и Т.4, были приняты с помощью геофона V_z , установленного на мысе Шульца на грунте в точке R.4, которая расположена на высоте 83 м по отношению к уровню моря. На рис. 2.23 показаны вариации акустического давления $p(t)$, измеренные с помощью опорного гидрофона P_0 во время излучения в точке Т.3, и вариации вертикальной компоненты колебательной скорости V_z в относительных единицах, измеренные в точке R.4, а также их спектры. На том же рисунке представлены спектры $G(f)$, опорного сигнала и V_z , измеренные во время излучения низкочастотного импульса в точке Т.2, удаленной от точки приема R.4 на 2 км. Акустическая энергия, генерируемая импульсным пневмоизлучателем в бухте Витязь, в обоих случаях дошла до почти верхней точки мыса Шульца (83 м) в виде затянутого импульса с хорошо выраженным пиком мощности в его графике спектра на частоте 64 Гц. Разность потерь при распространении для двух трасс протяженностью 2 и 0,5 км примерно равна 10 дБ. По-видимому, это объясняется тем, что от точки излучения Т.2 до точки Т.3 акустический импульс распространялся в водном слое с относительно малыми потерями.

На рис. 2.22 видно, что южный берег мыса Шульца представляет собой обрывистые скалы. Глубина моря в точке излучения Т.4 была равна 37 метрам. На рис. 2.24 показаны графики вариаций P_0 и V_z , измеренные во время излучения импульсного сигнала на горизонте 8 м в точке Т.4. При длительности опорного сигнала P_0 равной 0,2 с, длительность сигнала, измеренного на мысе Шульца в точке R.4, составляет не менее 1,4 с. По-видимому, это вызвано отражениями от практически вертикальной до глубины 20 – 25 метров скалистой извилистой береговой линией со сложным рельефом.

В октябре 2014 г. акустические измерения проводились только с помощью гидрофонов. Гидрофон P_1 опускался в скважину, пробуренную на мысе Шульца для сбора питьевой воды. На рис. 2.22 она обозначена как точка приема R.1. Скважина удалена примерно на 150 м от уреза воды и имеет глубину 90 м. Ее

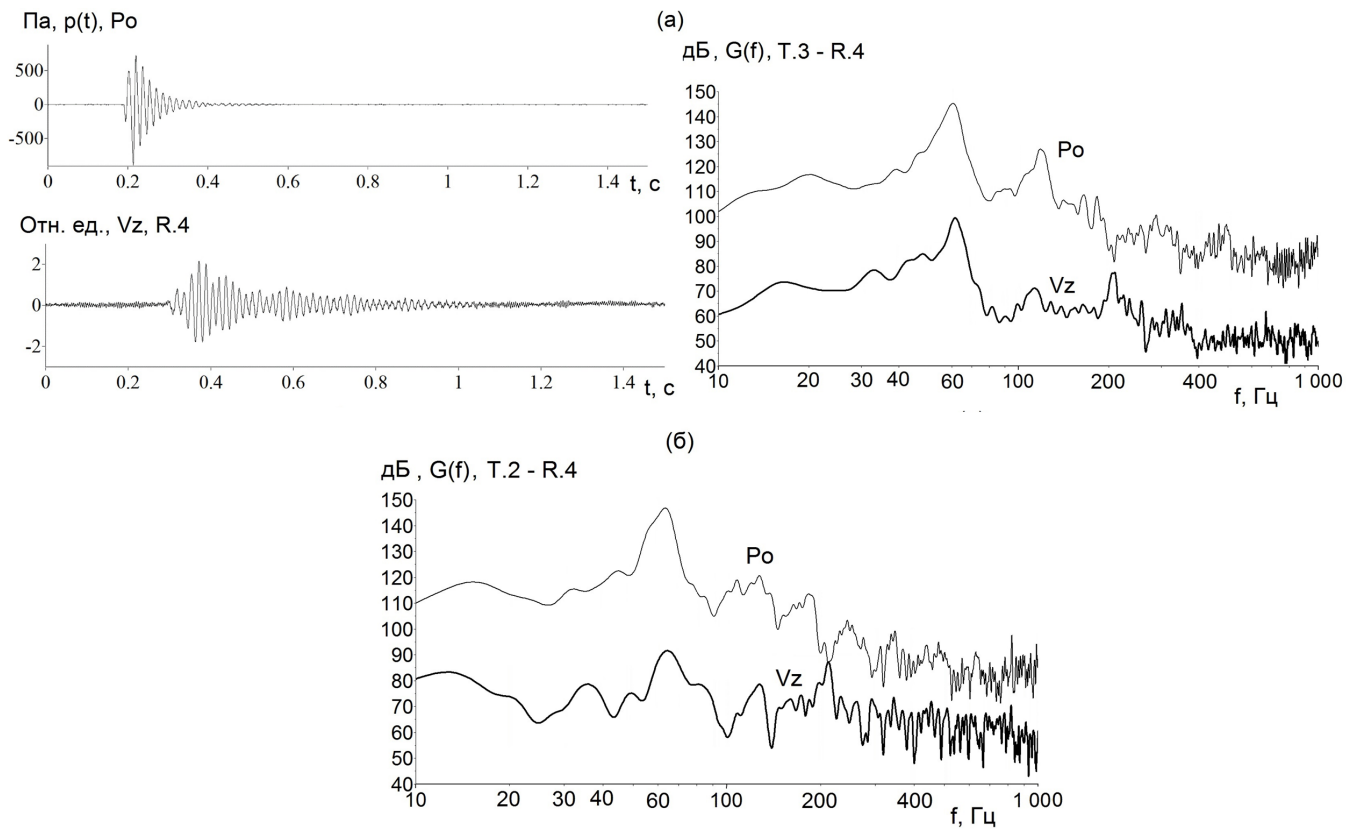


Рис. 2.23. Вариации акустического давления, измеренные опорным гидрофоном P_0 , и вариации вертикальной компоненты колебательной скорости V_z , соответствующие излучению акустического импульса в точке Т.3 (а) и их спектры (б). Спектры сигналов, измеренных во время излучения акустического импульса в точке Т.2 (в).

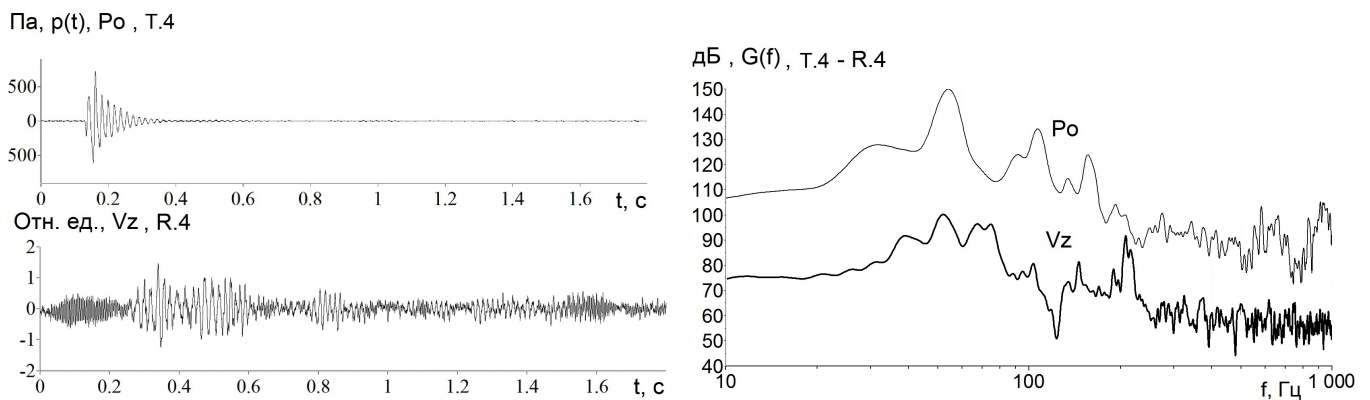


Рис. 2.24. Вариации опорного акустического давления P_0 и вертикальной компоненты колебательной скорости V_z , при излучении сигнала в точке Т.4 и их спектры.

верхнее отверстие расположено на высоте 22 м по отношению к уровню моря. Во время акустических измерений уровень воды в скважине составлял 10 м. В результатах, представленных ниже, параметр h – это расстояние от уровня

воды в скважине, поэтому $h = 80$ м соответствует глубине 90 м от поверхности Земли.

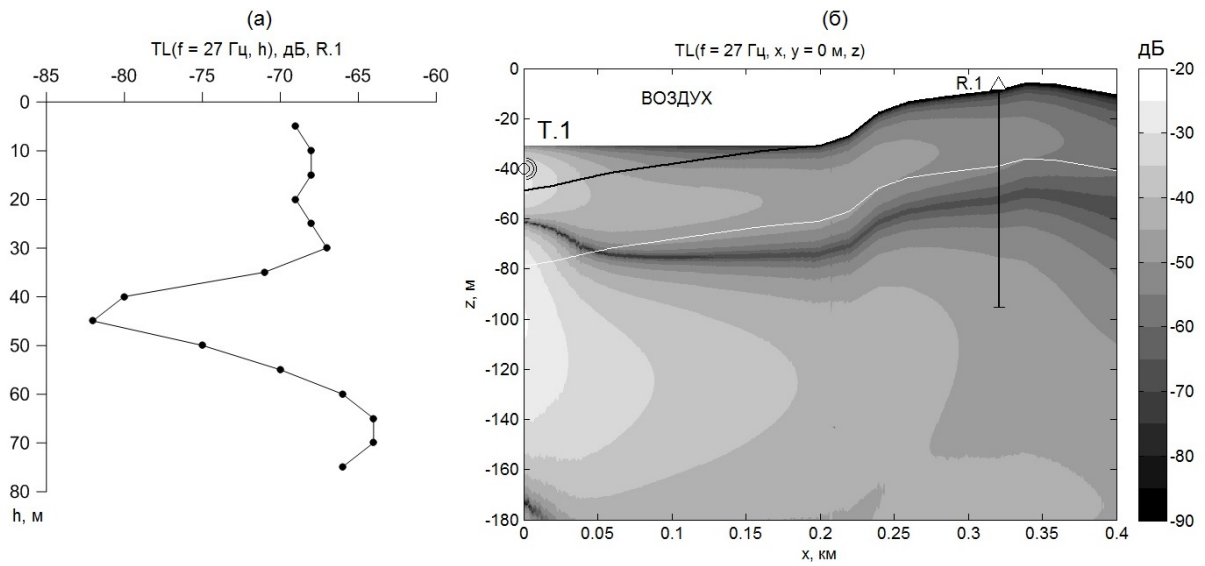


Рис. 2.25. Вертикальный разрез потерь при распространении, полученный с помощью скважинного гидрофона P_1 в точке R.1, (а) и результаты численного моделирования потерь при распространении акустического сигнала частоты 27 Гц, генерируемого в точке T.1 на горизонте 10 м (б).

Моделирование распространения звука в условиях пространственной неоднородности береговой линии и акустических свойств пород, слагающих дно, выступающих мысов и островов требуют, во-первых, введение в модель трехслойного волновода с резким скачком акустических параметров на границе слоев, во-вторых, применения трехмерного моделирования акустических полей, формируемых различными источниками звука. Для этих целей предлагается использовать возможности численного моделирования, опирающегося на опорные натурные измерения распространения сейсмоакустических волн и введения воздушного слоя с реальным рельефом суши и дна, а источник может быть расположен в воде, в дне или в воздухе, например, вертолет или судно на воздушной подушке.

На рис. 2.25 представлены вертикальный разрез потерь при распространении, полученный с помощью скважинного гидрофона P_1 в точке R.1, и результаты численного моделирования потерь при распространении акустического сиг-

нала частотой 27 Гц, генерируемого в точке Т.1 на горизонте 10 м. Расстояние от излучателя в точке Т.1 до скважины в точке R.1 составляет 320 м.

На графике $TL(f = 27 \text{ Гц}, h)$ на глубине $h = 45 \text{ м}$ хорошо выражен пик потерь, достигающий величины -83 дБ . У поверхности и на глубине 70 м потери уменьшаются до -68 и -65 дБ соответственно. Численное моделирование, проведенное для волновода с параметрами, показанными на рис. 2.26, иллюстрирует пространственные характеристики геоакустического поля, формируемого в море и на суше данным источником. Профили дна моря и высот суши построены по данным судового эхолота и GPS, а подбор геоакустических параметров грунта ориентировался на результаты предыдущих работ, выполненных для того же района [89, 90].

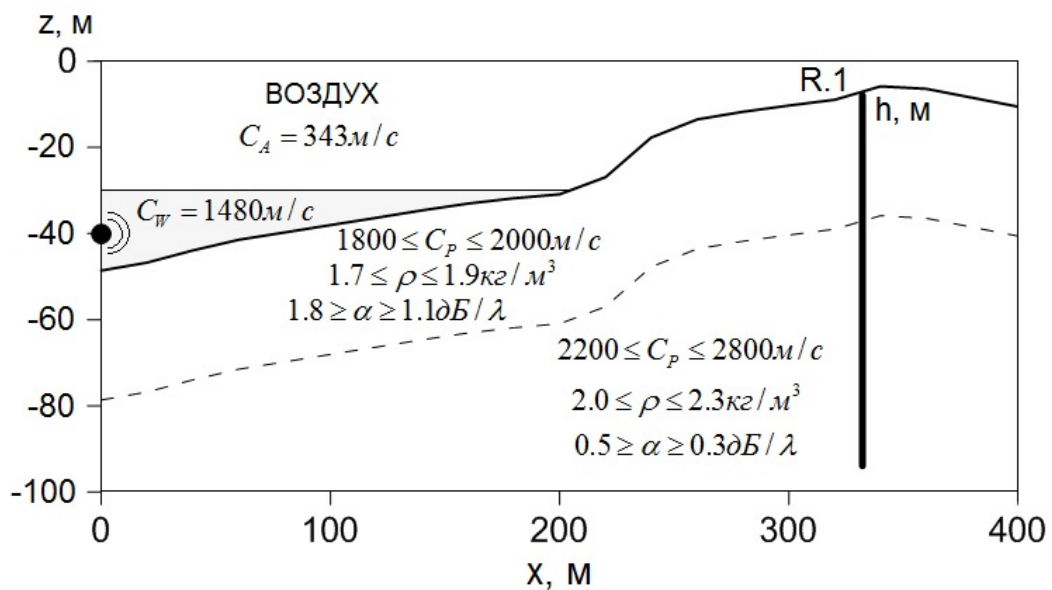


Рис. 2.26. Параметры модельного геоакустического волновода, использовавшиеся в расчетах.

На рис. 2.27 показана модельная функция потерь для сигнала частотой 27 Гц, генерируемого в точке Т.2 на глубине 10 метров и распространяющегося вдоль геоакустической трассы Т.2 – R.1. Моделирование выполнено для акустических параметров, показанных на рис. 2.26, с помощью МРЕ в адиабатическом приближении для пяти нормальных мод. На рис. 2.28 показаны экспериментальные и модельные значения потерь в зависимости от величины h для трасс Т.1 – R.1 и Т.2 – R.1, имеющих протяженность 334 м и 2 км соответственно. На

этом рисунке видно, что модельные значения на 10 – 20 дБ меньше, чем экспериментальные. Это может быть вызвано несколькими причинами: во-первых, дополнительные потери могут быть при переходе продольных волн из грунта в скважину, представляющую собой металлическую трубу, заполненную водой. Во-вторых, в разделе 2.1 было установлено, что отток энергии акустических колебаний может быть вызван при возбуждении поперечных волн грунта и потери могут быть увеличены порядка 18 дБ. Напомним, что численное моделирование здесь проводится в приближении «жидкого» дна.

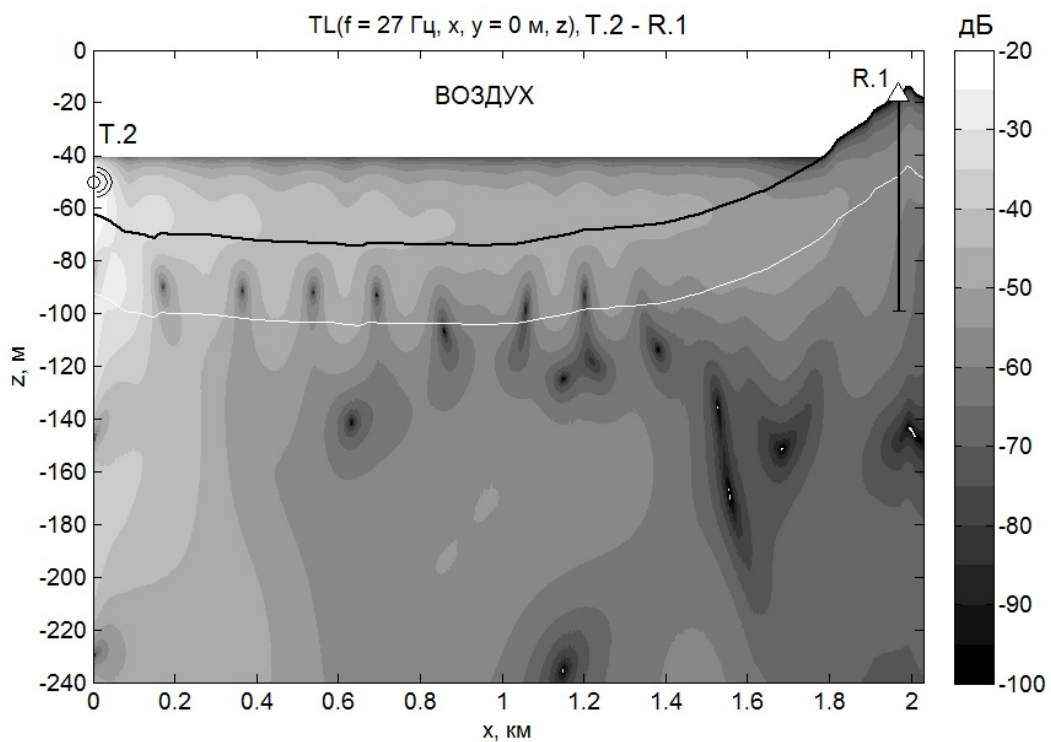


Рис. 2.27. Потери при распространении тонального сигнала частотой 27 Гц вдоль трассы Т.2 – R.1. При моделировании учитывались пять мод без взаимодействия.

На рис. 2.29 приведены акустические импульсы, измеренные в море в точке Т.1 на расстоянии 18 м от пневмоизлучателя P_0 , и на мысе Шульца P_1 в скважине с водой на четырех горизонтах, а также показаны значения модуля взаимной корреляционной функции между опорным сигналом и сигналом, измеренным в скважине на горизонте 80 м.

В табл. 2.4 представлены результаты взаимного корреляционного анализа – время и скорость распространения энергии сейсмоакустических волн, генери-

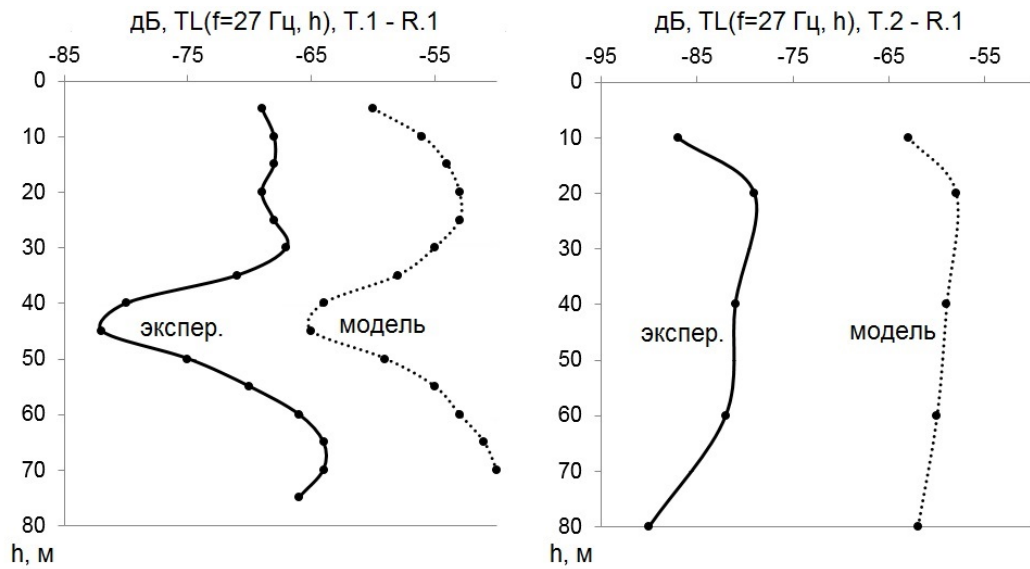


Рис. 2.28. Вертикальные разрезы экспериментальных и модельных значений потерь $-TL$ для сигнала 27 Гц для трасс Т.1 – R.1 (рис. 2.25) и Т.2 – R.1 (рис. 2.27) в зависимости от горизонта его приема h в скважине.

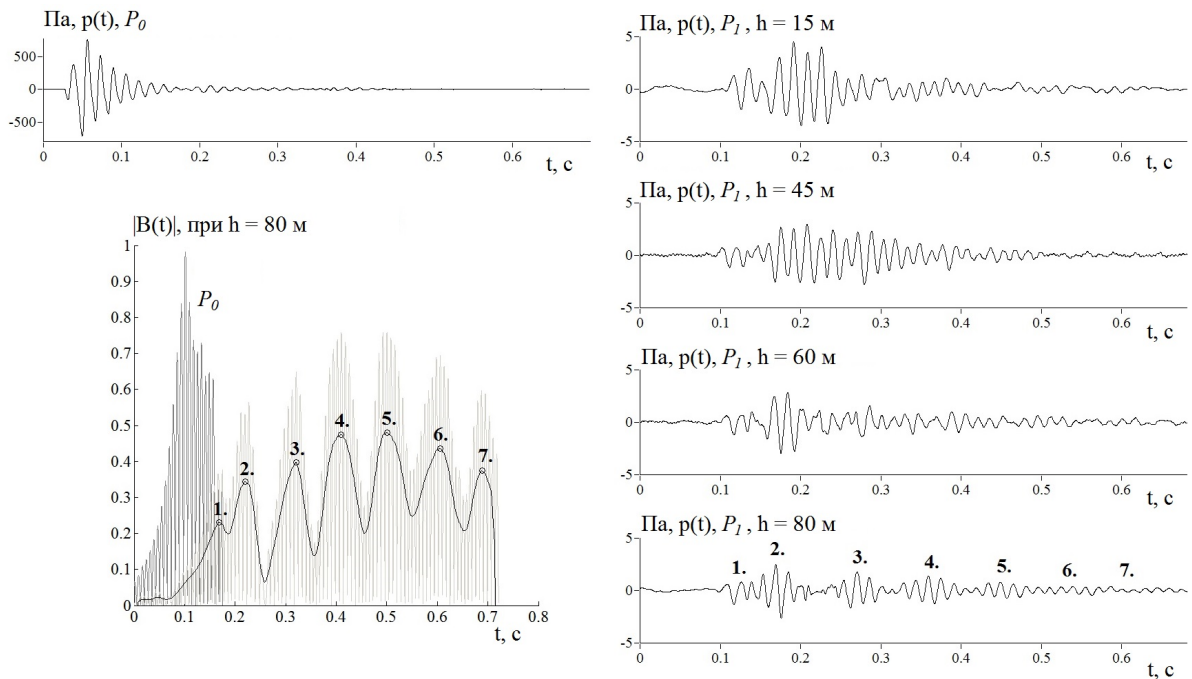


Рис. 2.29. Вариации опорного акустического давления P_0 , измеренные на расстоянии 18 м от пневмоизлучателя в точке Т.1, и акустического давления P_1 в скважине на четырех горизонтах. Модуль взаимной корреляционной функции $|B(t)|$ между опорным сигналом и акустическим сигналом в скважине на горизонте 80 м.

руемых пневмоизлучателем в море в точке Т.1 и сформировавших пакет из семи импульсов на берегу в скважине на горизонте 80 м. Согласно графикам $p(t)$,

представленным на рис. 2.29, и значениям скорости распространения, приведенным в табл. 2.4, сейсмоакустические волны, сформировавшие на всех четырех горизонтах импульсы с наибольшими амплитудами, распространялись со средним значением скорости равным 2800 м/с.

Таблица 2.4. Время и скорость распространения импульсных акустических сигналов, излученных в море и измеренных на берегу в скважине на горизонте 80 м.

R.1 (скважина), $h = 80$ м, расстояние 332 м		
№ импульса на рис. 2.29	Время, с	Скорость, м/с
1	0.0667	5015
2	0.1184	2825
3	0.219	1527
4	0.3084	1084
5	0.3987	839
6	0.5037	664
7	0.5867	570

По-видимому, скорости распространения со значениями равными 1084 м/с и меньше обусловлены переносом энергии, генерируемого в воде низкочастотного акустического импульса, в грунте поперечными и поверхностными волнами, а также возможными последовательными отражениями от границы раздела донных слоев.

Для оценки влияния рельефа суши и акустических свойств пород, составляющих мыс Шульца, на распространение акустических импульсов, генерируемых в бухте Витязь, были проведены измерения тональных и импульсных сигналов с помощью гидрофона P_2 , установленного в 5-литровой пластиковой бутылки с водой. Излучение производилось в точке Т.3, а прием осуществлялся в точках R.2, R.3 и R.4, показанных на рис. 2.22. Результаты анализа экспериментальных

данных и численного моделирования для сигнала частотой 27 Гц представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Экспериментальные и модельные значения потерь для тонального сигнала, излученного в точке Т.3 и принятого на мысе Шульца в точках R.2, R.3 и R.4. Для каждой точки указывается ее высота над уровнем моря и расстояние до источника.

Название точки	Высота над уровнем моря, м	Расстояние до источника Т.3, м	$TL(f = 27 \text{ Гц}, x)$, дБ	
			эксперимент	модель
R.2	32	312	-52	-72.4
R.3	49	369	-70	-72.2
R.4	83	533	-82	-77.5

На рис. 2.30 показано модельное поле, рассчитанное с помощью МРЕ для геоакустического волновода с акустическими параметрами, представленными на рис. 2.26, но при вычислениях учитывались пять взаимодействующих мод. Здесь надо отметить, что при моделировании мы использовали сетку с шагами $\Delta z = 0.5$ м, $\Delta y = 1$ м и $\Delta x = 2$ м, и для сравнения с экспериментальными данными мы взяли значение модельных потерь $TL(f = 27 \text{ Гц})$ для z на 1 м ниже поверхности грунта, на котором стояла пластиковая 5-литровая бутылка с водой и гидрофоном P_2 .

На рис. 2.31а показаны вариации акустического давления, измеренные с помощью опорного гидрофона P_0 в море на глубине 10 м в точке Т.3 и с помощью гидрофона P_2 , установленного в бутылки с водой на грунте в точке R.4. На этом рисунке представлены спектры этих импульсных сигналов, в которых хорошо выражены два пика спектральной плотности мощности на частотах 57 и примерно 110 Гц. Потери на распространение для частоты 57 Гц примерно равны -35 дБ.

Для моделирования распространения импульсного сигнала сперва строится эквивалентная точечная функция источника S по опорному сигналу с помо-

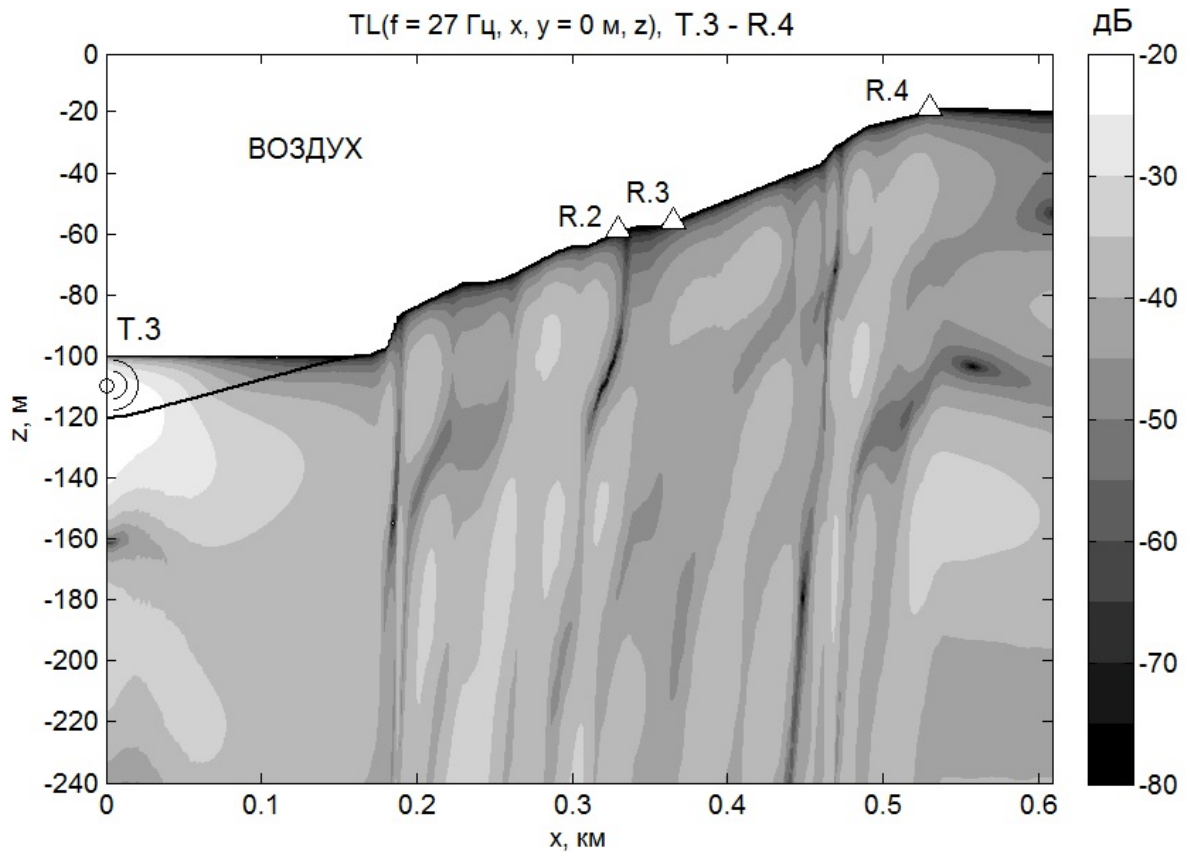


Рис. 2.30. Функция потерь TL при распространении сигнала частотой 27 Гц вдоль трассы Т.3 – R.4. При моделировании учитывались пять взаимодействующих мод.

щью методики, представленной в разделе 3.1. На рис. 2.31б видно, что измеренная амплитуда $p(t)$ примерно в 10 раз меньше, чем в эквивалентном точечном источнике S . Их спектры отличаются примерно на 25 дБ, следовательно, экспериментальные потери при распространении энергии данного акустического импульса из моря от точки Т.3 до точки R.4 (расстояние 533 м, высота над уровнем моря 83 м) составляют -60 дБ.

Моделирование проведено с помощью МРЕ в адиабатическом приближении с учетом первых пяти мод и «жидкого» дна, его результаты представлены на рис. 2.31в в виде графиков вариаций акустического давления $p(t)$ и их спектров $G(f)$. Графики сравнения экспериментального и модельного импульсов в точке R.4 качественно иллюстрирует согласие результатов моделирования с натурными измерениями.

Представленные выше результаты показывают, что акустические поля от

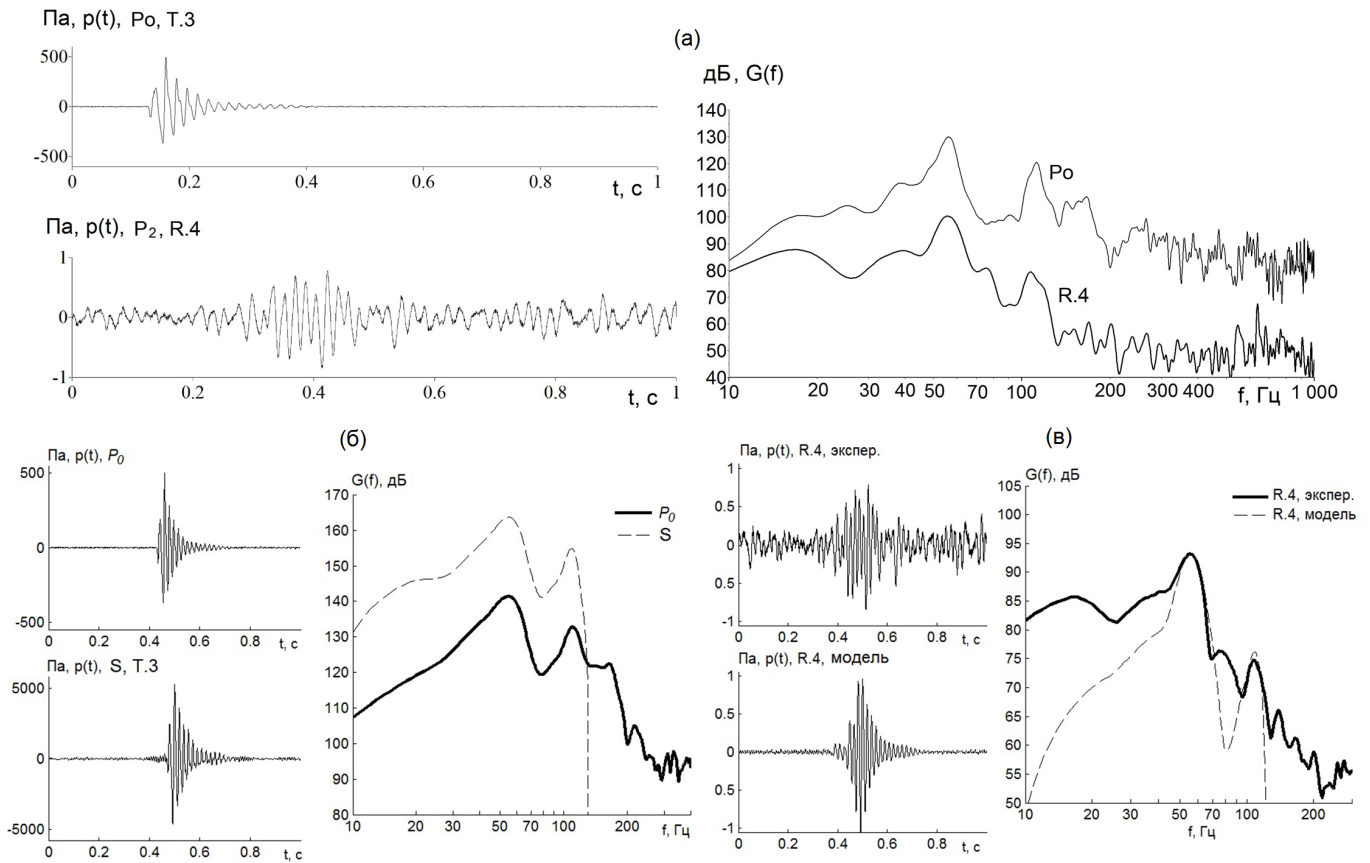


Рис. 2.31. Графики вариаций акустического давления, измеренные с помощью опорного гидрофона P_0 в море и гидрофона P_2 , установленного в точке приема R.4, и их спектры $G(f)$ (а). Эквивалентная точечная функция S пневматического импульсного источника, построенная по опорному сигналу с гидрофона P_0 в точке Т.3, и их спектры (б). Акустический импульс, измеренный гидрофоном P_2 на мысе Шульца в точке R.4 и модельный импульс, и их спектры (в).

различных источников могут устойчиво регистрироваться на поверхности суши и в скважинах на довольно значительном расстоянии от уреза воды. Используемый в экспериментах аппаратный комплекс обеспечивает проведение оперативных натурных измерений, а программа для моделирования тональных и импульсных акустических полей в неоднородных трехслойных (воздух, вода, грунт) геоакустических волноводах, основанная на распространяющихся адиабатических или взаимодействующих нормальных модах в вертикальной плоскости и узкоугольном параболическом уравнении в горизонтальной плоскости (см. описание в разделе 1.6.3 настоящей диссертации), позволяет оценивать потери при распространении акустических сигналов. Получаемые таким путем

данные необходимы для оценки возможного воздействия на биоту антропогенных шумов в воде и воздухе, в частности, генерируемых сейсмоакустическими источниками, вертолетами и судами на воздушной подушке.

На основании результатов натурных измерений, представленных в работе [73] и результатов исследований, приведенных в данном параграфе, можно рассмотреть возможность значительного удешевления организации и проведения в реальном времени акустического мониторинга сейсморазведочных работ на шельфе [152, 153]. В этом случае с помощью МРЕ в модельном трехмерном геоакустическом волноводе будет рассчитываться импульсное акустическое поле, формируемое в данной области шельфа сейсморазведочным сигналом. Эквивалентная точечная функция его источника может быть построена по методикам, представленным в разделе 3.1, опирающимся на натурные измерения, проведенные одиночным опорным гидрофоном в море или на берегу.

2.4. Выводы ко второй главе

1. В сценарии распространения тонального звука над наклонным дном на шельфе в сторону континентального склона экспериментально и численно исследовано явление «захвата» энергии звуковых колебаний на частоте 320 Гц придонным звуковым каналом при наличии сезонного термоклина. Численное моделирование показало, что модель геоакустического волновода в приближении «жидкого» дна (МРЕ, 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. Впервые экспериментально и теоретически детально исследована вертикальная структура акустического поля при оползневом характере распространения звука вдоль наклонного дна на шельфе. Согласование результатов моделирования с натурными данными для аку-

стической трассы протяженностью 18 км позволило следующим этапом удлинить модельный волновод до материкового склона и далее в Японское море, а также расширить возможности модели до зимних гидрологических условий. В результате расчетов был смоделирован «эффект оползня» для звука частотой 320 Гц в летне-осенних гидрологических условиях и эффект равномерного распространения звука в водном слое шельфовой зоны и формирования обширных зон тени и конвергенции в глубоководной части моря в зимних условиях.

2. В случае распространения звука в сторону берега на относительно мелководном шельфе (10 – 30 м), характерном для северо-восточного побережья о. Сахалин, сезонный термоклин приводит к увеличению функции потерь TL в пределах 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.

3. На распространение звука в шельфовой зоне существенное влияние оказывает структура и свойства морского дна. Реальное дно для районов шельфа невозможно описать с помощью какой-либо одной обобщенной геоакустической модели. Специфика отдельно взятого района может требовать включения в волновод пространственных неоднородностей донных осадков, выраженных, например, в изменениях мощности осадочного грунта, выходов природных газов в виде вертикальных каналов и т.д. Подобные неоднородности в моделировании акустического поля учитываются либо путем усреднения донного слоя с эффективным значением скорости продольных волн [102], либо путем введения в модель дополнительного слоя, на границах которого скорость звука изменяется скачком.

Экспериментальные исследования формирования импульсного поля в отно-

сительно глубоководной бухте Витязь показало, 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 МПУ. 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 районе северо-восточного шельфа о. Сахалин экспериментально было установлено, что на потери звука влияют аномальные зоны неоднородности поля скорости продольной волны в дне, представленные в виде «солитонов». С помощью численного моделирования показано, что аномальный участок по форме похожий на уединенную волну с основанием равным 400 м и высотой 75 м, в которой значение C_p на 350 м/с меньше, чем в дне и на 110 м/с меньше, чем в водном слое, увеличивает потери при распространении сейсморазведочного сигнала в водном слое на 14,2 дБ в частотном диапазоне 10 – 250 Гц. На частотах выше 70 Гц основная энергия сейсмоакустического импульса переносится за счет водных мод, и горизонтальная диаграмма в этом случае определяется особенностью конфигурации группы пневмоизлучателей.

4. Акустические поля от различных источников могут устойчиво регистрироваться на поверхности суши и в скважинах на довольно значительном расстоянии от уреза воды. Аппаратурный комплекс, использовавшийся в экспериментах с волноводами, включающих сухопутные участки, обеспечивал проведение

оперативных натуральных 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.

5. В ходе моделирования сценариев экспериментов была успешно протестирована и адаптирована для решения прикладных задач вычислительная программа МРЕ, основанная на решении узкоугольных МПУ (описание приведено в разделе 1.6.3 Главы 1). Согласования результатов моделирования с натурными данными позволило расширить экспериментальные исследования на другие частоты, области и гидрологические условия.

Глава 3

Методика оценки уровней акустических сигналов от идентифицированного источника

Для практических целей актуальной задачей является моделирование распространения импульсных акустических сигналов от известных источников антропогенного происхождения. Источники импульсного акустического поля могут быть не только точечными, но и распределенными в пространстве. Например, как упоминалось в разделе 1.2 Главы 1, излучающий комплекс сейсморазведочного судна представляет собой совокупность нескольких буксируемых на заданном горизонте пневмоисточников, которые в ходе работы одновременно излучают мощные короткие импульсные сигналы [154]. Основной проблемой при решении задачи моделирования акустического поля импульсного сигнала является отсутствие данных непосредственно в точке источника (или группы источников). Поскольку модовые параболические уравнения требуют задания начальных условий, необходимо на основе ближайшего к источнику гидрофона получить комплексное значение эффективной функции источника. В данной главе предложена методика построения такой функции эквивалентного точечного источника по результатам натурных измерений, выполненных одиноким опорным гидрофоном (раздел 3.1). Приведено сравнение результатов моделирования акустических полей, формируемых группой пневмоисточников, выполненных с помощью моделей узкоугольного и широкоугольного МПУ (раздел 3.2). Основываясь на совокупности экспериментальных данных, показана методика расчета акустического воздействия на прибрежную зону от импульсного источника на берегу и рассчитан уровень звуковой экспозиции точек положения кита, наблюдаемого с берега (раздел 3.3).

Материал, описанный в главе, опубликован в следующих работах автора [95, 147, 155–159].

3.1. Функция точечного источника для моделирования распространения импульсных акустических сигналов

На основе натуральных данных по сейсморазведочным работам, проводимым на северо-восточном шельфе о. Сахалин [95, 147], рассматривается моделирование нестационарного акустического поля, формируемого группой пространственно-разнесенных пневмоизлучателей, при условии настолько большого расстояния от источника до опорного гидрофона, что можно говорить о заметном изменении формы спектра распространяющегося импульса.

На рис. 3.1а приведена карта района проведения сейсморазведочных работ на относительно мелководном северо-восточном шельфе о. Сахалин. Судно-катамаран «Искатель-4» обеспечивало излучение коротких низкочастотных импульсных сигналов на горизонте 4 м (осадка судна — 5 м) в море глубиной 8 – 30 м с помощью пневмоисточников (их описание и принцип работы приведены в разделе 1.2 Главы 1). Суммарный рабочий объем буксируемых судном «Искатель-4» пневмоисточников составлял 1300 куб. дюймов. Трек, вдоль которого двигалось судно, ориентирован практически перпендикулярно береговой линии. Сейсмоакустические сигналы регистрировались в 20 см над дном с помощью гидрофона АПАР в точках $P1$ и $P2$ на 20- и 10-метровых изобатах соответственно.

На рис. 3.1б-в показаны акустические импульсы, которые формируются в контролируемой акватории в момент прохождения судном точки S с глубиной моря равной 19 м. В точке акустического мониторинга $P1$, удаленной от излучателя на 650 м, амплитуда вариаций акустического давления в импульсе, измеренном у дна, достигает 3 кПа и в его спектре хорошо выражен пик мощности на частоте 130 Гц. Значение уровня акустического воздействия $SEL_{90\%}^{imp}$ на временном интервале $T_{90\%}$ равно 168 дБ отн. 1 мкПа²·с, соответственно $SPL_{rms}^{imp} = 183$ дБ отн. 1 мкПа, но уже на расстоянии 6,2 км в точке $P2$, с глубиной моря 10 м амплитуда акустического давления в измеренном импульсе не

превышает 130 Па, а значения параметров импульса $SEL_{90\%}^{imp} = 140$ дБ, $SPL_{rms}^{imp} = 148$ дБ. Таким образом, в радиусе 700 – 800 м от судна «Искатель-4» уровень SPL_{rms}^{imp} превышает 180 дБ, а такие уровни акустических импульсов могут вызвать травму слуховых органов у некоторых особей серых китов [160].

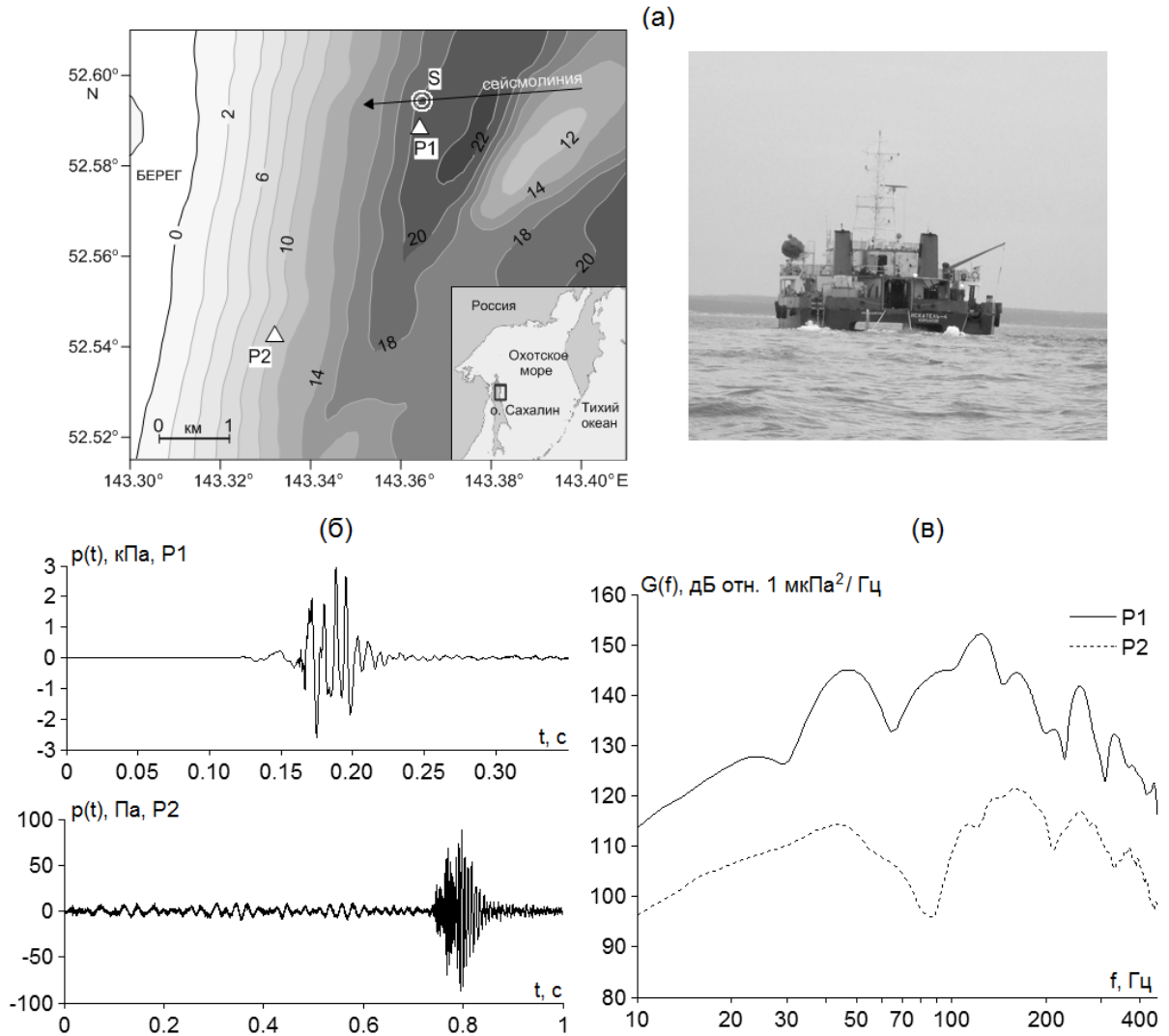


Рис. 3.1. Карта района с указанием точек приема акустических данных $P1$, $P2$ и точки излучения S акустического сейсморазведочного импульса (а), вариации акустического давления $p(t)$, измеренных в $P1$ и $P2$ (б) и их спектры $G(f)$ (в).

Рассмотрим особенности распространения на шельфе энергии сейсморазведочных импульсов. На рис. 3.2 подробно рассмотрен сейсморазведочный акустический импульс, измеренный гидрофоном в точке $P2$ на расстоянии 6,2 км от пневмоизлучающего комплекса судна. Вариации акустического давления $p(t)$ иллюстрируют характер распространения энергии сигнала: сначала приходит

энергия низкочастотных акустических волн (6 – 70 Гц), распространившихся в толще донных пород в виде головной волны, или так называемые «предвестники». Их спектр показан на рис. 3.2 кривой **2**. На временном интервале **3** приходит энергия, переносимая акустическими волнами, распространяющимися в водном слое – это два пика в графиках спектральной плотности мощности **1** и **3** на частотах 100 – 180 Гц и 220 – 320 Гц соответственно. На интервале **4** хорошо выражена волна, соответствующая фазе Эйри [161] – она распространяется с наименьшей групповой скоростью в данном волноводе и согласно графику $G(f)$ имеет частоту около 300 Гц.

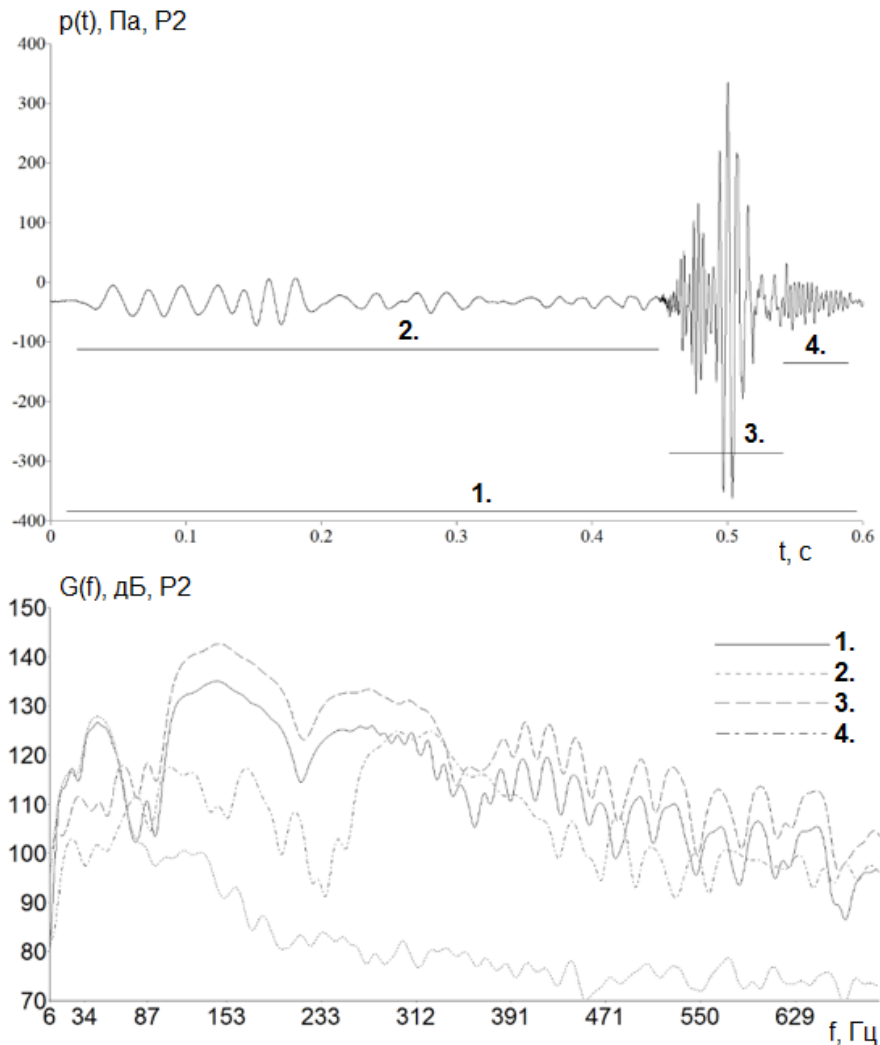


Рис. 3.2. Вариации акустического давления $p(t)$, измеренные в точке $P2$, и графики спектральной плотности мощности $G(f)$, соответствующие четырем временным интервалам, показанным на этом рисунке.

Перейдем к численному моделированию распространения сейсморазведочного сигнала в данной акватории, опирающемуся на результаты натурных измерений. На рис. 3.3 показан вертикальный разрез модельного геоакустического волновода с измеренным распределением скорости звука в водном слое, скорости продольной волны в донном слое (C_p), плотности осадочных слоев (ρ) и коэффициента затухания энергии продольной волны (α). Параметры дна соответствуют осадочному слою с переходом от мелкозернистого песка до крупнозернистых осадочных отложений. До горизонта 30 м дно задается однородным, далее градиент геоакустических параметров сохраняется постоянным до горизонта 60 м, затем происходит переход к однородному слою мощностью 540 м. Данная модель волновода сформирована на основе сведений о структуре дна, полученных из других моделей исследуемого района и подтверждена экспериментальными данными морской сейсморазведки (см. рис. 2.18).

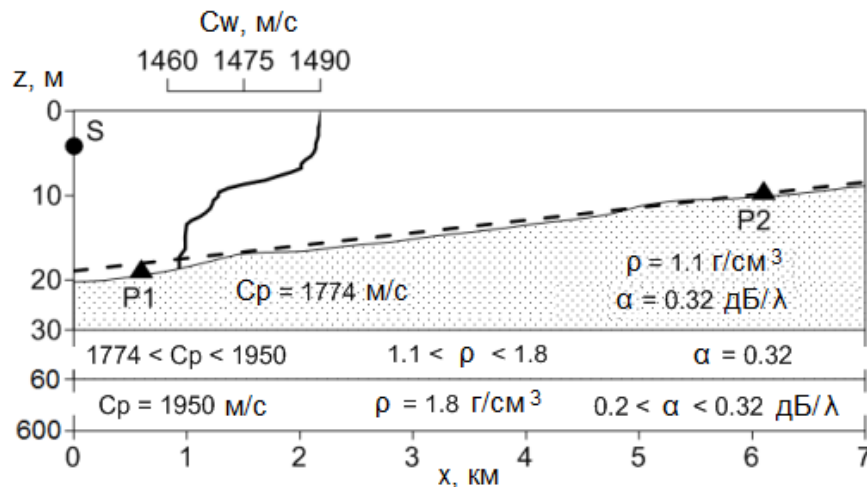


Рис. 3.3. Модельный геоакустический волновод с указанием распределения геоакустических параметров. S – точечный источник сейсморазведочного импульса, эквивалентный излучающему комплексу судна «Искатель-4». Пунктиром показана линейная аппроксимация профиля дна, заданная уравнением (3.16).

Уравнение (1.33) выражает решение прямой задачи о распространении звука и при переходе в частотную область позволяет вычислить акустическое поле $\hat{p}(\omega, x, y, z)$, создаваемое точечным источником, который излучает сигнал фор-

мой $S(t)$ и спектром $\hat{S}(\omega) = \mathcal{F}(S)$, где \mathcal{F} – преобразование Фурье (1.9):

$$\hat{p}(\omega, x, y, z) = \hat{S}(\omega) \sum_{j=1}^J A_j(x, y) \phi_j(z, x, y). \quad (3.1)$$

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 источника 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 тональных компонент опорного сигнала из точки излучения в точку приема. Далее производим коррекцию на потери действительной и мнимой части комплексной величины, характеризующей акустическое поле, берем обратное преобразование Фурье и строим акустический импульс. Будем называть его модельной функцией эквивалентного точечного источника — $S_1(t)$:

$$\hat{S}_1(\omega) = \frac{\hat{p}_1(\omega)}{\sum_{j=1}^J A_j(x_1, y_1) \phi_j(z_1, x_1, y_1)}, \quad (3.2)$$

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 (3.2) вычисляется путем решения МПУ для дискретного набора частот, равномерно распределенных по заданному интервалу.

В результате получают начальные условия для модового параболического уравнения, адекватно воспроизводящие при моделировании сигнал в точке расположения опорного гидрофона. Функция эквивалентного точечного источника во временной и спектральной областях показана на рис. 3.4а, г. Импульс, полученный путем пересчета функции источника S_1 в точку $P2$ (рис. 3.5г) подобен акустическому импульсу, измеренному в этой точке (рис. 3.5в). Результаты сравнительного анализа параметров экспериментальных и модельных импульсов представлены в табл. 3.1, из которой видно, что в точке мониторинга $P2$,

удаленной от источника на 6,2 км, модельное значение $SEL_{imp}(20 - 200 \text{ Гц})$ на 1 дБ больше экспериментального.

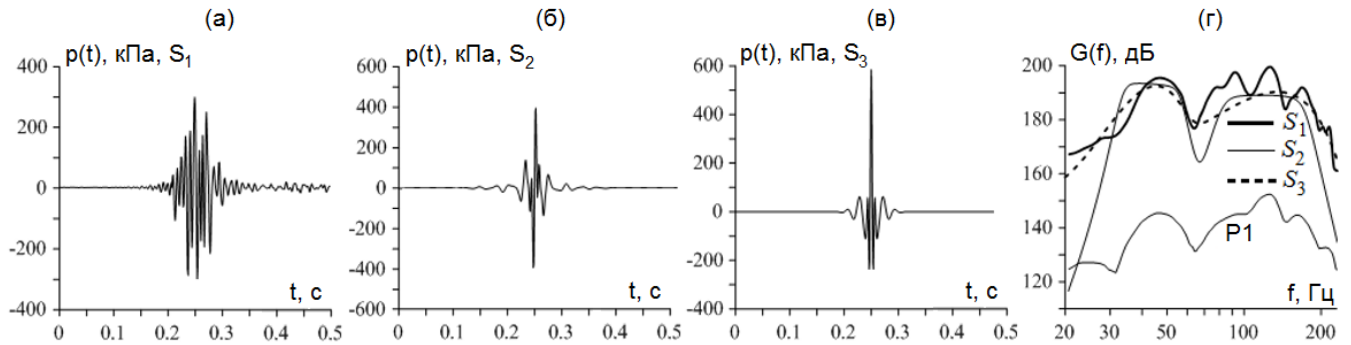


Рис. 3.4. Сравнение функций точечного источника, построенных по опорному сигналу $P1$ тремя способами: на основе обратного расчета (3.2) (а), с помощью производной функции Гаусса (3.13) (б), с помощью функции Морле (3.14) (в); спектры приведенных функций и опорного сигнала (г).

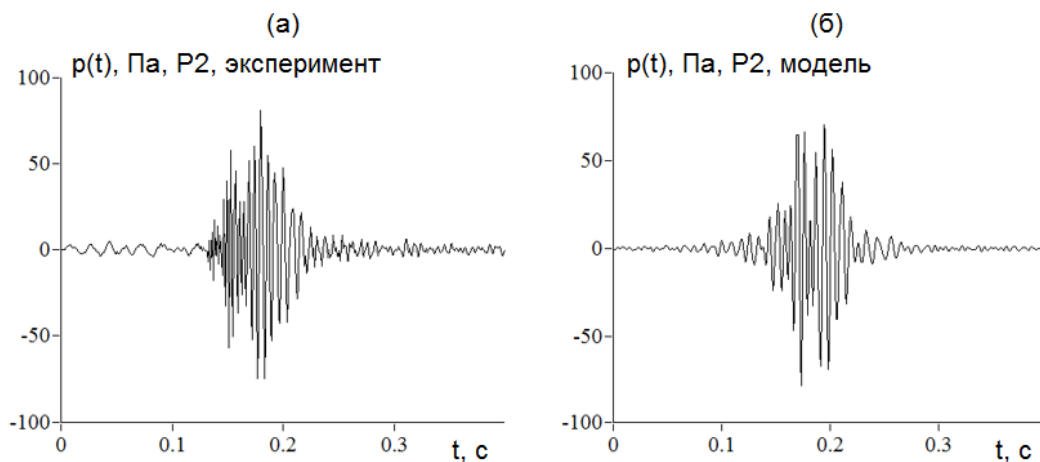


Рис. 3.5. Экспериментальный импульс, измеренный в $P2$ (а), соответствующий ему модельный импульс, полученный при использовании эквивалентного точечного источника — S_1 с помощью МПУ (б).

Целью численного моделирования является построение пространственного распределения значений параметра $SEL(\Delta f, x, y, z)$ в водном слое трехмерного модельного геоакустического волновода, которое необходимо для корректной оценки вокруг сейсморазведочного судна зон определенного уровня возможного антропогенного воздействия на морских млекопитающих. На рис. 3.6 показано такое распределение на горизонте $z = 4$ м, что соответствует горизонту пнев-

Таблица 3.1. Экспериментальные и модельные значения $SEL_{imp}(\Delta f = 20 - 200 \text{ Гц})$ для импульсов, формируемых в точках мониторинга $P1$ и $P2$ излучающим комплексом судна «Искатель-4» и тремя точечными эквивалентными источниками: расчетный подход по формуле (3.2) – S_1 , аналитический подход согласно (3.13) – S_2 и (3.14) – 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

моизлучающего комплекса сейсморазведочного судна «Искатель-4» при излучении акустического импульса, примененного в качестве опорного при нахождении эквивалентной модельной функции источника S_1 (рис. 3.4а).

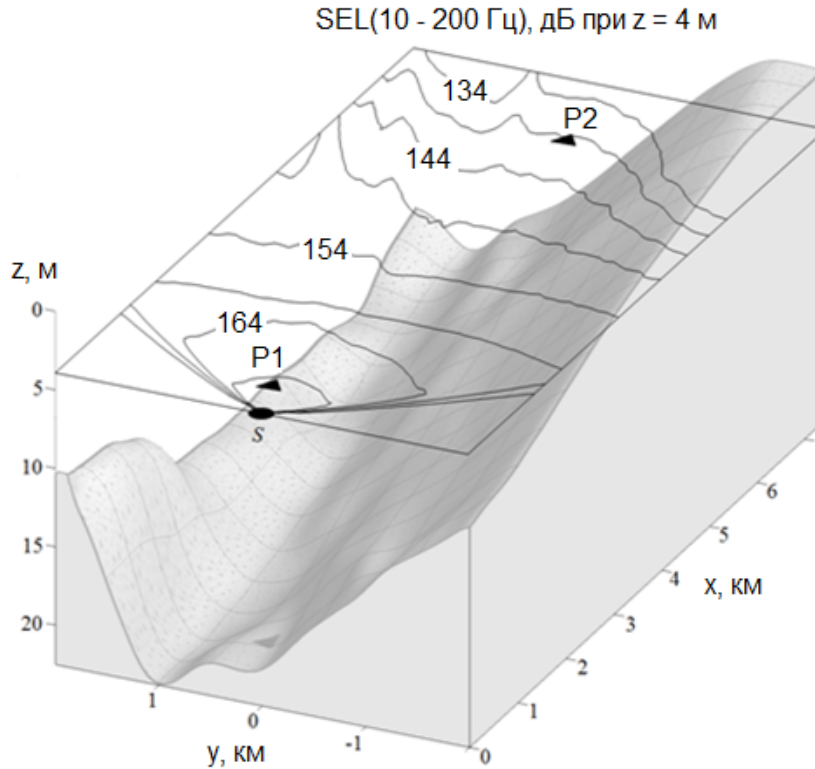


Рис. 3.6. Распределение значений $SEL(x, y, z = 4 \text{ м})$, рассчитанное с применением модельной функции эквивалентного точечного источника S_1 , показанной на рис. 3.4а.

В действительности реальный акустический сейсморазведочный импульс вблизи «источника» может иметь форму, отличную от формы импульса, показанного на рис. 3.4а. Альтернативный подход может состоять в параметризации точечного источника аналитической функцией. В работе [153] для моделирования распространения сейсмоимпульсов во временной области была использована модель, в основе которой лежит численное решение двумерного нестационарного волнового уравнения в цилиндрических координатах. В этой работе в качестве задаваемой аналитически функции источника была применена производная от функции Гаусса:

$$p(t) = A(t - t_0) \cdot \exp\left(\frac{-4 \cdot (t - t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad (3.3)$$

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

Преобразование Фурье $\hat{p}(\omega)$ для функции (3.3) принимает вид:

$$\hat{p}(\omega) = \frac{iA}{16\sqrt{2}}\tau^3\omega \cdot \exp\left(it_0\omega - \frac{\tau^2\omega^2}{16}\right). \quad (3.4)$$

Будем предполагать, что величины A , τ и t_0 в дальнейшем вещественные, а τ и t_0 , кроме того, положительные. В этом случае квадрат модуля функции $\hat{p}(\omega)$, который мы будем обозначать через $S(\omega)$ будет иметь вид:

$$S(\omega) = \frac{A^2}{512}\tau^6\omega^2 \cdot \exp\left(-\frac{\tau^2\omega^2}{8}\right). \quad (3.5)$$

Переходя от круговой частоты $\omega = 2\pi f$ к частоте f , получим

$$S(f) = \frac{A^2}{128}\tau^6\pi^2 f^2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2\tau^2 f^2}{2}\right). \quad (3.6)$$

Покажем, что при заданном численном значении параметр τ функции $S(f)$ обратно пропорционален частоте f_0 , в которой функция $S(f)$ принимает максимальное значение. Действительно, в точке максимума f_0 производная $S'(f_0)$

функции $S(f)$ равна нулю.

$$\begin{aligned} S'_{f-f_0}(f) &= \frac{1}{64}A^2 f_0 \tau^6 \pi^2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \tau^2 f_0^2}{2}\right) - \frac{1}{128}A^2 f_0^3 \tau^8 \pi^4 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \tau^2 f_0^2}{2}\right) = \\ &= \frac{1}{64}A^2 f_0 \tau^6 \pi^2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \tau^2 f_0^2}{2}\right) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\pi f_0 \tau\right) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\pi f_0 \tau\right). \end{aligned} \quad (3.7)$$

Отсюда, учитывая замечание о том, что параметр $\tau > 0$, $S'_f(f_0) = 0$ при $\tau = \frac{\sqrt{2}}{\pi \cdot f_0}$, и заменив в формуле (3.6) параметр τ выражением $\frac{\sqrt{2}}{\pi \cdot f_0}$, получим окончательное выражение для $S(f)$:

$$S(f) = \frac{A^2}{16\pi^4 f_0^4} \left(\frac{f^2}{f_0}\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{f^2}{f_0^2}\right). \quad (3.8)$$

Отсюда следует, что если задано значение B для пика импульса на частоте f_0 , например, в децибелах, то величина A определяется из соотношения (3.6):

$$b^2 = 10^{\frac{B}{10}} = S(f_0) = \frac{A^2}{16\pi^4 f_0^4} \left(\frac{f_0^2}{f_0}\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{f_0^2}{f_0^2}\right) = \frac{A^2}{16\pi^4 f_0^4 e}. \quad (3.9)$$

Отсюда:

$$A = \pm 4b\pi^2 f_0^2 \sqrt{e}. \quad (3.10)$$

Аналитическое представление формы импульса позволяет вычислить значение SEL импульсного сигнала. Пусть для простоты временной интервал T , на котором мы рассматриваем функцию $p(t)$, равен 1 с. Тогда:

$$\int S(f)df = \frac{A^2}{16\pi^4 f_0^4} \int \left(\frac{f^2}{f_0}\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{f^2}{f_0^2}\right) df = \frac{A^2 \sqrt{\pi}}{64\pi^4 f_0^3} = \frac{b^2 f_0 e \sqrt{\pi}}{4}, \quad (3.11)$$

$$SEL = 10 \cdot \log_{10} \frac{b^2 f_0 e \sqrt{\pi}}{4} = B + 10 \cdot \log_{10} \frac{f_0 e \sqrt{\pi}}{4}. \quad (3.12)$$

На графике спектральной плотности мощности экспериментального сигнала (рис. 3.1в) видно, что колебания импульса 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 (3.3),

имеет один частотный пик с центральной частотой f_0 , то аналитическую функцию источника необходимо представить в виде суммы двух сигналов:

$$S_2(t) = p_1(t) + p_2(t) = A_1(t - t_0) \cdot \exp\left(-4 \cdot \log_e 2(t - t_0)^2/\tau_1^2\right) + \\ + A_2(t - t_0) \cdot \exp\left(-4 \cdot \log_e 2(t - t_0)^2/\tau_2^2\right). \quad (3.13)$$

Определим функцию $p_1(t)$ таким образом, чтобы она вносила вклад в энергию импульса на частоте 45 Гц, а $p_2(t)$ 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. На рис. 3.7а приведен график акустического сейсморазведочного импульса, измеренного в точке мониторинга $P1$, а на рис. 3.7в представлен график, соответствующий модельному импульсу для этой точки, рассчитанному для аналитического сигнала, показанного на рис. 3.7б. Расчеты проведены с помощью МПУ для трехмерного геоакустического волновода с параметрами, приведенными на рис. 3.3 в приближении двух распространяющихся взаимодействующих мод. На рис. 3.7д приведены графики спектров, соответствующих натурным измерениям и моделированию. Значения A_1 и A_2 (см. табл. 3.2) выбирались с учетом согласования графиков соответствующих спектров – $G(f)$. В табл. 3.1 для S_2 представлены значения $SEL_{imp}(\Delta f = 20 - 200 \text{ Гц})$, соответствующие расчетам с использованием эквивалентной аналитической функции, которые согласуются с экспериментальными данными. В точке мониторинга $P2$ экспериментальные и модельные значения SEL импульсных сигналов отличаются на 0,3 дБ, что вполне приемлемо для практических целей.

Для локализации функции как во времени, так и в частотной области предлагается использовать другую аналитическую функцию – используемую в вейвлет-анализе функцию Морле (например, [162]), заданную соотношением:

$$S_3(t) = P_{max} \cdot \exp\left(i\omega_0 \frac{t}{b}\right) \cdot \left(-\frac{t^2}{2b^2}\right), \quad (3.14)$$

где параметр P_{max} [Па] является пиковым значением генерируемого импульса;

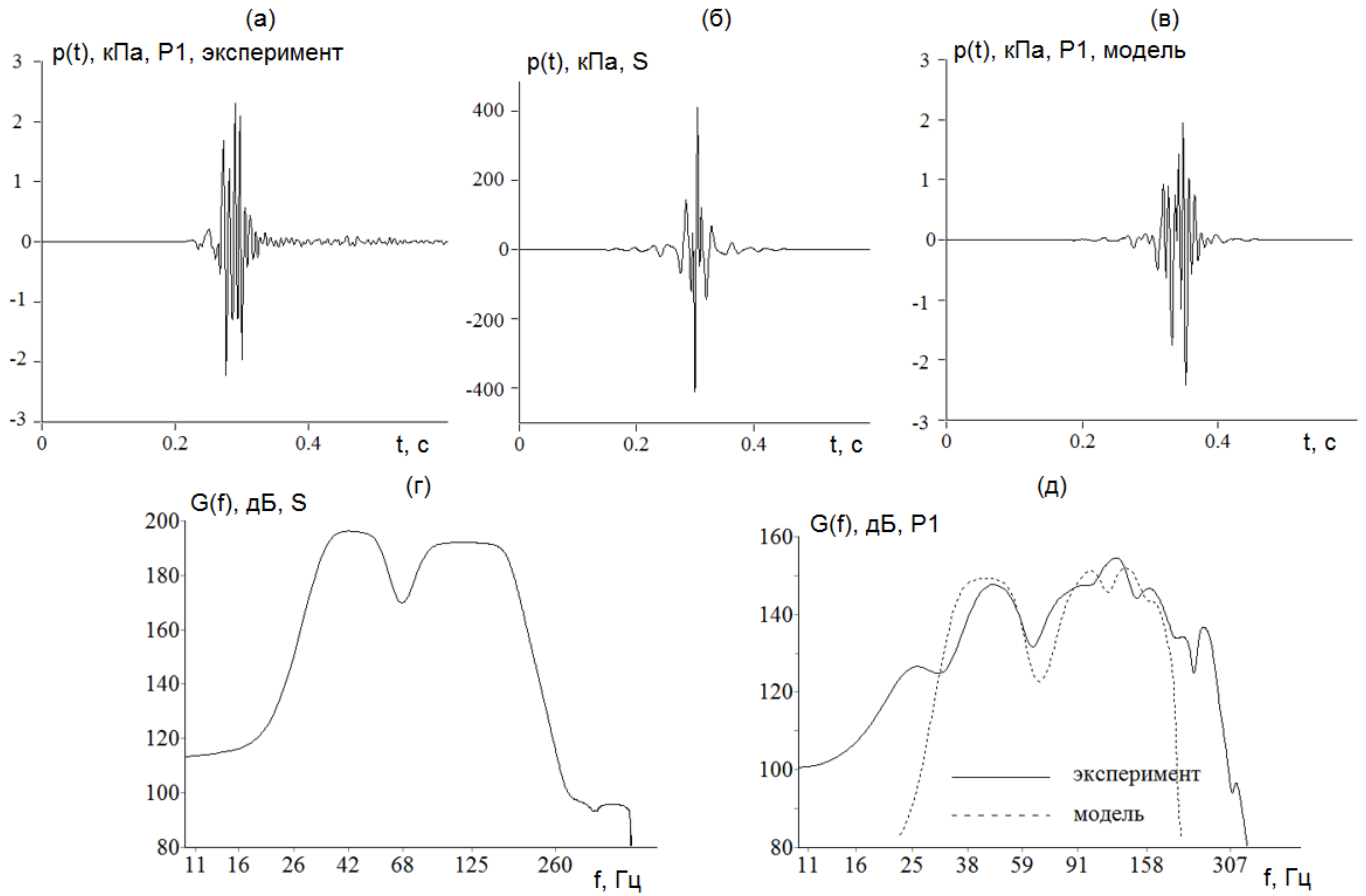


Рис. 3.7. Экспериментальный импульс, измеренный в точке $P1$ (а), аналитическая функция эквивалентного точечного источника S_2 (б), соответствующий данному источнику модельный импульс в точке $P1$ (в). Спектр эквивалентной аналитической функции источника (г). Экспериментальный и модельный спектры акустических импульсов в точке $P1$ (д).

Таблица 3.2. Параметры аналитических импульсов $p_1(t)$ и $p_2(t)$, примененных в формулах (3.13) и (3.14) для построения функции источника S_2 и S_3 соответственно.

	$S_2 = p_1(t) + p_2(t)$, производная функции Гаусса			$S_3 = p_1(t) + p_2(t)$, функция вейвлета Морле		
	Параметры импульса		Фильтрация	Параметры импульса		
	$A \cdot 10^5$	τ	$f_n - f_m$, Гц	P_{max} , кПа	f_0 , Гц	b
$p_1(t)$	123.5	0.010004	35–60	150	45	0.02
$p_2(t)$	723.5	0.003215	80–200	470	135	0.04

ω_0 [рад] и b – параметры, регулирующие значение частоты пика спектральной плотности мощности

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi b} \quad (3.15)$$

и его ширину соответственно. Функция точечного источника S_3 (см. рис. 3.4в) в этом случае также задается как сумма двух сигналов $p_1(t)$ и $p_2(t)$, каждый из которых определяется формулой (3.14) со своим набором параметров, показанных в табл. 3.2.

Первый способ построения источника (S_1) является оптимальным по затратам вычислительных и временных ресурсов. Построение функций источника с помощью аналитических функций (3.13) и (3.14) являются математической альтернативой первому способу и в некоторых случаях может достигать более точного результата построения импульсного поля. Заметим, что третий способ восстановления источника не требует дополнительных операций полосовой фильтрации, а также параметры, входящие в его формулу, имеют прямое физическое толкование.

В данном разделе показаны возможности численного моделирования сейсмоакустических импульсных полей, формируемых сейсморазведочными сигналами в море, с использованием модового параболического уравнения в неоднородных трехмерных геоакустических волноводах в приближении распространения взаимодействующих нормальных акустических мод и реконструкции функции точечного эквивалентного источника. Расчеты пространственного распределения функции SEL_{imp}^{1s} , показали приемлемую для практики точность. В точках, удаленных от излучателя на 0,65 км – $P1$ и 6,2 км – $P2$, модельные значения SEL_{imp}^{1s} отличаются от экспериментальных менее 2 дБ (табл. 3.1).

3.2. Сравнение с результатами расчетов широкоугольного МПУ

В этом разделе исследуются различия между двумя моделями узкоугольного (МРЕ) и широкоугольного (AMPLE) МПУ, описанных в разделе 1.6.3 Главы 1. Для этого вновь рассматривается сценарий распространения звука, описанный в предыдущем разделе. Импульсные акустические сигналы, записанные приемником $P1$ на расстоянии около 650 м от точки излучения S (см. рис. 3.1), использовались для реконструкции спектра источника согласно формуле (3.2), а данные другого приемника $P2$ – для сравнения с результатами моделирования и проверки точности моделирования распределения поля SEL .

Как видно из рис. 3.1а, изобаты в области моделирования представляют собой практически равноудаленные параллельные прямые линии, поэтому батиметрия может быть представлена аппроксимирующей линейной функцией. Угол наклона дна составляет около $0,3^\circ$, что характерно для шельфа Сахалина. Траектория распространения $S - P1 - P2$ выровнена под углом примерно 16° к оси x , т. е. почти в поперечном направлении. Из литературы известно, что в таких средах связь мод практически незначительна, а горизонтальная рефракция может играть важную роль в распространении энергии акустического поля [96].

Начнем с модели волновода, дно которой аппроксимируется наклонной плоскостью, описываемой следующим уравнением:

$$z = 18.9 - 0.0015x + 0.005y. \quad (3.16)$$

Используя простую линейную модель, мы исследуем разницу между прогнозами поля SEL , полученными узкоугольной моделью МРЕ и широкоугольной программой AMPLE.

На рис. 3.8 показаны горизонтальные распределения параметра SEL импульсного сигнала, распространяющегося из точки S в волноводе с линейной

батиметрией (3.16), рассчитанные методами AMPLE (а) и MPE (б), а также модуль их разности (в). Расчеты указывают, что на глубинах менее 10 м разница полей превышает 8 дБ. Видно, что AMPLE позволяет лучше воспроизвести эффект горизонтальной рефракции звука над наклонным дном. Разница SEL достаточно значительна, поэтому в сценариях распространения, подобных рассмотренному здесь, важно использовать модель, имеющую достаточно широкую апертуру в горизонтальной плоскости.

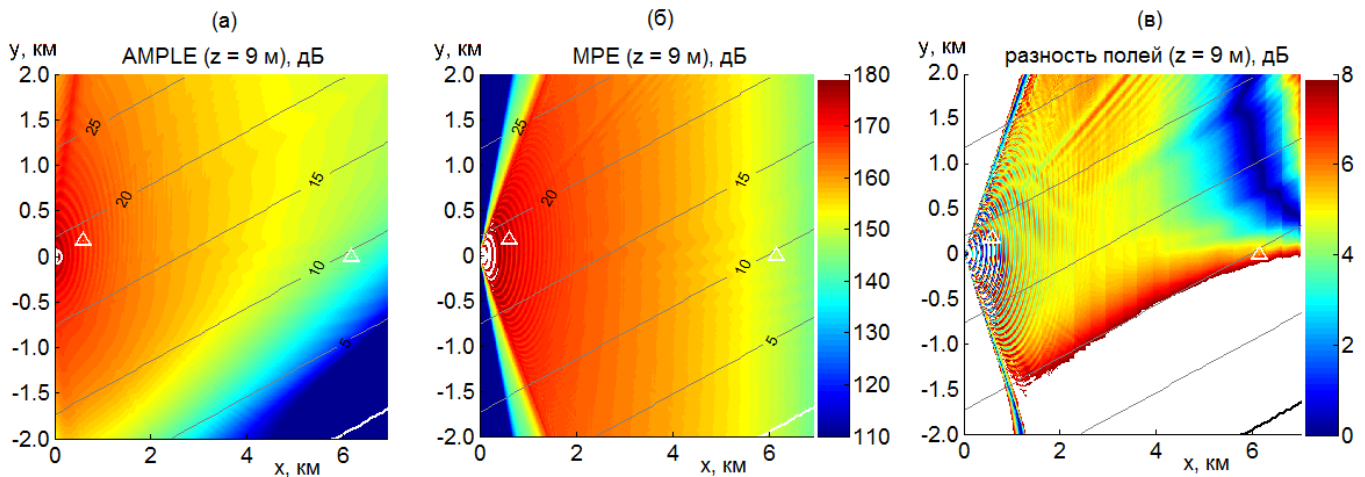


Рис. 3.8. Пространственное распределение параметра SEL на горизонте 9 м, рассчитанное AMPLE (а) и MPE (б) для модели волновода с линейным дном, определяемым уравнением (3.16), и модуль их разности (в). Треугольниками отмечены точки положения приемных гидрофонов.

На следующем шаге исследуется точность вычислений параметра SEL по двум моделям с использованием реалистичных данных батиметрии в модели геоакустического волновода. В этом случае мы также можем смоделировать форму сигнала в точке $P2$ и оценить точность модели путем прямого сравнения с данными измерений. На рисунках 3.9, 3.10, 3.11 показаны результаты расчетов в случае реалистичной батиметрии. Контурные графики на рис. 3.9 показывают, что закономерности распределения SEL в этом случае качественно аналогичны полученным с использованием упрощенной батиметрической модели (3.16). Кроме этого, модуль разности распределения полей, рассчитанных двумя моделями (рис. 3.9в), в этом случае также напоминают контурный гра-

фик на рис. 3.8в. Пространственное распределение поля SEL четко отражает батиметрические особенности района, а его формирования демонстрируют типичные проявление горизонтальной рефракции в условиях мелководья (заметно большая амплитуда поля в более глубокой части акватории).

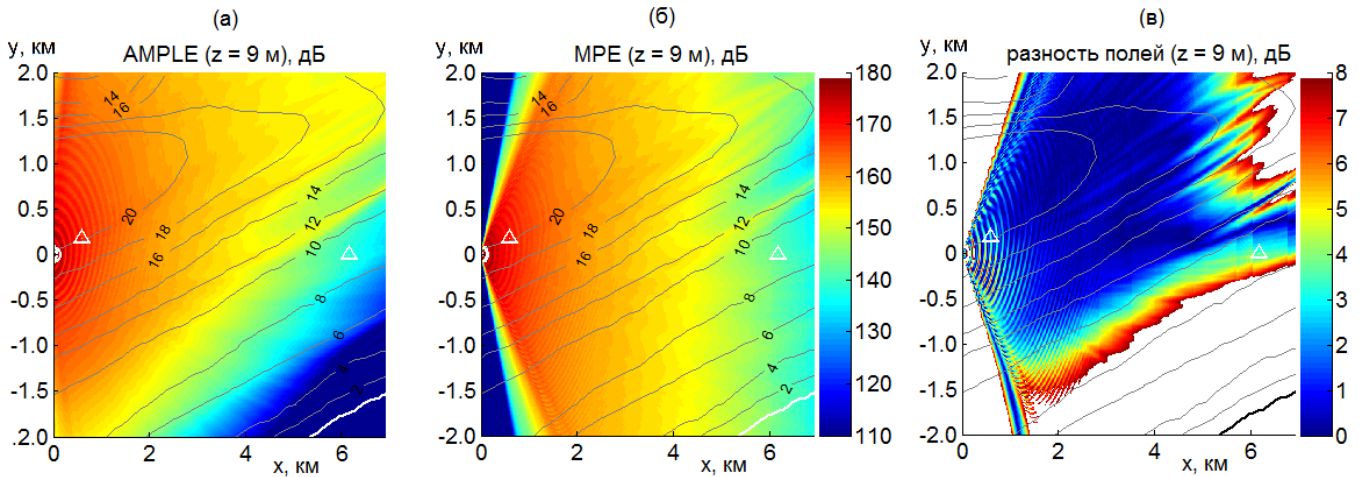


Рис. 3.9. Пространственное распределение параметра SEL на горизонте 9 м, рассчитанное AMPLE (а) и MPE (б) для модели волновода с реальным дном, модуль их разницы (в). Треугольниками отмечены точки положения приемных гидрофонов.

Сравнение результатов моделирования (рис. 3.10 и 3.9в), полученных с использованием моделей AMPLE и MPE, демонстрирует относительно хорошее согласование вдоль пути распространения звука (т.е. вдоль линии $y = 0$). Однако, отойдя от этой линии, мы наблюдаем существенные различия значений поля SEL (см. рис. 3.9в). Очевидно, что это различие является следствием ограниченности апертуры MPE в горизонтальной плоскости, и важно отметить, что разница достигает 8 дБ даже в пределах сектора $\pm 3.5^\circ$ (около линии $y = 0$) на расстоянии около 7 км от источника. Окончательная проверка обеих моделей осуществляется путем прямого сравнения формы импульсных сигналов в точке P2. Это сравнение представлено на рис. 3.11. Импульс, полученный с использованием программы AMPLE, демонстрирует значительно лучшее согласие с экспериментальным сигналом.

Несмотря на то, что общий SEL сигнала в нашей модели воспроизводится с точностью, достаточной для практических приложений (как мы можем

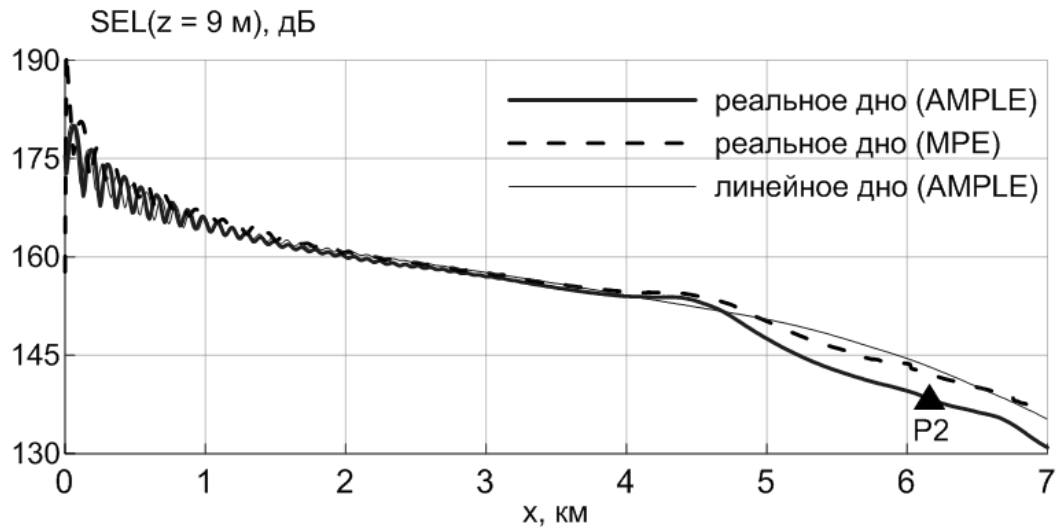


Рис. 3.10. Зависимость SEL от дальности x на горизонте 9 м, рассчитанная AMPLE и MPE для реалистичного и модельного сценариев.

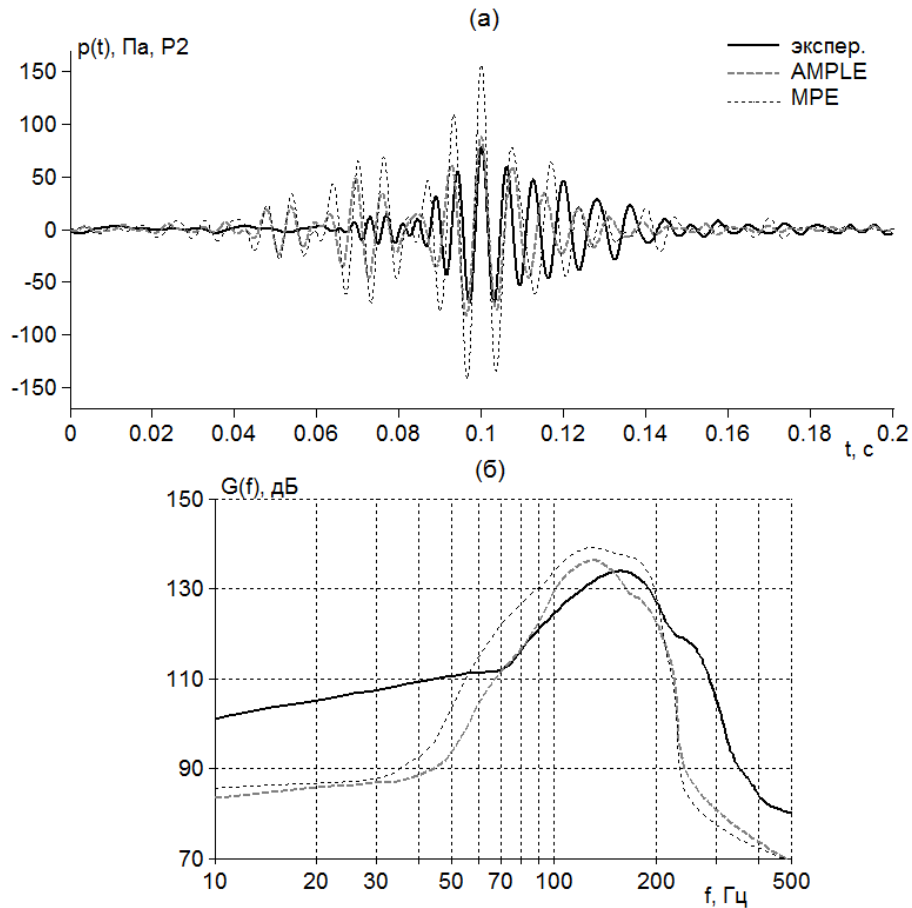


Рис. 3.11. Сравнение экспериментального и модельных импульсных сигналов в точке приема P2 (а) и их спектры (б).

судить по прямому сравнению в точке P2), наблюдается существенное расхождение спектров в диапазоне низких частот 10 – 50 Гц – рис. 3.11. Данное разно-

гласие можно объяснить недостатком сведений о слоях, составляющих морское дно. Было бы целесообразно включить алгоритм геоакустической инверсии в программное обеспечение с тем, чтобы структура донных слоев также могла быть восстановлена на основе натуральных измерений. Действительно, дисперсионные данные широкополосных сейсморазведочных импульсов, полученных в результате акустических измерений, проведенных за несколько километров от источника (например, в нашем случае на $P2$), можно использовать для выполнения инверсии методом ворпинг-преобразования (*warping transform*) [163]. Это еще больше повысит точность модельного распределения SEL , однако даже в этом случае инвертированные параметры донных слоев будут лишь приближениями к их реальным значениям, усредненным по акустической трассе (тем не менее достаточными для решения практических задач).

3.3. Расчет акустического поля, формируемого источником на берегу

При строительстве производственных городков в районах Одопту и Чайво в северо-восточной части о. Сахалин в качестве фундаментов применялись забиваемые в грунт металлические сваи. Известно [6, 57, 164], что операция забивки свай сопровождается генерированием сейсмоакустических волн, формирующих в прилегающей акватории шельфа низкочастотные акустические нестационарные поля. С целью анализа их воздействия на акваторию и МЖ в ней была поставлена задача: во-первых, изучить особенности потерь при распространении энергии низкочастотных колебаний от источника на берегу в прилегающую акваторию, во-вторых, с помощью численного моделирования оценить для всей акватории параметры низкочастотных акустических импульсов, формируемых в водном слое, с достаточной для практики точностью.

Рассмотрим северо-восточное побережье о. Сахалин — район Одопту, где на берегу в 230 метрах от уреза воды на строительной площадке S проводи-

лась забивка фундаментных свай, а в прибрежной зоне донные акустические станции АПАР регистрировали вариации акустического давления – рис. 3.12а. Фундаментные сваи представляли собой цилиндрические стальные трубы, имеющие диаметр 530 или 762 мм и длину 17 или 20 м с различными комбинациями. Установка свай производилась в несколько этапов. Вначале в грунте бурится скважина диаметром незначительно больше диаметра устанавливаемой сваи. Глубина скважины варьируется в пределах 3 – 5 м. Затем в скважину устанавливают сваю и путем серии ударов молотом по ее концу забивают до проектной глубины, которая лежит в диапазоне 14 – 19 м в зависимости от длины сваи. Время забивки одной сваи составляло 7 – 23 минуты. Период следования акустических импульсов от забивки сваи примерно равен 1,7 с.

Удар молота по поверхностному концу сваи передается ее нижнему концу, и в грунте возбуждаются волны разного типа, которые разносят энергию удара в разные стороны. В работе [73] показано, что на распространение на шельфе энергии от взрывного источника, заложенного в скважину, пробуренную на берегу, оказывает существенное влияние на водный слой прилегающей акватории. В этом случае в море формируется пространственная интерференционная картина с выраженными максимальными и минимальными значениями интенсивности колебаний, пространственные масштабы которых зависят от частоты звука. На рис. 3.12б представлены графики вариаций акустического давления, измеренные в ближайших к источнику точках мониторинга во время забивки фундаментных свай на берегу. Графики наглядно демонстрируют зависимость потерь при распространении звука от расстояния до строительной площадки Одопту и от глубины моря в месте постановки станции наблюдения. Экспериментальные данные показали, что уровни импульсных сигналов не превышают уровень фоновых шумов в точках наблюдений Odoptu-3 к северу (8,8 км), и Odoptu-S-20 к югу (10,6 км) от точки *S*.

Следует отметить важное отличие графиков спектра импульсных сигналов, измеренных в точках Odoptu-N-10 и Odoptu-N-20, удаленных от точки *S*

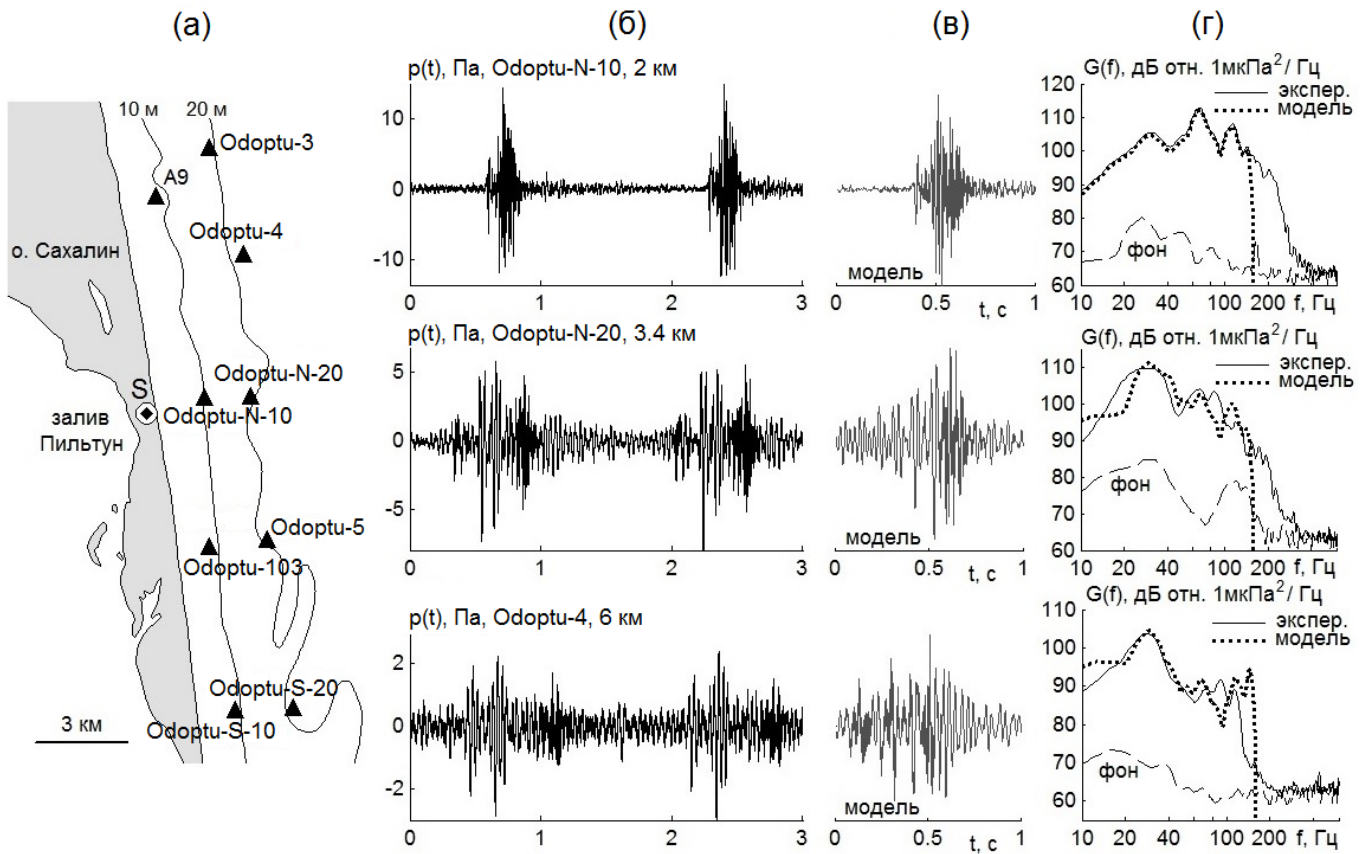


Рис. 3.12. Карта района исследований с указанием точек, в которых были измерены импульсные сигналы от работ по забивке свай в районе Одопту в точке S (а). Вариации акустического давления $p(t)$, измеренные у дна в указанных на карте точках Odoptu-N-10, Odoptu-N-20, Odoptu-4 акустического мониторинга во время забивки свай (б), соответствующие им модельные импульсные сигналы (в) и их спектры (г).

на расстояния 2 и 3,4 км соответственно. Между точками на дистанции 1,9 км дно опустилось с глубины 10 до 20 м. В точке Odoptu-N-10 зарегистрированный импульс имеет пик мощности на частоте 60 Гц, а значение спектральной плотности мощности на этой частоте составляет 115 дБ отн. $1 \text{ мкПа}^2/\text{Гц}$. При распространении импульсного сигнала далее до точки Odoptu-N-20 значение максимальной амплитуды уменьшается в два раза и примерно в два раз удлиняется импульсный сигнал. В частотном диапазоне 50 – 300 Гц спектр импульса в точке Odoptu-N-10, измеренного на 10 м изобате, в среднем на 10 дБ выше, чем в импульсах в точке Odoptu-N-20, но на частотах 20 – 40 Гц они практически равны или в некоторых случаях преобладают спектры импульсов из дальней точки (рис. 3.13). Данный эффект характерен для низкочастотных сигналов,

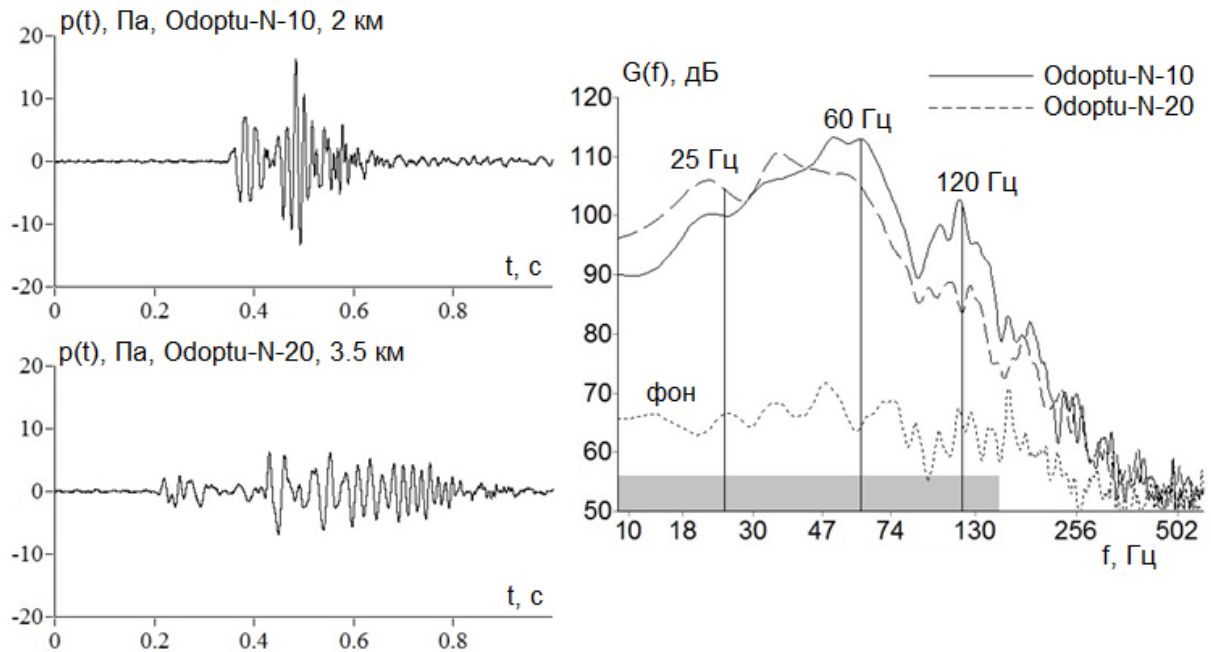


Рис. 3.13. Акустические импульсы, измеренные в точках Odoptu-N-10 и Odoptu-N-20 и их спектры $G(f)$, соответствующие забивке свай на берегу в точке S.

распространяющихся на геоакустическом профиле, ориентированном перпендикулярно берегу в сторону моря. Причиной его появления является особенность интерференционной структуры в водном слое, а также положительная рефракция низкочастотных продольных волн, распространяющихся в дне, что приводит к образованию на шельфе в водном слое пространственной зоны конвергенции. Наглядно эффект демонстрируется на рис. 3.14, на котором показана трансформация первой моды для частоты 27 Гц. На рисунке видно, что на берегу и в водном слое, толщина которого менее 15 м, максимальное значение первой моды расположено в дне между горизонтами 40 – 50 метров, но около точки Odoptu-N-20 максимум функции переходит в водный слой и располагается над дном на горизонте 20 м. В результате при распространении акустических колебаний на частотах 10 – 40 Гц вблизи точки Odoptu-N-20 происходит выход энергии звуковой волны в водный слой, из-за чего увеличивается мощность сигнала на этих частотах.

Воспроизведем данный эффект с помощью численного моделирования. На берегу геоакустические импульсы генерировались нижнем концом 20-метровой

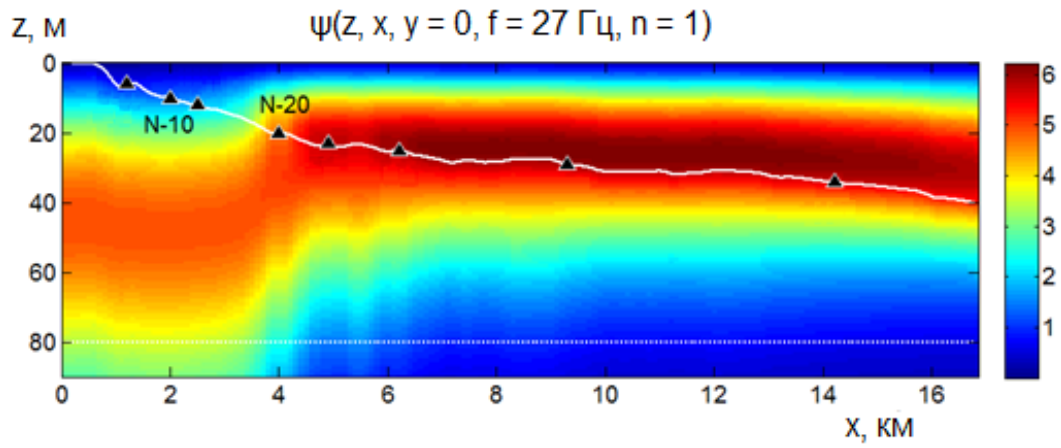


Рис. 3.14. Трансформация первой моды для частоты 27 Гц в модельном геоакустическом волноводе «берег-море».

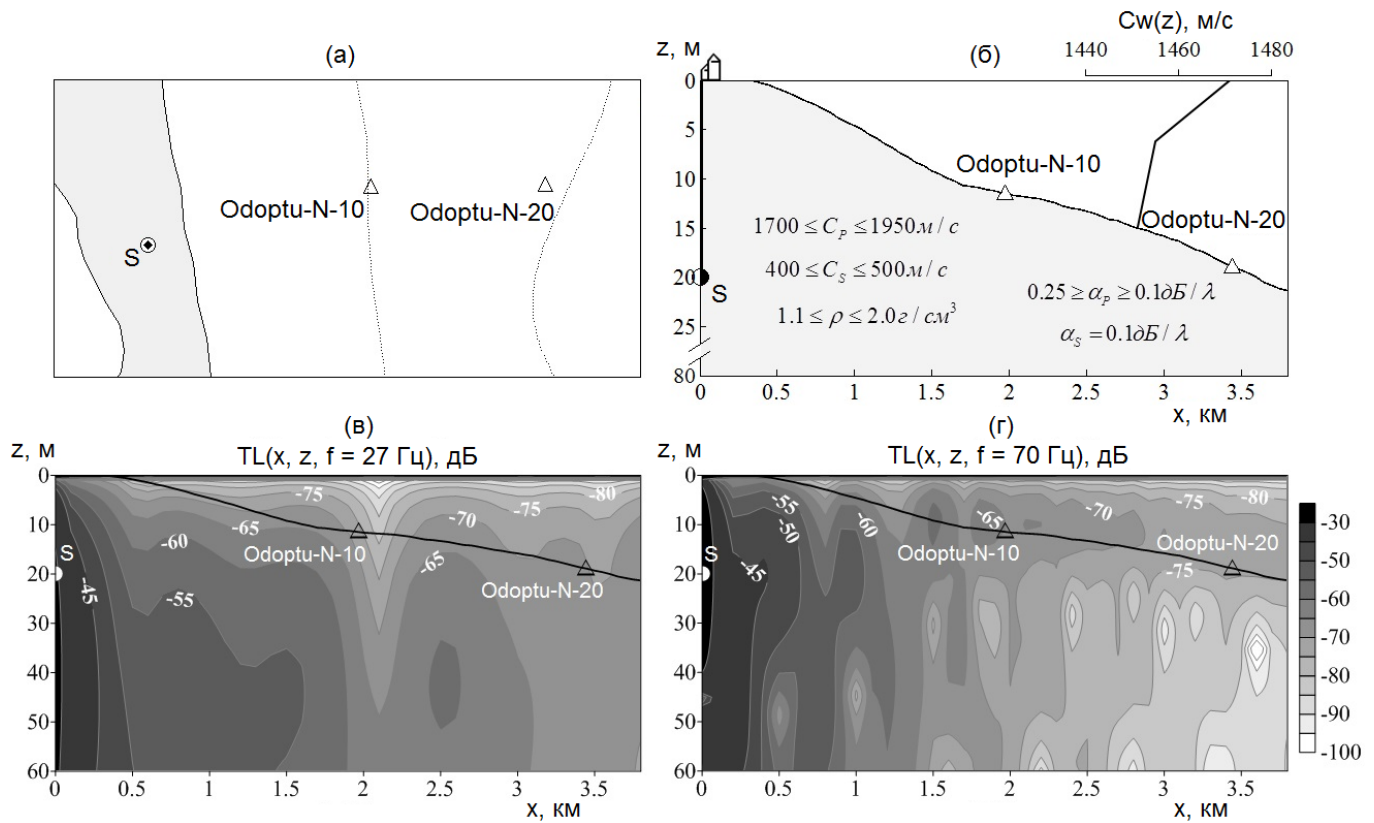


Рис. 3.15. Карта района с указанием в море точек акустических измерений Odoptu-N-10, Odoptu-N-20 и на берегу точки S , в которой забивалась свая (а). Модельный геоакустический волновод с указанием нижней точки сваи S и акустических свойств пород, слагающих дно (б). Распределение модельных значений функции потерь в акустическом поле, формируемом тональными источниками с частотой 27 Гц (в) и 70 Гц (г).

сваи, забиваемой в точке S , показанной на рис. 3.15а. На рис. 3.15б представлен модельный геоакустический волновод с измеренным профилем скорости

звука в воде $C_w(z)$ и подобранными пространственными значениями геоакустических параметров в дне. Расчеты проведены с помощью метода МПУ (см. раздел 1.6.3), реализованного в пакете МРЕ, в адиабатическом приближении с учетом первых трех вертикальных мод.

На рис. 3.15в, г показаны распределения в вертикальной плоскости значений функции потерь $TL(x, z, f)$ в данном модельном волноводе, рассчитанных для тональных акустических сигналов с частотами 27 и 70 Гц, излученных в точке S на глубине 20 м. Точка мониторинга Odoptu-N-10 расположена вблизи интерференционного минимума в поле, формируемом тональным сигналом с частотой 27 Гц, при этом потери звука в этой точке значительно превышают потери в точке Odoptu-N-20. В поле, формируемом тональным сигналом с частотой 70 Гц, интерференционная структура в водном слое имеет гораздо меньше пространственный масштаб. Кроме того, для продольных волн с частотой 70 Гц потери при распространении в дне больше, чем для волн с частотой 27 Гц. На рис. 3.15г видно, что на дистанциях больше 2 км донные моды уже практически не влияют на водный слой, чего нельзя сказать о поле, формируемом в водном слое сигналом с частотой 27 Гц.

На рис. 3.16 показан акустический импульс, измеренный на 10-метровой изобате в точке акустического мониторинга Odoptu-N-10. На его основе в частотном диапазоне 10 – 180 Гц с помощью МРЕ для модельного геоакустического волновода построена эквивалентная точечная функция источника S_1 (см. методику в разделе 3.1), соответствующая нижнему концу забиваемой сваи – S . Проверка корректности построения модельной функции источника осуществляется на основе данных измерений в точке Odoptu-N-20 – на рис. 3.16 показаны измеренный и модельный импульсы для этой точки мониторинга, а также показаны их спектры. В данном случае графики измеренных и модельных вариаций акустического давления $p(t)$ и их спектров $G(f)$ подобны, причем на частоте 27 Гц значения спектральной плотности мощности в точке Odoptu-N-20, примерно на 5 дБ больше, чем в точке Odoptu-N-10, а на частоте 60 Гц значение $G(f)$

на 6 дБ больше в Odoptu-N-10, чем в акустическом модельном и измеренном в точке Odoptu-N-20 импульсе.

В табл. 3.3 для сравнения, приведены экспериментальные и модельные значения уровня воздействия SEL в двух частотных диапазонах 10 – 40 Гц и 10 – 180 Гц. Для первого диапазона экспериментальное значение $SEL(10 – 40 \text{ Гц})$ в точке Odoptu-N-10 на 4,5 дБ меньше, чем экспериментальное значение в точке Odoptu-N-20 и на 3,4 дБ меньше модельного. В диапазоне частот 10 – 180 Гц значения SEL максимально в точке Odoptu-N-10 и равно 124,6 дБ, а в точке Odoptu-N-20 экспериментальное значение меньше на 1,1 дБ, а модельное значение меньше на 1,6 дБ.

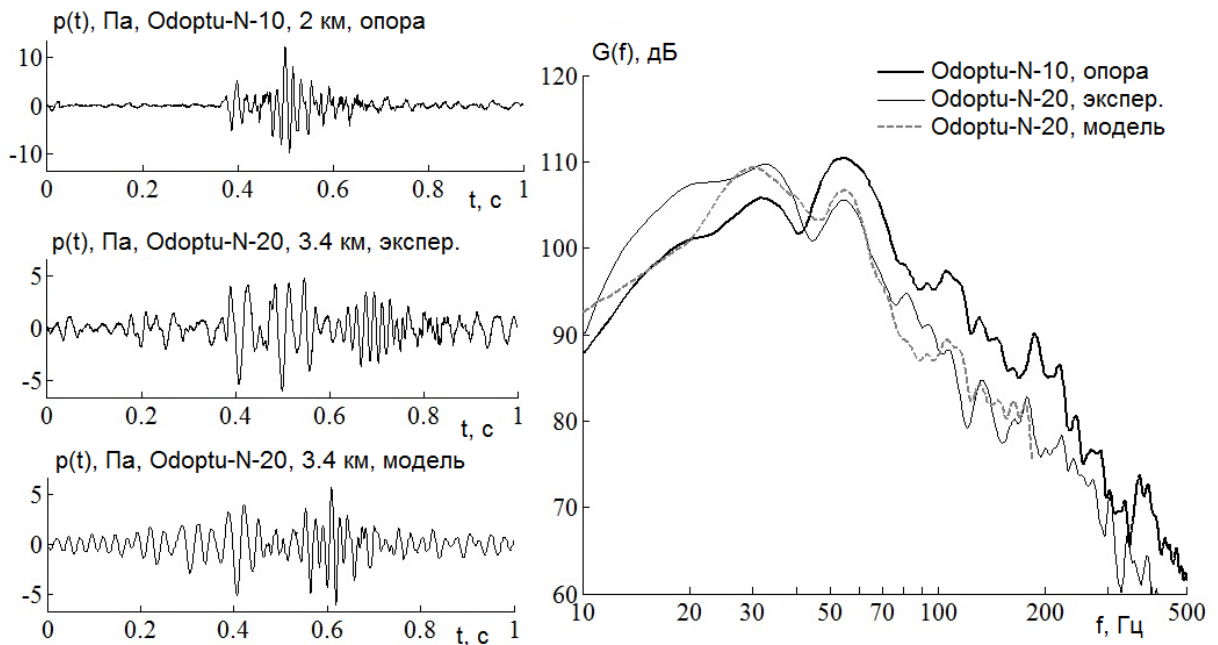


Рис. 3.16. Акустические импульсы, измеренные в точках мониторинга Odoptu-N-10 и Odoptu-N-20 и их спектры. Импульс, измеренный в Odoptu-N-10, использовался как опорный для построения с помощью МРЕ точечной эквивалентной функции источника – $S1$, соответствующей частотному диапазону 10 – 180 Гц. Для сравнения с измеренным акустическим импульсом в точке Odoptu-N-20 на рисунке показан модельный импульс и его спектр.

Сравнительный анализ параметров экспериментальных и модельных импульсных сигналов для модельного волновода, параметры которого показаны на рис. 3.15б, был сделан не только для точки мониторинга Odoptu-N-20 (3,4 км от источника, 20 м глубина), но и для точек Odoptu-4 (6 км, 20 м глубина) и

Таблица 3.3. Сравнение значений SEL акустических импульсов в частотных диапазонах 10 – 40 и 10 – 180 Гц.

Δf , Гц	$SEL(\Delta f)$, дБ, Odoptu-N-10		$SEL(\Delta f)$, дБ, Odoptu-N-20	
	экспер. (опорный сигнал)		экспер.	модель
10–40	117.6		122.1	121.0
10–180	124.6		123.5	123

Odoptu-103 (4,7 км, 10 м глубина) – см. рис. 3.12в. Во всех точках расхождение экспериментальных и теоретических оценок SEL у дна не превышали 1,5 дБ.

Основной задачей акустического мониторинга забивки береговых свай являлось получение оценки уровня шумовой нагрузки, оказываемой на всю акваторию вблизи источника шума. При решении узкоугольных модовых параболических уравнений корректные значения акустического поля в горизонтальной плоскости ограничены сектором, апертура которого не превышает 30° . Поскольку источник звука (центр строительной площадки S) находится на берегу, а звук распространяется в море, то необходимо рассчитать распространение энергии импульсного сигнала, генерируемого забивкой свай, в область, ограниченную углом около 180° . В связи с этим было принято решение разбить область побережья на пять узкоугольных секторов, в каждом из которых рассчитываются значения $SEL(x, y, z)$ с помощью программного комплекса MPE. Отметим, что модель узкоугольного МПУ выбрана по той причине, что AMPLE на тот момент не поддерживала сценарий распространения звука с берега. Границы крайних секторов размещены вдоль берега, другие сектора ориентированы в сторону моря. Для определения энергии акустического поля в точках, где отсутствуют расчетные значения параметра SEL , проводится операция пространственной интерполяции. На рис. 3.17а проиллюстрировано расположение центральных линий пяти секторов и построенное по ним потери медианного акустического

поля $TL_{SEL}^{imp}(x, y) = SEL_{median}(x, y) - SEL_{source}$.

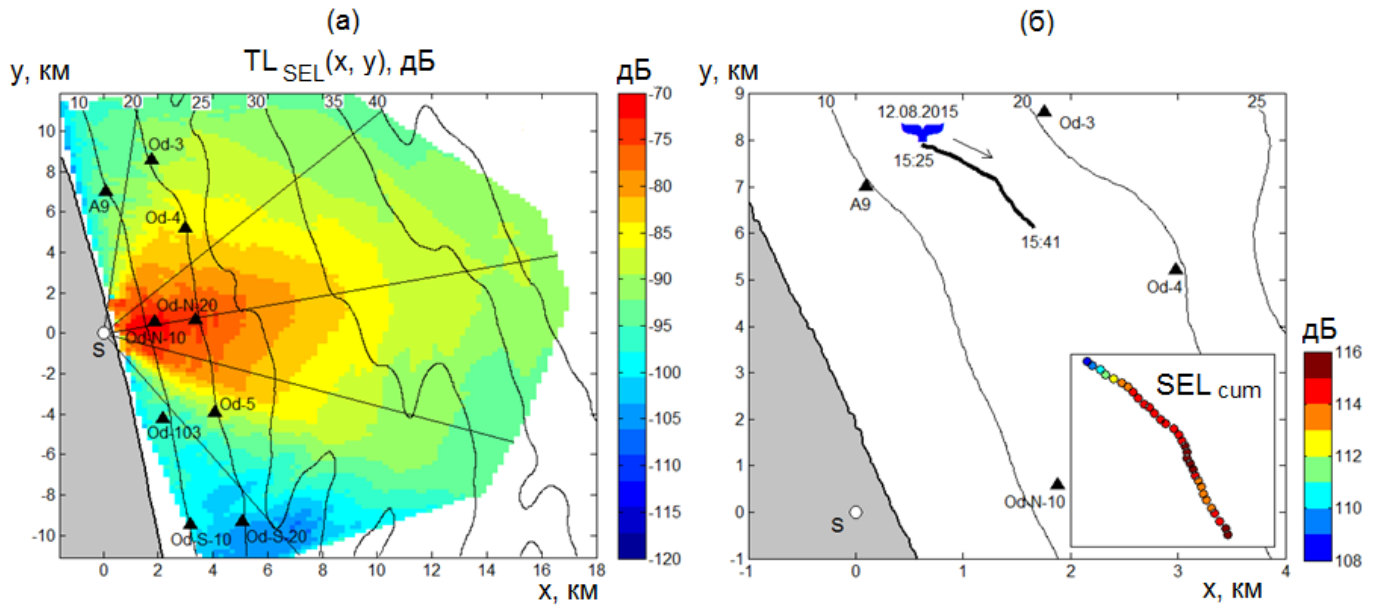


Рис. 3.17. Пространственное распределение потерь энергии импульсного сигнала во время забивки свай на берегу (а), суммарное акустическое воздействие, оказываемое на точки положения кита (б).

Фундаментные сваи в районе Одопту в 2015 году забивались в период с 1 июня по 15 октября. В течение этого времени осуществлялось наблюдение с береговых станций за передвижениями серых китов западной популяции. Положение китов отслеживалось биологами с помощью теодолита — оценивалось их местоположение и характер поведения. За весь сезон с берега были зафиксированы 145,4 тысячи точек движения кита с 30-секундным периодом, из них 2735 точек зарегистрировано во время забивки свай на берегу в Одопту. В этом случае в качестве дополнительной задачи ставился расчет акустического воздействия, которое получил серый кит при строительных работах на берегу. При этом было необходимо учитывать, что уровни акустических шумов, оказываемых на МЖ в зоне потенциального акустического воздействия, на протяжении забивки фундаментной сваи будут изменяться. Это связано, во-первых, с тем, что положение животного в море постоянно меняется, а, во-вторых, при забивке сваи ее нижний конец смещается по вертикали, генерируя звук различной интенсивности. Поскольку для района Одопту характерно наличие в некото-

рых местах слоя вечной мерзлоты, то время забивки свай могло варьироваться в широких пределах. Соответственно, если свая забивалась достаточно долго, то для каждой 30-секундной точки положения кита, наблюдаемого в момент работ, необходимо учесть поправку на отклонение текущего уровня акустического шума от среднего уровня за все время забивки свай. Для каждой точки трека кита такую поправку необходимо вводить индивидуально. Для вычисления поправки в j -ой точке трека кита рассчитываются значения SEL всех экспериментальных импульсов в опорной точке приема Odoptu-N-10 – рис. 3.18. Затем высчитывается среднее значение акустической энергии по всем импульсам в опорной точке:

$$\langle SEL_N^{exp} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N SEL_i^{exp}}{N}. \quad (3.17)$$

Далее, время забивки делится на участки в соответствии со временем фиксации положения кита и на каждом таком участке рассчитывается среднее значение энергии $\langle SEL_{30sec}^{exp} \rangle_j$. Тогда для j -ой точки поправка на энергию источника будет рассчитываться по формуле:

$$\Delta_j = \langle SEL_N^{exp} \rangle - \langle SEL_{30sec}^{exp} \rangle_j. \quad (3.18)$$

Для расчета функции эквивалентного источника берется опорный сигнал в точке приема Odoptu-N-10, имеющий энергию, близкую к средней энергии импульсов за время забивки свай. Функция источника для всех свай рассчитывалась на горизонте 20 м.

Серый кит, смещаясь по своей траектории, мог находиться на разных горизонтах водного слоя. Исходя из этого, оценка звуковой экспозиции серого кита при забивке свай на берегу рассчитывалась двумя способами. В первом случае акустическое воздействие оценивалось как 50-перцентиль ряда модельных значений SEL , полученных в водном слое в узлах вычислительной сетки в точке волновода (x, y) . С учетом поправки (3.18), учитывающей изменение параметров генерируемых импульсов по мере погружения забиваемой свай в

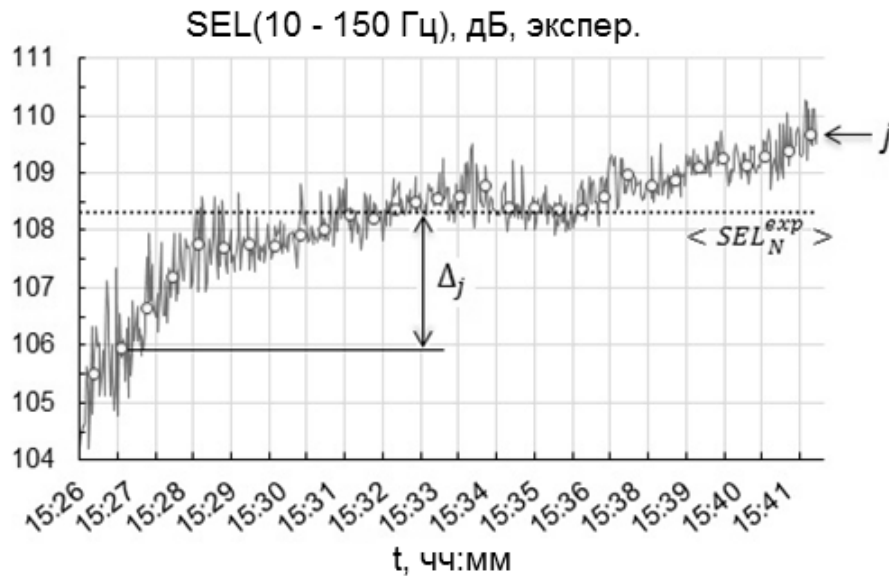


Рис. 3.18. Расчет поправки к энергии функции эквивалентного источника, учитывающий характер изменения уровня акустического шума на протяжении забивки сваи.

грунт, звуковая экспозиция серого кита вычислялась по следующей формуле:

$$SEL_j^{whale}(x_j, y_j) = [SEL^{source} + \Delta_j] + mTL(x_j, y_j), \quad (3.19)$$

где $mTL(x, y)$ – нормированное на источник медианное поле, рассчитанное для вертикального ряда $SEL(x, y, z_i)$ в водном слое:

$$mTL(x, y) = mSEL^{model}(x, y) - SEL^{source}. \quad (3.20)$$

Результат расчетов приведен на рис. 3.17, где распределение функции $TL_{SEL}(x, y)$ показано на графике (а); трек движения кита и суммарный уровень акустического воздействия на него — на графике (б).

Вторым способом оценка SEL_j^{whale} производилась вблизи дна (когда кит погружается, например, для кормления) на основе экспериментальных акустических данных ближайшей к киту станции мониторинга, например, точки А9 (см. рис. 3.17а). Автоматический поиск импульсных сигналов [165] позволил оценить уровень SEL экспериментальных импульсов, зарегистрированных в этой точке, а затем усреднить по 30-секундным интервалам в соответствии с точками наблюдения кита. Теоретическая поправка потерь ΔTL_{bottom} между точками ближайшей станции и точкой кита дала возможность оценить параметр SEL в

точке, где находился кит, по следующей формуле:

$$SEL_j^{whale}(x_j, y_j) = [SEL_{30sec}^{exp}(x_{A9}, y_{A9}, h_{A9})]_j + \Delta TL_{bottom}, \quad (3.21)$$

где

$$\Delta TL_{bottom} = SEL_{bottom}^{model}(x, y) - SEL^{source}. \quad (3.22)$$

Выше описано акустическое воздействие на точки кита от единичного удара молота по забиваемой свае. Однако при анализе поведенческого отклика интерес представляет интерес энергия не от одного удара, а суммарное акустическое воздействие за указанный интервал наблюдения. В этом случае значение энергии от одного удара умножается на количество ударов N копра по свае, попавших в этот период. Сравнение уровней суммарного (кумулятивного) воздействия на точки положения кита, рассчитанных для водного слоя и вблизи дна, показаны на графике рис. 3.19. Видно, что придонные значения SEL почти для каждой точки трека кита больше соответствующего значения медианной энергии в водном слое.

Причина того, что значение придонного SEL на треках движения китов выше значений медианного SEL , рассчитанного в водной толще, можно объяснить в разнице интенсивности акустического поля на поверхности моря и у дна. На рис. 3.20б построены первые три модовые функции для двух волноводов сравнения в точках 20- и 40-метровых изобатах на частоте 27 Гц. Из графиков видно, что основное усиление поля происходит у дна, поскольку значения первой модовой функции при приближении к поверхности моря убывают. Согласно экспериментальным данным, полученным в 2009 г. с помощью вертикальная акустико-гидрофизической измерительной системы «Моллюск-07» [166], разность интенсивности акустического поля на частоте 27 Гц на поверхности моря и у дна достигает 10 дБ (рис. 3.20а). Согласно графикам рис. 3.13, основная энергия сигнала распространяется на низких частотах 10 – 80 Гц, на которых первая мода возрастает с глубиной. Поскольку медианное значение параметра SEL оценивается во всем водном слое, то вблизи дна значения SEL будут

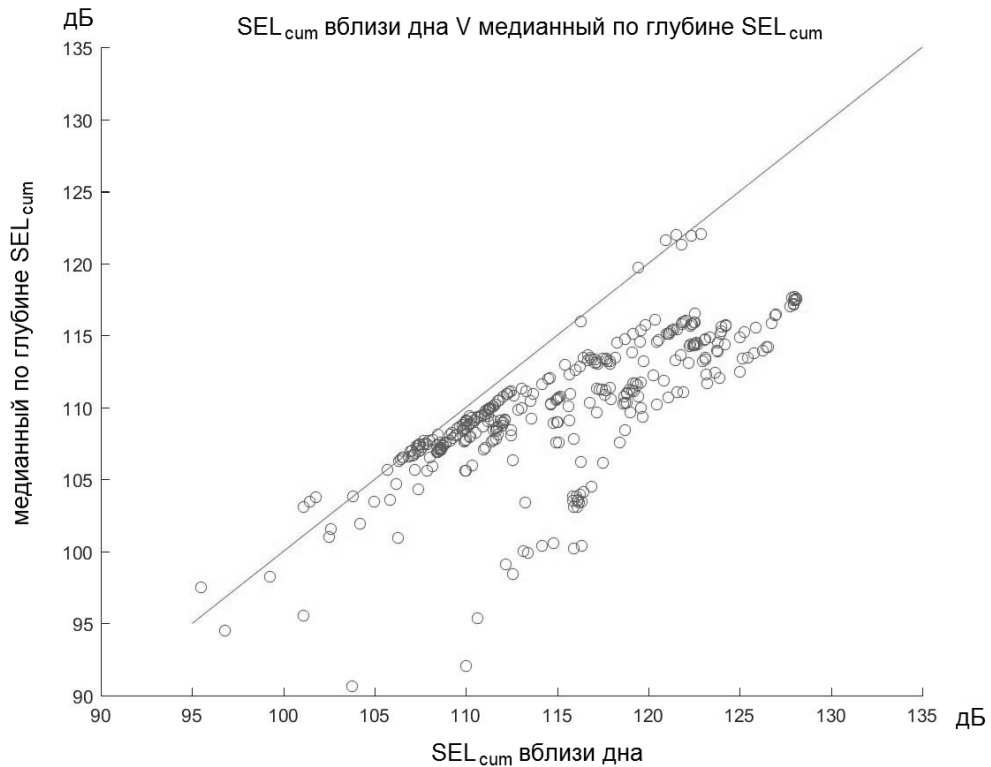


Рис. 3.19. Сравнение придонного кумулятивного значения SEL (3.21) на треках движения китов и медианного по водной толще кумулятивного SEL (3.19).

больше, что подтверждается расчетами.

Результаты численного моделирования, приведенные в данном разделе, в согласованном формате переданы биологам, которые используют их в многофакторном корреляционном анализе [167] с целью оценки возможного влияния антропогенных акустических шумов на поведение серых китов, питавшихся в рассматриваемом районе в 2015 г.

3.4. Выводы к третьей главе

В описанных исследованиях предложена и реализована методика построения функции эквивалентного точечного источника по результатам измерений в опорной точке, применение которой позволило оценить пространственное распределение энергии и пиковой амплитуды импульсного сигнала в акватории в ходе акустического мониторинга антропогенных шумов (морская сейсмоз-

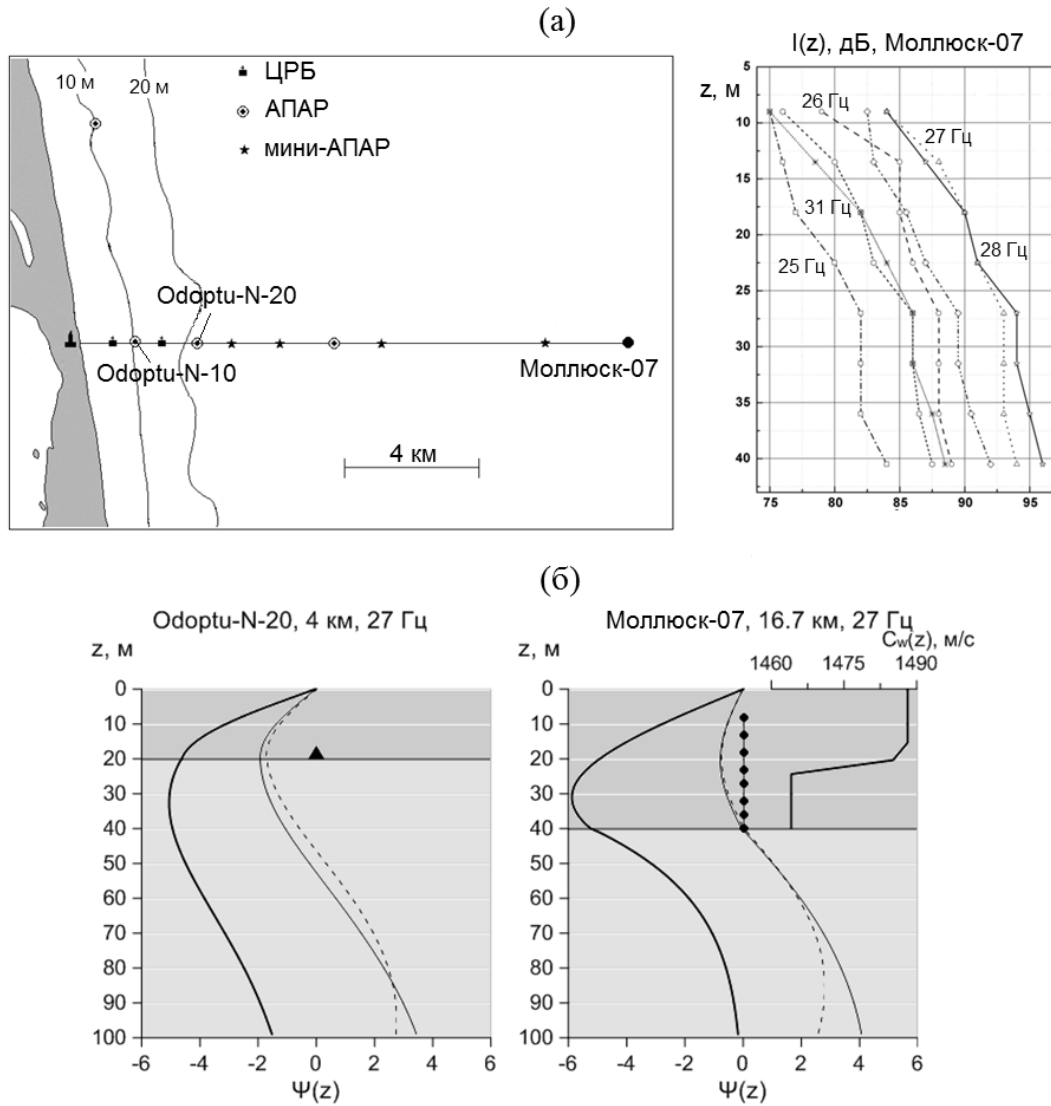


Рис. 3.20. Карта района с указанием источника тонального звука на берегу р.0 и серии точек приема, последняя из которых является вертикальная приемная система «Моллюск-07». Указаны вертикальные распределения в водном слое значений интенсивности акустического поля на различных горизонтах в точке «Моллюск-07» (а). Модовые функции продольных волн с частотой 27 Гц, рассчитанные для двух волноводов сравнения, соответствующих точке акустического мониторинга Odoptu-N-20 и точке, в которой в 2009 г. была установлена вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система «Моллюск-07» (б).

ведка, забивка свай на берегу). Описаны два подхода реконструкции функции источника – расчетный метод и с использованием параметрических функций Гаусса и Морле. Проверка корректности построения функции источника и геоакустических параметров модельного волновода проводилась по натурным данным с удаленных приемников. Предложенный подход позволил воспроизвести

форму импульсного сигнала в удаленных точках с разумной точностью как во временной, так и в частотной областях (в пределах 2 дБ).

Сравнение результатов моделирования акустического поля методами МРЕ и AMPLE показали, что псевдодифференциальный (широкоугольный) адиабатический метод решения МПУ дает значительно более точные результаты, чем его узкоугольный аналог, учитывающий взаимодействие мод.

Таким образом, метод модового параболического уравнения в совокупности с методикой построения функции эквивалентного точечного источника по акустическим данным опорного гидрофона становится эффективным инструментом для прогнозирования и оценки уровней низкочастотных акустических шумов, генерируемых производственной деятельностью человека на шельфе. Использование такого инструмента находит широкое практическое применение, например, при прогнозировании уровней шума в акватории до проведения промышленных работ. Такие данные позволят применить дополнительные меры по смягчению влияния акустических волн на МЖ и рыб.

Заключение

Результаты исследований, полученные в рамках защищаемой работы, позволили сделать следующие выводы:

1. На распространение звука в шельфовой зоне существенное влияние могут оказывать неоднородности геоакустических параметров волновода как по вертикали, так и в горизонтальном направлении. Пространственные неоднородности могут проявляться в виде сезонной изменчивости свойств водного слоя, изменение значений поля скорости звука в осадочных слоях, связанных, например, с выходом природных газов, а также в виде береговой линии, сухопутных участков, островов и мысов. Это обосновывает необходимость применения трехмерных моделей моделирования акустических полей. Специфика отдельно взятого района может требовать включения в волновод пространственных неоднородностей батиметрии и/или донных осадков, выраженных, например, в изменениях мощности осадочного грунта или скачком значений поля скорости продольной волны, плотности и коэффициента затухания звука.

2. На основе собранных акустико-гидрологических и батиметрических данных построены или уточнены наборы значений геоакустических параметров моделей волноводов, соответствующих районам залива Посьета и северо-восточного шельфа о. Сахалин. Получено согласование экспериментальных и модельных акустических данных для всех рассматриваемых акустических трасс.

3. Численные методы решения модовых параболических уравнений позволили смоделировать сценарии распространения звука для прибрежных акустических трасс согласно экспериментальным данным и расширить их на другие акустические и гидрологические условия. При этом псевдодифференциальный (широкоугольный) адиабатический метод решения МПУ дает значительно более точные результаты для случаев, в которых наблюдаются явления, связанные с горизонтальной рефракцией звука, или при существенных изменениях топографии морского дна.

4. Разработанная методика построения спектральной функции эффективного точечного индустриального источника основана на коррекции потерь тональных компонент нестационарного опорного сигнала, измеренного одиночным гидрофоном, при распространении из точки излучения в точку опорного гидрофона. Функция источника может быть также параметризована аналитическими функциями специального вида. Корректность оценки уровней акустического поля и его спектрального портрета может быть проверена по данным измерений, выполненных удаленным от источника точечным приемником.

5. Использование функции эквивалентного источника в совокупности с моделью модовых параболических уравнений позволяет произвести расчет пространственного распределения параметров антропогенных звуковых сигналов в акватории с точностью 2 дБ в частотном диапазоне полезного сигнала. В случае пространственно-разнесенных источников звука для достижения указанной точности необходим учет диаграммы направленности источника. Моделирование акустических полей было проведено для сценариев распространения звука при сейсморазведочных исследованиях на шельфе и забивки фундаментных свай на берегу.

Список литературы

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. Lindseth A., Lobel P. Underwater soundscape monitoring and fish bioacoustics: a review. *Fishes* 3 (3), 36. — 2018.
 14. A review and inventory of fixed autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals / Sousa-Lima R., Norris T., Oswald J., and Fernandes D. // *Aquatic Mammals.* — 2013. — Vol. 39, no. 1. — P. 23–53.
 15. Delarue J., Laurinolli M., Martin B. Acoustic detections of beluga whales in the northeastern Chukchi Sea, July 2007 to July 2008 // *Arctic.* — 2011. — P. 15–24.
 16. Barlow J., Taylor B. Estimates of sperm whale abundance in the northeastern temperate Pacific from a combined acoustic and visual survey // *Marine Mammal Science.* — 2005. — Vol. 21, no. 3. — P. 429–445.

17. Distribution and behavior of the bowhead whale, *Balaena mysticetus*, based on analysis of acoustic data collected during the 1993 spring migration off Point Barrow, Alaska / Clark C., Charif R., Mitchell S., and Colby J. // *Report-International Whaling Commission*. — 1996. — Vol. 46. — P. 541–554.
18. Gillespie D., Chappell O. An automatic system for detecting and classifying the vocalisations of harbour porpoises // *Bioacoustics*. — 2002. — Vol. 13, no. 1. — P. 37–61.
19. Gillespie D. Detection and classification of right whale calls using an 'edge' detector operating on a smoothed spectrogram // *Canadian Acoustics*. — 2004. — Vol. 32, no. 2. — P. 39–47.
20. Vocalisation rates of the North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) / Matthews J., Brown S., Gillespie D., Johnson M., McLanaghan R., Moscrop A., Nowacek D., Leaper R., Lewis T., Tyack P., et al. // *J. Cetacean Res. Manage.* — 2001. — Vol. 3, no. 3. — P. 271–282.
21. Passive acoustic detection and localization of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in the tongue of the ocean / Morrissey R., Ward J., DiMarzio N., Jarvis S., and Moretti D. // *Applied acoustics*. — 2006. — Vol. 67, no. 11–12. — P. 1091–1105.
22. Tiemann C., Porter M., Frazer L. Localization of marine mammals near Hawaii using an acoustic propagation model // *The Journal of the Acoustical society of America*. — 2004. — Vol. 115, no. 6. — P. 2834–2843.
23. Marine Mammal Monitoring on Navy Ranges (M3R): A toolset for automated detection, localization, and monitoring of marine mammals in open ocean environments / Jarvis S., Morrissey R., Moretti D., DiMarzio N., and Shaffer J. // *Marine Technology Society Journal*. — 2014. — Vol. 48, no. 1. — P. 5–20.
24. A visual sighting and acoustic detections of minke whales, *Balaenoptera acutorostrata* (Cetacea: Balaenopteridae), in nearshore Hawaiian waters /

- Rankin S., Norris T., Smultea M., Oedekoven C., Zoidis A., Silva E., and Rivers J. // *Pacific Science*. — 2007. — Vol. 61, no. 3. — P. 395–398.
25. Modeling the aggregated exposure and responses of bowhead whales *Balaena mysticetus* to multiple sources of anthropogenic underwater sound / Ellison W., Racca R., Clark C., Streever B., Frankel A., Fleishman E., Angliss R., Berger J., Ketten D., Guerra M., et al. // *Endangered Species Research*. — 2016. — Vol. 30. — P. 95–108.
26. It often howls more than it chugs: wind versus ship noise under water in Australia's maritime regions / Erbe C., Schoeman R., Peel D., and Smith J. // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 9, no. 5. — P. 472.
27. Potential impacts of shipping noise on marine mammals in the western Canadian Arctic / Halliday W., Insley S., Hilliard R., de Jong T., and Pine M. // *Marine Pollution Bulletin*. — 2017. — Vol. 123, no. 1-2. — P. 73–82.
28. Erbe C. Underwater noise of whale-watching boats and potential effects on killer whales (*Orcinus orca*), based on an acoustic impact model // *Marine mammal science*. — 2002. — Vol. 18, no. 2. — P. 394–418.
29. Seals and shipping: quantifying population risk and individual exposure to vessel noise / Jones E., Hastie G., Smout S., Onoufriou J., Merchant N., Brookes K., and Thompson D. // *Journal of applied ecology*. — 2017. — Vol. 54, no. 6. — P. 1930–1940.
30. Acoustic monitoring and analyses of air gun, pile driving, vessel, and ambient sounds during the 2015 seismic surveys on the Sakhalin shelf / Rutenko A., Zыkov M., Gritsenko V., Fershalov M., Jenkerson M., Manulchev D., Racca R., and Nechayuk V. // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 2022. — Vol. 194, no. Suppl 1. — P. 744.
31. Computational ocean acoustics / Jensen F., Porter M., Kuperman W., and Schmidt H. — Springer, New York, 2011.
32. Etter P. Underwater acoustic modeling and simulation. — CRC press, 2018.

33. Austin M. E., Chapman N. R. The use of tessellation in three-dimensional parabolic equation modeling // *Journal of Computational Acoustics*. — 2011. — Vol. 19, no. 03. — P. 221–239.
34. Marine mammal monitoring and mitigation during BP Liberty OBC seismic survey in Foggy Island Bay, Beaufort Sea, July-August 2008: 90-day report / Aerts L., Bles M., Blackwell S., Greene C., Kim K., Hannay D., and Austin M. // *LGL Rep. P1011-1. Rep. from LGL Alaska Research Associates Inc., LGL Ltd., Greeneridge Sciences Inc. and JASCO Research Ltd. for BP Exploration Alaska*. — 2008.
35. Marine mammal monitoring during open water seismic exploration by Shell Offshore, Inc. in the Chukchi and Beaufort Seas, July-November 2007: 90 day report / Funk D., Hannay D., Ireland D., Rodrigues R., and Koski W. // *Prep. By LGL Alaska Research Assoc., Inc., Anchorage, AK*. — 2008.
36. Marine mammal monitoring and mitigation during open water seismic exploration by Shell Offshore Inc. in the Chukchi and Beaufort Seas, July–October 2008: 90-day report / Ireland D., Rodrigues R., Funk D., Koski W., and Hannay D. // *Mar. Fish. Serv., and US Fish and Wild. Serv.* — 2009. — Vol. 277.
37. Austin M., MacGillivray A., Chapman N. Acoustic transmission loss measurements in Queen Charlotte Basin // *Canadian Acoustics*. — 2012. — Vol. 40, no. 1. — P. 27–31.
38. Рутенко А. Н., Ущиповский В. Г. Оценки акустических шумов, генерируемых вспомогательными судами, работающими с нефтедобывающими платформами // *Акустический журнал*. — 2015. — Т. 61, № 5. — С. 605–605.
39. Veirs S., Veirs V., Wood J. Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales // *PeerJ*. — 2016. — Vol. 4. — P. e1657.
40. MacGillivray A. O. An airgun array source model accounting for high-frequency sound emissions during firing—Solutions to the IAMW source test cases // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. — 2018. — Vol. 44, no. 3. —

- P. 582–588.
41. Laws R., Hatton L., Haartsen M. Computer modelling of clustered airguns // *First break*. — 1990. — Vol. 8, no. 9.
 42. Duncan A. J., Gavrilov A. N. The CMST Airgun Array Model—A simple approach to modeling the underwater sound output from seismic airgun arrays // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. — 2019. — Vol. 44, no. 3. — P. 589–597.
 43. Sertlek H., Ainslie M. Airgun source model (AGORA): Its application for seismic surveys sound maps in the Dutch North Sea // Proc. Conf. UAC. — 2015. — P. 439–446.
 44. Экспериментальное и теоретическое исследование времен прихода и эффективных скоростей при дальнем распространении импульсных акустических сигналов вдоль кромки шельфа в мелком море / Петров П. С., Голов А. А., Безответных В. В., Буренин А. В., Козицкий С. Б., Сорокин М. А. и Моргунов Ю. Н. // *Акустический журнал*. — 2020. — Т. 66, № 1. — С. 20–33.
 45. Wenz G. Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources // *The journal of the acoustical society of America*. — 1962. — Vol. 34, no. 12. — P. 1936–1956.
 46. Hamson R. The modelling of ambient noise due to shipping and wind sources in complex environments // *Applied Acoustics*. — 1997. — Vol. 51, no. 3. — P. 251–287.
 47. McDonald M., Hildebrand J., Wiggins S. Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2006. — Vol. 120, no. 2. — P. 711–718.
 48. Comiso J. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover // *Journal of climate*. — 2012. — Vol. 25, no. 4. — P. 1176–1193.
 49. Temporal and spatial patterns of ship traffic in the Canadian Arctic from

- 1990 to 2015 / Dawson J., Pizzolato L., Howell S., Copland L., and Johnston M. // *Arctic*. — 2018. — Vol. 71, no. 1. — P. 15–26.
50. Smith L., Stephenson S. New Trans-Arctic shipping routes navigable by mid-century // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2013. — Vol. 110, no. 13. — P. E1191–E1195.
51. Борисов А. С., Плотникова И. Н. Геолого-геофизические исследования акваторий // *Учебно-методическое пособие. Казань*. — 2011.
52. Ziolkowski A. A method for calculating the output pressure waveform from an air gun // *Geophysical Journal International*. — 1970. — Vol. 21, no. 2. — P. 137–161.
53. Ainslie M. A., Laws R. M., Sertlek H. Ö. International Airgun Modeling Workshop: Validation of Source Signature and Sound Propagation Models—Dublin (Ireland), July 16, 2016—Problem Description // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. — 2019. — Vol. 44, no. 3. — P. 565–574.
54. Verification of airgun sound field models for environmental impact assessment / Ainslie M. A., Halvorsen M. B., Dekeling R., Laws R. M., Duncan A. J., Frankel A. S., Heaney K. D., Küsel E. T., MacGillivray A. O., Prior M. K., et al. // *Proceedings of Meetings on Acoustics* / AIP Publishing. — 2016. — Vol. 27.
55. Нечаюк В. Е., Манульчев Д. С., Рутенко А. Н. Изучение горизонтальной диаграммы направленности типового сейсморазведочного излучающего комплекса по пространственным измерениям на шельфе // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”. — 2018. — С. 251–254.
56. Series B. Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment // *Report of the OSPAR Commission*. — 2009. — P. 133.
57. Nedwell J., Howell D. A review of offshore windfarm related underwater noise sources // *Cowrie Rep.* — 2004. — Vol. 544. — P. 1–57.

58. Guan S., Brookens T., Miner R. Acoustic characteristics from an in-water down-the-hole pile drilling activity // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2022. — Vol. 151, no. 1. — P. 310–320.
59. Measurement of underwater noise arising from marine aggregate dredging operations / Robinson S., Theobald P., Hayman G., Wang L., Lepper P., Humphrey V., and Mumford S. — 2011.
60. A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: the disparity between science and policy / Gomez C., Lawson J., Wright A., Buren A., Tollit D., and Lesage V. // *Canadian Journal of Zoology*. — 2016. — Vol. 94, no. 12. — P. 801–819.
61. Popper A., Hastings M. The effects of anthropogenic sources of sound on fishes // *Journal of fish biology*. — 2009. — Vol. 75, no. 3. — P. 455–489.
62. Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton / McCauley R., Day R., Swadling K., Fitzgibbon Q., Watson R., and Semmens J. // *Nature ecology & evolution*. — 2017. — Vol. 1, no. 7. — P. 0195.
63. Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects / Southall B., Finneran J., Reichmuth C., Nachtigall P., Ketten D., Bowles A., Ellison W., Nowacek D., and Tyack P. // *Aquatic Mammals*. — 2019. — Vol. 45, no. 2. — P. 125–232.
64. Popper A., Hawkins A. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes // *Journal of fish biology*. — 2019. — Vol. 94, no. 5. — P. 692–713.
65. Erbe C., Farmer D. Zones of impact around icebreakers affecting beluga whales in the Beaufort Sea // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2000. — Vol. 108, no. 3. — P. 1332–1340.
66. Behavioral responses of gray whales to industrial noise: Feeding observations and predictive modeling : Rep. / BBN Labs., Inc., Cambridge, MA (USA) ; executor: Malme C., Würsig B., Bird J., Tyack P. : 1986.

67. Seismic surveys near gray whale feeding areas off Sakhalin Island, Russia: assessing impact and mitigation effectiveness / Aerts L., Jenkinson M., Nechayuk V., Gailey G., Racca R., Blanchard A., Schwarz L., and Melton H. // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 2022. — Vol. 194, no. Suppl 1. — P. 746.
68. Mitigation of underwater pile driving noise during offshore construction / Stokes A., Cockrell K., Wilson J., Davis D., and Warwick D. // *M09PC00019*. — 2010.
69. Bellmann M. Overview of existing noise mitigation systems for reducing pile-driving noise.
70. Серые киты. Сахалинская история / Владимиров А. В., Ильяшенко В. Ю., Олейникова Е. А. и Черняховский И. О. — М.: ИП Волкова М.А., 2012.
71. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе / Рутенко А. Н., Борисов С. В., Ковзель Д. Г. и Гриценко В. А. // *Акустический журнал*. — 2015. — Т. 61, № 4. — С. 500–511.
72. Ковзель Д. Г. Аппаратура акустической связи для контроля работы автономной гидро-акустической донной станции на шельфе // *Акустический журнал*. — 2019. — Т. 65, № 5. — С. 619–629.
73. Мониторинг параметров сейсмоакустических импульсов и антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин / Рутенко А. Н., Гаврилевский А. В., Ковзель Д. Г., Коротченко Р. А., Путов В. Ф. и Соловьев А. А. // *Акустический журнал*. — 2012. — Т. 58, № 2. — С. 248–257.
74. Ковзель Д. Г., Рутенко А. Н. Автономная акустическая станция с цифровым радиотелеметрическим каналом для мониторинга сейсмоакустических сигналов на шельфе // *Приборы и техника эксперимента*. — 2009. — № 6. — С. 102–106.
75. Ковзель Д. Г. Технические средства гидроакустического мониторинга сейсморазведочных работ на шельфе // *Акустический журнал*. — 2018. —

- Т. 64, № 5. — С. 605–617.
76. Гореликов А. И. Экологический генератор отпугивающих звуков. Пат. RU 2447658 С2. Российская федерация 2010126403/13. — 2012.
77. Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натурных экспериментах / Борисов С. В., Гриценко А. В., Ковзель Д. Г., Лихачев В. В., Коротченко Р. А., Круглов М. В., Пенкин С. И. и Рутенко А. Н. // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. — 2003. — № 2. — С. 16–29.
78. Urick R. J. Principles of underwater sound. — McGraw – Hill Book Company, 1975.
79. Ainslie M., Halvorsen M., Robinson S. A terminology standard for underwater acoustics and the benefits of international standardization // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. — 2021. — Vol. 47, no. 1. — P. 179–200.
80. Pikler A. Logarithmic frequency systems // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 1966. — Vol. 39, no. 6. — P. 1102–1110.
81. Де Д. Санто. Акустика океана. — М.: Мир, 1983. 384 с, 1982.
82. Collins M. Applications and time-domain solution of higher-order parabolic equations in underwater acoustics // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 1989. — Vol. 86, no. 3. — P. 1097–1102.
83. Collins M. Higher-order Padé approximations for accurate and stable elastic parabolic equations with application to interface wave propagation // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 1991. — Vol. 89, no. 3. — P. 1050–1057.
84. Collins M. A split-step Padé solution for the parabolic equation method // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 1993. — Vol. 93, no. 4. — P. 1736–1742.
85. Collins M. A self-starter for the parabolic equation method // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 1992. — Vol. 92, no. 4. — P. 2069–2074.
86. Collins M., Westwood E. A higher-order energy-conserving parabolic equa-

- tion for range-dependent ocean depth, sound speed, and density // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 1991. — Vol. 89, no. 3. — P. 1068–1075.
87. Collins M. Beach Acoustics // *J. Acoust. Soc. Am.* — 1995. — Vol. 97, no. 5.
88. Collis M., Metzler A. Seismo-acoustic propagation near thin and low-shear speed ocean bottom sediments using a massive elastic interface // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2014. — Vol. 135, no. 1. — P. 115–123.
89. 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.
90. Рутенко А. Н., Манульчев Д. С. Распространение низкочастотных волн через мыс Шульца // *Акустический журнал*. — 2014. — Т. 60, № 4. — С. 384–394.
91. Рутенко А. Н., Козицкий С. Б., Манульчев Д. С. Влияние наклонного дна на распространение звука // *Акустический журнал*. — 2015. — Т. 61, № 1. — С. 76–89.
92. Trofimov M., Kozitskiy S., Zakharenko A. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // *Wave Motion*. — 2015. — Vol. 58. — P. 42–52.
93. Trofimov M., Kozitskiy S., Zakharenko A. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // *Wave Motion*. — 2015. — Vol. 58. — P. 42–52.
94. Рутенко А. Н., Козицкий С. Б., Манульчев Д. С. Влияние наклонного дна на распространение звука // *Акустический журнал*. — 2015. — Т. 61, № 1. — С. 76–89.
95. Мониторинг антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных исследований / Рутенко А. Н., Гаврилевский А. В., Путов В. Ф., Соловьев А. А. и Манульчев Д. С. // *Акустический журнал*. —

2016. — Т. 62, № 3. — С. 348–362.
96. Wide-angle mode parabolic equations for the modelling of horizontal refraction in underwater acoustics and their numerical solution on unbounded domains / Petrov P., Ehrhardt M., Tyshchenko A., and Petrov P. // *Journal of Sound and Vibration*. — 2020. — Vol. 484. — P. 115526.
97. Petrov P., Antoine X. Pseudodifferential adiabatic mode parabolic equations in curvilinear coordinates and their numerical solution // *Journal of Computational Physics*. — 2020. — Vol. 410. — P. 109392.
98. A Program based on the Wide-Angle Mode Parabolic Equations Method for Computing Acoustic Fields in Shallow Water / Tyshchenko A. G., Zaikin O. S., Sorokin M. A., and Petrov P. S. // *Acoustical Physics*. — 2021. — Vol. 67. — P. 512–519.
99. Petrov P., Zaikin O., Tyshchenko A. CAMBALA Software Complex. — 2021. — Access mode: <https://github.com/Nauchnik/CAMBALA> (online; accessed: 05.2021).
100. Гамильтон Э. Геоакустические модели морского дна. Акустика морских осадков. — М.: Мир, 1977.
101. Кацнельсон Б. Г., Петников В. Г. Акустика мелкого моря. — М.: Наука, 1997.
102. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном / Григорьев В. А., Петников В. Г., Росляков А. Г. и Терёхина Я. Е. // *Акустический журнал*. — 2018. — Т. 64, № 3. — С. 342–358.
103. Рокос С. И., Костин Д. А., Длугач А. Г. Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей // *Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала*. — 2001. — С. 40–51.
104. Григорьев В. А., Петников В. Г., Шатравин А. В. Звуковое поле в мелководном волноводе арктического типа с дном, содержащим газонасыщен-

- ный осадочный слой // *Акустический журнал*. — 2017. — Т. 63, № 4. — С. 389–405.
105. Bonnel J., Chapman N. Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2011. — Vol. 130, no. 2. — P. EL101–EL107.
106. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. — Springer, 2012. — Vol. 1.
107. Рутенко А. Н., Манульчев Д. С., Jenkerson M. Исследования распространения энергии сейсморазведочных сигналов на шельфе // Труды XIV все-российской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". — 2018. — С. 369–372.
108. 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.
109. 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.
110. 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.
111. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море / Безответных В. В., Буренин А. В., Моргунов Ю. Н. и Половинка Ю. А. // *Акустический журнал*. — 2009. — Т. 55, № 3. — С. 374–380.
112. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирование импульсной характеристики в глубоком море / Акуличев В. А., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А. и Моргунов Ю. Н. // *Акустический журнал*. — 2010. —

- Т. 56, № 1. — С. 51–52.
113. Tappert F., Spiesberger J., Wolfson M. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2002. — Vol. 111, no. 2. — P. 757–762.
114. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море / Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В. и Войтенко Е. А. // *Акустический журнал*. — 2016. — Т. 62, № 3. — С. 341–347.
115. Экспериментальное исследование импульсной характеристики волновода Японского моря с использованием псевдослучайных последовательностей в приложении к навигации удаленных объектов / Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Голов А. А., Буренин А. В., Лебедев М. С. и Петров П. С. // *Акустический журнал*. — 2021. — Т. 67, № 3. — С. 291–297.
116. Экспериментальное тестирование акустической термометрии в масштабе Японского моря с размещением приемной системы на оси подводного звукового канала / Моргунов Ю. Н., Голов А. А., Войтенко Е. А., Лебедев М. С., Разживин В. В., Каплуненко Д. Д. и Шкрамада С. С. // *Akustičeskij žurnal*. — 2023. — Т. 69, № 5. — С. 559–568.
117. Самченко А. Н., Карнаух В. Н., Аксентов К. И. Геолого-геофизические исследования верхней части осадочного чехла и геоакустическая модель шельфа залива Посьета (Японское море) // *Тихоокеанская геология*. — 2013.
118. Самченко А. Н., Ярощук И. О. Акустические параметры донных отложений в заливе Посьета Японского моря // *ФИЗИКА ГЕОСФЕР*. — 2023. — С. 104–108.
119. Томография морской земной коры на основе применения береговых лазерных деформографов и гидроакустических излучателей / Долгих Г. И., Будрин С. С., Долгих С. Г., Овчаренко В. В., Пивоваров А. А., Плотни-

- ков А. А., Самченко А. Н., Чупин В. А., Швец В. А., Швырёв А. Н. и др. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая.* — 2020. — Т. 84, № 6. — С. 766–771.
120. О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна / Долгих Г. И., Долгих С. Г., Пивоваров А. А., Самченко А. Н., Чупин В. А., Швырёв А. Н. и Ярощук И. О. // Доклады Академии наук / Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук". — 2013. — Т. 452. — С. 321–325.
121. Экспериментальные исследования сейсмоакустических процессов на границе гидросфера-литосфера в заливе Петра великого Японского моря / Самченко А. Н., Пивоваров А. А., Швырев А. Н. и Ярощук И. О. // *Подводные исследования и робототехника.* — 2022. — № 2. — С. 74–82.
122. Кацнельсон Б. Г., Переселков С. А. Горизонтальная рефракция низкочастотного звукового поля, вызванная солитонами внутренних волн в мелководном волноводе // *Акустический журнал.* — 2000. — Т. 46, № 6. — С. 779–788.
123. Measurement and modeling of three-dimensional sound intensity variations due to shallow-water internal waves / Badiy M., Katsnelson B., Lynch J., Pereselkov S., and Siegmann W. // *The journal of the acoustical society of America.* — 2005. — Vol. 117, no. 2. — P. 613–625.
124. Рутенко А. Н. Влияние внутренних волн на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря в разные сезоны года // *Акустический журнал.* — 2005. — Т. 51, № 4. — С. 527–535.
125. Internal solitons in the ocean and their effect on underwater sound / Apel J., Ostrovsky L., Stepanyants Y., and Lynch J. // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 2007. — Vol. 121, no. 2. — P. 695–722.
126. Parameter dependence of acoustic mode quantities in an idealized model for shallow-water nonlinear internal wave ducts / Milone M., DeCourcy B., Lin Y., and Siegmann W. // *The Journal of the Acoustical Society of Amer-*

- ica.* — 2019. — Vol. 146, no. 3. — P. 1934–1945.
127. DeCourcy B., Lin Y., Siegmann W. Estimating the parameter sensitivity of acoustic mode quantities for an idealized shelf-slope front // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 2018. — Vol. 143, no. 2. — P. 706–715.
128. DeCourcy B., Lin Y., Siegmann W. Effects of front width on acoustic ducting by a continuous curved front over a sloping bottom // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 2019. — Vol. 146, no. 3. — P. 1923–1933.
129. Бондарь Л. Ф., Бугаева Л. К., Рутенко А. Н. Влияние прилива на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря // *Акустический журнал.* — 2000. — Т. 46, № 5. — С. 613.
130. Acoustic observations of internal tides and tidal currents in shallow water / Turgut A., Mignerey P., Goldstein D., and Schindall J. // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 2013. — Vol. 133, no. 4. — P. 1981–1986.
131. Гулин О. Э., Ярощук И. О. О флуктуациях обратно рассеянного поля в случайной слоистой среде // *Акустический журнал.* — 1999. — Т. 45, № 6. — С. 781–788.
132. Гулин О. Э., Ярощук И. О. Особенности энергетической структуры акустических полей в океане с двумерными случайными неоднородностями // *Акустический журнал.* — 2017. — Т. 6, № 2. — С. 158–164.
133. Гулин О. Э., Ярощук И. О. Зависимость средней интенсивности низкочастотного акустического поля от параметров дна мелкого моря с объемными случайными неоднородностями водного слоя // *Акустический журнал.* — 2018. — Т. 64, № 2. — С. 186–190.
134. Кацнельсон Б. Г., Переселков С. А. Пространственно-частотная зависимость горизонтальной структуры звукового поля в присутствии интенсивных внутренних волн в мелком море // *Акустический журнал.* — 2004. — Т. 50, № 2. — С. 210–210.
135. Рутенко А. Н. Влияние движущегося по шельфу внутреннего температурного фронта на распространение звука // *Акустический журнал.* —

2006. — Т. 52, № 5. — С. 710–715.
136. Рутенко А. Н. Экспериментальное исследование влияния внутренних волн на частотную интерференционную структуру акустического поля в мелком море // *Акустический журнал*. — 2000. — Т. 46, № 2. — С. 259–263.
137. Кузькин В. М., Переселков С. А. Акустический мониторинг фоновых внутренних волн с использованием корреляционного метода измерений частотных сдвигов интерференционных максимумов // *Акустический журнал*. — 2011. — Т. 57, № 4. — С. 501–508.
138. Флуктуации гидроакустических сигналов, обусловленные внутренними волнами / Борисов Н. Г., Гриценко А. В., Козицкий С. Б., Никора О. И., Рутенко А. Н., Трофимов М. Ю. и Филонов А. Е. // *Акустический журнал*. — 1994. — Т. 40, № 5. — С. 749–755.
139. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. — Ленинград: Гидрометеиздат., 1982.
140. Григорьев В. А., Луньков А. А., Петников В. Г. Затухание звука в мелководных акваториях с газонасыщенным дном // *Акустический журнал*. — 2015. — Т. 61, № 1. — С. 90–100.
141. 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.
142. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном / Григорьев В. А., Петников В. Г., Росляков А. Г. и Терёхина Я. Е. // *Акустический журнал*. — 2018. — Т. 64, № 3. — С. 342–358.
143. Spatial and temporal variability of free gas content in shallow sediments: Lake Kinneret as a case study / Uzhansky E., Katsnelson B., Lunkov A., and Ostrovsky I. // *Geo-Marine Letters*. — 2020. — Vol. 40. — P. 491–505.
144. Characterization of the gassy sediment layer in shallow water using an acoustical method: Lake Kinneret as a case study / Katsnelson B., Uzhansky E.,

- Lunkov A., and Ostrovsky I. // *Limnology and Oceanography: Methods*. — 2022. — Vol. 20, no. 9. — P. 581–593.
145. Methane gas dynamics in sediments of Lake Kinneret, Israel, and their controls: Insights from a multiannual acoustic investigation and correlation analysis / Katsman R., Uzhansky E., Lunkov A., and Katsnelson B. // *Science of The Total Environment*. — 2024. — P. 170480.
146. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка: история, теория и получение данных. — М.: Мир, 1987.
147. 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.
148. Долгих Г. И. Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых низкочастотным гидроакустическим излучателем // *Акустический журнал*. — 1998. — Т. 44, № 3. — С. 358–361.
149. Долгих Г. И., Чупин В. А. Экспериментальная оценка преобразования гидроакустического излучения в сейсмоакустическую волну // *Акустический журнал*. — 2005. — Т. 51, № 5. — С. 628–632.
150. Регистрация сейсмоакустических сигналов надводного судна двухкоординатным лазерным деформографом / Бородин А. Е., Долгих А. Г., Долгих Г. И. и Фищенко В. К. // *Акустический журнал*. — 2016. — Т. 62, № 1. — С. 59–59.
151. Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натуральных экспериментах / Борисов С. В., Гриценко А. В., Ковзель Д. Г., Лихачев В. В., Коротченко Р. А., Круглов В. М., Пенкин С. И. и Рутенко А. Н. // *Вестник ДВО РАН*. — 2003. — № 2. — С. 16–29.
152. Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and es-

- timating acoustic transmission during a 3D seismic survey, Sakhalin Island, Russia / Rutenko A., Borisov S., Gritsenko A., and Jenkerson M. // *Environmental monitoring and assessment*. — 2007. — Vol. 134, no. 1. — P. 21–44.
153. 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.
154. Gisiner R. Sound and marine seismic surveys // *Acoust. Today*. — 2016. — Vol. 12, no. 4. — P. 10–18.
155. 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.
156. 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.
157. 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.
158. 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.
159. 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.
160. Greene C., Moore S. Man-made noise. Marine mammals and noise. — 1995.
161. Клей К., Герман М. Акустическая океанография: Основы и применения. — Мир, 1980.
162. Вейвлет-анализ в примерах: Учебное пособие / Нагорнов О. В., Никитавев В. Г., Простокишин В. М., Тюфлин С. А., Проничев А. Н., Бухарова Т. И., Чистов К. С., Кашафутдинов Р. З. и Хоркин В. А. // М.: НИЯУ МИФИ. — 2010.
163. Nonlinear time-warping made simple: A step-by-step tutorial on underwater acoustic modal separation with a single hydrophone / Bonnel J., Thode A., Wright D., and Chapman R. // *The journal of the acoustical society of America*. — 2020. — Vol. 147, no. 3. — P. 1897–1926.
164. Blackwell S., Lawson J., Williams M. Tolerance by ringed seals (*Phoca hispida*) to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2004. — Vol. 115, no. 5. — P. 2346–2357.
165. Гриценко В. А. Метод автоматического обнаружения сейсмоакустических импульсов // Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских/Москва. ГЕОС. — 2013. — С. 94–97.
166. Ковзель Д. Г., Рутенко А. Н., Ущиповский В. Г. Автономная вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система "Моллюск-07-// *Приборы и техника эксперимента*. — 2008. — № 5. — С. 138–142.
167. Behavioural responses of western gray whales to a 4-D seismic survey off northeastern Sakhalin Island, Russia / Gailey G., Sychenko O., McDonald T., Racca R., Rutenko A., and Bröker K. // *Endangered Species Research*. — 2016. — Vol. 30. — P. 53–71.