

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт
имени В.И. Ильичева
Дальневосточное отделение Российской Академии Наук

На правах рукописи

Шкрамада Сергей Сергеевич

**Исследование особенностей формирования низкочастотных
широкополосных полей в подводных звуковых каналах различного
происхождения**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия,
профиль 01.04.06 – «акустика»

Научно-квалификационная работа (диссертация)

Научный руководитель:
д.т.н. Ю.Н. Моргунов

Владивосток – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Теоретические основы в области гидроакустики для решения целевых задач.....	9
1.1. Основные принципы распространения звука в морской среде.....	9
1.2. Теоретическое описание современных гидроакустических систем.....	13
1.3. Теоретическое обоснование эффективности фазоманипулированных псевдослучайными M-последовательностями сложных сигналов при исследовании акустических полей в океане.....	18
Выводы по главе.....	28
Глава 2. Обзор технических и программных средств, используемых при исследовании распространения акустической энергии в подводных звуковых каналах.....	29
2.1.1. Описание измерителя скорости звука.....	29
2.1.2. Описание цифрового гидрофона.....	34
2.1.3. Описание автономных цифровых гидроакустических регистраторов.....	38
2.1.4. Описание излучателя низкочастотных акустических сигналов.....	41
2.2. Обзор вычислительной программы «RAY», разработанной для моделирования акустических низкочастотных полей в океане лучевым методом.....	43
2.2.1. Вычислительные алгоритмы, реализованные в программе «RAY».....	44
2.2.2. Тестирование программы «RAY».....	51
Выводы по главе	61
Глава 3. Исследование особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач позиционирования подводных объектов и акустической термометрии.....	62

3.1. Исследование особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач позиционирования подводных объектов.....	62
3.2. Исследование особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач акустической термометрии.....	70
3.3. Реализация уникальной системы мониторинга температурных режимов в зимних условиях при устойчивом ледовом покрове.....	82
Выводы по главе	92
Заключение	95
Список используемой литературы.....	96
Приложение А.....	104
Приложение Б.....	105
Приложение В.....	107

ВВЕДЕНИЕ

Исследование морских ресурсов всегда было основой экономического развития Дальневосточного региона. Особенно в сложных экономических условиях, диктуемых вызовами сегодняшнего дня, как никогда актуально развивать отечественные технические и методические средства исследования океана. В ТОИ ДВО РАН уже более 20 лет ведутся разработки, направленные на усовершенствование методической базы гидроакустического мониторинга акваторий региональных масштабов.

Кроме того, из-за масштабных изменений климата на планете, остро встаёт необходимость в эффективных методах акустического мониторинга климатической изменчивости морской среды.

В целях развития этих методов был проведен ряд экспериментов, направленных на исследование особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах на различных акустических трассах.

Акустическая томография неоднородностей морской среды, акустическая термометрия, подводная навигация и управление измерительными глубоководными автономными системами (ИГАС) — вот далеко не полный перечень задач, решаемых применением подводных акустических технологий. Широкий частотный диапазон используемых акустических сигналов от десятков Гц до десятков кГц определяет сложность технологических решений при разработке и создании аппаратуры, а также финансовые затраты при экспериментальной апробации и испытаниях.

В данной научно-исследовательской работе продемонстрированы актуальные разработки технических средств, которые не уступают зарубежным аналогам и являются оптимальным выбором для решения поставленных задач, а также результаты экспериментального и численного моделирования распространения акустической энергии, которые были направлены на усовершенствование методов акустической томографии.

Актуальность работы

Для эффективного решения актуальных задач освоения океанов и морей в современных условиях все чаще обращаются к использованию перспективных гидроакустических методов и средств.

В важных для практики случаях требуется проведение специальных экспериментов, направленных на выявление особенностей формирования акустических полей, которые могут повлиять на эффективность функционирования гидроакустических комплексов и систем на подводных объектах различного назначения. Особенно это важно при проведении разработок систем позиционирования и управления ИГАС, выполняющих миссии на глубинах до 1000

метров и в сотнях километров от источников навигационных и информационных сигналов, размещаемых вблизи береговой черты.

Стоит отметить, что в последние десятилетия интенсивного изучения и освоения морей и океанов получили значительное развитие дистанционные методы гидроакустической термометрии в исследовании гидрофизических характеристик и термодинамических процессов. Эти методы имеют неоспоримое преимущество по сравнению с любыми другими контактными методами для освоения и диагностики водных масс на акваториях больших масштабов, поэтому критически важной остается работа над усовершенствованием существующих методов и разработка принципиально новых технических решений их реализации.

С развитием мощных электронных вычислительных машин и программных средств актуальным становится применение теоретических и вычислительных моделей распространения акустических волн на этапах проектирования техники и подготовки к экспериментам в сложных гидрологических и батиметрических условиях.

Цель научно-квалификационной работы - экспериментальные и теоретические исследования особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач акустической термометрии морской среды и высокоточного позиционирования подводных объектов на протяженных (в тысячи километров) акваториях и глубинах до тысячи метров.

При этом были поставлены следующие задачи:

- Изучить основные методы исследования особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах.
- Провести качественный анализ применяемых в научно исследовательской работе технических и программных средств и разработать предложения по их модернизации.
- Провести комплексные экспериментальные и теоретические исследования особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач позиционирования подводных объектов и акустической термометрии морской среды.
- Провести комплекс натурных экспериментов и численного моделирования распространения акустических сигналов, с целью разработки новых методов гидроакустического мониторинга океанической среды.

Научная новизна

Исследование предполагает развитие существующих и разработку новых методов гидроакустического мониторинга морской среды, а также усовершенствование технических и программных средств.

Практическая значимость

К сожалению, большинство экспериментальных и теоретических работ, посвященных акустической термометрии на расстояниях в тысячи километров, выполнялись на морских акваториях южных широт с расположением оси ПЗК на глубинах 800 – 1000 метров. Так как в основном, эксперименты проводились при размещении источников сигналов на оси подводного звукового канала, то рассмотрение полученных результатов применительно к морским акваториям северных широт с заглублением оси ПЗК от 50 до 300 метров не всегда корректно. Поэтому проведение натурных экспериментов в Японском и Охотском морях является принципиально важным для исследования мирового Океана.

Публикации и апробация работы

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 13 работах.

С февраля по октябрь 2021 года, работая в секторе обеспечения и подготовки оборудования к морским экспедиционным исследованиям лаборатории 6/4, участвовал в выполнении работ по проекту «Бриз» (заказчик – Фонд перспективных исследований).

Подробный доклад «Измеритель скорости звука», описывающий измеритель скорости звука, рассмотренный в работе и демонстрирующий его преимущества, автор представил на Всероссийской научной конференции «XXXIV сессия Российского акустического общества», которая проходила 14 – 18 февраля 2022 году в городе Москва, АО «Акустический институт имени Академика Н.Н. Андреева»

Подробный доклад «Цифровой гидрофон», описывающий цифровой гидрофон, рассмотренный в работе, и демонстрирующий его преимущества, автор представил на XII Всероссийском симпозиуме «Физика геосфер», который проходил 6-10 сентября 2021 года, в городе Владивосток, в ТОИ ДВО РАН.

Подробный доклад «Автономные цифровые гидроакустические регистраторы», описывающий автономные цифровые гидроакустические регистраторы, и демонстрирующий их преимущества, автор представил на IX конференции молодых ученых «Океанологические исследования», которая проходила 29-30 апреля 2021 года в городе Владивосток, в ТОИ ДВО РАН.

Автор представил подробный доклад «Исследование структуры акустического поля на основе гидроакустического эксперимента в Японском море» с результатами этого исследования на Всероссийской научной конференции «XXXVI сессия Российского акустического общества», которая проходила 21 – 25 октября 2024 года в городе Москва, в АО «Акустический институт имени Академика Н.Н. Андреева»

Результаты экспериментов автор представил в устном докладе «Численное моделирование распространения сложных акустических сигналов для решения задач термометрии и

дальнометрии» на V Международной научной конференции «Наука будущего» и VIII Всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего – Наука молодых», которые проходили 20 – 23 сентября 2023 года в городе Орел, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»

Автор принял участие в X конференция молодых учёных «Океанологические исследования», которая проходила 24 – 28 апреля 2023 года, в городе Владивосток, ТОИ ДВО РАН с докладом «Особенности распространения псевдослучайных сигналов на пересекающих вихревые структуры сверхдальних трассах».

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в натурных экспериментах, описанных в работе. Автор моделировал распространение акустической энергии в лучевом приближении с помощью программы «RAY», описанной в данной работе. Автор участвовал в разработке и усовершенствовании методов акустического мониторинга, описанных в данной работе.

На защиту выносятся следующие положения:

- Доказана эффективность применения вычислительной программы «RAY», основанной на лучевом методе моделирования акустических полей, при распространении низкочастотных сигналов в сложных волноводах.
- Проведены комплексные экспериментальные исследования особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач акустической томографии океана. Выявлены важные для практики особенности формирования импульсного отклика волновода после воздействия на морскую среду циклонических природных явлений.
- Разработана и испытана методика повышения точности измерения температур морской среды на коротких акустических трассах путём учёта искривления лучей между источником и приемником системы на малых (несколько километров) расстояниях.

Работа состоит из введения, трех глав и заключения.

Глава 1 посвящена теоретическим основам акустического мониторинга морской среды.

В пункте главы 1.1. были разобраны методы расчета гидрологических параметров, важных для проведения исследований, а также основные формулы, используемые в исследовании, а также был определен и описан эффект акустического «оползня». В пункте главы 1.2. показано, что проектирование сложных гидроакустических систем требует учёта множества факторов, включая особенности распространения сигналов, неоднородность среды и динамику источников. В пункте главы 1.3. был обоснован выбор M-последовательности в качестве самого эффективного сигнала для акустического мониторинга.

Глава 2 посвящена техническим и программным средствам исследования.

В пункте главы 2.1.1. содержит описание измерителя скорости звука, в пункте главы 2.1.2. описание цифрового гидрофона, в пункте главы 2.1.3. описание автономных цифровых гидроакустических регистраторов, в пункте главы 2.1.4. описание излучателя низкочастотных акустических сигналов. В пункте главы 2.2. выполнен обзор вычислительной программы «RAY», разработанной для моделирования акустических низкочастотных полей в океане лучевым методом. В пункте главы 2.2.1. описаны вычислительные алгоритмы, реализованные в программе «RAY», в пункте главы 2.2.2. показаны результаты тестирования программы «RAY»

В главе 3 Проведены комплексные экспериментальные исследования распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач позиционирования подводных объектов и акустической термометрии.

В пункте главы 3.1. описано исследование особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач позиционирования подводных объектов, а в пункте 3.2. описано исследование распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач акустической термометрии. В пункте главы 3.3. показана реализация уникальной системы мониторинга температурных режимов в зимних условиях при устойчивом ледовом покрове.

Планы на будущее

Результаты экспериментального и численного моделирования распространения широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах, описанные в данной работе, хоть и являются крайне важными, однако не являются исчерпывающими в плане развития новых методов исследования. Не останавливающийся ни на секунду технологический прогресс, развитие цифровых технологий и активно меняющиеся климатические условия подталкивают постоянно улучшать старые и разрабатывать новые методы исследования океана.

В ближайшее время планируется разработка эффективного программного комплекса для решения задач гидроакустической томографии океана, в который войдет программа «RAY», описанная в данной работе.

Благодарности

Выражаю огромную благодарность всему коллективу лабораторий океанотехники № 6/1 и акустической томографии № 6/2 за профессионализм, командную работу на высоком уровне и позитив. Без таких профессионалов как вы, проведение столь сложных экспериментов было бы невозможно.

Глава 1. Теоретические основы в области гидроакустики для решения целевых задач

1.1. Основные принципы распространения звука в морской среде

Для начала стоит рассмотреть основные параметры морской среды, влияющие на распространение акустической энергии в океане. Скорость звука в морской среде является фундаментальным параметром, определяющим эффективность гидроакустических систем, от подводной навигации до климатического мониторинга морской среды. Ее значения варьируются в зависимости от температуры, солености и давления (глубины), что делает необходимым использование эмпирических моделей, которые опираются на точные натурные данные при акустическом мониторинге. Наиболее широко применяемым уравнением для нахождения скорости звука является формула Чена-Миллера, разработанная в 1977 году и доработанная в последующих исследованиях [66]. Эта формула выражает скорость звука $c(T, S, P)$ как функцию температуры (T , °C, в диапазоне от 0°C до 40°C), солености (S , ‰, в диапазоне от 0 до 40 промилле) и давления (P , бар, в диапазоне от 0 до 1000 бар). Эта формула легла в основу алгоритма расчета скорости звука в морской воде ЮНЕСКО, который описан в работе [72]. В 1995 году, после принятия международной температурной шкалы 1990 года, коэффициенты морской среды были уточнены. Конечная форма формулы ЮНЕСКО имеет следующий вид [73]:

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^3 + D(T, P)S^2, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{где } C_w(T, P) &= C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5 + (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + \\ &C_{13}T^3 + C_{14}T^4P + C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4P^2 + (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3, \\ A(T, P) &= A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4 + A_{05}T^5 + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + \\ &A_{14}T^4P + A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3 + A_{24}T^4P^2 + (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3, \\ B(T, P) &= B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P, \\ D(T, P) &= D_{00} + D_{10}P. \end{aligned}$$

Коэффициенты, применяемые в данной формуле, приведены в «Приложении А».

Погрешность этой формулы в открытом океане не превышает 0.5 м/с, что подтверждено экспериментально. Однако, в прибрежных зонах с высокой турбулентностью и переменной соленостью требуются иные подходы. Например, формула Лероя [81], адаптированная для мелководья обеспечивает точность +/- 0.1 м/с даже при резких градиентах солености, характерных для устьевых областей.

Формула Лероя в упрощенном виде выглядит следующим образом:

$$c = 1492,9 + 3(T - 10) - 0,006(T - 10)^2 - 0,04(T - 18)^2 + 1,2(S - 35) - 0,01(T - 18S - 35 + z/61),$$

где z – глубина в метрах.

Практическое применение этих уравнений реализуется в получении с помощью STD-зондов актуальной гидрологической картины. Данные температуры, солености и давления, с учетом погрешностей измерительных приборов, позволяют получить вертикальные разрезы скорости звука (ВРСЗ) в необходимых областях мирового океана. Актуальная гидрологическая картина позволяет прогнозировать траектории распространения акустической энергии и импульсные отклики волновода, что важно для задач навигации подводных аппаратов [45].

Итак, скорость звука в воде определяется сложным взаимодействием температуры, солености и давления, формируя пространственно-временные неоднородности среды. Эти неоднородности напрямую влияют на характер распространения акустических волн, что требует применения двух взаимодополняющих подходов – волновой и лучевой теорий, основанных на решении волнового уравнения.

Волновое уравнение, являющееся фундаментом гидроакустики, описывает распределение акустического давления p в пространстве и времени t . В однородной среде оно имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right),$$

где p – акустическое давление; t – время; c – скорость звука, зависящая от координат.

Волновой метод базируется на теории нормальных волн (волновой теории). Согласно этому методу, распространение акустической энергии описывается характеристическими функциями, называемыми нормальными волнами (модами). Каждая из этих функций представляет собой решение волнового уравнения. Суммы нормальных волн составляются таким образом, чтобы удовлетворить граничным условиям с учетом параметров источника звука.

Второй формой решения волнового уравнения является лучевая теория. Совокупность результатов и выводов, полученных на основе этой теории, называется лучевой акустикой. В основе лучевой теории лежат: 1) постулат о волновых фронтах, на которых фазовые или временные функции решения принимают постоянные значения; 2) представление о лучах, определяющих область, в которую попадает звук, излученный источником.

Обе теории имеют свои плюсы и минусы, поэтому для расширенного анализа звукового поля стоит применять оба метода. Авилов К.В. в работе [1] указывает, что «разбор поля» на отдельные элементы может служить хорошим инструментом, позволяющим проводить более детальный анализ особенностей формирования пространственно-угловых характеристик полей.

Волновая теория формально дает полное решение, однако его порой трудно получить с учетом реальных граничных условий, кроме самых простых. Кроме того, решения, полученные с помощью этого метода, часто трудно интерпретировать. Теория справедлива на всех частотах, но практически применима для низких частот (для немногих нормальных волн).

В свою очередь, лучевая теория позволяет легко построить траекторию луча и получить наглядное изображение распределения интенсивности звука, а реальные граничные условия вводятся легко. Она не зависит от характера источника звука. Однако, она не позволяет решить проблему дифракции, т.е. рассчитать звуковое поле в зоне тени и не учитывает явление горизонтальной рефракции. Справедлива при следующих условиях: 1) Радиус кривизны луча больше длины волны (λ) или 2) изменения скорости звука по глубине в пределах расстояния, равного λ невелики [49].

Одним из наиболее важных практических результатов лучевой теории является закон Снеллиуса.

Изменения скорости звука, обусловленные пространственной неоднородностью температуры, солености и давления, приводят к рефракции – искривлению траекторий акустических лучей. Это явление, описываемое законом Снеллиуса, является ключевым фактором, определяющим структуру акустических полей в океане.

Закон Снеллиуса устанавливает, что в среде, состоящей из слоев с постоянными значениями скорости звука, углы скольжения $\theta_1, \theta_2, \dots$ лучей на границах слоев связаны со значениями скоростей звука c_1, c_2, \dots в этих слоях следующим соотношением для любого луча:

$$\frac{\cos \theta_1}{c_1} = \frac{\cos \theta_2}{c_2} = \frac{\cos \theta_3}{c_3} = const$$

В этом выражении константа равна величине, обратной скорости звука в слое, где луч становится горизонтальным, т.е. при $\cos \theta = 1$.

Рассмотрим волновые фронты (поверхности постоянной фазы) в двух жидкостях, имеющих скорости звука c_1 и c_2 , а также разделенных плоской границей. Расстояние AB вдоль границы между двумя волновыми фронтами связано с длинами волн λ_1 и λ_2 в двух средах выражением:

$$AB = \frac{\lambda_1}{\cos \theta_1} = \frac{\lambda_2}{\cos \theta_2}$$

С учетом того, что $\lambda_1 = f/c_1$ и $\lambda_2 = f/c_2$, получим закон Снеллиуса в виде [49]:

$$\frac{c_1}{\cos \theta_1} = \frac{c_2}{\cos \theta_2} \quad (2)$$

Градиент скорости звука является важнейшим параметром при определении траектории лучей:

$$g = \frac{\Delta c}{\Delta z}, \quad (3)$$

где $\Delta c = c_2 - c_1$, $\Delta z = z_2 - z_1$, c – скорость звука, z – глубина.

Искривление траекторий звуковых лучей, обусловленное вертикальными градиентами скорости звука, создает условия для формирования акустических волноводов. Наиболее значимым из них является подводный звуковой канал (ПЗК), где акустическая энергия фокусируется и распространяется на тысячи километров с минимальным затуханием. Этот природный волновод, зависящий от гидрологических параметров морской среды, играет ключевую роль в глобальном мониторинге океана и подводной связи, что будет показано в следующих главах.

ПЗК формируется в глубоком океане, где вертикальный профиль скорости звука имеет четкий минимум. Глобально этот минимум возникает из-за снижения температуры океана с глубиной, с одной стороны, и из-за роста гидростатического давления, с другой [11].

Лучи захватываются ПЗК, если их начальный угол скольжения θ_0 не превышает критический угол $\theta_{кр}$. Критический угол захвата луча – это максимальный угол скольжения луча относительно горизонта, при котором акустический сигнал остается захваченным ПЗК. Если начальный угол превышает $\theta_{кр}$, то луч покидает канал и рассеивается. Критический угол описывается формулой:

$$\cos \theta_{кр} = \frac{c_{min}}{c_0}, \quad (4)$$

где c_{min} – минимальная скорость звука на оси ПЗК; c_0 – скорость звука в точке излучения (источника).

Кроме того, бывают поверхностные и придонные волноводы. При наличии положительного градиента скорости звука в верхних слоях воды может возникнуть поверхностный волновод (поверхностный ПЗК). Он может образоваться из-за прогрева поверхности солнцем, что увеличивает температуру, или из-за сезонного таяния льдов, снижающего соленость. В таких условиях лучи, выходящие под малыми углами, отражаются от поверхности водоема и преломляются около слоя с повышенной скоростью звука. Нестабильность поверхностных волноводов, вызванная сезонными изменениями или антропогенным воздействием, осложняет их использование в долгосрочном мониторинге среды.

При отрицательном градиенте скорости звука образуется придонный волновод (придонный ПЗК). В нем наблюдается отрицательная рефракция – звуковые лучи искривляются в сторону

дна. Затухание сигнала в придонном волноводе определяется акустическими свойствами грунта. Песчаное или илистое дно лучше поглощает акустическую энергию, чем скальные породы, однако при скалистом дне акустическая энергия испытывает сильное рассеяние из-за неровностей поверхности дна. Для предотвращения поглощения акустической энергии используется низкочастотный звук.

В контексте описания природных акустических волноводов стоит упомянуть эффект акустического «оползня», так как он играет важную роль при разработке гидроакустических систем навигации и климатического мониторинга в Японском море, что было неоднократно показано, например в работах [4, 39, 40]. Суть этого явления заключается в захвате энергии сигнала волноводом, включающем шельфовую зону, континентальный склон и глубокое море [90]. Впервые идея захвата акустической энергии сигнала при описанных условиях распространения была предположена в работе [88]. Подробное описание механизма возникновения данного эффекта и детальное описание результатов численного моделирования натурального эксперимента [88], полученных с помощью акустической модели параболического уравнения в университете Майами (UMPE) [34], были приведены в статье Тапперта и др. [90]. Было показано, что данный эффект распространения в горизонтально-неоднородной среде имеет место, когда источник находится на дне в шельфовой зоне с отрицательным градиентом скорости звука. В то время как звуковые волны малых углов опускаются по склону шельфа, градиент скорости звука уменьшает свое значение до тех пор, пока не обратится в ноль, при достижении оси звукового канала в глубоком море. При этом, акустическая энергия фокусируется в придонном слое на шельфе, переходит на ось ПЗК в глубоком море и распространяется по траекториям, близким к прямолинейным, с минимальным затуханием на большие расстояния.

Данный эффект имеет огромный практический потенциал, так как он:

- 1) является устойчивым к неровностям дна;
- 2) концентрирует большую часть акустической энергии около оси ПЗК, что позволяет передавать сигнал на огромные расстояния;
- 3) способствует малому времени затягивания сигнала;
- 4) дает устойчивую структуру приходов акустической энергии в точке приема.

1.2. Теоретическое описание современных гидроакустических систем

Гидроакустические системы подводной навигации, коммуникации и акустического мониторинга среды представляют собой ключевой инструмент в исследовании океана, поскольку эффективность передачи электромагнитных волн под водой на расстояниях более

десятков метров незначительна, в отличие от акустических сигналов, дальность распространения которых может достигать более тысячи километров в водной среде.

Гидроакустические системы значительно эволюционировали с момента их создания. Современные технологии включают новые методы модуляции сигналов, усовершенствованные алгоритмы обработки данных, а также инновационные архитектуры приёмников и передатчиков. Если первые системы обеспечивали дальность действия до 1 километра с погрешностью около 5%, то сегодняшние аналоги способны работать на расстоянии в сотни километров, а их погрешность может составлять менее 0,1% от дальности. В работах [2, 55] подробно описаны характеристики современных гидроакустических систем.

Особенностью гидроакустических систем является их работа в сложных условиях, которые существенно отличаются от условий эксплуатации радиоэлектронных устройств. Среди особенностей работы с гидроакустическими системами можно выделить:

- Ограниченное пространство для размещения оборудования;
- высокая влажность;
- сложности с теплоотводом из-за работы электронных компонентов.

Сегодня на рынке представлено множество гидроакустических систем от различных производителей. Их технические характеристики часто схожи, а различия заключаются в технологиях и материалах, используемых при изготовлении приёмопередающих элементов. Принцип работы таких систем основан на измерении времени прохождения акустического сигнала между передающим и приёмным преобразователями.

Координаты подводного объекта определяются путём анализа результатов нескольких измерений при разном взаимном расположении передатчиков и приёмников. Обработка данных осуществляется с помощью специализированного программно-аппаратного комплекса, эффективность которого зависит от применяемых алгоритмов [55].

Согласно работе [57], ключевыми параметрами гидроакустических устройств являются: частота излучаемого сигнала и диаграмма направленности. Частота сигнала варьируется от сотен герц до сотен килогерц. Чем выше частота, тем меньше дальность распространения сигнала. Диаграмма направленности определяет область применения устройства и характеризуется углами обзора в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Особое место среди гидроакустических систем занимают гидроакустические системы позиционирования (ГАНС). В зависимости от метода определения координат, их можно разделить на три группы [2]:

1. ГАНС с длинной базой (ГАНС ДБ) — координаты объекта вычисляются относительно удалённых опорных точек (маяков), расстояние между которыми (база) значительно превышает размеры зоны позиционирования.

2. ГАНС с короткой базой (ГАНС КБ) — аналогична ГАНС ДБ, но маяки устанавливаются на судне-носителе.

3. ГАНС с ультракороткой базой (ГАНС УКБ) — использует комбинацию дальномерных и угломерных измерений, полученных от компактно расположенных маяков. Приёмник в такой системе представляет собой массив антенн, что позволяет точно определять местоположение объекта.

Эти системы находят применение в навигации, подводных исследованиях и других областях, где требуется точное определение координат под водой.

Основу гидроакустических систем составляет измерение времени распространения акустического сигнала. В зависимости от метода измерения, такие системы делятся на два типа [15, 35]:

1. Пассивные системы — работают по одностороннему принципу: принимают сигналы от естественных или сторонних источников без генерации собственного излучения.

2. Активные системы — используют двухсторонний принцип: излучают сигнал и анализируют его отражение от объектов, что позволяет определять их местоположение и характеристики.

Эти методы наглядно демонстрируются на Рисунке 1.1. Пассивные системы чаще применяются для скрытного наблюдения, тогда как активные обеспечивают более точное измерение расстояний и используются, например, в эхолотах или гидролокаторах.

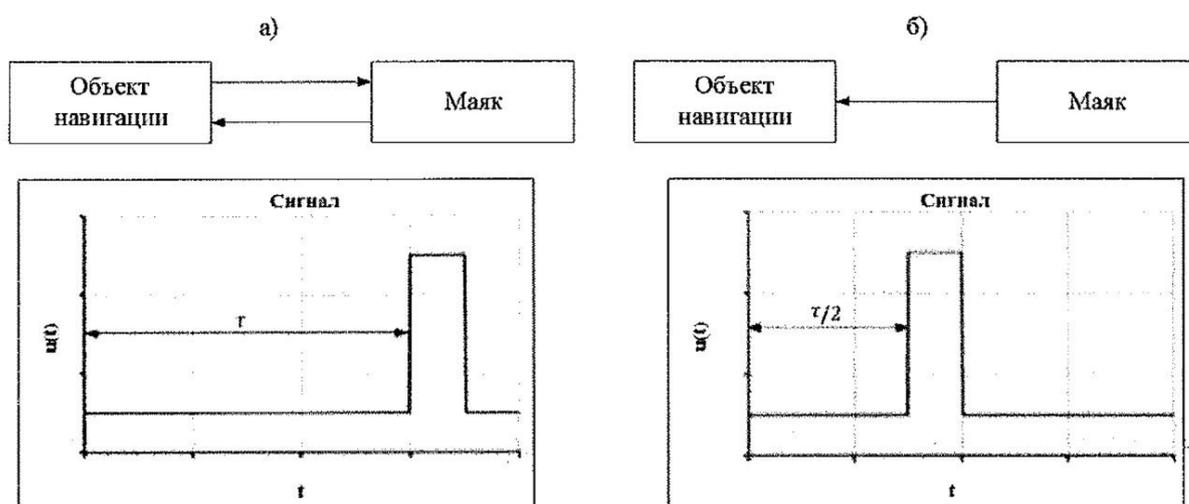


Рисунок 1.1. – Измерение времени распространения сигнала: а) двухстороннее и б) одностороннее

Расстояние r между приёмником и источником акустического сигнала рассчитывается по формуле:

$$r = k \cdot \tau \cdot V_{зв}, \quad (5)$$

где $V_{зв}$ – скорость звуковой волны в среде; τ – время прохождения сигнала; k – коэффициент, зависящий от типа системы измерений.

При активном измерении:

- Объект генерирует акустический сигнал через передатчик;
- принимается либо отражённый сигнал от препятствия (пассивный отклик), либо ответный сигнал от маяка (активный отклик);
- для активного ответа требуется, чтобы маяк был оснащён приёмопередающим оборудованием;
- коэффициент $k = 1/2$, так как сигнал проходит двойное расстояние (до объекта и обратно).

При пассивном измерении:

- Излучающий объект является самостоятельным источником сигнала;
- приёмник фиксирует время распространения сигнала без генерации ответа;
- требуется синхронизация систем времени на обоих объектах;
- коэффициент $k = 1$, поскольку измеряется прямое распространение сигнала.

Таким образом, выбор метода (активный/пассивный) определяет не только схему измерений, но и значение корректирующего коэффициента в расчётной формуле.

Гидроакустические системы с активным измерением времени распространения сигнала обладают двумя ключевыми преимуществами:

1. Простота реализации — не требуют синхронизации часов между приёмными устройствами.
2. Универсальность — идеально подходят для навигации и автономной работы подводных аппаратов.

Как следует из формулы (5), точность определения расстояния и координат напрямую зависит от точности измерения времени прихода сигнала. Исследование [62] демонстрирует: пропорциональную зависимость между погрешностью измерения времени δ_τ и погрешностью определения расстояния δ_r , а также то, что наибольшая точность достигается при малых значениях δ_τ .

Современные системы позиционирования сталкиваются с важным противоречием: высокие частоты сигнала повышают точность, но сокращают дальность действия, а низкие частоты, в свою очередь, увеличивают дальность, но снижают точность. Баланс точности и дальности зависит от специфики конкретных задач исследования.

Растущие требования к подводным миссиям стимулируют исследования в области:

- Оптимизации обработки сигналов;
- разработки новых алгоритмов;
- создания гибридных систем, сочетающих преимущества разных частотных диапазонов.

Таким образом, современные гидроакустические системы развиваются в направлении увеличения автономности, точности и адаптивности к сложным подводным условиям.

Гидроакустические системы и условия их применения изучаются в рамках статистической теории гидролокации — раздела технической гидроакустики, который занимается вероятностным моделированием сигналов, помех и условий подводных наблюдений. На основе этих моделей разрабатываются методы анализа и проектирования гидролокационных систем. Хотя гидролокация во многом схожа с радиолокацией, её уникальные особенности выделяют её в самостоятельное научное направление.

Далее стоит рассмотреть особенности зон распространения сигнала. В ближней зоне (зоне Френеля) фронт волны близок к сферическому. В дальней зоне (зоне Фраунгофера) фронт волны приближается к плоскому. Однако из-за переотражений от поверхности моря, дна и рефракции зона Френеля может значительно расширяться, достигая десятков или даже сотен километров. Как показали исследования [36], в таких условиях фронт волны можно считать плоским лишь условно.

Важно отметить, что динамические условия излучения сигнала влияют на его параметры. Сигналы от неподвижных и подвижных источников различаются. Наибольшие искажения сигнала наблюдаются при неравномерном движении источника в неоднородной среде. В однородной среде с постоянной скоростью движения искажения сводятся к доплеровскому сдвигу частот. В неоднородной среде сигнал изменяется более сложным образом [37, 38].

Доплеровский эффект, изменяющий форму полезного сигнала, требует разработки специальных моделей сигналов, минимизирующих это влияние. Это особенно важно для обеспечения точности и надёжности гидроакустических измерений в динамичных условиях.

Таким образом, проектирование гидроакустических систем требует учёта множества факторов, включая особенности распространения сигналов, неоднородность среды и динамику источников.

1.3. Теоретическое обоснование эффективности фазоманипулированных псевдослучайными M-последовательностями сложных сигналов при исследовании акустических полей в океане

Проектирование любой системы беспроводной связи начинается с создания максимально точной модели принимаемого сигнала — ключевого элемента всей системы. Хотя параметры сигнала на момент его излучения обычно известны, процесс его распространения в водной среде сопровождается множеством искажений, которые сложно предсказать детерминированными методами. Это относится как к шумовым сигналам, так и к сигналам активной локации (первичным и вторичным).

Основные проблемы при моделировании сигналов включают: многообразие искажающих факторов, неполное понимание механизмов их возникновения, неизвестные или изменчивые параметры этих искажений.

Для практического применения необходимо располагать хотя бы приблизительными данными о диапазоне изменения параметров сигналов. В идеале требуются достоверные модели, учитывающие: изменения частотных характеристик, потери энергии сигнала (эффекты поглощения средой), искажения формы сигнала, особенности распространения, отражения и рассеивания в водной среде.

Для описания гидроакустических сигналов применяется теория случайных полей и функций [28]. В цифровых системах сигнал может быть представлен в виде дискретной случайной последовательности $\{S_i\}$, где каждый элемент S_i принимает значения из конечного множества $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m$.

Существуют два основных подхода к моделированию:

1. Модель с независимыми элементами — простейший вариант, где значения S_i не зависят друг от друга.
2. Модель с зависимыми элементами — более сложный, но и более точный подход, учитывающий взаимосвязи между последовательными значениями сигнала.

Разработка адекватных моделей сигналов — критически важный этап для создания эффективных алгоритмов обработки, позволяющих компенсировать искажения и повысить надежность гидроакустических систем связи.

Гидроакустические системы используют разнообразные модели сигналов, выбор которых определяется конкретными задачами и условиями эксплуатации. Временные модели анализируют изменения параметров сигнала во времени, пространственно-временные учитывают особенности распространения в водной среде, спектральные фокусируются на частотных характеристиках, а волновые - на особенностях распространения волновых фронтов.

Для их описания применяют математический аппарат, включающий автокорреляционные функции, спектральную плотность мощности, а также функции взаимной корреляции и когерентности.

Параметры реальных гидроакустических сигналов варьируются в чрезвычайно широких пределах. Длительность сигналов может составлять от микросекунд до нескольких часов, несущая частота – от единиц герц до сотен килогерц, а рабочая полоса частот - от долей октавы до нескольких октав. Особое место занимают полосовые сигналы, спектр которых сосредоточен около определенной несущей частоты ω_0 . Такие сигналы математически описываются уравнением:

$$s(t) = a(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi(t)),$$

где $a(t)$ представляет закон изменения амплитуды, а $\varphi(t)$ - фазовую модуляцию.

Классификация гидроакустических сигналов основывается на принципе неопределённости Габора: $FT \geq a$, где F – полоса, занимаемая сигналом; T – длительность сигнала (FT – база сигнала).

Согласно этому принципу, сигналы делятся на простые ($FT \approx 1$) и сложные ($FT \gg 1$). Простые сигналы характеризуются жесткой взаимосвязью между длительностью (T) и полосой (F), где увеличение полосы возможно только за счет сокращения длительности. В отличие от них, сложные сигналы (или сигналы с распределённым спектром) позволяют независимо варьировать полосу и длительность [32, 77].

Дополнительная классификация [25, 85] разделяет сигналы на узкополосные, для которых отношение полосы частот сигнала Δf к средней его частоте f_{s0} значительно меньше единицы, и широкополосные, не удовлетворяющие этому условию.

Такой многоуровневый подход к моделированию и классификации сигналов позволяет оптимально подбирать параметры сигналов для конкретных задач гидроакустики, учитывая требования к дальности действия, точности измерений и устойчивости к помехам. Комплексное использование различных моделей и типов сигналов обеспечивает эффективную работу гидроакустических систем в разнообразных условиях – от мелководных прибрежных зон до глубоководных районов океана.

Развитие методов обработки сигналов продолжает оставаться ключевым направлением в современной гидроакустике.

Существующие классификации гидроакустических сигналов не исключают, а дополняют друг друга, что позволяет создавать комплексные характеристики. Например, можно говорить об узкополосных сложных сигналах.

Ширина спектра полезного сигнала зависит не только от его структуры, но и от рабочих характеристик излучателя и приемника. В русскоязычной литературе сложные сигналы часто

отождествляют с шумоподобными сигналами (ШПС), что объясняется схожестью их амплитудного спектра с распределением белого гауссовского шума в ограниченной полосе частот.

Традиционно в гидроакустических системах преобладали простые импульсные детерминированные узкополосные сигналы, что было обусловлено ограничениями элементной базы. Однако, с развитием вычислительных систем и алгоритмов для обработки сигналов [23, 24, 27, 42], все большее распространение получают сложные сигналы, обладающие рядом преимуществ:

1. Повышенная помехоустойчивость при воздействии мощных помех;
2. комбинированная функциональность – одновременный прием информации с высокой достоверностью и точное измерение параметров движения (особенно для сигналов с линейной частотной модуляцией);
3. возможность кодовой адресации множества абонентов и их разделение в общей полосе частот (для сигналов, модулированных псевдослучайными последовательностями).

Ключевым параметром, определяющим помехоустойчивость, является база сигнала (B), связанная с отношением сигнал/шум (SNR) формулой:

$$q^2 = 2B\rho^2,$$

где q^2 - SNR на выходе приемника, ρ^2 - SNR на входе.

Так как для сложных сигналов с большой базой ($B \gg 1$) SNR на выходе приемного устройства будет много выше, чем на входе, то это позволяет построить систему, работающей при значениях SNR на входе приемника ниже 0 дБ.

Процесс обработки сложных сигналов включает их временное сжатие при корреляционном анализе [21]. После прохождения через согласованный фильтр, сигнал длительностью T преобразуется в автокорреляционную функцию (АКФ) с характерной структурой (Рисунок 1.2):

- Центральный пик с амплитудой A и длительностью $\tau_0 = \frac{1}{w}$. Чем шире спектр сложного сигнала, тем более узким становится центральный пик;
- боковые пики с максимальным значением a_{max} .

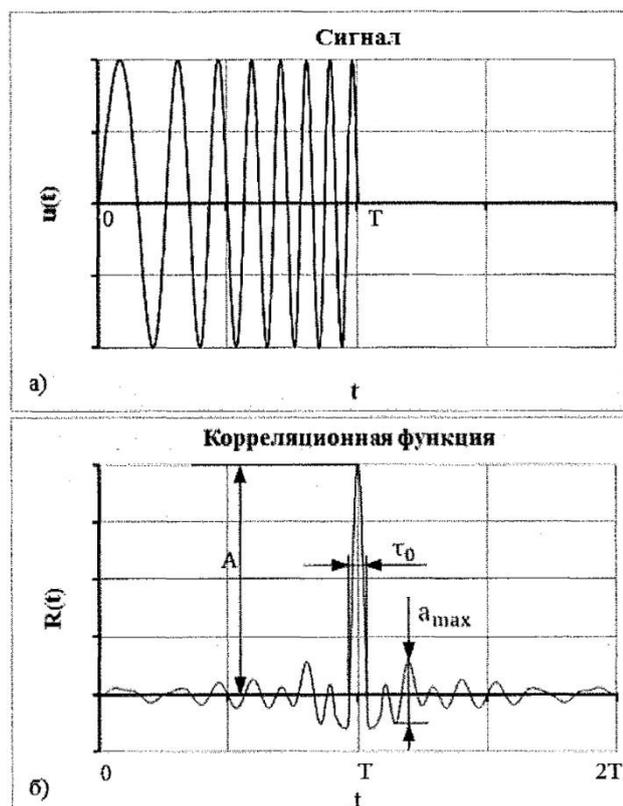


Рисунок 1.2. – Сложный сигнал (а); корреляционная функция (б)

В результате обработки длительность сигнала сокращается в B раз, а его мощность соответственно возрастает, что значительно улучшает фильтрацию шумов на стороне приема.

Сложные гидроакустические сигналы демонстрируют значительные преимущества при решении задач разрешения, особенно в условиях многолучевого распространения, когда необходимо различать сигналы одинаковой формы, временно смещенные на величину τ . Ключевыми факторами, определяющими разрешающую способность, являются форма сигнала, ширина его спектра и общая длительность. Для оценки этого параметра используется функция неопределенности [22]:

$$\chi(\tau, f) = |\beta(\tau_p, f_p)|,$$

где τ_p представляет временную задержку между сигналами, а f_p – частотное расстояние между сигналами. Нормированная функция рассогласования $\beta(\tau_p, f_p)$ вычисляется по формуле:

$$\beta(\tau_p, f_p) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(t) \dot{S}^*(t - \tau_p) \exp(j2\pi f_p t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(t)|^2 dt},$$

где $\dot{S}(t)$ – комплексная огибающая сигнала; $\dot{S}^*(t)$ – комплексно-сопряженная функция к комплексной огибающей, с учетом временного и частотного сдвигов.

Узкий пик функции неопределенности свидетельствует о высокой потенциальной разрешающей способности, достигаемой в оптимальных условиях обнаружения [21].

Графически эта зависимость представлена на рисунке 1.2, где по оси абсцисс отложена длительность сигнала T , а по оси ординат – нормированные значения функции [82]. Важно отметить, что для сложных сигналов разрешающая способность (определяемая обычно на уровне 0,5) существенно меньше длительности самого сигнала. Это свойство, обусловленное узким центральным пиком корреляционной функции, делает сложные сигналы особенно эффективными для борьбы с явлением многолучевости при распространении акустических волн [24].

Ранее разработчики гидроакустических систем позиционирования ограничивались использованием простых гармонических сигналов из-за технологических ограничений элементной базы. Однако переход к технологии распределённого спектра и сложным сигналам открыл новые возможности для улучшения характеристик систем. Ключевые преимущества включают: существенное повышение помехоустойчивости, уменьшение влияния многолучевости [22], а также возможность увеличения дальности работы без наращивания мощности излучения. Эти особенности важны для задач точного измерения временных задержек сигналов, что наделяет сложные сигналы особой важностью в развитии современных подводных систем позиционирования и связи.

Для эффективного разделения сигналов от различных источников (маяков, станций или судов) в гидроакустических системах применяют принцип ортогональности. Два сигнала $s_1(t)$ и $s_2(t)$ считаются ортогональными, если их взаимная корреляция на интервале длительности T равна нулю, что математически выражается условием:

$$\int_0^T u_1(t) \cdot u_2(t) dt = 0$$

Важно отметить, что широкополосность сигнала сама по себе не гарантирует ортогональности, поэтому особое значение приобретает правильный выбор системы сигналов.

В современной гидроакустике наибольшее распространение получили три типа сложных сигналов [21]:

1. Сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) характеризуются линейным изменением частоты по закону $f(t) = f_0 + \vartheta t$, где f_0 – начальная частота; ϑ – скорость изменения частоты. Их база вычисляется как: $B = \Delta f \cdot T = \vartheta T^2$.

2. Дискретно-частотные (ДЧ) сигналы представляют последовательность символов с изменяющейся частотой. При N_s символах, длительности символа $\tau_s = T/N_s$ и шириной спектра символа $W_s = \frac{N_s}{T}$, база такого сигнала составляет: $B = WT = N_s W_s \cdot N_s \tau_s = N_s^2 W_s \tau_s = N_s^2$, поскольку база импульса $W_s \tau_s = 1$.

3. Фазоманипулированные (ФМ) сигналы состоят из импульсов с дискретным изменением фазы (0 или π). При N_s символах, длительности символа $\tau_s = T/N_s$ и шириной спектра символа $W_s = \frac{1}{\tau_s} = N_s/T$, то база ФМ сигнала будет: $B = WT = \frac{T}{\tau_s} = N_s$, т.е. равна количеству импульсов.

Спектральные характеристики этих сигналов имеют принципиальные различия. ЛЧМ сигналы требуют сокращения полосы частот для эффективного разделения, что снижает помехоустойчивость. В отличие от них, ДЧ и ФМ сигналы позволяют использовать кодовое разделение, работая во всей доступной полосе частот. Наибольшую помехоустойчивость демонстрируют сигналы с равномерным спектром [82], что делает ФМ и ЛЧМ сигналы предпочтительными для широкополосных систем.

Однако применение ЛЧМ сигналов в гидроакустике сталкивается с существенными техническими ограничениями:

- Отсутствие преобразователей с равномерной широкополосной характеристикой в режиме излучения, что ограничивает возможности многоабонентных систем;
- искажение формы и спектральных характеристик при распространении;
- высокий уровень боковых лепестков корреляционной функции по сравнению с ФМ-сигналами.

Эти особенности необходимо учитывать при проектировании гидроакустических систем, выбирая тип сигналов в зависимости от конкретных задач и условий эксплуатации. Оптимальный выбор позволяет достичь баланса между разрешающей способностью, помехоустойчивостью и эффективностью использования частотного ресурса.

Фазоманипулированные (ФМ) сигналы представляют собой один из наиболее перспективных типов сложных сигналов для современных гидроакустических систем. Их ключевое преимущество заключается в практически неограниченных возможностях масштабирования – длина сигнала ограничивается лишь техническими характеристиками обработки, а современное развитие аппаратной базы делает это ограничение все менее существенным.

Это позволяет создавать сигналы значительной длительности, что особенно важно для подводных коммуникаций. Цифровая природа ФМ-сигналов обеспечивает их идеальную совместимость с современными цифровыми методами обработки, как при формировании, так и при приеме сигналов. Наибольшую эффективность эти сигналы демонстрируют в многоабонентских системах, включающих средства связи, навигации и телеуправления. Увеличение длины базовой последовательности позволяет генерировать практически неограниченное количество ортогональных ФМ-сигналов с превосходными

автокорреляционными свойствами, что критически важно для организации параллельной работы множества устройств.

Анализ современных гидроакустических систем показывает, что большинство производителей до сих пор ориентированы на обслуживание единичного подводного аппарата. Однако актуальной задачей становится организация совместной работы нескольких аппаратов различного типа и назначения в рамках единого операционного пространства.

Использование сложных ФМ-сигналов позволяет решить эту проблему путем назначения каждому аппарату уникального набора ортогональных последовательностей. Такой подход обеспечивает возможность независимого адресного взаимодействия между обеспечивающим судном и каждым подводным аппаратом, а также различными аппаратами в группе [33].

В рамках дальнейшего рассмотрения особое внимание будет уделено ФМ-сигналам, модулированным М-последовательностями, которые демонстрируют оптимальное сочетание характеристик для решения указанных задач. Эти типы сигналов обладают необходимыми свойствами ортогональности и помехоустойчивости, что делает их идеальным выбором для перспективных гидроакустических систем группового применения. Кроме того, сигналы данного типа позволяют использовать технологию кодового разделения каналов, что описано в работах [74, 86, 94].

Рассмотрим детальнее эти сигналы. ФМ-сигнал формируется как последовательность гармонических импульсов с фазовой модуляцией, где фаза принимает одно из двух значений (0 или π) в соответствии с бинарной псевдослучайной последовательностью.

$$\text{Математически это выражается как: } u(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_c t), & \text{при } m_i = 0 \\ \sin(2\pi f_c t + \pi), & \text{при } m_i = 1 \end{cases}$$

где m_i – псевдослучайная бинарная последовательность; f_c – несущая частота.

Ключевые свойства бинарных псевдослучайных последовательностей [80, 84, 92], делающие их идеальными для гидроакустических систем, включают:

- Баланс между количеством нулей и единиц (разница не более 1);
- оптимальное распределение последовательностей одинаковых символов;
- автокорреляционную функцию, приближающуюся к дельта-функции при увеличении длины последовательности. Автокорреляционный пик растет с увеличением длины последовательности и приближается к автокорреляционной функции белого шума;
- минимальную взаимную корреляцию между разными последовательностями.

На практике используются несколько типов псевдослучайных кодов, включая коды Баркера, М-последовательности, коды Голда, Адамара-Уолша и Касами. В данном исследовании основное внимание уделяется М-последовательностям, которые были выбраны благодаря их исключительным корреляционным свойствам.

M-последовательности особенно ценны за счёт максимального соотношения между главным пиком и боковыми лепестками автокорреляционной функции, что обеспечивает наилучшую помехоустойчивость среди всех рассматриваемых вариантов. Эти особенности делают их идеальным выбором для современных гидроакустических систем, работающих в сложных условиях подводной среды.

При реализации технологии кодового разделения каналов количество уникальных сигналов определяется набором используемых псевдослучайных последовательностей, где каждая последовательность соответствует конкретному абоненту (аппарату, маяку или судну) и номеру команды.

ФМ-сигналы на основе M-последовательностей обладают тремя ключевыми свойствами:

- 1) они являются периодическими кодами с чётко определённым количеством импульсов N_s в периоде;
- 2) боковые пики периодической автокорреляционной функции равны $1/\sqrt{N_s}$, поэтому эти сигналы демонстрируют предсказуемое уменьшение боковых лепестков корреляционной функции с ростом N_s ;
- 3) M-последовательность в общем случае состоит из нескольких типов импульсов, которые могут различаться, например, начальными фазами или несущими частотами. Импульсы разных типов встречаются в периоде примерно одинаковое количество раз, где распределяются равномерно. Благодаря этой особенности, M-последовательности часто называют псевдослучайными.

Экспериментальные исследования [14] подтвердили, что эти последовательности по своим статистическим характеристикам близки к белому гауссовскому шуму, что обеспечивает им высокую помехоустойчивость в гидроакустических навигационных системах.

Для примера практической реализации этих принципов можно рассмотреть специализированную программу [12, 13, 16, 17], выполняющую две важные функции: генерацию M-последовательностей заданной длины и анализ их корреляционных свойств. Этот инструментарий позволяет не только находить оптимальные M-последовательности, но и исследовать другие типы псевдослучайных кодов.

Основу алгоритма формирования M-последовательностей составляет циклический сдвиг битовой строки с выполнением операции сложения по модулю 2 последнего символа и бит слова, определяемых формирующим полиномом (биты c_1, c_2, \dots, c_k). Результат операции добавляется в начальный разряд T_1 , а значение из последнего разряда T_k сохраняется каждый такт, как бит генерируемой последовательности.

Полный цикл формирования занимает $2^k - 1$ тактов, причём характеристики получаемой последовательности критически зависят от начального значения слова и вида используемого полинома.

После генерации последовательности проводится тщательный анализ её корреляционных свойств путём вычисления автокорреляционной функции (АКФ). Критерии качества последовательности включают:

- Максимальное значение АКФ, равное 1;
- уровень боковых лепестков, не превышающий $1/N_s$ (где N_s – длина последовательности).

Последовательности, удовлетворяющие этим условиям, классифицируются как идеальные М-последовательности. При этом допускается использование неидеальных вариантов, где боковые лепестки АКФ не превышают 20% от максимума.

Важно отметить, что не все полиномы из 2^k вариантов генерируют М-последовательность. Для нахождения М-последовательности применяют полиномы вида:

$y = x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$. Данный полином имеет порядок $k = 7$ и дает последовательность длиной $(2^k - 7) = 127$ знаков.

Ввиду вышеописанных преимуществ, в экспериментальных работах, где автор принимал непосредственное участие [18, 20, 41, 53, 54, 67, 69], были использованы фреймы в составе нескольких фазоманипулированных псевдослучайными М-последовательностями сложных сигналов.

Методика обработки принятых сигналов, описанная в работе [19], заключается в следующем:

На выходе гидрофона и каждого канала векторного приемника вычисляется взаимная корреляционная функция излученного $S_0(t)$ и принятого $S(t)$ сигналов:

$$K_{ss_0}(r, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) G(\omega, r) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (6)$$

где $H(\omega) = S_0(\omega)S^*(\omega)$, $S_0(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(t)e^{-i\omega t} dt$ – спектр Фурье излученного сигнала; $S^*(\omega)$ – соответственно комплексно сопряженный спектр принятого сигнала; $G(\omega, r) = \sum_{j=1}^N A_j(r)e^{-i\omega t_j(r)}$ – функция Грина; $t_j(r)$ и $A_j(r)$ – соответственно время распространения и амплитуда сигнала, распространяющегося по j -му лучу от источника до приемника, расположенного в точке r ; N – число лучей, приходящих на приемник.

Для каждого луча, по которому приходит акустическая энергия, на полученной таким образом импульсной характеристике волновода по соотношению амплитуд в каналах определялись величины углов скольжения по формуле:

$$a = \operatorname{arctg} \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}},$$

где A_z, A_x, A_y – значения максимумов корреляционной функции соответственно в вертикальном и горизонтальном каналах.

На практике обработка информации заключается в вычислении взаимной корреляционной функции между принятыми сигналами и репликой излученного сигнала. На полученных таким образом импульсных характеристиках в каждой точке, на каждой принятой посылке выделяются максимальные по амплитуде импульсы, и определяется время их распространения T_i . Затем рассчитывается расстояние до источника сигналов:

$$D_{\text{ПЗК}} = T_i \times C_{\text{ПЗК}},$$

где $C_{\text{ПЗК}}$ – скорость звука на оси ПЗК, измеренная в данной точке. Далее производится расчет расстояния с учетом средней скорости звука на акустической трассе, которая получается путем суммирования средней скорости на шельфе $C_{\text{Ш}}$ и $C_{\text{ПЗК}}$ в пропорциях, соответствующих расстояниям, пройденным сигналом на шельфе и в глубоком море. Соответственно, средняя скорость звука вычисляется по формуле:

$$C_{\text{сред.}} = C_{\text{Ш}} \times \frac{R_{\text{Ш}}}{(R_{\text{ПЗК}} + R_{\text{Ш}})} + C_{\text{ПЗК}} \times \frac{R_{\text{ПЗК}}}{(R_{\text{ПЗК}} + R_{\text{Ш}})}, \quad (7)$$

где $R_{\text{Ш}}$ – длина части трассы на шельфе, а $R_{\text{ПЗК}}$ – длина части трассы в глубоком море.

Далее рассчитываются ошибки измерения дистанции путем сравнения с данными GPS:

$$\Delta D_{\text{ПЗК}} = D_{\text{GPS}} - D_{\text{ПЗК}}; \quad \Delta D_{\text{сред.}} = D_{\text{GPS}} - D_{\text{сред.}}$$

После этого оценивается временная когерентность (стабильность) сигнала.

$$\rho(t, \tau) = \left\langle \frac{[p^*(t) \otimes p(t+\tau)]_{\text{max}}}{\sqrt{[p^*(t) \otimes p(t)]_{\text{max}} \cdot [p^*(t+\tau) \otimes p(t+\tau)]_{\text{max}}}} \right\rangle,$$

где τ – временная задержка; $[p^*(t) \otimes p(t+\tau)]_{\text{max}}$ означает максимальное значение взаимной корреляции двух, следующих друг за другом, временные выборки или свертку обращенного во времени сигнала (обозначенного *) с другим сигналом.

Стабильность приема сигнальной информации оценивается, во-первых, по отношению амплитуд сигналов к шуму во всех точках, которые были выбраны произвольно на трассе. Во-вторых, анализируется процент соответствия последних приходов в импульсных характеристиках максимальным приходам по амплитуде, т.к. это является основой точности расчетов расстояния между источником и приемником сигналов.

Выводы по главе

В главе были разобраны методы расчета гидрологических параметров, важных для проведения исследований, а также основные формулы, используемые в исследовании. Среди важнейших для дальнейших рассуждений можно отметить: алгоритм Чена-Миллеро (1), закон Снеллиуса (2), градиент скорости звука (3), определение критического угла скольжения (4), расчет расстояния между источником и приемником (5), взаимная корреляционная функция излученного и принятого сигналов (6) и расчет средней скорости звука в волноводе (7).

Был определен и описан эффект акустического «оползня», который имеет огромный практический потенциал при проведении акустического мониторинга океанической среды, так как он:

- 1) является устойчивым к неровностям дна;
- 2) концентрирует большую часть акустической энергии около оси ПЗК, что позволяет передавать сигнал на огромные расстояния;
- 3) способствует малому времени затягивания сигнала;
- 4) дает устойчивую структуру приходов акустической энергии в точке приема.

Показано, что проектирование сложных гидроакустических систем требует учёта множества факторов, включая особенности распространения сигналов, неоднородность среды и динамику источников.

Кроме того, был обоснован выбор М-последовательности в качестве самого эффективного сигнала для акустического мониторинга. М-последовательности особенно ценны за счёт максимального соотношения между главным пиком и боковыми лепестками автокорреляционной функции, что обеспечивает наилучшую помехоустойчивость среди всех рассматриваемых вариантов. Эти особенности делают их идеальным выбором для современных гидроакустических систем, работающих в сложных условиях подводной среды.

Глава 2. Обзор технических и программных средств, используемых при исследовании распространения акустической энергии в подводных звуковых каналах

2.1.1. Описание измерителя скорости звука

Как было отмечено в пункте 1.1. этой работы, скорость звука в морской среде является фундаментальным параметром, определяющим эффективность гидроакустических систем, от подводной навигации до климатического мониторинга морской среды. Для измерения этого параметра существует множество технических средств.

Проведение океанологических и гидрофизических исследований требует оперативного получения данных о вертикальном распределении скорости звука. Однако, существующие на рынке измерительные приборы часто не соответствуют конкретным исследовательским задачам, условиям работы в сложных условиях морской среды или имеют неоптимальное соотношение цены и качества.

В ТОИ ДВО РАН был разработан специализированный измеритель скорости звука (ИСЗ), позволяющий в режиме реального времени отображать измеряемые параметры в цифровом и графическом виде непосредственно в процессе погружения и подъёма измерительного модуля (Рисунок 2.1).



Рисунок 2.1. – Внешний вид измерителя скорости звука, разработанного в ТОИ ДВО РАН

ИСЗ работает по принципу прямых измерений в импульсно-циклическом режиме и состоит из двух основных компонентов: измерительного и бортового модулей (Рисунок 2.2). Эти модули соединены кабельной линией связи.



Рисунок 2.2. – Структурная схема ИСЗ. 1 – однопорожечный датчик скорости звука (акустическая база), 2 – датчик давления, 3 – формирователь синхрокольца, 4 – преобразователь давления, 5 – микропроцессор, 6 – драйвер линии, 7 – модуль питания, 8 – ЭВМ (ноутбук/планшет)

Измерительный модуль включает в себя:

- Однопорожечный датчик скорости звука (акустическая база) на основе обратимого ультразвукового преобразователя из пьезокерамики типа ЦТС-19 (резонансная частота $2.5 \cdot 10^6$ Гц);
- герметический контейнер с датчиком давления (глубины), а также блоками формирователя синхрокольца, преобразователя давления и микропроцессора.

Конструкция предусматривает возможность оперативной замены датчиков.

Формирователь синхрокольца включает электронный приемоизлучающий тракт, состоящий из входного усилителя, порогового устройства, выходного усилителя и синхронизируемого импульсного генератора, который при подключенном к нему датчике с обратимым ультразвуковым преобразователем (Рисунок 2.3) позволяет создать импульсно-циклический режим пробега сигнала на длине акустической базы между обратимым преобразователем и отражателем.

Роль микропроцессора заключается в управлении измерительным процессом аппаратно-программным способом. Микропроцессор устанавливает генератор сигнала строга (запускающего импульса) на автоциркуляцию, вычисляет время прохождения сигнала в двух противоположных направлениях, определяет, учитывая все введенные калибровки и погрешности, величину скорости звука и управляет передачей данных в кабельную линию связи.

Бортовой модуль включает в себя:

- Драйвер линии связи;
- модуль питания;
- управляющее устройство (ноутбук/планшет).

Передача информации в бортовой модуль осуществляется по 4-жильному грузонесущему кабелю с продольной герметизацией КМГПЭУГ 4 x 0.5 - 5.0.



Рисунок 2.3. - Однородный датчик скорости звука

Измерение скорости звука в разработанном устройстве можно реализовать двумя методами. Первый основан на подсчете количества циклов сигнала за единицу времени. Однако, этот способ обладает существенным недостатком – высокой погрешностью измерения. Эта погрешность возникает из-за неоднозначности учета неполного завершенного цикла и возрастает пропорционально увеличению периода импульсов. Второй метод, реализованный в данном ИСЗ, предполагает измерение длительности периода импульса (времени прихода сигнала в двух противоположных направлениях, для исключения влияния скорости течения) или фиксированной серии импульсов. Этот способ обеспечивает значительно более высокую точность за счет использования высокой частоты отсчетов, но предъявляет повышенные требования к вычислительным ресурсам процессора, который параллельно выполняет другие задачи.

Для реализации точных измерений в устройстве используется 32-разрядный счетчик с частотой счета 16 МГц с разрешением по скорости звука 0.001 м/с.

Обработка и визуализация данных осуществляется с помощью специализированного программного пакета «Delphi_SoundMeter_2020», разработанного на платформе «Borland Delphi Enterprise v 7.0». Программное обеспечение совместимо с операционными системами Windows 98 – Windows 10 (версии 21H2) и предоставляет оператору широкие возможности управления:

отображение данных в цифровом и графическом виде, их сохранение, а также настройку через интерактивный интерфейс. В режиме реального времени оператор может корректировать калибровочные коэффициенты, изменять частоту и настраивать другие параметры, что позволяет адаптировать работу прибора под конкретные условия эксперимента.

Далее проведем оценку погрешности измерений разработанного прибора.

$$\text{Период следования импульсов равен: } T(C) = \frac{L + \tau_n \cdot C}{C},$$

где L – общая длина измерительной базы, C – скорость звука в точке измерения, τ_n – временная задержка сигнала в реальных условиях, возникающая в акустическом и электронном трактах. Период следования импульсов в синхрокольце составляет величину $(T + \tau_n)$, что приводит к нелинейной зависимости частоты следования импульсов от скорости звука, а также к ее занижению. В разработанном ИСЗ основными источниками временной задержки (0.12 – 0.13 мкс) являются конечное время срабатывания микроконтроллера и температурная зависимость электронных компонентов. Относительное изменение длины акустической базы $\Delta L/L$, при изменении температуры морской воды (от -1°C до $+36^\circ\text{C}$) и изменении давления (от 1.033 кг/см^2 до 207.61 кг/см^2), составляет $\sim 10^{-5}$ [26].

Методика калибровки измерителей скорости звука подробно описана в литературе [5, 6], при этом наиболее точным признан метод сличения с образцовым прибором. Для оценки погрешности разработанного ИСЗ на лабораторном стенде с использованием дистиллированной воды проводилась калибровка совместно с гидрологическим зондом SBE-37, а также методом сравнения с показаниями зонда в натуральных условиях. Сертифицированный производителем зонд SBE-37 имеет погрешность измерения температуры 0.002°C , электропроводности 0.0003 См/м и скорости звука 0.008 м/с , рассчитанной методами рекомендованными UNESCO (UNESCO-78) [91] по стандартным гидрологическим параметрам (C , T , D).

Результаты испытаний показали, что в лабораторных условиях погрешность ИСЗ не превышала 0.013 м/с . В натуральных условиях, при сличении показателей приборов на однородных по температуре участках вертикального профиля (10 – 12 м., 14 – 16 м.), максимальная погрешность ИСЗ составляла 0.25 м/с , что было принято в качестве итоговой оценки точности прибора.

Сравнительный анализ с современными отечественными и зарубежными аналогами [29, 30, 31] подтвердил, что разработанный ИСЗ не уступает им по точности измерений, демонстрируя сопоставимые характеристики при существенно более низкой стоимости.

Основные технические характеристики ИСЗ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. - Основные технические характеристики ИСЗ

Диапазон измерений скорости звука, м/с	1400 - 1600
Цена единицы мл. разряда кода скорости звука, м/с	0.001
Погрешность измерения скорости звука, м/с	± 0.25
Диапазон измерений глубины, м	0 - 100
Погрешность измерения глубины, м	± 0.05
Частота измерений, Гц	10 (программируемая)
Интерфейс связи	RS485
Напряжение питания от источника постоянного тока, В	7.5 - 18
Габаритные размеры, мм / масса без кабеля, кг	$\varnothing 75 \times 350$ / не более 1

Разработанный ИСЗ успешно эксплуатируется при проведении акустических исследований в шельфовых зонах Японского и Охотского морей, обеспечивая оперативный мониторинг вертикального распределения скорости звука во время развертывания и работы гидроакустического оборудования.

В ходе испытаний в Амурском заливе (июль 2021 г.) при глубине 16 м была проведена серия из 10 синхронных измерений с интервалом в 5 минут совместно с гидрологическим зондом SBE-37 (Рисунок 2.4). Практическое применение показало ряд существенных преимуществ устройства:

- Мгновенное получение данных в цифровом и графическом виде;
- компактные габариты и малый вес;
- ИСЗ продемонстрировал значительно меньший разброс значений (в 4 раза) при прохождении слоя температурного скачка на глубине 6 м. по сравнению с SBE-37. Это преимущество обусловлено принципом прямого измерения и меньшей тепловой инерционности благодаря компактной конструкции.

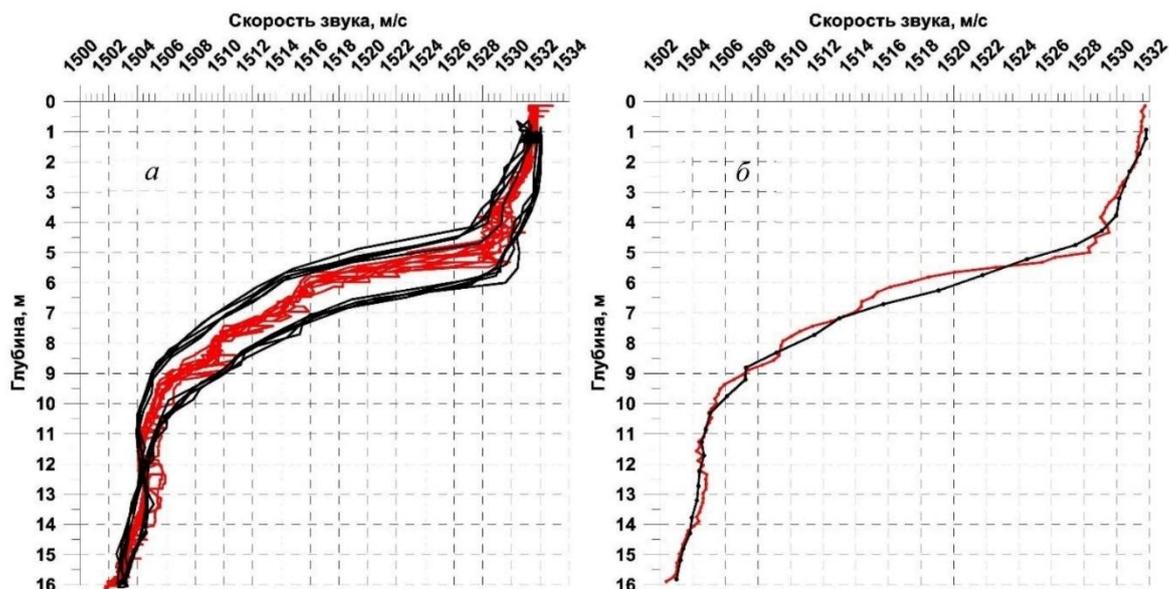


Рисунок 2.4. – Скорость звука в Амурском заливе 30 июля 2021 года. Красный цвет – ИСЗ, черный – SBE-37. а – суммарное представление («как есть») всей серии измерений, б – осредненное с окном 0.1 м представление серии измерений.

Подробный доклад «Измеритель скорости звука», описывающий данный ИСЗ и демонстрирующий его преимущества, автор представил на Всероссийской научной конференции «XXXIV сессия Российского акустического общества», которая проходила 14 – 18 февраля 2022 году в городе Москва, АО «Акустический институт имени Академика Н.Н. Андреева» [47].

По результатам калибровки и применения в натуральных условиях, представленный ИСЗ удовлетворяет задачам оперативного получения информации о вертикальной изменчивости скорости звука и обладает высокими эксплуатационными характеристиками. За исключением микропроцессора, приемоизлучающий тракт выполнен на отечественной радиоэлектронной элементной базе, а модульность конструкции позволяет применять и адаптировать ее элементы к задачам измерений (например, добавить датчики температуры, электропроводности, выбрать другую частоту измерений, использовать его в автономном варианте, поместить в другой корпус и пр.). Разработанный ИСЗ не уступает аналогичным по назначению образцам отечественного и зарубежного производства по показателю погрешности измерений, и конкурирует по эксплуатационным характеристикам.

2.1.2. Описание цифрового гидрофона

Ввиду особенностей выполнения задач натуральных акустических экспериментов, зачастую оказывается невозможным использование имеющихся на рынке гидрофонов или приемных измерительных устройств. Отводя таким средствами измерений задачи метрологического

обеспечения [50], все же актуальной для практики остается разработка нестандартного контрольно-измерительного оборудования и технических решений, которые позволяют выбрать, помимо основных технических параметров, вид передаваемого сигнала, длину кабельной линии, скорость передачи данных, а также способы постановки и применения в эксперименте.

В отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН разработаны и изготовлены конструкции цифровых гидрофонов (ЦГ), предназначенных для непрерывной регистрации звуковых колебаний в диапазоне низких звуковых частот. Особенностью их конструкции является возможность раздельной градуировки акустического и электронного трактов, большой динамический диапазон, позволяющий исследовать полезный сигнал при высоком уровне структурной помехи, регулируемые АЧХ и высокие коэффициенты усиления, допускающие использование гидрофонов в качестве составляющих элементов приёмных гидроакустических систем, например, непосредственное подключение к радиобуям без дополнительной обработки сигнала. Кроме того, в гидрофонах предусмотрен режим регистратора данных, полезный при невозможности использования кабельной линии.

В состав цифрового гидрофона входит чувствительный элемент с кабелем длиной 1 м, гермокорпус с электроникой и кабельная линия длиной 200 метров. В качестве чувствительного элемента гидрофона применен пьезокерамический пьезопреобразователь Ø50 мм, причем, с целью обеспечения периодической градуировки, кабель гидрофона, а также кабельная линия, оснащены унифицированными быстросъемными соединителями с гермокорпусом. Внешний вид разработанных ЦГ представлен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5. – Автономные цифровые гидрофоны

Структурная схема находящегося в гермокорпусе ЦГ блока электроники представлена на рисунке 2.6. Она включает прецизионный аудио усилитель и полосовой фильтр в связке с быстродействующим 16-разрядным АЦП, датчик давления на 10 Мпа вместе с 16-разрядным сигма-дельта АЦП, микропроцессорный модуль [43], драйвер линии.

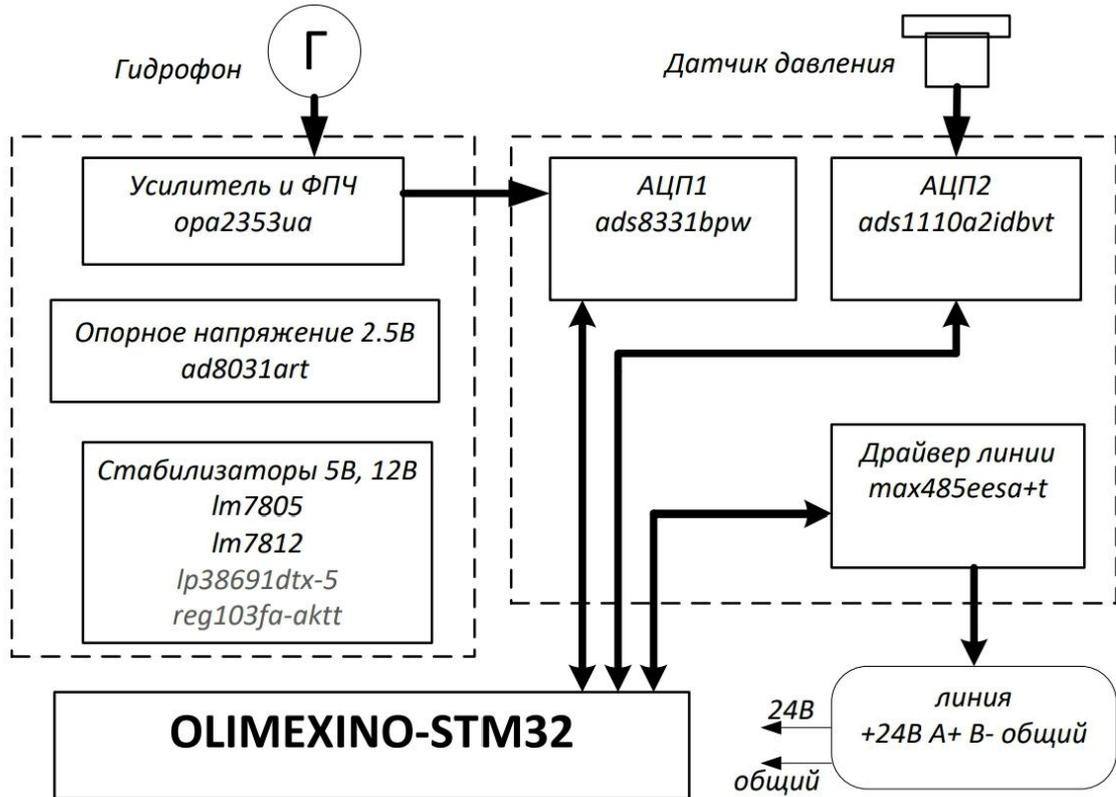


Рисунок 2.6. – Структурная схема цифрового гидрофона

Гермокорпус ЦГ, выполненный из нержавеющей стали, допускает погружение на глубину до 1 км. В кабельном варианте гидрофона электропитание и связь с устройством осуществляются по 4-проводному грузонесущему кабелю Ø7 мм. Регистрация информации производится с помощью компьютера, сигналограмма и ее параметры представляются графическим интерфейсом.

Кабельный вариант не исключает возможности работы ЦГ в автономном режиме. Запись информации при этом производится на внутреннюю SD-карту микропроцессорного модуля, а электропитание прибора осуществляется двумя аккумуляторами типоразмера 18650, которые обеспечивают 25 часов непрерывной работы устройства.

Основные характеристики ЦГ приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. - Основные характеристики ЦГ

Чувствительность гидрофона	160 мкВ/Па
Динамический диапазон, при THD < 10%	85 дБ
Коэффициенты усиления	1200, 2400, 4800, 9600
Полоса пропускания (-3 дБ)	200 – 800 Гц
Шум, приведенный к выходу	0.5 мкВ
Рабочая глубина	До 1000 м
Погрешность определения глубины	± 0.1 м
Частота дискретизации аудио АЦП	9600 Гц
Разрядность аудио АЦП	16
Частота дискретизации АЦП датчика глубины	2 Гц
Разрядность АЦП датчика глубины	16
Аппаратный интерфейс	RS-485
Скорость передачи	460800 бит/с

Аудио усилитель ЦГ реализован на двухзвенном неинвертирующем ОУ с частотной коррекцией. Первое звено работает как предусилитель с большим входным сопротивлением, обеспечивая согласование импедансов пьезопреобразователя и следующих звеньев. Коэффициент усиления устанавливается простой комбинацией перемычек на плате.

Изменение полосы пропускания тракта возможно путем изменения номиналов времязадающих цепей фильтров. Частота преобразования аудио АЦП – 9600 Гц, причем высокая частотная стабильность достигнута применением прецизионных кварцевых генераторов типа ТСХО.

Градуировка трактов ЦГ выполнена на лабораторных испытательных стендах.

Подробный доклад «Цифровой гидрофон», описывающий данный прибор и демонстрирующий его преимущества, автор представил на XII Всероссийском симпозиуме «Физика геосфер», который проходил 6-10 сентября 2021 года, в городе Владивосток, в ТОИ ДВО РАН [51].

2.1.3. Описание автономных цифровых гидроакустических регистраторов

Разработанные специалистами ТОИ ДВО РАН автономные цифровые гидроакустические регистраторы эксплуатируются уже более 5 лет. Они представляют собой современное средство для длительного непрерывного мониторинга акустических процессов на глубинах до 1000 м. Их разработка стала возможной благодаря развитию энергоэкономичной радиоэлементной базы, удешевлению твердотельных накопителей на рынке, а также достижениям последних лет в области создания малогабаритных аккумуляторов высокой емкости.

Обычно для акустического мониторинга морской среды используются многоканальные вертикальные гирлянды гидрофонов. Однако, относительно большая стоимость и сложность в эксплуатации могут оказать существенное влияние в пользу выбора разработанных в ТОИ ДВО РАН регистраторов акустических сигналов. Автономные цифровые гидроакустические регистраторы могут быть оперативно развернуты в составе вертикальных гирлянд [48], поставлены на грунт или закреплены на движущихся объектах. Практика показала, что использование регистраторов позволяет существенно упростить процедуру постановки и выборки устройства, а также выполнять работы с борта маломерных плавсредств, что особенно важно для проведения ряда натурных экспериментов.

При обеспечении синхронной регистрации сигналов можно верифицировать разрабатываемые расчетные модели распространения акустической энергии и физического моделирования приема навигационной и связной информации подводными аппаратами в заданном диапазоне глубин.

Разработанные автономные цифровые гидроакустические регистраторы (Рисунок 2.7) состоят из:

- Гидрофона;
- прецизионного аудио усилителя в связке с быстродействующим (до 500 kSPS) 16-разрядным АЦП;
- датчика глубины с 16-разрядным АЦП;
- микроконтроллерного модуля;
- модуля памяти;
- источника питания;
- гермокорпуса, выполненного из нержавеющей стали, выдерживающего глубины до 1 км.



Рисунок 2.7. – Разработанный автономный цифровой гидроакустический регистратор в разборе

Характеристики разработанных регистраторов приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. - Характеристики автономных цифровых гидроакустических регистраторов

Аудио канал	
Чувствительность гидрофона	160 мкВ/Па
Динамический диапазон, при TDH < 10%	70 – 85 дБ
Коэффициент усиления на частоте 400 Гц	4400 - 4600
Полоса пропускания (- 3 дБ)	200 -650 Гц
Шум, приведенный к выходу, на $f_0 = 400$ Гц	1.8 – 2.7 мкВ
Частота дискретизации АЦП	24 kSPS
Канал давления	
Максимальная регистрируемая глубина	1000 м
Разрешение по глубине	0.1 м

Время функционирования	
Время непрерывной работы до допустимого разряда аккумуляторов	36 ч
Время полного заполнения карты памяти	108 ч

После извлечения регистраторов из среды, записанная информация распаковывается с SD-карты, принятые сигналы подвергаются спектральной и корреляционной обработке для получения импульсной характеристики волновода.

По результатам эксплуатации был разработан ряд предложений по модернизации автономных цифровых гидроакустических регистраторов:

1. Снижение электрического шума в аудиоканале за счет изменения элементного состава, схемных решений с корректной развязкой цифровых и аналоговых линий, стабилизации опорных напряжений, экранирования узлов и модулей, чувствительных к внешним электрическим наводкам;

2. снижение энергопотребления регистратора и увеличения времени его автономной работы посредством оптимизации соединений в аккумуляторной секции и приведения аккумуляторной секции к виду, допускающему подключение типового балансного зарядного устройства;

3. улучшение эксплуатационных характеристик посредством обеспечения управлением регистратора и замены карты памяти без извлечения шасси из гермокорпуса.

Реализация предлагаемых технических решений позволит:

1. Уменьшить собственный шум аудио усилителей до 0.5 мкВ;
2. увеличить динамический диапазон на 10 – 15 дБ;
3. увеличить коэффициент усиления в аудио канале до 10000;
4. увеличить время непрерывной работы регистратора до 72 часов;
5. создать более удобные условия работы оператора.

Подробный доклад «Автономные цифровые гидроакустические регистраторы», описывающий данный прибор и демонстрирующий его преимущества, автор представил на IX конференции молодых ученых «Океанологические исследования», которая проходила 29-30 апреля 2021 года в городе Владивосток, в ТОИ ДВО РАН [52].

2.1.4. Описание излучателя низкочастотных акустических сигналов

Одной из наиболее успешных концепций для создания мощного низкочастотного акустического источника является техническое решение на основе излучателя поршневого типа [10, 46, 63]. Этот тип излучателя обладает рядом преимуществ:

1. Использование преобразователя без компенсации внешнего гидростатического давления, так как максимальная рабочая глубина излучателя определяется пределом текучести используемых материалов и механическими напряжениями, возникающими в конструкции под воздействием давления;
2. возможность значительного увеличения эффективной площади излучающей поверхности относительно поперечного сечения активного элемента за счёт развитой поверхности корпуса излучателя;
3. совмещение функций излучающей апертуры и несущей конструкции для упругих элементов, создающих предварительное напряжение активного пьезокерамического элемента корпусом излучателя.

Излучатель состоит из двух конических излучающих поверхностей, соединённых гибким упругим элементом в виде кольцевой пружины, которые вместе образуют герметичную оболочку. Между вершинами излучающих поверхностей расположен активный элемент — столб из параллельно соединённых пьезокерамических шайб с чередующейся поляризацией, изготовленных из пьезокерамического материала и изолированных от корпуса диэлектрическими шайбами. При подаче переменного электрического напряжения активный элемент совершает возвратно-поступательные колебания, которые передаются через торцевые элементы на излучающие поверхности. Электрический импеданс такого преобразователя определяется взаимодействием механической и электрической подсистем, а также влиянием присоединённой массы воды.

Конструкция такого акустического источника позволяет использовать его без компенсации гидростатического давления на глубинах более 300 м. Он обладает КПД до 80% и создаёт акустическое давление до 20 кПа·м для тональных, частотно-модулированных и фазоманипулированных сигналов.

Технические характеристики:

- Диаметр — 1400 мм;
- Высота — 1450 мм;
- Масса — 600 кг;
- Максимальное эффективное значение напряжения — 1500 В;
- КПД на резонансной частоте — более 70%;
- Расчётный срок службы — 10^{11} циклов;

- Максимальная рабочая глубина без компенсатора — 200 м;
- Рабочий частотный диапазон — 300–600 Гц.

Внешний вид излучателя низкочастотных акустических сигналов, используемого при проведении натуральных экспериментов, показан на Рисунке 2.8. Излучатель был подробно описан в статье [67].

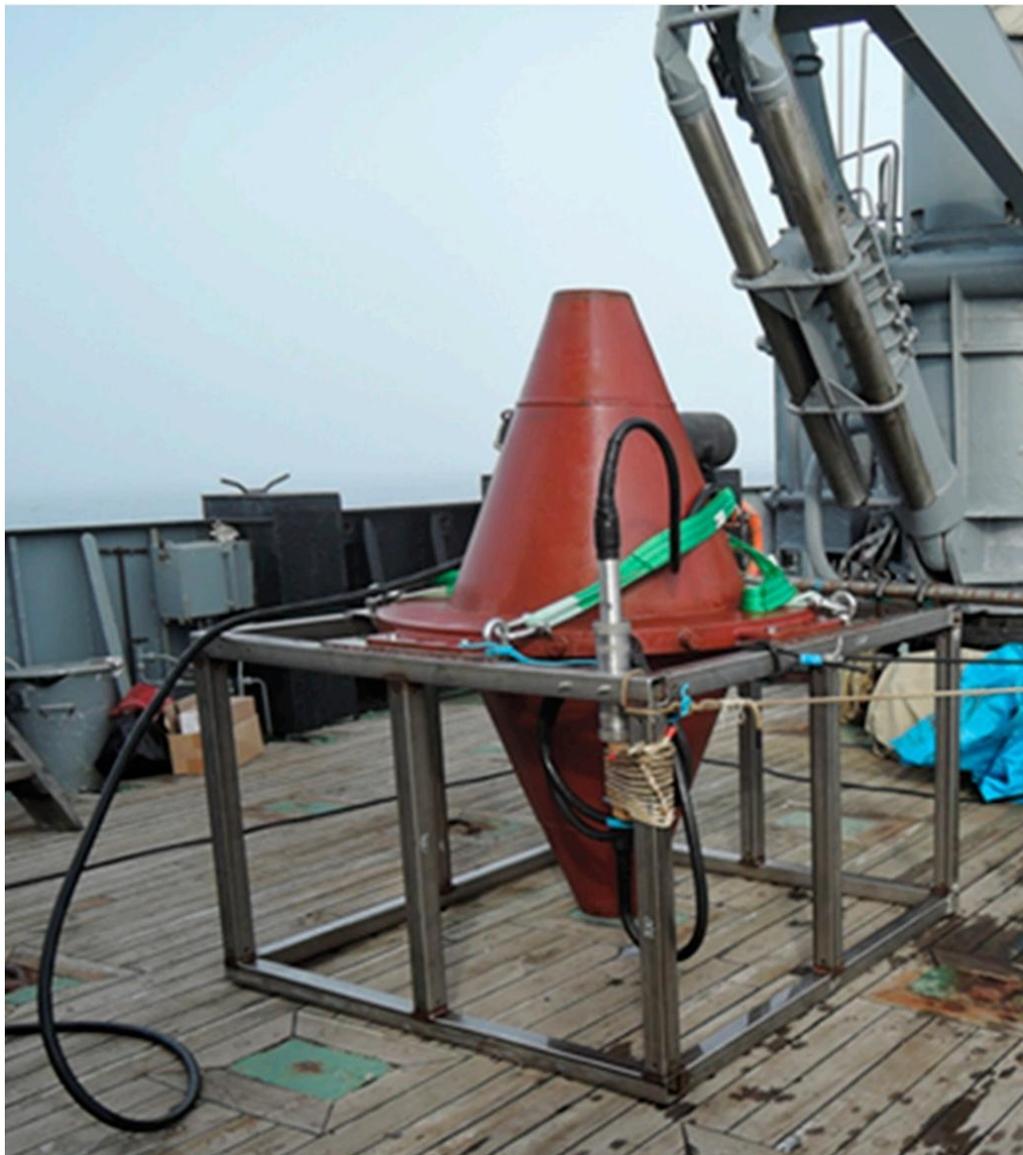


Рисунок 2.8. - Внешний вид излучателя низкочастотных акустических сигналов, используемого при проведении натуральных экспериментов

2.2. Обзор вычислительной программы «RAY», разработанной для моделирования акустических низкочастотных полей в океане лучевым методом

Программа «RAY» была написана на языке программирования «Си» в 1993 году исследовательской командой Джона Спийсбергера [61] для точного вычисления траекторий акустических лучей, проходящих через подводный звуковой канал, учитывая зависимости свойств среды от расстояния. Задача, которая стояла перед группой Спийсбергера, заключалась в создании полностью автоматизированной системы акустической томографии бассейнов океанических масштабов. Программа базируется на построении точной лучевой модели поля скорости звука в океаническом волноводе. Параметры волновода задаются входными данными гидрологии и батиметрии. Программа обеспечивает гладкий волновой фронт распространения энергии и исключает из него «ошибки каустик». Она может быть полезной при вычислении аппроксимированного решения полного волнового уравнения в диапазоне мега-метров.

Ключевой частью системы, над которой работал Спийсбергер, является прямое моделирование многолучевости, которое, при заданных параметрах скорости звука и батиметрии, предсказывает время прихода лучей от источника к приемнику, а также показывает траектории их распространения. В настоящее время, существует несколько путей решения данной задачи, к числу которых относятся метод нормальных мод, решение параболического уравнения, а также метод лучевой акустики. Некоторые теоретические исследования прямого моделирования приводят к концепции «собственных трубок» (eigentubes), которые являются волновым обобщением собственных лучей (eigenrays) из геометрической акустики [60]. Это наводит на мысли о том, что несмотря на известные недостатки методов геометрической акустики (описаны в главе 1.1. данной работы) волновой фронт, сгенерированный этими методами, может оказаться полезным при решении задач моделирования низкочастотного звука.

Основная идея заключается в следующем:

Предположим, что для заданных физических условий (окружающая среда и локализация источника) геометрический волновой фронт будет независим от частотной полосы и излучаемой частоты источника. Рассмотрим группу лучей, исходящую из источника под разными углами и приходящую на заданную дистанцию к приемнику акустических сигналов. Глубины, времена прихода и углы этих лучей в точке приема, как функции угла выхода – это то, что мы имеем ввиду под волновым фронтом. Фактическое (физическое) акустическое поле для заданной частоты и полосы излучателя может быть затем вычислено из геометрического волнового фронта следующим образом: к геометрически построенным лучам (независимым от частоты) добавляется дифракционная (зависимая от частоты) составляющая фронта [65].

Для добавления дифракционной составляющей к геометрическому каркасу, необходимо включить в модель поля «гладкость волнового фронта» в качестве основного критерия.

Помимо основы для моделирования акустического поля, лучевая модель дает точное и численно верное отображение разделенных многолучевых сигналов. Расчет многолучевости эквивалентен нахождению пространственной структуры волнового фронта, сформированного импульсным источником. Эта структура была проанализирована в эксперименте [70] и детально рассмотрена на ранних этапах развития методов акустической томографии [64].

При разработке программы «RAY» основными требованиями к лучевому моделированию были точность и скорость вычисления.

2.2.1. Вычислительные алгоритмы, реализованные в программе «RAY»

Большинство лучевых программ для моделирования акустического поля аппроксимируют скорость звука кусочно-линейной функцией. Разрывы непрерывности в первой производной этих аппроксимаций приводят к «ложным каустикам», а именно к каустикам, «не связанным с точками поворота» (НТП-каустикам). Это можно увидеть, рассмотрев групповую скорость как функцию угла выхода сигнала в среде, не зависящей от дальности. Обозначим

$$S \equiv \frac{dv_g}{d\psi},$$

где ψ – угол выхода, а v_g – «групповая скорость одной петли», определяемая как расстояние одной петли луча, деленное на время его прохождения.

S зависит от интегралов вида:

$$\int (a_i + \beta_i \frac{c'c}{(c')^2}) \frac{dz}{\sin \theta},$$

где a_i и β_i – ограниченные, плавно меняющиеся функции, а θ – угол луча относительно горизонтали.

Для кусочно-линейной скорости звука выражение $c''c/(c')^2$ становится дельта-функцией, а $1/\sin \theta$ интегрируется (по dz) в точках поворота лучей. Когда точка поворота луча приближается к узлу кусочно-линейной аппроксимации, S может становиться сколь угодно большим. Это приводит к разрывам в волновом фронте, которых не было бы, если бы вторая производная скорости звука была ограничена.

Каустики возникают в волновом фронте в экстремумах функции глубины на дальности приема в зависимости от угла излучения, где $\frac{dz_{\text{прием}}}{d\psi} = 0$.

Это условие выполняется, когда луч волнового фронта находится в точке поворота. Такие каустики называются каустиками точек поворота. Так же каустика может образоваться, если в

волновом фронте возникает скачек из-за очень большого значения S . Такие каустики не обязательно связаны с точками поворота лучей, поэтому их называют НТП-каустиками.

Анализ распространения акустических сигналов на частотах в несколько сотен герц на дистанциях от 1000 до 3000 километров, проведенный в работах [70, 87, 89] показал, что волновой фронт оказался проще, чем предсказывают лучевые модели с кусочно-линейной аппроксимацией скорости звука. Было выдвинуто разумное требование к программе лучевого расчета – воспроизведение устойчивой структуры волнового фронта при сглаженной усредненной модели поля скорости звука. Именно для этого и была разработана программа «RAY», способная моделировать непрерывные волновые фронты на мегаметровых расстояниях. Была реализована на практике идея поиска простой модели среды, согласованной с входными данными (скорости звука и батиметрии), которая дает наиболее гладкие волновые фронты.

Заложенные в программу алгоритмы устраняют многие, но не все НТП-каустики. Оставшиеся НТП-каустики обусловлены сложной структурой скорости звука в среде. Эти неустранимые каустики распределяются на конечной части волнового фронта и акустическое поле в теневых зонах, связанных с такими каустиками, может быть аналитически вычислено геометрическими методами.

Хотя идея сглаживания профилей скорости звука для получения гладких волновых фронтов существует давно [83], в программе реализован автоматизированный вариант такого сглаживания, с интеграцией эффективных численных методов, что позволяет оперативно моделировать распространение лучей с данными, получаемыми в ходе натурального эксперимента.

Далее рассмотрим вычислительные алгоритмы, реализованные в программе.

1) Уравнение движения с поправкой на сферическую форму Земли

Уравнения движения для луча, распространяющегося в океане, в декартовых координатах имеет вид:

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{\partial_r c}{c} \tan \theta - \frac{\partial_z c}{c};$$

$$\frac{dz}{dr} = \tan \theta;$$

$$\frac{dt}{dr} = \frac{\sec \theta}{c},$$

где θ – угол луча относительно горизонтальной оси r ; z – вертикальная координата. Эти уравнения выводятся из принципа Ферма о наименьшем времени (Приложение Б).

Декартова система координат не очень подходит для учета кривизны земной поверхности на больших дистанциях. Введем новые оси \tilde{z} , направленные вдоль радиусов, проходящих через центр Земли, где $\tilde{z} = 0$ на уровне моря, а $\tilde{z} = R_e$ в центре Земли (R_e – радиус Земли). Пусть \tilde{r} обозначает дальность, измеренную вдоль дуги окружности на уровне моря. При переходе к этой

новой системе координат происходят три изменения: 1) Тривиальная замена знака для z и θ ; 2) Эффект преобразования от dr к $d\tilde{r}$. Например, представим движущийся объект А, находящийся на глубине \tilde{z} прямо под движущимся объектом Б. Объект А пройдет меньшее расстояние, чем объект Б, с коэффициентом $f_e = \frac{dr}{d\tilde{r}} = (R_e - \tilde{z})/R_e$; 3) Поворот системы координат на $d\tilde{r}/R_e$ радиан при шаге $d\tilde{r}$.

Модифицированные уравнения движения, учитывающие геометрическую форму Земли, принимают вид:

$$\frac{d\theta}{d\tilde{r}} = f_e \frac{\partial_z c}{c} - \frac{\partial_{\tilde{r}} c}{c} \tan \theta - \frac{1}{R_e};$$

$$\frac{d\tilde{z}}{d\tilde{r}} = f_e \tan \theta;$$

$$\frac{dt}{d\tilde{r}} = \frac{f_e \sec \theta}{c}.$$

Именно эти уравнения интегрированы в программу «RAY» с учетом модификаций и аппроксимаций, которые мы рассмотрим далее.

2) Интерполяция скорости звука

Интерполяция скорости звука как функции глубины является ключевым алгоритмом в программе «RAY». Для точного расчета траектории лучей и времени их распространения необходимо иметь набор ВРСЗ, измеренных в произвольных точках. Для реализации алгоритма требуется метод, который на основе дискретного набора значений скорости звука на заданных глубинах строит непрерывную функцию, описывающую скорость звука на любой глубине. Эта функция должна быть непрерывной, иметь ограниченную вторую производную и достаточно точно аппроксимировать реальное распространение скорости звука в океане.

Алгоритм сглаживания выглядит следующим образом:

Рассмотрим независимый от дальности профиль скорости звука. Пусть задана сетка глубин z_i и соответствующие значения скорости звука c_i для $1 \leq i \leq N$, такие что: $c(z_i) = c_i$.

Каждая глубина z_i называется узлом. Непрерывная кусочно-линейная аппроксимация этих точек обозначается как $c^{(1)}(z)$ и имеет вид:

$$c^{(1)}(z) = c_i + \beta_i(z - z_i), \quad z_i \leq z \leq z_{i+1},$$

где $\beta_i \equiv (c_{i+1} - c_i)/(z_{i+1} - z_i)$. Эта функция является непрерывной. Первая производная кусочно-постоянна и имеет вид: $\frac{dc^{(1)}}{dz} = \beta_i, \quad z_i < z < z_{i+1}$.

Вторая производная представляет собой сумму дельта-функций: $\frac{d^2c^{(1)}}{dz^2} = \sum_{i=2}^{N-1} \alpha_i \delta(z - z_i)$,

где $\alpha_i \equiv \beta_i - \beta_{i-1}$.

Для устранения резких изломов в узлах и уменьшения величины второй производной используется свертка с нормированной симметричной ступенчатой функцией:

$$g(w; z) = \begin{cases} 2w^{-1}, & \text{при } |z| \leq w \\ 0, & \text{при } |z| > w \end{cases}$$

Результатом этой операции будет:

$$c^{(2)}(w; z) \equiv \int c^{(1)}(z - z')g(w; z')dz' = \frac{1}{2w} \int_{-w}^w c^{(1)}(z - z')dz',$$

что представляет непрерывную кусочно-параболическую функцию с непрерывной кусочно-постоянной первой производной и конечной (но разрывной) кусочно-постоянной второй производной. Если ширина w функции $g(\)$ меньше расстояния между узлами, то $c^{(2)}$ будет параболической для z в пределах w узла и будет линейной и равной $c^{(1)}$ для всех z , которые не находятся в пределах w узла. В параболических областях вторая производная $c^{(2)}$ постоянна, а в линейных областях равна нулю.

Выбор ширины w для функции $g(w; z)$ представляет собой компромиссную задачу. Необходимость использования интерполяционной схемы обуславливается отсутствием точных данных о реальном распределении $c(z)$ между точками измерений z_i . Целью является подбор такого значения w , при котором обеспечивается максимально гладкий волновой фронт, оставаясь при этом согласованным с исходными измеренными значениями $\{c\}$. Чем шире выбирается w , тем меньше становится вторая производная $c^{(2)}$ и тем плавнее получается волновой фронт.

В случае равномерно распределенных глубин z_i одним из вариантов является выбор $w = (z_{i+1} - z_i)/2$. Такой подход позволяет устранить все линейные участки $c^{(2)}$, где вторая производная равна нулю и минимизировать ее значение на параболических участках.

Однако, при работе с данными натуральных экспериментов, где глубины z_i распределены неравномерно, требуется модификация метода. В этом случае вводится набор переменных глубины w_i , где каждое значение w_i соответствует конкретной глубине z_i . Для обеспечения корректности накладываются ограничения:

$$z_i - w_i \geq z_{i-1};$$

$$z_i + w_i \leq z_{i+1}.$$

Это позволяет построить непрерывную кусочно-параболическую функцию $c^{(3)}$ с непрерывной первой производной, аналогичную $c^{(2)}$, но адаптированную для неравномерной сетки данных. Функция $c^{(3)}$ совпадает с $c^{(2)}(w_i; z)$ в интервалах, определяемых условиями: $\max(z_{i-1} + w_{i-1}, z_i - w_i) < z < \min(z_{i+1} - w_{i+1}, z_i + w_i)$.

Получается, что функциональная форма $c^{(3)}$ зависит от значений z_i и w_i и есть три варианта поведения этой функции:

• В первом случае имеем линейные участки $c^{(1)}$, расположенные далеко от узлов. Это происходит для всех z , удовлетворяющих условию $z_{i-1} + w_{i-1} < z < z_i - w_i$. На этих участках функция принимает вид:

$$c^{(3)}(z) = c_i + \beta_i(z - z_i),$$

сохраняя структуру исходной аппроксимации.

• Второй случай соответствует параболическим участкам $c^{(2)}(w_i; z)$ вблизи узлов. Он соответствует z , попадающим в интервал $\max(z_{i-1} + w_{i-1}, z_i - w_i) < z < \min(z_{i+1} - w_{i+1}, z_i + w_i)$. В этом случае функция описывается выражением:

$$c^{(3)}(z) = c_i + \frac{w_i \alpha_i}{4} + \frac{(\beta_{i+1} + \beta_i)}{2} (z - z_i) + \frac{\alpha_i}{4w_i} (z - z_i)^2,$$

обеспечивая плавное поведение в окрестностях узлов.

• Третий случай представляет собой гладкую интерполяцию между участками из второго случая. Он соответствует z , удовлетворяющим условию $z_{i+1} - w_{i+1} < z < z_i + w_i$. Каждый такой участок располагается между двумя параболическими секциями. Тогда $c^{(3)}(z)$ можно выразить через эти промежутки $c_l(z)$ и $c_r(z)$:

$$c^{(3)}(z) = c_l(z_l) + \gamma_l(z - z_l) + \frac{\gamma_r - \gamma_l}{2(z_r - z_l)} (z - z_l)^2,$$

$$\text{где } z_l = z_{i+1} - w_{i+1}; z_r = z_i + w_i; \gamma_l = \left. \frac{dc_l}{dz} \right|_{z_l}; \gamma_r = \left. \frac{dc_r}{dz} \right|_{z_r}.$$

В программе «RAY» набор значений $\{w_i\}$ можно подобрать для работы с конкретными профилями скорости звука на необходимой сетке глубин. Это обеспечивает согласованность с реальными гидрологическими данными, сохраняя при этом гладкость волнового фронта и точность моделирования.

3) Устранение систематической погрешности при сглаживании

Процесс сглаживания, описанный выше, имеет серьезный побочный эффект. Полученная гладкая функция не проходит через исходный набор данных:

$$c^{(3)}(z_i) = c_i + \frac{w_i \alpha_i}{4} \neq c_i.$$

Если бы ширина области сглаживания w_i была значительно меньше расстояния между точками z_i , эта проблема была бы незначительной, так как отклонение было бы малым на небольшом участке. Однако для достижения максимально возможной гладкости необходимо устранить это расхождение между исходными данными и сглаженным профилем, чтобы минимизировать погрешность в расчетах времени прохождения лучей.

Существует возможность найти новый набор значений скорости звука $\{\tilde{c}_i\}$, который после сглаживания даст функцию, проходящую через исходные точки. Этот новый набор определяется решением системы линейных уравнений:

$$c_i = \tilde{c}_i + \frac{w_i}{4} \left(\frac{\tilde{c}_{i+1} - \tilde{c}_i}{\Delta_i} - \frac{\tilde{c}_i - \tilde{c}_{i-1}}{\Delta_{i-1}} \right),$$

где $\Delta_i = z_{i+1} - z_i$. Программа «RAY» решает эту систему не напрямую, а итерационно:

$$\tilde{c}_i^{(n)} = \frac{4\Delta_i\Delta_{i-1}c_i + \epsilon w_i(\tilde{c}_{i+1}^{(n-1)}\Delta_{i-1} + \tilde{c}_{i-1}^{(n-1)}\Delta_i)}{4\Delta_i\Delta_{i-1} - \epsilon w_i(\Delta_i + \Delta_{i-1})}$$

с начальным приближением $\tilde{c}_i^{(0)} = c_i$. Пользователь может задать количество итераций и коэффициент сходимости ϵ , что позволяет гибко управлять степенью коррекции.

Каждая итерация влияет только на ближайшие соседние точки, поэтому количество итераций определяет уровень коррекции. Коэффициент ϵ регулирует степень приближения к исходным значениям: при $\epsilon = 1.0$ программа пытается полностью компенсировать сглаживание, а при $\epsilon = 0.5$ устраняется только половина смещения. Тестирование программы показывает, что 10 итераций с $\epsilon = 1.0$ обеспечивают сходимость с исходными значениями.

Этот подход позволяет устранить систематическую погрешность и скорректировать работу программы.

4) Учет зависимости от расстояния

Далее рассмотрим учет зависимости от расстояния, который внедрен в программу «RAY».

Скорости звука задаются в виде таблиц зависимости скорости от глубины для последовательно увеличивающейся дальности от источника. На каждом расстоянии профиль скорости звука подвергается сглаживанию и коррекции систематических погрешностей, как описано ранее. Программа предлагает три различные модели учета зависимости от расстояния.

Наиболее простая модель рассматривает океан как последовательность независимых по дальности участков. На каждом расстоянии, где задан профиль скорости звука, происходит резкий скачкообразный переход к новым значениям без учета закона Снеллиуса на границе раздела. Лучи, формирующие волновой фронт, проходят через каждую границу раздела на разных глубинах. Поскольку величина скачка скорости звука варьируется с глубиной, эта модель вносит модуляцию волнового фронта при прохождении каждой границы. В некоторых регионах океана такая модуляция не вызывает серьезных проблем, но во многих случаях она неприемлема. Все попытки устранить эту модуляцию путем внесения поправок на границе (например, соблюдения закона Снеллиуса) не увенчались успехом - поправки лишь изменяли характер модуляции, но не устранили ее полностью.

Более совершенная модель предполагает линейное изменение профиля скорости звука с расстоянием. Для двух соседних профилей, заданных на расстояниях r_j и r_{j+1} , скорость звука на промежуточном расстоянии r вычисляется как:

$$c(z, r) = c(r_j, z) + \frac{r - r_j}{r_{j+1} - r_j} (c(r_{j+1}, z) - c(r_j, z)).$$

Уравнения движения луча (см. выше) зависят от c , $\partial c/\partial z$ и $\partial c/\partial r$. В этой модели c и $\partial c/\partial z$ изменяются плавно с расстоянием и глубиной, тогда как $\partial c/\partial r$ претерпевает разрывы на каждой границе. Если этот член существенно влияет на траекторию луча, линейная модель с зависимостью от расстояния также будет создавать модуляцию волнового фронта, зависящую от глубин прохождения лучей через границы.

Программа «RAY» предлагает две реализации линейной модели для оценки значимости вклада члена $\partial c/\partial r$. Одна реализация учитывает этот член, другая - игнорирует его. Тесты программы показали, что различия между волновыми фронтами, генерируемыми этими моделями, сопоставимы с уровнем численного шума. Это позволяет сделать вывод, что линейная модель с зависимостью от дальности достаточна для целевого применения программы «RAY».

5) Алгоритмы сглаживания батиметрических данных и отражения лучей от поверхности дна

Программа «RAY» предлагает несколько вариантов обработки батиметрии. Опция «sort» отслеживает минимальное расстояние до дна для каждого луча в волновом фронте, продолжая трассировку даже для лучей, уходящих ниже дна (в этом случае расстояние становится отрицательным, фиксируя максимальное отрицательное значение и соответствующую дальность). Опция «absorbing» прекращает трассировку лучей при контакте с дном, а «reflecting» реализует отражение таких лучей.

Батиметрические данные могут быть сглажены аналогично скорости звука с использованием единственного параметра «bath_smoothing» (по умолчанию 10 км). Для точек, расстояние которых до ближайших соседних точек превышает 4 x «bath_smoothing», применяется заданная ширина сглаживания. Для более плотно расположенных точек ширина уменьшается до четверти расстояния до соседних, создавая чередование линейных и параболических участков. При нулевом значении «bath_smoothing» сглаживание отключается, и дно аппроксимируется ломаными линиями между исходными точками. Коррекция систематических погрешностей для батиметрии пока что не реализована, но может быть выполнена до передачи данных в программу.

Алгоритм определения отражений основан на точном поиске точек пересечения луча с границей. На каждом шаге интегрирования выполняется проверка возможного пересечения. При его признаках глубины луча и дна аппроксимируются параболой относительно разности дальностей $dr = r_1 - r$:

$$z_{\text{луч}} - z_{\text{дно}} = z_{\text{miss}} \approx z_0 + drz_1 + dr^2z_2.$$

Если шаг интегрирования сошелся, первое пересечение ищется либо у наименьшего положительного корня этого уравнения, либо в минимуме (при отсутствии естественных

корней). На первом этапе выполняется грубая оценка положения пересечения $r_g^{(1)} = r_1 + r_{\text{корень}}^{(1)}$, куда делается пробный шаг интегрирования.

Затем процедура повторяется ближе к точке $r_g^{(1)}$. Если естественные корни не обнаружены, считается, что пересечения на данном шаге нет. При их наличии, следующее приближение вычисляется как $r_g^{(2)} = r_1 + r_{\text{корень}}^{(2)}$, где $r_{\text{корень}}^{(2)}$ – корень новой параметризации с наименьшим абсолютным значением.

Итерации продолжаются до выполнения одного из условий: либо отсутствие вещественных корней в интервале $[r_1, r_2]$, либо пока не будет выполнено условие $|z_{\text{miss}}| < z_{\text{допустимое}}$ (по умолчанию 10^{-6} м).

При выполнении условия допустимости на i -ой итерации мы считаем, что луч дошел границы на этом шаге в диапазоне $r_g^{(i)}$, после чего активируется механизм прекращения движения луча или отражения от границы дна, в зависимости от выбранной опции в соответствии с типом батиметрии.

2.2.2. Тестирование программы «RAY»

Тестирование программы «RAY» лучше всего провести параллельно с натурным исследованием, так как именно практическое использование программы с использованием гидрологических и батиметрических данных, полученных в реальных условиях, является главным критерием оценки работоспособности программы, а результат моделирования можно сравнить с результатами натурального эксперимента.

Исследования, с помощью которых мы будем тестировать программу, проходили на протяженных акустических трассах в Охотском (250 км) и в Японском (300 км) морях в разное время, но по одинаковой методике. Целью исследований было выявление особенностей формирования импульсных характеристик на оси подводного звукового канала в волноводах с различными гидрологическими и батиметрическими условиями юго-восточных морей Дальнего Востока России, а также реализация эффекта «оползня» для оптимального приема сигналов в заданных волноводах.

Для начала, в зависимости от батиметрии, смоделируем три возможных варианта поведения акустического поля, чтобы определить условия особенностей шельфового участка, необходимые для реализации эффекта акустического «оползня».

В качестве граничных параметров на шельфе зададим: наклонное дно с углом наклона $\beta = 0.05^\circ$; глубина в точке излучения $z_0 = 50$ м; глубина излучателя $z_{\text{изл}} = 49$ м, а скорость звука на соответствующем горизонте $c_{\text{изл}} = 1486.3975$ м/с.

В качестве граничных параметров в глубоком море зададим: плоское дно с глубиной $z_{ГМ} = 3000$ м. Подводный звуковой канал в глубоком море зададим двумя слоями с постоянными градиентами скорости звука:

- В интервале $0 \leq z < z_{ПЗК}$, градиент $g_1 = -0.6$;
- в интервале $z_{ПЗК} < z \leq z_{ГМ}$, градиент $g_2 = 0.01$.

Скорость звука на оси подводного звукового канала $c_{ПЗК} = 1455.7975$ м/с, а глубина $z_{ПЗК} = 100$ м.

Расстояние между излучателем и приемником $R = 300$ км. Диапазон выхода лучей из излучателя $\alpha_{ИЗЛ} = \pm 10^\circ$.

Моделирование выполнялось для трех волноводов, отличающихся друг от друга протяженностью шельфа ($R_{СВАЛ}$) и глубиной края шельфового участка – свала глубин ($z_{СВАЛ}$): 1) $R_{СВАЛ} = 5$ км, $z_{СВАЛ} = 54.36$ м; 2) $R_{СВАЛ} = 50$ км, $z_{СВАЛ} = 93.63$ м; 3) $R_{СВАЛ} = 100$ км, $z_{СВАЛ} = 137.27$ м.

Лучи, описывающие акустическое поле на шельфе, можно условно разделить на две группы: 1) В первой группе, лучи выходят из излучателя, поднимаются от дна до глубины поворота, не соприкасаясь с морской поверхностью, затем устремляются ко дну и продолжают двигаться по такому дугообразному циклу вдоль дна к свалу глубин; 2) лучи второй группы распространяются по всей толще волновода, отражаясь от дна и поверхности. Полный цикл между соседними отражениями о дно подобен катетам треугольника.

Углы выхода лучей первой группы близки к нулевым $\alpha_1 \approx 0$. При распространении, углы этих лучей изменяются однократно при первом отражении от дна $\alpha_1 = \alpha_{ИЗЛ} - \beta$ и двигаются по склону к свалу глубин ($z_{СВАЛ}$). Высота подъема этой группы лучей над дном постоянна, т.е. лучи распространяются на одном диапазоне глубин в придонном волноводе. Горизонт поворота и предельное значение угла на горизонте поворота ($\alpha_{1,МАКС}$) можно вычислить, используя приближение лучевого инварианта [11] или подходы, приведенные в работах [7, 90]. Лучи этой группы слабо затухают и переносят основную часть энергии сигнала, так как коэффициент затухания зависит от угла падения [11] (чем больше значение угла падения, тем выше коэффициент затухания).

Вторая группа лучей выходит из излучателя под крутыми углами $\alpha_2 \gg 0$ и отражается от дна n -е количество раз, а значит $\alpha_2(n) = \alpha_{ИЗЛ} - n\beta$. Если при очередном отражении значение угла $\alpha_2(n) \leq \alpha_{1,МАКС}$, то луч захватывается придонным волноводом и продолжает свое движение в нем, не изменяя последнего значения. Так как угол падения $\alpha_2 > \alpha_1$ (до захвата волноводом), то и затухание второй группы лучей больше, чем первой, а значит их вклад в регистрируемое поле значительно меньше.

Рассмотрим распространение лучей в глубоком море с точки зрения закона Снеллиуса (2). Обозначим критические углы поворота луча в пределах ПЗК индексами «в» и «н», где α_v – угол поворота луча выше оси ПЗК, α_n – угол поворота луча ниже оси ПЗК.

Все возможные варианты распространения лучей можно условно разделить на три случая.

Первый случай. Пусть минимальный угол скольжения луча удовлетворяет следующим требованиям: $\alpha \geq \alpha_v$ и $\alpha \geq \alpha_n$. Чтобы это условие выполнялось, так как на шельфе $\alpha(n) = \alpha_{изл} - n\beta$, влияние шельфового участка должно быть минимальным (длина шельфа $R_{СВАЛ}$ и угол его наклона β должны быть достаточно малы), а лучи должны выходить в глубокое море под большими углами выше оси ПЗК ($z_{СВАЛ} < z_{ПЗК}$). В этом случае лучи покидают пределы ПЗК, неоднократно касаясь дна и поверхности моря при распространении.

Рассмотрим результат моделирования первого случая (Рисунок 2.9). Импульсная характеристика на различных горизонтах (трехмерная t - z - α диаграмма на рисунке 2.9, б) представляет собой «псевдопериодическую» структуру приходов энергии (пиков). Отметим следующие свойства смоделированной импульсной характеристики ($IR(z)$): 1) С увеличением времени распространения увеличивается временной интервал между соседними пиками; 2) С увеличением времени распространения увеличиваются углы прихода, соответствующие отдельным пикам. Эти свойства справедливы для каждого отдельного горизонта функции $IR(z)$. Максимальный пик на отдельном горизонте может располагаться как в начале, так и в конце реализации; $IR(z)$ простирается практически равномерно от морской поверхности до дна.

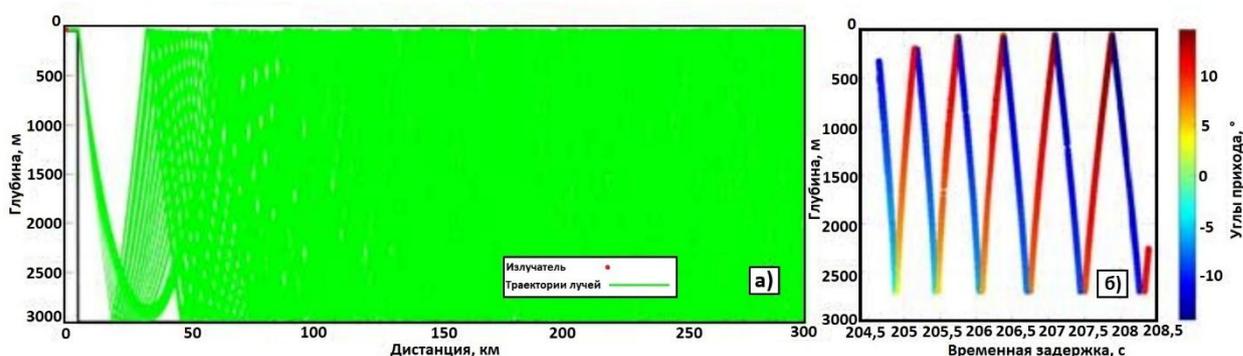


Рисунок 2.9. – Результат численного моделирования $R_{СВАЛ} = 5$ км; $z_{СВАЛ} = 54.36$ км. а) – лучевая картина; б) – трехмерные t - z - α диаграммы (время распространения – горизонт приема – угол скольжения луча на приемнике)

Второй случай реализуется, если минимальный угол скольжения луча удовлетворяет следующим требованиям: $\alpha \geq \alpha_v$ и $\alpha < \alpha_n$. В этом случае все лучи в глубоком море отражаются от морской поверхности и не касаются дна. Для выполнения этого условия

необходимо, чтобы свал глубин был лишь немного выше ПЗК ($z_{\text{СВАЛ}} \cong z_{\text{ПЗК}}$), а лучи выходили из шельфовой зоны под достаточно большими углами ($\alpha \geq \alpha_{\text{В}}$).

Рассмотрим результат моделирования второго случая (Рисунок 2.10). На рисунке 2.10, б) изображена $IR(z)$, которая представляет собой «сжимающуюся» структуру приходов. Можно отметить следующие свойства $IR(z)$: 1) С увеличением времени распространения уменьшается временной интервал между соседними пиками; 2) с увеличением времени распространения уменьшаются углы прихода, соответствующие отдельным пикам; 3) с увеличением глубины уменьшается количество приходов; 4) местоположение максимального пика (в плоскости глубина – время распространения) изменяется с увеличением времени распространения, поднимаясь от дна к оси ПЗК, а энергия сигнала и последние пики $IR(z)$ фокусируются у оси ПЗК.

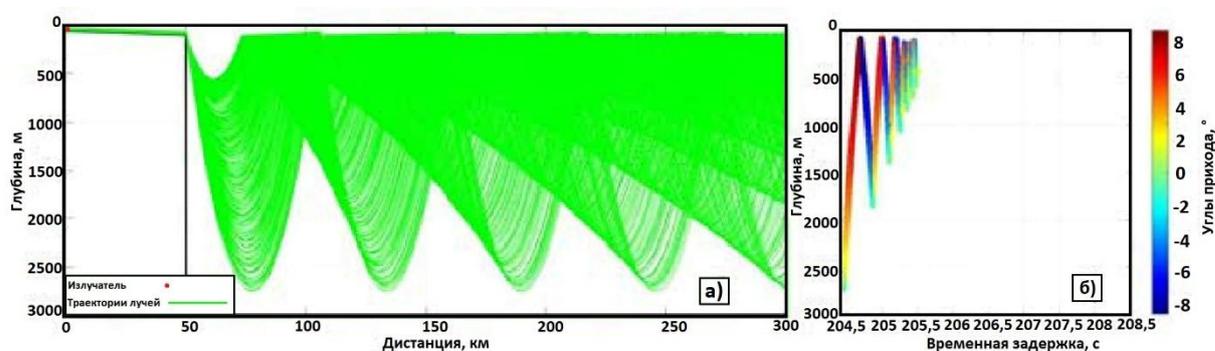


Рисунок 2.10. – Результат численного моделирования $R_{\text{СВАЛ}} = 50$ км; $z_{\text{СВАЛ}} = 93.63$ км.

а) – лучевая картина; б) – трехмерные t - z - α диаграммы (время распространения – горизонт приема – угол скольжения луча на приемнике)

Третий случай проявляется, когда минимальный угол скольжения луча удовлетворяет следующим требованиям: $\alpha < \alpha_{\text{В}}$ и $\alpha < \alpha_{\text{Н}}$. В этом случае все лучи в глубоком море не касаются морской поверхности и дна. Чтобы выполнялось это условие, достаточно протяженный шельф должен быть ниже оси ПЗК ($z_{\text{СВАЛ}} > z_{\text{ПЗК}}$), а придонный волновод плавно входить в ПЗК. Тогда лучи войдут в ПЗК под небольшими углами.

Рассмотрим результат моделирования третьего случая (Рисунок 2.11.). На рисунке 2.11, б) изображена $IR(z)$, которая представляет собой локализованную у оси ПЗК «сжатую» структуру приходов. Все лучи фокусируются около оси ПЗК под малыми углами прихода акустической энергии.

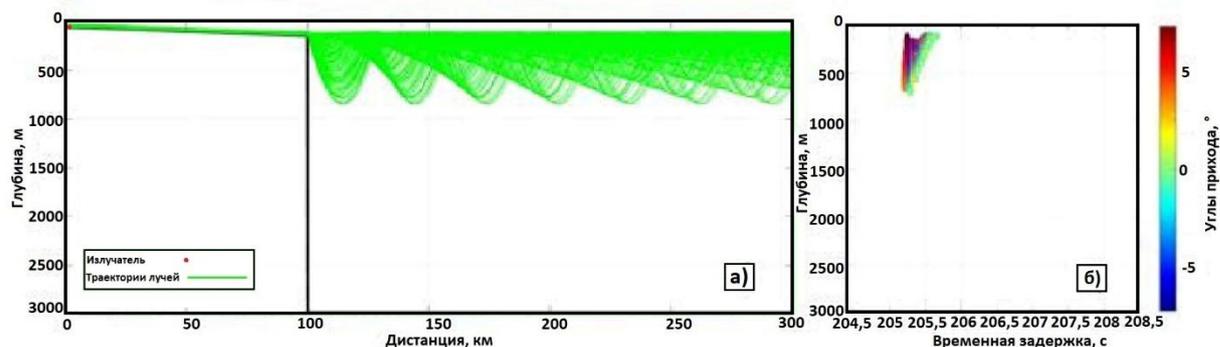


Рисунок 2.11. – Результат численного моделирования $R_{\text{СВАЛ}} = 100$ км; $z_{\text{СВАЛ}} = 137.27$ км.

а) – лучевая картина; б) – трехмерные t - z - α диаграммы (время распространения – горизонт приема – угол скольжения луча на приемнике)

Таким образом, можно предложить следующие рекомендации для оптимальной постановки излучающей системы на шельфе: принципиальным является разность глубин между свалом и осью ПЗК. Эта разность должна быть минимальной. В идеале шельф должен плавно переходить в глубокое море (третий случай).

Далее рассмотрим моделирование распространения акустической энергии с реальными гидрологическими и батиметрическими данными, чтобы сравнить смоделированные импульсные характеристики волновода (ИХВ) с ИХВ, полученными в ходе натурального эксперимента.

Гидрологические и батиметрические условия проведения экспериментов представлены на рисунке 2.12 и 2.14. Можно отметить существенные различия вертикальных разрезов скорости звука (ВРСЗ) из-за влияния холодного промежуточного слоя в приповерхностных водах Охотского моря.

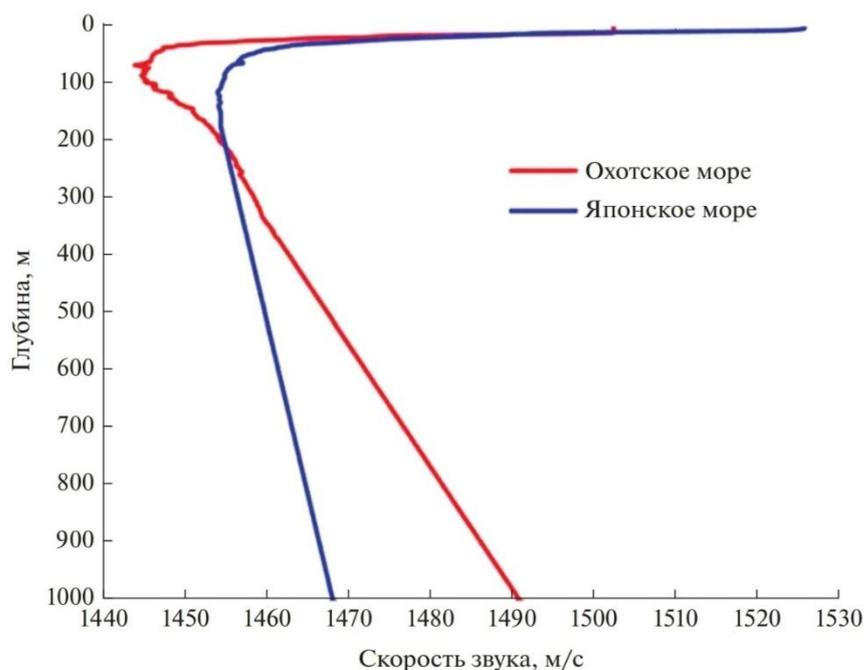


Рисунок 2.12. – Вертикальные разрезы скорости звука

Методика проведения натуральных экспериментов заключалась в следующем:

Широкополосный пьезокерамический излучатель располагался на глубине 34 м, вблизи береговой линии, в 1 м от дна. Для зондирования использовались фазоманипулированные М-последовательностью сигналы (длина последовательности 1023 символа, несущая частота 400 Гц, на один символ последовательности приходится 4 периода несущей частоты). Излучение сигналов проводилось каждые 5 мин в течение нескольких часов. В глубоководной части моря сигналы регистрировались на дрейфующий вблизи судна радиогидроакустический буй, состоящий из гидрофона, системы GPS и системы единого времени. Гидрофон заглублялся до оси ПЗК, местоположение которой определялось при измерении ВРСЗ гидрологическим зондом с судна.

Методика обработки полученной информации основывалась на вычислении взаимно-корреляционной функции между излученным и принятым сигналом (6). Далее, рассчитывается огибающая взаимно-корреляционной функции, которая является оценкой импульсной характеристики волновода с разрешением по времени, соответствующим параметрам зондирующего сигнала. На рисунке 2.13 приведены фрагменты ИХВ в линейном масштабе, измеренные в Охотском и Японском море с использованием описанной выше методики.

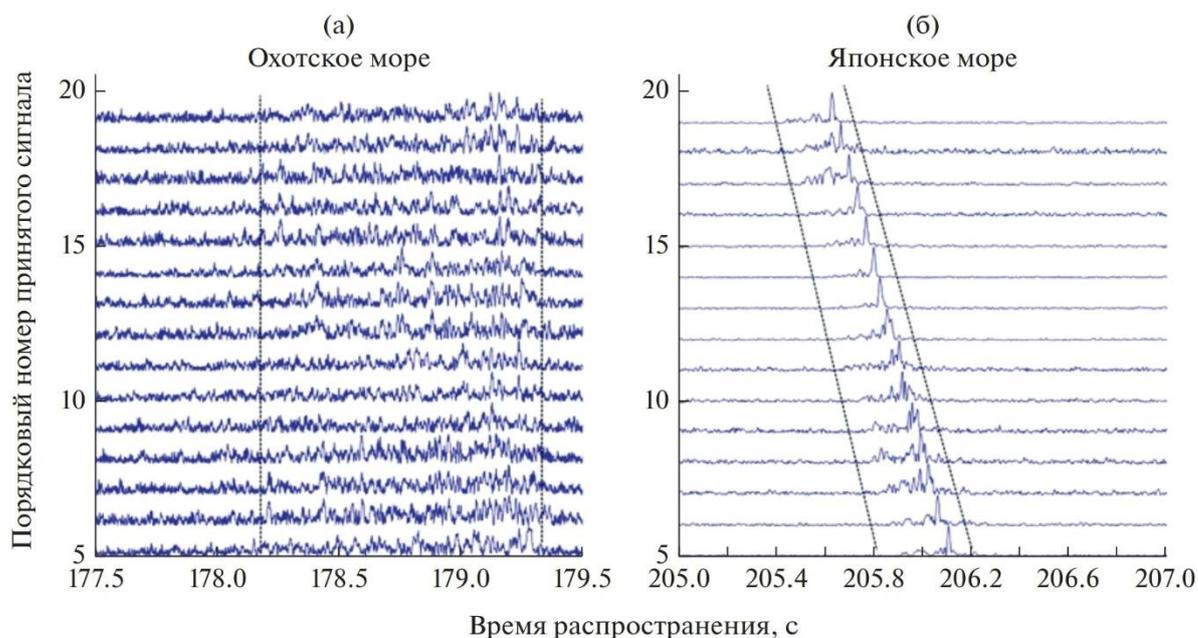


Рисунок 2.13. – Зависимость от времени импульсных характеристик волноводов: (а) – Охотского моря и (б) – Японского моря

Пунктирными вертикальными линиями обозначены границы времени «затягивания» принятого сигнала: $\tau_0 \approx 1.2$ с; $\tau_{\text{Я}} \approx 0.4$ с (здесь и далее индексами «Я» и «О» обозначены величины, относящиеся к Японскому и Охотскому морям соответственно). «Затягивание» сигнала определяется здесь как время задержки принятого сигнала относительно сигнала, прошедшего по кратчайшей прямолинейной траектории. В нашем случае — это распространение вблизи оси ПЗК с минимальной скоростью и максимальным временем. Эксперимент показал, что амплитудно-временная структура ИХВ Охотского моря характеризуется превышающим временем «затягивания» сигнала структуру ИХВ Японского моря практически в 3 раза.

Максимальные пики ИХВ Охотского моря лежат во временном интервале от 0.4 до 0.6 с, тогда как в Японском море они сосредоточены в конце ИХВ, в интервале не превышающем 0.05 с. Следует отметить существенные отличия импульсных откликов в Японском и Охотском морях. Меньшая ширина ПЗК в Охотском море обуславливает рассредоточение акустической энергии во времени и, соответственно, снижает фокусирующий эффект распространения в ПЗК. К тому же, близость оси ПЗК к поверхности вызывает повышенный уровень помех от обеспечивающего судна на приемном гидрофоне и снижение отношения сигнал/шум. По этой причине наблюдаются значительные вариации ИХВ на начальном участке из-за преимущественного влияния лучевых приходов с крутыми углами. Но в конце ИХВ фиксируются более стабильные, близкие по фазе лучевые приходы, с близкими к нулевым

углами скольжения относительно оси ПЗК. Они могут быть использованы для решения задач высокоточной дальнометрии.

С помощью программы «RAY» было проведено численное моделирование процессов формирования импульсных откликов волноводов с использованием гидрологических и батиметрических условий, при которых проводились экспериментальные работы (Рисунок 2.14).

Для шельфовых участков акустических трасс были заданы следующие размеры: $R_0 = 115$ км, $R_{\text{Я}} = 27$ км. Угол наклона шельфа в обоих случаях находился в диапазоне 1 - 1.2 градуса. ВРСЗ для обоих морей приведены на рисунке 2.14, а), г). Отметим следующие характеристики волновода: глубина оси ПЗК $z_0 = [50, 80]$ и $z_{\text{Я}} = [100, 200]$, скорость звука на оси ПЗК $c_0 = 1440.94$ м/с, $c_{\text{Я}} = 1457.12$ м/с. «Ширина» ПЗК ($\Delta H = z^- - z^+$) определялась как вертикальное расстояние между горизонтами разворота луча выше (z^+) и ниже (z^-) оси ПЗК, вышедшего из расположенного на оси ПЗК излучателя под углами $\alpha = \pm 5^\circ$. Значение углов выхода в 5 градусов было выбрано из практических соображений для анализа самых энергонесущих лучей. Значение глубин поворота лучей z^+ и z^- находим с использованием закона Снеллиуса (2) и значений скорости звука на оси ПЗК ($c_{\text{поворот}} = c_{\text{ПЗК}} / \cos \alpha$). Значения скоростей звука на горизонтах поворота лучей равны ($c_{\text{поворот}}(z^+) = c_{\text{поворот}}(z^-)$). Для Японского моря $c_{\text{поворот,Я}} = \frac{c_{\text{Я}}}{\cos(5^\circ)} = 1462.69$ м/с, соответственно для Охотского моря $c_{\text{поворот,О}} = 1446.44$ м/с. На рисунке 2.14, а) и 2.14, г) значения z^+ и z^- отмечены черными точками. Следовательно, $\Delta H_0 \approx 50$ м и $\Delta H_{\text{Я}} \approx 450$ м. Столь значительные отличия связаны с наличием холодного промежуточного слоя при формировании ВРСЗ в Охотском море.

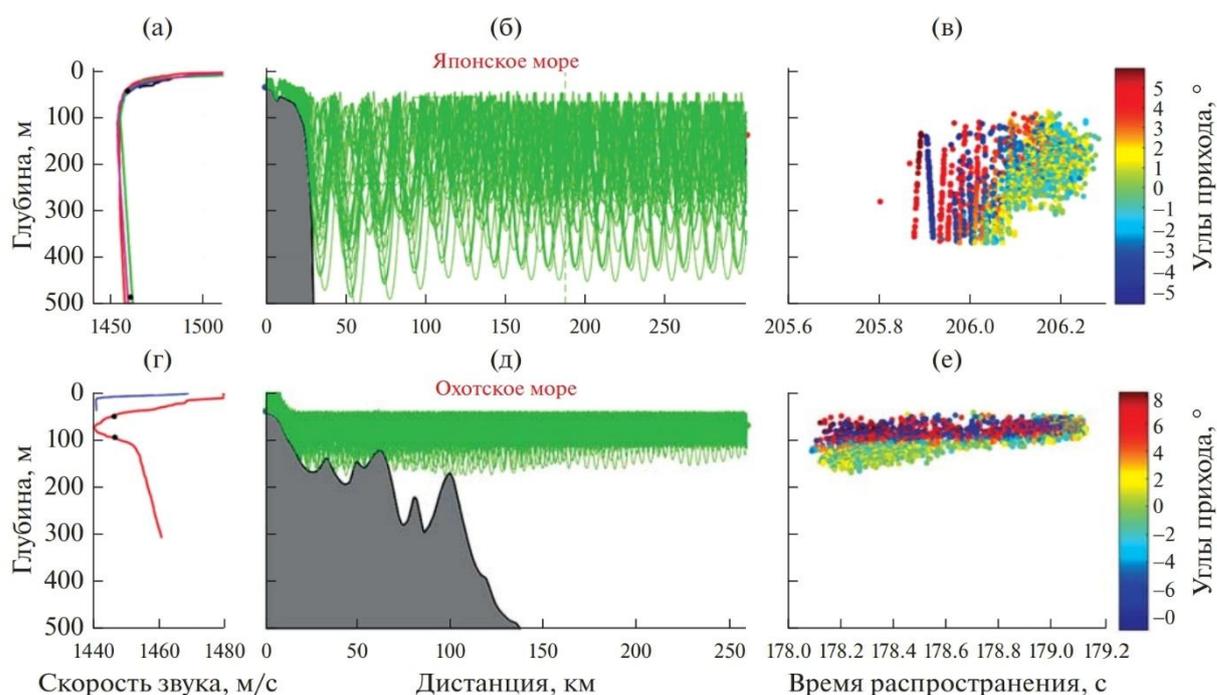


Рисунок 2.14. – Результаты численного моделирования: (а) и (г) - ВРСЗ; (б) и (д) – лучевые картины; (в) и (е) – трехмерные t - z - α диаграммы (время распространения – горизонт приема – угол скольжения луча на приемнике) Японского и Охотского морей соответственно.

Можно увидеть, что в волноводе Охотского моря все лучи захвачены «узким» ПЗК и формируют импульсный отклик длительностью 1 с (в пространстве 1500 м) в водном слое около 100 м. При этом в 50-метровом слое вблизи оси ПЗК принимаются сигналы, сформированные лучами с крутыми углами, и лишь в конце ИХВ фиксируются лучевые приходы с углами скольжения, близкими к нулевым углам. В то же время на глубине от 50 до 100 м также фиксируются близкие к нулевым углам лучевые приходы, которые формируются на участках разворота лучей к поверхности. В Японском море основная энергия ИХВ фиксируется во временном промежутке 0.4 с (в пространстве 520 м) в водном слое около 250 м. Вблизи оси ПЗК принимаются вначале сигналы, сформированные крутыми лучами, а в конце ИХВ (как и в Охотском море) фиксируются лучевые приходы с углами скольжения, близкими к нулевым (Рисунок 2.14, в), е)). Очень важно, что результаты натуральных экспериментов показали практически те же значения времен «затягивания»: $\tau_0 \approx 1.2$ с; $\tau_{\text{Я}} \approx 0.4$ с. Это свидетельствует о правильности расчетов вычислительной программы «RAY», т.к. сходимость экспериментальных и численных значений столь сложных ИХВ характеризует достижение адекватности модельных расчетов реальным процессам формирования акустических полей.

Хорошая сходимость модельных расчетов с экспериментами по величинам затягивания сигналов и временам максимального прихода акустической энергии в конце ИХВ показала

правильность выбора предложенных для реализации дальномерных измерений мест установки излучателей (углы наклона шельфа и расстояние до свала глубин). В нашем случае модельные исследования процессов позиционирования подводных объектов в Японском и Охотском морях показали, что выбранные схемы размещения излучающих и приемных элементов гидроакустических навигационных систем (координаты, глубины), заданные параметры излучаемых сигналов и методы приема и обработки сигнальной информации, обеспечили (с экспериментальным подтверждением) решение поставленной задачи – реализацию эффекта «оползня» для оптимального приема сигналов в заданных волноводах. Расчеты для обеих морей показали, что для получения высоких точностей измеренных времен распространения сигналов, а следовательно, и точности позиционирования подводных объектов, необходимо фиксировать поздние приходы акустической энергии, которые соответствуют лучам, распространяющимся по траекториям, близким к прямолинейным. При этом, чем короче по времени ИХВ, тем более четко выделяется последний приход акустической энергии с максимальной амплитудой и обеспечивается высокая точность расчета времени прохождения навигационного сигнала. Необходимо учитывать, что в «затянутой» по времени ИХВ акустическая энергия рассредоточена по времени, и для получения достаточного превышения сигнала над помехой потребуется больший уровень излучения источника навигационных сигналов. Кроме этого, большое время «затягивания» ИХВ при передаче информационных посылок может привести к интерференции соседних битов. Устранить подобную проблему можно за счет увеличения времени передаваемого бита, что ведет, в свою очередь, к уменьшению скорости передачи. Таким образом, предварительные расчеты позволили качественно и количественно оценить необходимую пространственную и техническую оснащенность заданных акваторий для решения задач позиционирования и управления подводными объектами.

По результатам тестирования можно заключить, что вычислительная программа «RAY» оказалась эффективной для решения практических задач, связанных с восстановлением и физической интерпретацией процессов формирования импульсного отклика диагностируемых волноводов, включающих шельф и глубокое море.

Подробное описание тестирования программы «RAY» и натуральных экспериментов, описанных в данной главе, можно найти в статьях [18, 20]. Результаты экспериментов автор представил в устном докладе «Численное моделирование распространения сложных акустических сигналов для решения задач термометрии и дальнометрии» на V Международной научной конференции «Наука будущего» и VIII Всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего – Наука молодых», которые проходили 20 – 23 сентября 2023 года в городе Орел, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» [54].

Выводы по главе

В главе разобраны основные характеристики технических средств, применяемых в исследованиях. В частности: измерителя скорости звука (ИСЗ), цифрового гидрофона, автономных цифровых гидроакустических регистраторов и излучателя широкополосных низкочастотных сигналов. Показано, что разработанные в ТОИ ДВО РАН приборы ничем не уступают зарубежным и отечественным аналогам.

2.1.1 Обзор измерителя скорости звука

При практическом применении ИСЗ показал ряд существенных преимуществ устройства, относительно используемых STD-зондов:

- Мгновенное получение данных в цифровом и графическом виде;
- компактные габариты и малый вес;
- ИСЗ продемонстрировал значительно меньший разброс значений (в 4 раза) при прохождении слоя температурного скачка на глубине 6 м. по сравнению с SBE-37. Это преимущество обусловлено принципом прямого измерения и меньшей тепловой инерционности благодаря компактной конструкции.

По результатам эксплуатации автономных цифровых регистраторов был разработан ряд предложений по модернизации. Реализация предлагаемых технических решений позволит:

- Уменьшить собственный шум аудио усилителей до 0.5 мкВ;
- увеличить динамический диапазон на 10 – 15 дБ;
- увеличить коэффициент усиления в аудио канале до 10000;
- увеличить время непрерывной работы регистратора до 72 часов;
- создать более удобные условия работы оператора.

Во второй части главы сделан обзор вычислительной программы «RAY», разработанной для моделирования акустических низкочастотных полей в океане лучевым методом. Показаны алгоритмы, которые позитивно выделяют данную программу среди аналогов. Данная программа, функционирующая на основе лучевого метода, позволяет эффективно моделировать распространение низкочастотного звука на большие (мега-метровые) дистанции.

Описан эксперимент тестирования программы с использованием натуральных данных, показана ее эффективность при прогнозировании распространения низкочастотных акустических сигналов в сложном волноводе, включающем шельф и глубокое море.

Глава 3. Исследование особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач позиционирования подводных объектов и акустической термометрии

3.1. Исследование особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач позиционирования подводных объектов

Рассмотрим теоретические и экспериментальные результаты исследований, осуществленных в Японском море в августе 2023 на акустической трассе протяженностью 144,4 км.

Целью исследования было проведение экспериментов и численного моделирования, направленных на решение задач позиционирования ИГАС при их функционировании на глубинах до 1000 метров, существенно превышающих глубину оси подводного звукового канала (ПЗК). Исследования строились таким образом, чтобы реализовать измерения импульсных характеристик волновода, включающего шельф и глубокое море, при приеме низкочастотных фазоманипулированных сигналов. Импульсные характеристики использовались для расчетов эффективных скоростей распространения звука при приеме сигналов на различных глубинах.

Прошедший перед началом работ по акватории мощный тайфун «KHANUN» привел к перемешиванию воды на протяженном (около 60 км) шельфе, что обусловило формирование практически однородного по вертикали поля скорости звука и отсутствие придонного звукового канала на шельфе, что не характерно для этой акустической трассы в период летне-осеннего сезона. На рисунке 3.1 приведены ВРСЗ, которые демонстрируют отличие гидрологической обстановки на шельфе в 2023 году после прохождения тайфуна от обычной ситуации для летне-осеннего сезона в 2018 году.

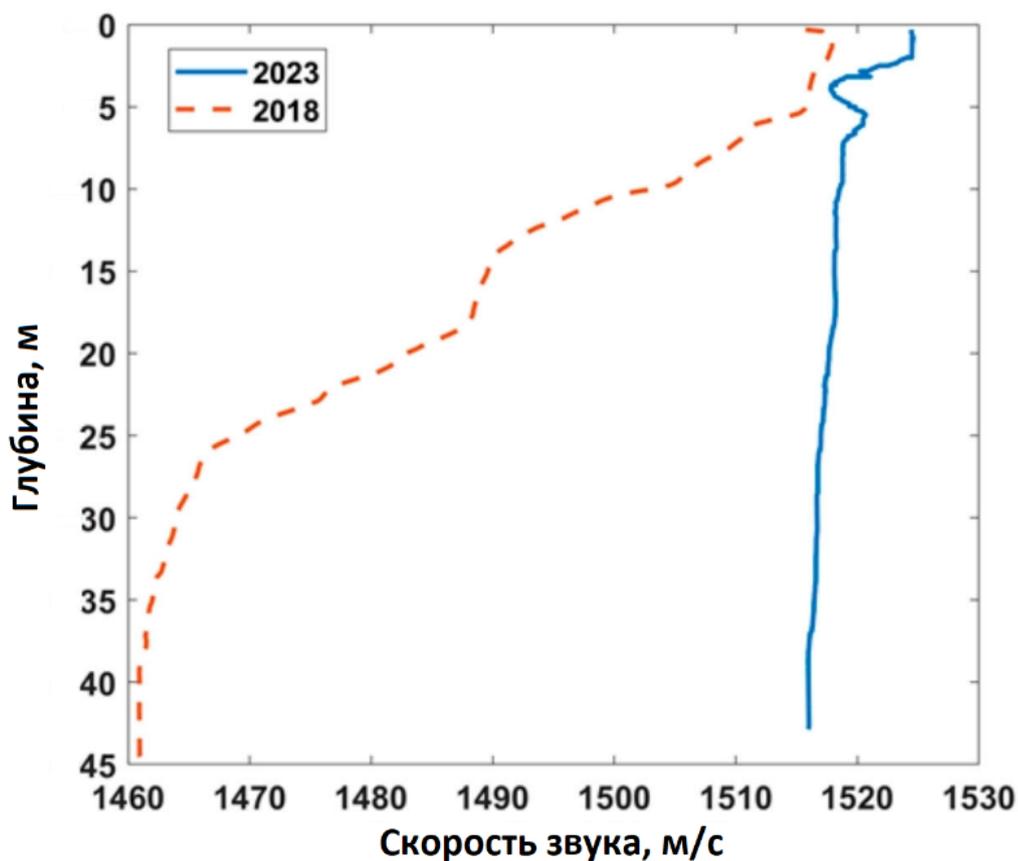


Рисунок 3.1. – Измеренные ВРСЗ на шельфовой зоне акустической трассы, проведенные в 2023 году (синяя линия) и в 2018 году (оранжевая пунктирная линия)

Опишем методику проведения эксперимента. В 150 метрах от береговой черты на глубине 25-30 метров (при глубине моря 40 метров) был вывешен с борта заякоренного судна широкополосный излучатель, соединенный кабелем с бортовым постом управления. Один раз в 6 минут излучался сложный фазоманипулированный сигнал (М-последовательность, 1023 символов, 16 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 400 Гц. Длительность сеанса излучения составила более 12 часов. Схема эксперимента приведена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2. – Схема эксперимента 2023 года на акустической трассе протяженностью 144 км

Для приема сигнальной информации применялась распределенная вертикальная приемная система, которая состоит из нескольких автономных цифровых гидрофонов, размещаемых с помощью быстросъемных зажимов на более чем 1000-метровом фале, который соединен с дрейфующей вехой. На вехе установлен GPS приемник с передачей информации о местоположении системы по радиоканалу на обеспечивающее судно. Глубина крепления каждого гидрофона задавалась после проведения гидрологических измерений для решения целевой задачи эксперимента. В нашем случае это были глубины 69, 126 метров (глубина оси ПЗК), 648 и 914 метров, на которых регистрировались сеансы излучения (Рисунок 3.3).

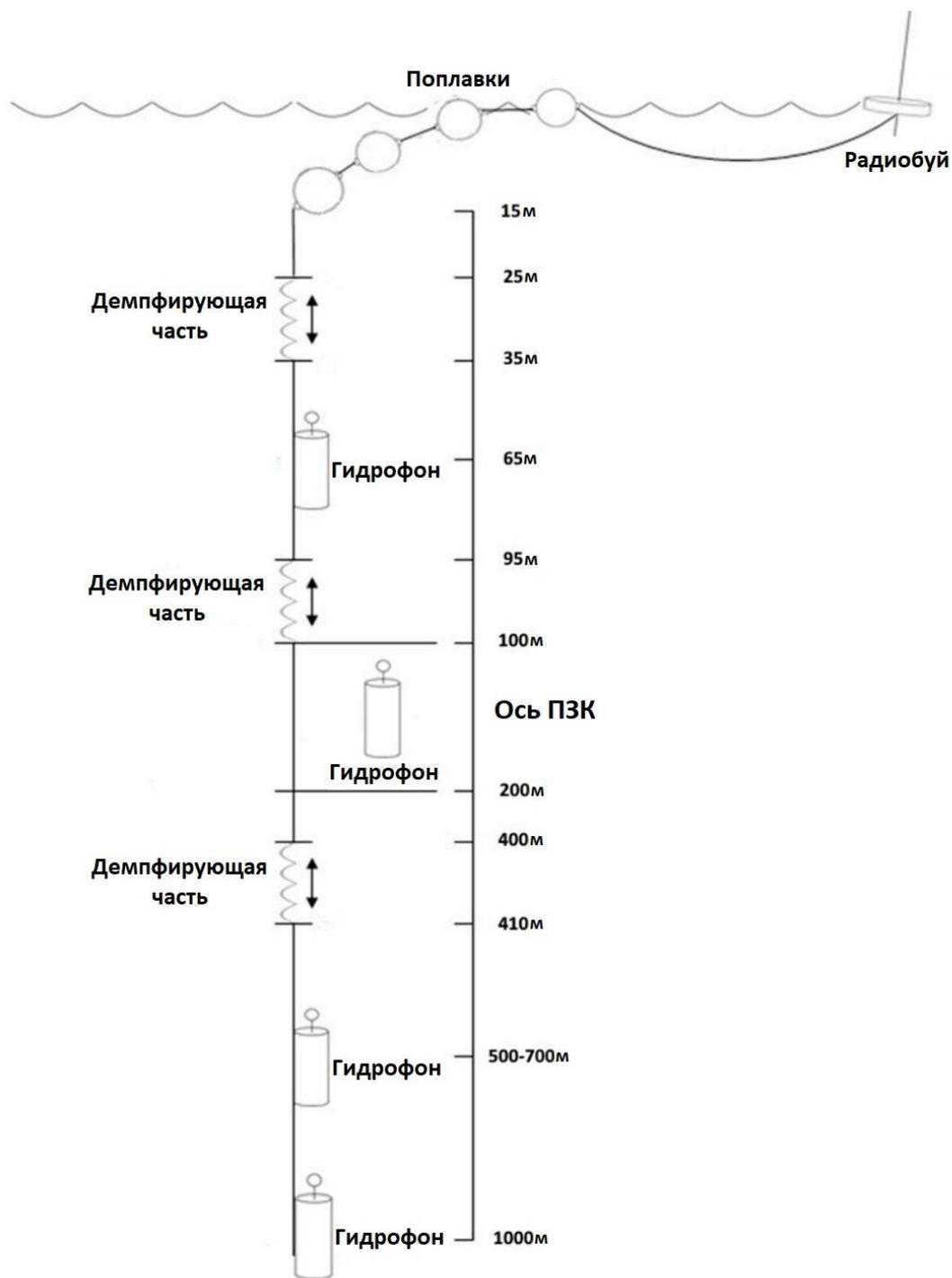


Рисунок 3.3. - Дрейфующая приемная система

Далее производилась свертка (б) принятых сигналов с маской излученного для определения импульсного отклика волновода на заданных глубинах (Рисунок 3.4).

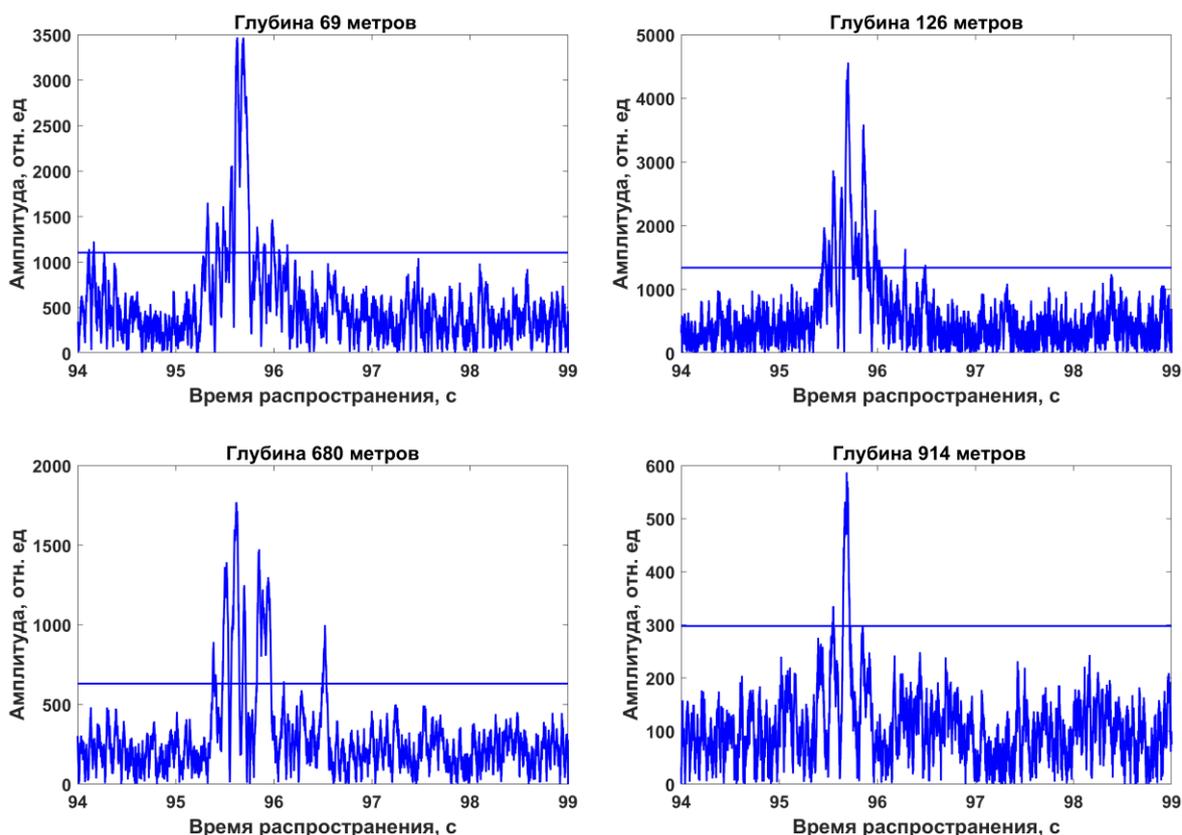


Рисунок 3.4. – Импульсные характеристики волновода

Анализ зависимости структуры импульсных характеристик от глубины показывает, что сигнал начинает фиксироваться приемной системой с глубины 69 метров и достигает максимума амплитуды на глубине 126 метров, что соответствует заглублению оси ПЗК. При этом на всех глубинах энергия сигнала в основном концентрируется в пачке импульсов длиной 0.5 секунд с максимальным импульсом, расположенным около середины. Неожиданно схожие импульсные характеристики, полученные на оси ПЗК и на других глубинах, могут быть объяснены особенностями вертикального разреза скорости звука (ВРСЗ) на протяженном шельфе, обусловленного сильным перемешиванием воды после тайфуна. Отсутствие ярко выраженного придонного канала распространения привело к большей засветке приосевых глубин ПЗК. Тем не менее, отмечается самая большая амплитуда максимального прихода акустической энергии на горизонте 126 метров, что указывает на его распространение по траектории близкой к прямолинейной.

Для решения целевой задачи исследования были произведены расчеты средней скорости прохождения импульсных сигналов от ИНС до приемников (7), расположенных на разных глубинах. Эффективные скорости рассчитывались путем деления значений расстояния между источником и приемником на момент регистрации сигнала по данным GPS на время распространения, определенное по моменту регистрации максимального пика импульсного

отклика. Результаты расчетов позволили зафиксировать очень важную закономерность, которая заключается в приблизительном равенстве времен распространения и эффективных скоростей (1478 м/с) на глубине расположения оси ПЗК и на других глубинах, вплоть до 914 метров.

Физически этот результат может быть качественно объяснен на языке лучевой теории распространения звука. Максимальная концентрация акустической энергии вблизи оси ПЗК формируется сигналами, распространяющимися под углами, близкими к нулевым, со скоростью, мало отличающейся от скорости звука на оси ПЗК [39, 58, 76, 93]. Зафиксированные в эксперименте на больших глубинах (значительно ниже оси ПЗК) приходы импульсов соответствуют звуковым волнам, распространяющимся под большими углами к оси канала. Эти импульсы проходят по лучевым траекториям большей длины, с точками поворота лучей на больших глубинах, где скорость звука существенно выше, чем на оси ПЗК. В нашем случае оказывается, что эти факторы – увеличение длины траектории и прирост скорости звука – уравнивают друг друга, что и приводит к приблизительному равенству времен и эффективных скоростей распространения на всех горизонтах. Это можно показать при помощи модели распространения акустической энергии в лучевом приближении.

Для более детального анализа и физической интерпретации полученных экспериментальных данных было проведено численное моделирование зависимости скорости звука от глубины с использованием программы «RAY». Для проведения расчетов были использованы приведенные выше данные о гидрологических и батиметрических параметрах волновода.

Средний угол наклона дна на шельфе был задан, как $\beta = 0.06^\circ$. Глубина в точке излучения $z_0 = 42$ м, глубина излучателя $z_0 = 35$ м. В глубоком море среднее значение глубины $z_{ГМ} = 3000$ м. Расстояние между излучателем и приемником $R = 141.44$ км.

В результате численного моделирования (Рисунок 3.5) были рассчитаны собственные лучи между излучателем и приемником и импульсные характеристики волновода в интервале глубин от 60 до 1000 м с шагом между горизонтами в 1 метр. Далее, вычислялось время распространения $\tau_{МАКС}$, соответствующее максимальному приходу энергии ИХВ. В большинстве ИХВ максимум располагался в середине. На последнем этапе, для расчета эффективной скорости звука расстояние между источником и приёмником делилось на время распространения: $V_{ЭФФ} = R/\tau_{МАКС}$. Результаты моделирования на всех исследуемых горизонтах приведены в «Приложении В».

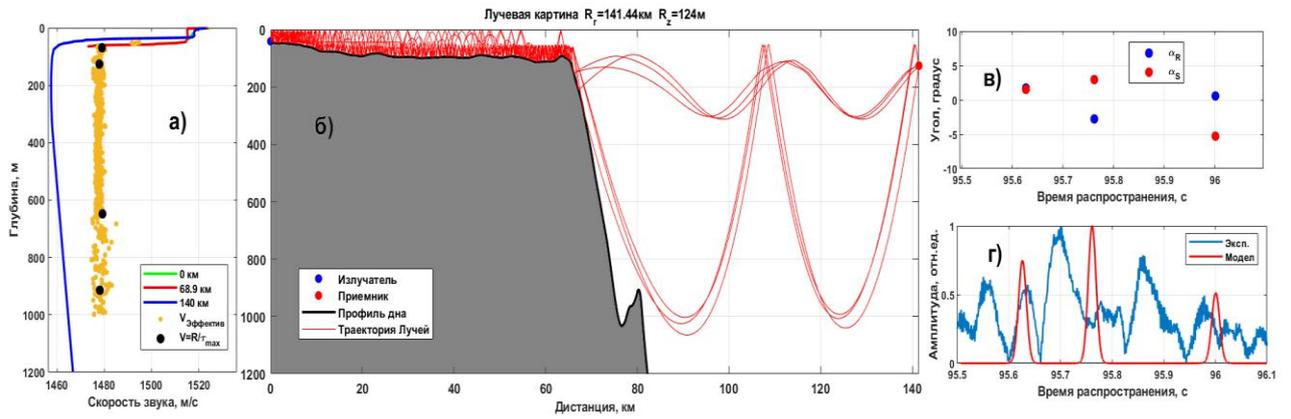


Рисунок 3.5. - Результаты численного моделирования: а) вертикальные разрезы скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (синяя, красная и зеленая кривая); вычисленное в лучевом приближении вертикальное распределение эффективной скорости звука (оранжевые точки); экспериментально измеренные значения эффективной скорости звука на заданных глубинах с помощью импульсных характеристик волновода (черные точки); б) рельеф дна и пример лучевой картины собственных лучей для акустической трассы при приеме на глубине 126 метров; в) угловая структура поля в точке приема (красные точки углы выхода из излучателя, синие – углы входа в приемник); г) импульсная характеристика волновода в точке приема на горизонте 126 метров (синим цветом изображена экспериментальная ИХВ, а красным – смоделированная).

Рассмотрим рисунок 3.5. Видно, что рассчитанные эффективные скорости (оранжевые точки) для каждого горизонта хорошо согласуются с эффективными скоростями (черные точки), наблюдаемыми в эксперименте с точностью около 1 м/с (Таблица 3.1). Кроме того, при сравнении суммарной средней эффективной скорости звука на всех исследуемых горизонтах с модельными расчетами, погрешность оказалась меньше 0.003 м/с, что является достаточно точным результатом. Задача добиться точного совпадения рассчитанных и экспериментально полученных ИХВ не ставилась, но было получено численное подтверждение расширения до 0,5 секунд импульсного отклика волновода и наличие максимального прихода в середине. Это свидетельствует о перспективности применения программы «RAY» для моделирования и физической интерпретации процессов распространения низкочастотных акустических волн в сложных гидрологических и батиметрических условиях.

Таблица 3.1. – Сравнение эффективных скоростей звука по максимальному приходу ИХВ

Глубина, м	Скорость по максимуму, м/с Эксперимент	Скорость звука по максимуму, м/с Модель
69	1479.06	1477.95
126	1477.92	1478.72
648	1479.25	1478.89
914	1478.15	1478.91

Ранее, в работах [4, 8, 9, 39] было экспериментально показано, что ошибки измерения расстояний акустическими методами при использовании в расчетах времени распространения сигналов и значений скорости звука на оси ПЗК не превышают 100-150 метров на дистанции до 200 миль. Следовательно, приведенные выше результаты о равенстве эффективных скоростей при приеме на оси ПЗК и на других глубинах позволяют рассчитывать на такие же точности позиционирования при выполнении реального маневрирования группы ИГАС на глубинах до 1000 метров и удалении на сотни километров от постов управления.

В заключение сформулируем основные результаты и выводы, полученные при выполнении целевой задачи эксперимента.

Приведенные результаты имеют очень важное фундаментальное и прикладное значение для решения задач позиционирования и управления ИГАС при выполнении миссий на больших (сотни км) удаленностях от ИНС и больших глубинах (до 1000м). Обсуждаемый эксперимент технически и методически является продолжением описанного в [9], но получен для существенно отличающихся климатических условий, обусловленных последствием мощного тайфуна на диагностируемой акватории. Это значительно расширяет возможности для совершенствования теории и практики решения подобных задач.

Выявлены важные для практики особенности формирования импульсного отклика волновода после воздействия мощного тайфуна, прошедшего через исследуемую акваторию. Отсутствие придонного звукового канала на шельфе (обычно формируемого в летние месяцы) из-за перемешивания воды привело к тому, что структура импульсных характеристик волновода на всех глубинах представляет собой пачку импульсов длительностью 0.5 секунды с максимальным по амплитуде импульсом, расположенным ближе к середине. При этом зафиксировано, что времена и эффективные скорости распространения максимальных импульсов приблизительно одинаковы на всех глубинах и могут эффективно применяться для

решения задач позиционирования ИГАС при их функционировании на глубинах до 1000 метров.

Результаты численного моделирования в лучевом приближении с использованием программы «RAY» показали, что рассчитанные эффективные скорости для каждого горизонта хорошо согласуются с эффективными скоростями, наблюдаемыми в эксперименте с точностью до 1 м/с. Очень важно, что было получено численное подтверждение расширения до 0,5 секунд импульсного отклика волновода и наличие максимального прихода в середине, полученных экспериментально. Это свидетельствует о перспективности применения программы «RAY» для моделирования и физической интерпретации процессов распространения низкочастотных акустических волн в сложных гидрологических и батиметрических условиях.

Этот эксперимент детально описан в статье [67].

Автор представил подробный доклад «Исследование структуры акустического поля на основе гидроакустического эксперимента в Японском море» с результатами этого исследования на Всероссийской научной конференции «XXXVI сессия Российского акустического общества», которая проходила 21 – 25 октября 2024 года в городе Москва, в АО «Акустический институт имени Академика Н.Н. Андреева» [53].

3.2. Исследование особенностей распространения низкочастотных широкополосных импульсных сигналов в подводных звуковых каналах при решении задач акустической термометрии

В августе 2022 года на морском полигоне, от побережья о-ва Сахалин до банки Кита-Ямато в Японском море, был проведен тестовый акустико-гидрологический эксперимент на тысячекилометровой трассе в интересах разработки методов и средств акустической термометрии для оперативного мониторинга и моделирования климатической изменчивости температурных режимов в сложных волноводах, включающих шельф и глубокое море.

При этом решались следующие задачи:

- 1) разработка и апробация облика измерительной системы для исследования и контроля температурных режимов в Японском море методом акустической термометрии;
- 2) экспериментальные исследования особенностей формирования и взаимодействия гидроакустических и гидрологических полей на протяженной (свыше 1000 км) трассе при пересечении вихревой системы;
- 3) проведение численного моделирования процессов формирования и взаимодействия гидроакустических и гидрологических полей на протяженной акустической трассе в северо-восточной части Японского моря с использованием модели гидродинамической циркуляции океана NEMO [75] и вычислительной программы «RAY».

Облик и структура системы мониторинга климатической изменчивости температурных режимов в дальневосточных морях основываются на выборе критических акваторий, влияющих на общий характер структуры и динамики водных масс, и размещении в них акустических измерительных комплексов, структурно состоящих из излучающих и приемных систем. По опыту экспериментальных работ ТОИ ДВО РАН это могут быть излучающие и приемные системы, размещения которых на акватории Японского моря указаны на рисунке 3.6. Центральная приемная система-регистратор сигналов в донном исполнении (звездочка) будет размещена на банке Кита-Ямато. Излучатели импульсных широкополосных сигналов (красные точки) будут размещены в донном варианте на шельфовых зонах вблизи маячных сооружений у мысов Гамова, Островного и поселка Чехова (о. Сахалин) и соединены кабельными линиями с береговыми постами. Практическая реализация излучения с этих пунктов и приема сигналов на банке Кита-Ямато была неоднократно апробирована ранее при выполнении различных работ ТОИ ДВО РАН [3, 4, 39, 40, 44, 68].



Рисунок 3.6. – Измерительная система для исследования и контроля температурных режимов в Японском море

Метод акустической термометрии основан на разнесенном по пространству и синхронизированном по времени излучении и приеме зондирующих акустических сигналов на оси ПЗК диагностируемых волноводов. При свертке принятых сигналов с масками излученных определяются импульсные отклики (огнивающие взаимно корреляционных функций принятых и излученных сигналов) соответствующих волноводов. Из структуры импульсных откликов выделяются отдельные приходы акустической энергии, и измеряется время их распространения. По известной дистанции между излучателем и приемником рассчитываются средние скорости звука на оси ПЗК для всех компонент. Далее, применяя общепринятый в океанологии алгоритм Чена–Миллера (1), рассчитываются средние температуры в волноводе. Важным обстоятельством выбора такой схемы измерений является тот факт, что трасса № 3 на северо-востоке, описываемая в этой работе, является продолжением хорошо изученных акустических трасс мыс Шульца–Кита–Ямато (трасса № 1) и мыс Островной–Кита–Ямато (трасса № 2). Это позволяет распространить полученные результаты на всю акваторию Японского моря.

В рамках тестового эксперимента были проведены исследования особенностей формирования гидрологической обстановки в зоне проведения измерений. Вблизи приемной системы и в точках на удалениях 271.3, 404.3 и 652.5 км от излучателя производилось измерение вертикального распределения скорости звука и температуры (Рисунок 3.7).

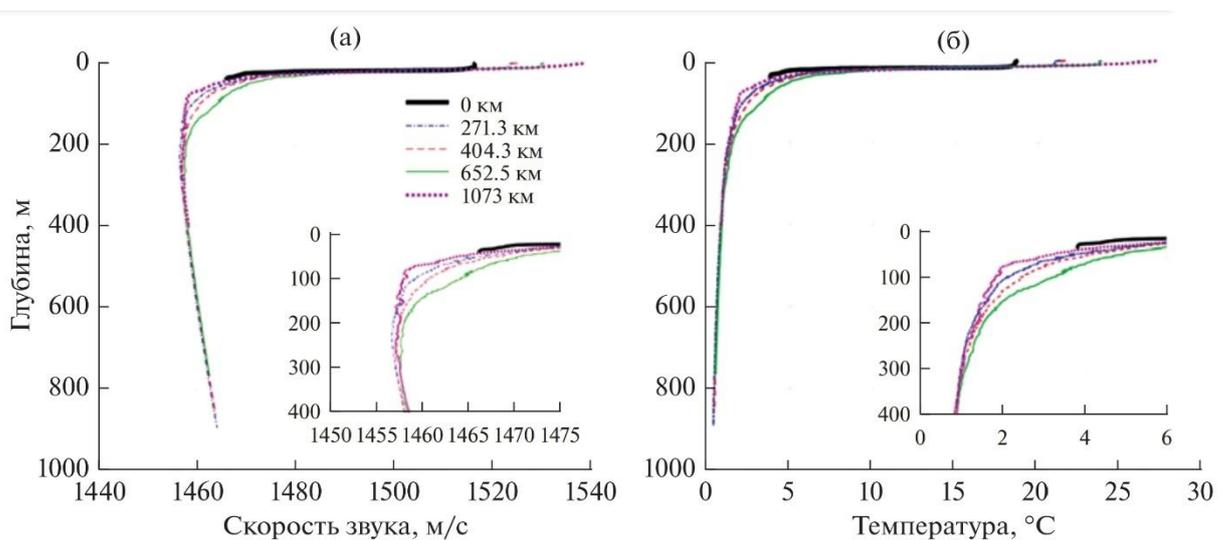


Рисунок 3.7. – Измеренные вертикальные распределения скорости звука (а) и температуры (б) по глубине в заданных точках

Анализ этих зависимостей показывает, что ось ПЗК (минимум скорости звука) во всех точках находилась на глубине от 200 до 300 м, а в слоях выше оси скорость звука и температура повышались с приближением к приемной системе (Таблица 3.2). Следовательно, с приближением к точке приема фиксируется постепенное увеличение отрицательного градиента скорости звука с глубиной в верхних слоях волновода. Кроме этого, можно отметить большее значение скорости звука и большее заглубление оси ПЗК в точке № 4 на удалении от излучателя 652.3 км.

Таблица 3.2. – Параметры ПЗК вдоль акустической трассы

№ точки измерения	Дистанция, км	Минимальная скорость звука, м/с	Глубина, м
1	0	1466.025	41.4
2	271.3	1456.678	228.5
3	404.3	1457.067	272.4
4	652.5	1457.567	317.5
5	1073	1457.0756	242.9

Для более полного анализа гидрологической обстановки в районе исследований были использованы данные гидродинамической модели циркуляции океана NEMO о полях скорости звука на данной трассе и в данный промежуток времени (Рисунок 3.8). На рисунке 3.8(в) отчетливо фиксируется отрезок от 600 до 700 км, на котором отмечаются большие значения скорости звука на оси ПЗК и большие глубины ее залегания. Это соответствует данным, полученным с STD (красные точки на рисунке 3.8(а) и 3.8(б)), и позволяет предположить наличие на этом участке трассы топографической антициклонической вихревой системы с теплым ядром в центре.

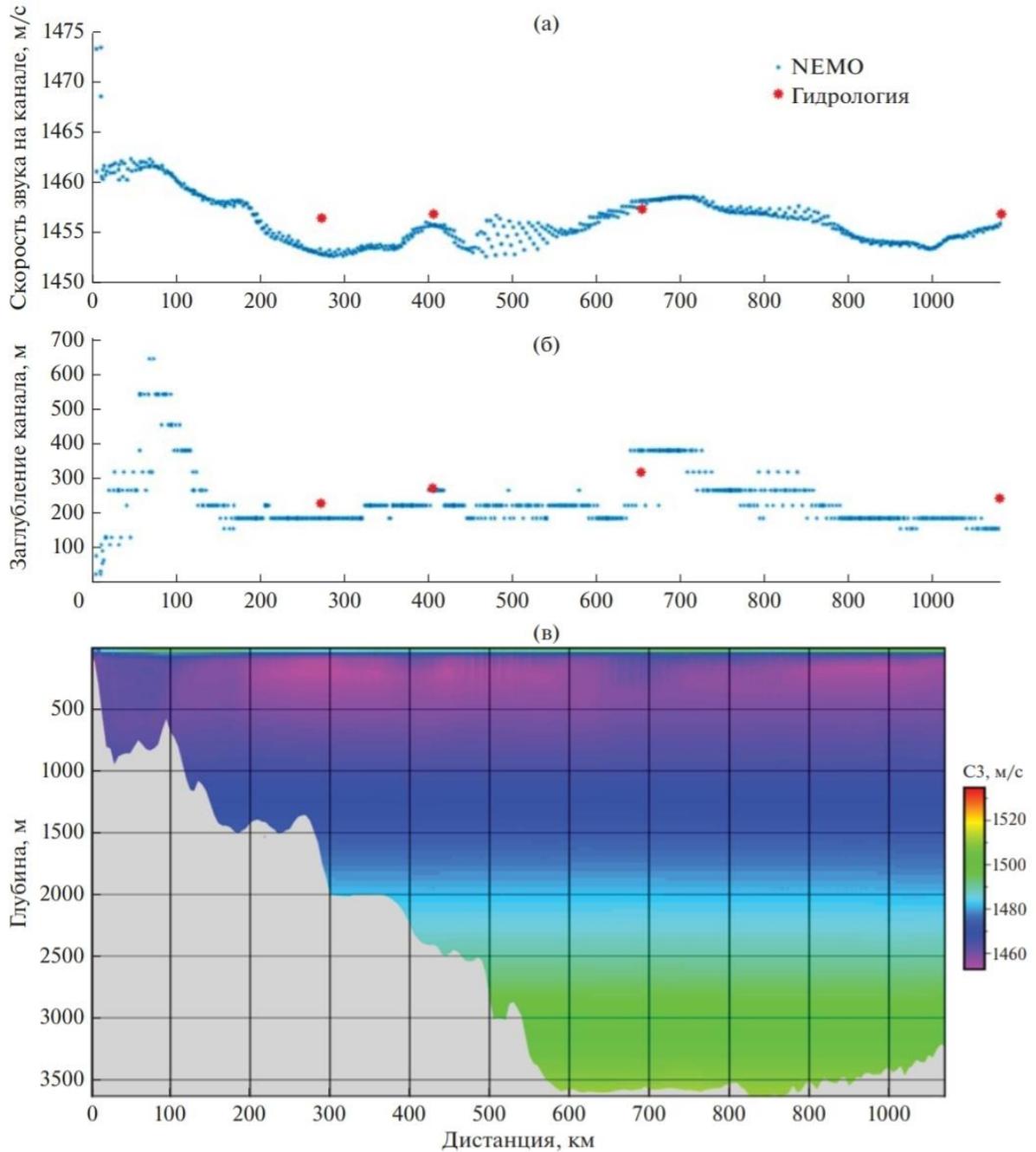


Рисунок 3.8. – Данные гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO и базы данных земной топографии GEBCO: (а) – изменение скорости звука на оси ПЗК; (б) – изменение глубины залегания оси ПЗК; (в) – поле скорости звука и рельеф дна вдоль акустической трассы

Предположение о нахождении в этом месте вихревой системы основано на фиксации этого вихря в течение трех летних месяцев (июль, август и сентябрь) и на влиянии подводной возвышенности Богорова, находящейся на этом участке (Рисунок 3.9).

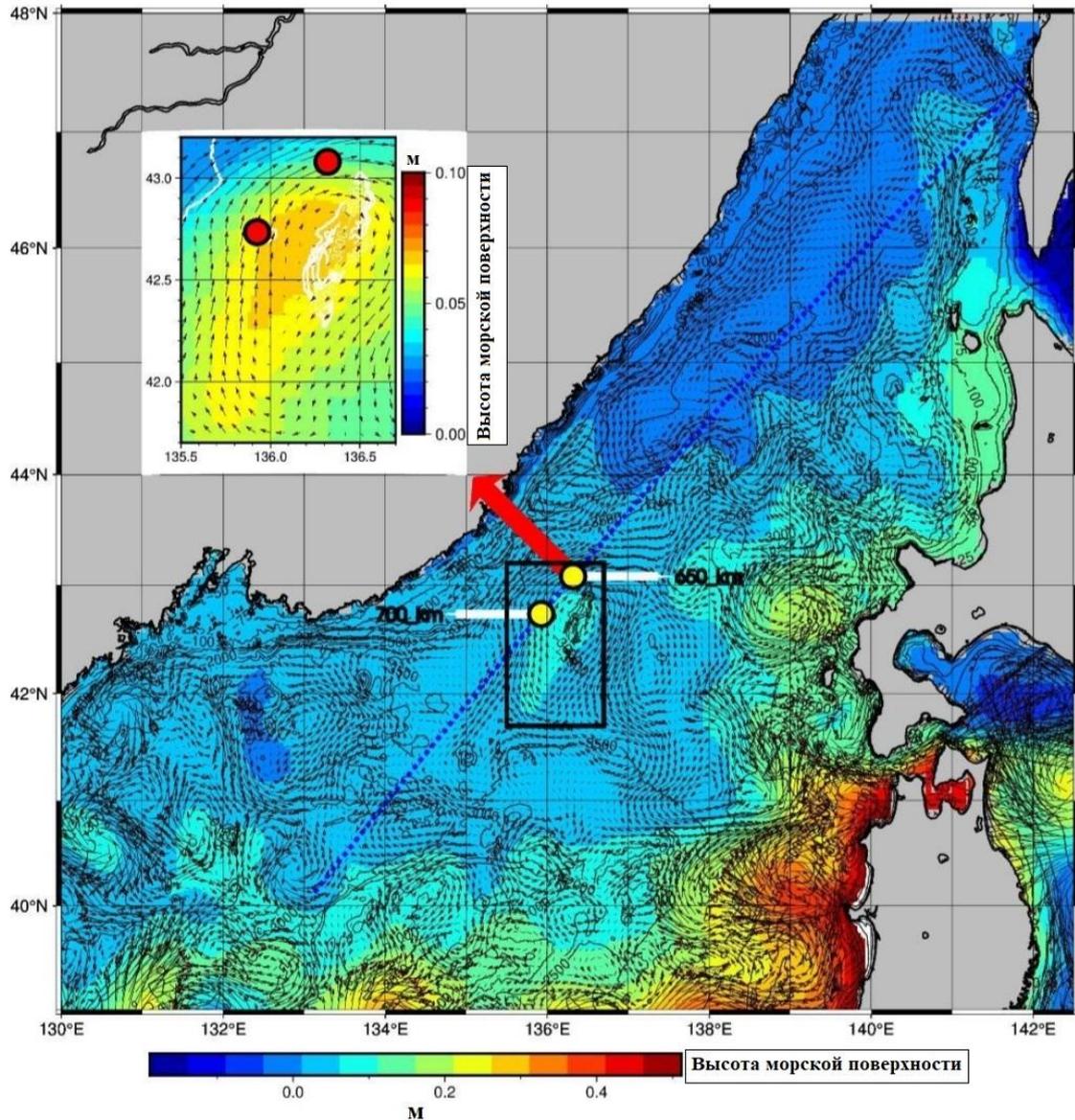


Рисунок 3.9. – Высота морской поверхности и циркуляция водных масс по данным гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO и базы данных земной топографии GEBCO

Таким образом, при решении задач акустической термометрии данные гидродинамической модели циркуляции океана NEMO могут заменить или значительно расширить результаты измерений STD-зондами.

Рассмотрим методику проведения эксперимента. Экспериментальное тестирование акустической термометрии проводилось на акустической трассе длиной 1073 км. Излучатель был расположен вблизи берега у поселка Чехов (о-в Сахалин), на глубине 41 м и на удалении 5 км от свала глубин (Рисунок 3.6).

Каждые 6 мин излучался фрейм в составе нескольких фазоманипулированных псевдослучайными M-последовательностями сигналов, в том числе: длиной 1023 символа с заполнением 4-мя и 16-ю периодами несущей частоты на символ (далее M1023 и M1023_16) и 127 символов с 40 периодами на символ (далее M127). Все сигналы имели несущую частоту 400 Гц, но различные полосы частот: M1023 – полосу [300, 500] Гц (длина символа 0.01 с); M127 – полосу [390, 410] Гц (длина символа 0.1 с), M1023_16 – полосу [375, 425] Гц (длина символа 0.04 с). Акустическое давление составляло около 8000 Па на 1 м от излучателя. Приемная система на базе радиогидроакустического буя дрейфовала вблизи обеспечивающего судна на удалении около 1073 км от излучателя. Гидрофон приемной системы погружался на ось ПЗК, которая определялась при измерении вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ).

Принятая сигнальная информация от излучателя поступала на поверхностный радиогидроакустический буй и по радиоканалу передавалась на приемное судно. На рисунке 3.10 приведены импульсные отклики волновода, которые были получены в результате свертки принятых сигналов с излученными.

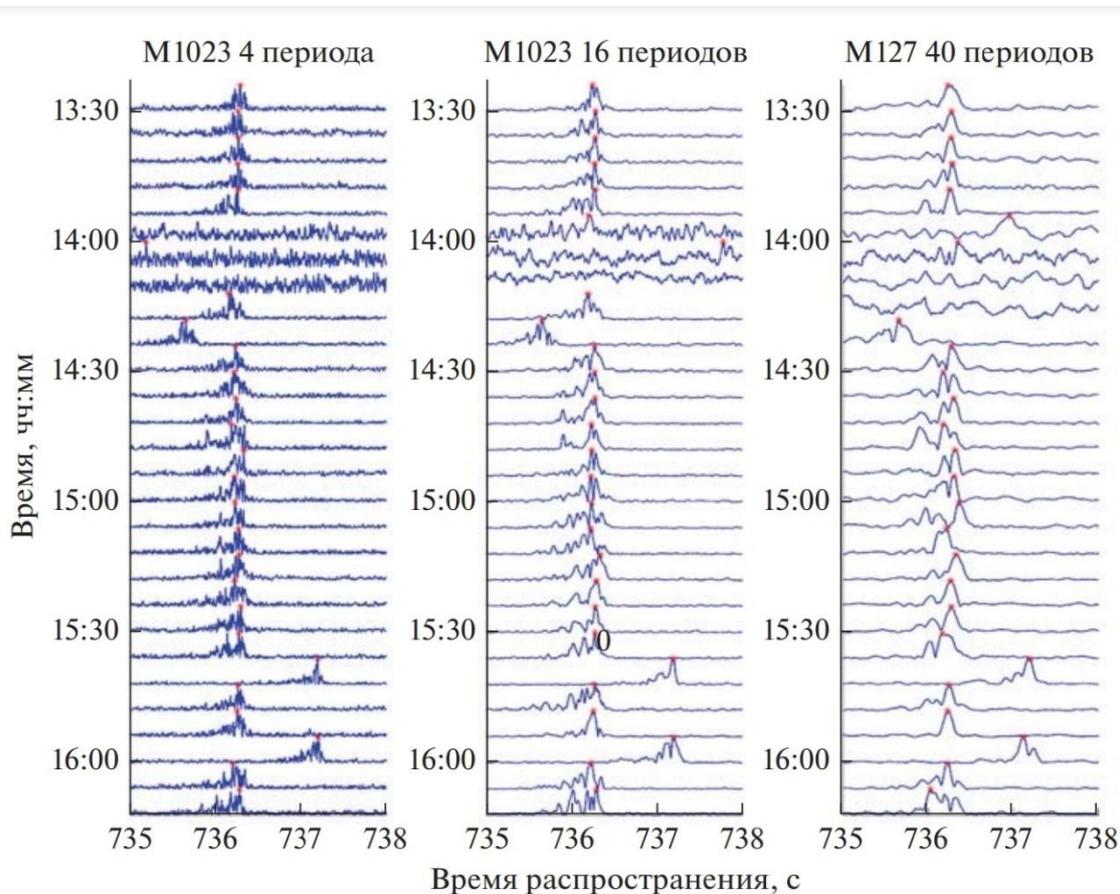


Рисунок 3.10. – Импульсные отклики, полученные от сигналов с разными длинами символов и количеством символов

Следует отметить, что размещение излучателя на шельфе в данном случае обеспечивает реализацию эффекта акустического «оползня» – явления перехода акустической энергии из придонной области шельфа на ось подводного звукового канала в глубоком море.

Применение в эксперименте сигналов с различными длительностями символов осуществлялось для выбора наиболее помехоустойчивого варианта измерения времени пробега максимального и последнего прихода акустической энергии вблизи оси ПЗК. Этот приход формируется лучевыми траекториями с углами скольжения и разностью фаз, близкими к нулевым. В данном случае время пробега одинаково для всех вариантов (736.3 с) и применяется для высокоточного измерения средней скорости звука (температуры) на оси ПЗК. Все остальные приходы импульсного отклика несут информацию о температуре в слоях выше и ниже оси ПЗК, но количественные оценки на столь протяженной трассе затруднены и не рассматривались в статье. Координаты дрейфа буя ежесекундно фиксировались системой GPS и учитывались при расчетах расстояния между излучателем и приемной системой (Рисунок 3.11).

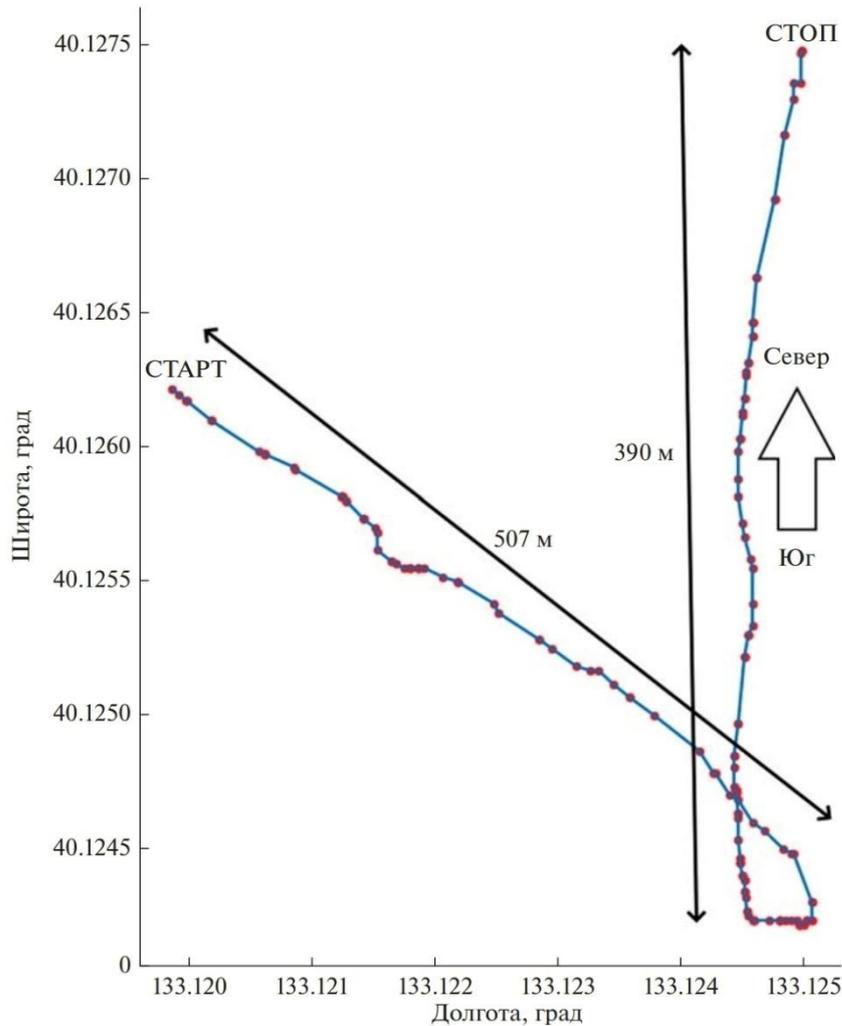


Рисунок 3.11. – Траектория дрейфа приемной системы с изменением дистанции до источника

На каждый момент прихода акустического сигнала рассчитывалась дистанция от источника до приемника. Расчет дистанции производился с помощью алгоритма [79] по GPS данным источника и приемника с учетом заглубления оси ПЗК. Поправка в расчете обуславливается уменьшением радиуса Земли при заглублении ниже уровня моря и как следствие уменьшением длины дуги, соединяющей корреспондирующие точки. Величина поправки ΔL определяется как: $\Delta L = 2\pi d \frac{L}{4 \times 10^7}$,

где L – дистанция между точками излучения и приема на уровне моря, м; 4×10^7 – средняя длина окружности Земли на уровне моря, м; d – глубина оси ПЗК, м.

Для дистанций между точками излучения и приема в диапазоне 1072.950 – 1073.3 км и глубины оси ПЗК 250 м: $\Delta L = 42$ м.

Далее, по данным координат буя и измеренному времени рассчитывалась средняя скорость звука на каждый момент дрейфа. Из полученной средней по трассе скорости звука, известных величин глубины залегания оси ПЗК (250 м) и солёности (34.1‰), по алгоритму Чена–Миллера (1) рассчитывалась температура (Рисунок 3.12).

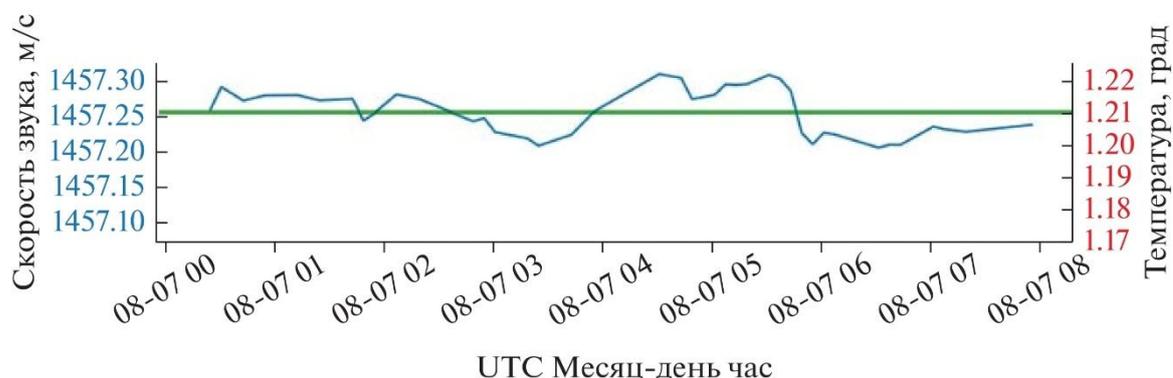


Рисунок 3.12. – Скорость звука и температура на оси ПЗК, рассчитанные по последнему приходу акустических сигналов (синий – окно усреднения по часовому интервалу, зеленый – среднее значение по всем измерениям)

Погрешность ΔC расчета скорости звука определяется протяженностью акустической трассы, временем распространения и временным разрешением применяемого акустического сигнала $\Delta \tau$, которое равно длительности символа М-последовательности [78]:

$$\Delta C = \frac{L}{\tau^2} \Delta \tau,$$

где L – протяженность акустической трассы, м; τ – время распространения, с;

$\Delta \tau$ – длительность символа М-последовательности, с.

При использовании алгоритма Чена–Миллера вычисления температуры в зависимости от солености, которая практически не меняется по трассе в течение года (34.0–34.1‰), давления (глубины) и скорости звука, погрешность расчета температуры для сигнала M1023 с длительностью символа 0.01 с составит величину $\Delta t = 0.007^\circ\text{C}$. Для сигнала M127 с длительностью символа 0.1 с погрешность расчета температуры $\Delta t = 0.044^\circ\text{C}$.

Таким образом, инструментальные акустические измерения величины средней температуры на оси ПЗК на тысячекилометровой акустической трассе показали значение 1.216°C с погрешностью 0.007°C (средняя скорость звука 1457.24 м/с), среднее квадратичное отклонение при более 100 измерений составило 0.012°C . Необходимо отметить, что измерения производились на трассе, которая пересекала вихревую систему, описанную выше. Следовательно, длительный мониторинг температур на трассе в совокупности с данными модели NEMO может обеспечить важной информацией об изменчивости характеристик вихревой системы. Актуальность приведенных термометрических наблюдений связана с тем, что постоянное наличие теплого вихря в данном районе, его размеры и заглубление могут иметь большое практическое значение для рыбохозяйственной деятельности в регионе.

Сравнение полученных данных с результатами многолетних измерений скорости звука, полученных на трассах № 1 и 2 [3, 4, 39, 40, 44], показывает, что в этот год значение средней скорости звука на трассе № 3 сравнимо с данными более теплых лет (2019–2022 гг.), полученными на трассах № 1 и 2. Следовательно, можно утверждать, что трасса №3 также находится в зоне более теплых трансформированных тихоокеанских вод из-за сдвига полярного фронта к северу.

Отметим, что предложенная измерительная схема, технические и вычислительные средства и методики могут быть использованы для организации высокоточного оперативного мониторинга климатической изменчивости температурных режимов во всей экономической зоне РФ Японского моря.

Для физической интерпретации полученных результатов было проведено численное моделирование процесса распространения широкополосных импульсных сигналов с использованием программы «RAY», с привлечением приведенных выше данных гидродинамической модели циркуляции океана NEMO, характеристик рельефа дна и измеренных ВРСЗ в заданных точках (Рисунок 3.13).

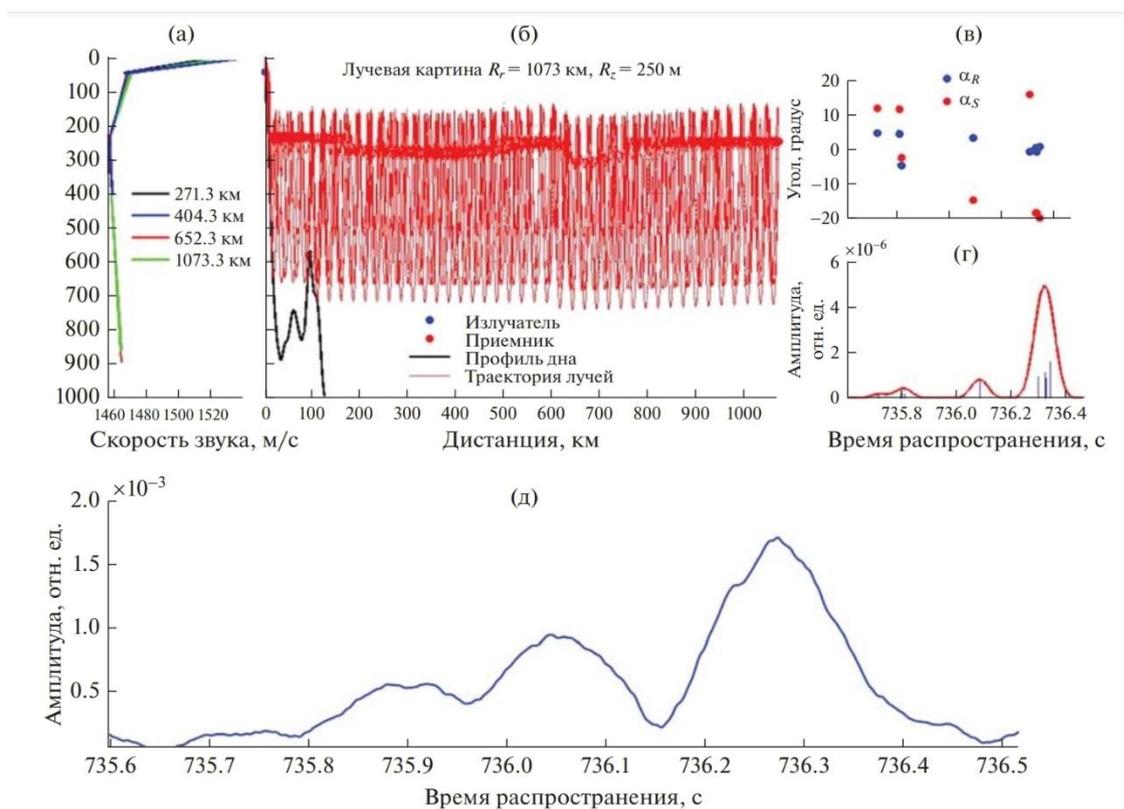


Рисунок 3.13. – Результаты моделирования распространения акустической энергии в лучевом приближении на трассе длиной 1073 км с использованием программы «RAY»: (а) – ВРСЗ в точках вдоль трассы, (б) – лучевая картина распространения собственных лучей; (в) – углы выхода и прихода; (г) – смоделированная ИХВ; (д) – экспериментально полученный импульсный отклик для сигнала M127 (для сравнения ИХВ)

Расчеты показали, что при заданных параметрах модели, на приемном гидрофоне формируется импульсный отклик, состоящий из трех приходов с временами распространения, приблизительно равными полученным экспериментально (Рисунок 3.13 (г) и 3.13(д)). При этом углы скольжения лучевых приходов имели значения от 0 (первый приход) до 5 градусов (Рисунок 3.13(в), синие точки). Это свидетельствует о том, что акустическая энергия из шельфа перемещается на ось ПЗК в глубоком море и далее распространяется с минимальным затуханием. Рисунок 3.13(б) иллюстрирует этот процесс «захвата» акустической энергии ПЗК. Видно, что на расстоянии от 600 до 730 км лучевые траектории заглубляются до 300 м, что соответствует данным модели NEMO и измерениям ВРСЗ. Критерием адекватности модельных расчетов реальному процессу распространения широкополосных импульсных сигналов является схожесть импульсных откликов, как по форме, так и по временам отдельных приходов акустической энергии. В нашем случае достигнуть максимального подобия удалось путем подбора горизонтального размера вихря, который оказался равным в данный момент времени 130 км. Следовательно, программа «RAY» может успешно применяться для получения

практических результатов моделирования процесса акустической термометрии в интересах организации мониторинга изменчивости климата в данном районе Японского моря.

Сформулируем выводы проведенного эксперимента. Результаты тестового эксперимента продемонстрировали эффективность комплексного применения технических и вычислительных средств для повышения точности и расширения возможностей акустической термометрии в сложных волноводах.

Результаты акустико-гидрологического эксперимента подтвердили эффективность методических и технических подходов к практической реализации метода акустической термометрии протяженных морских акваторий. Получена и подтверждена инструментальными измерениями величина средней температуры (1.216°C с инструментальной погрешностью 0.007°C и среднеквадратичным отклонением 0.012°C) на оси ПЗК в Японском море на тысячекилометровой акустической трассе при пересечении вихревой системы.

Результаты проведенных исследований по акустической термометрии на трассе от побережья о-ва Сахалин до банки Кита-Ямато показывают чувствительность метода для регистрации и мониторинга крупномасштабных гидрофизических процессов, оказывающих влияние на климатическую изменчивость в Японском море. В зоне функционирования разработанной измерительной системы зафиксировано потепление трансформированных тихоокеанских вод в 2019–2022 гг. из-за смещения Полярного фронта к северу.

Результаты численного моделирования процесса распространения импульсных широкополосных сигналов на протяженной (свыше 1000 км) акустической трассе с использованием вычислительной программы «RAY» и данных гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO позволили выявить и классифицировать значительную по размерам (около 130 км) вихревую систему. Актуальность приведенных термометрических наблюдений связана с тем, что постоянное наличие теплого вихря в данном районе, его размеры и заглублиение могут иметь важное практическое значение для рыбохозяйственной деятельности в регионе.

Подробные результаты проведенных исследований описаны в статьях [41, 69]

Результаты экспериментов автор представил в устном докладе «Численное моделирование распространения сложных акустических сигналов для решения задач термометрии и дальнометрии» на V Международной научной конференции «Наука будущего» и VIII Всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего – Наука молодых», которые проходили 20 – 23 сентября 2023 года в городе Орел, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» [54].

3.3. Реализация уникальной системы мониторинга температурных режимов в зимних условиях при устойчивом ледовом покрове

Цель проведенных исследований заключалась в оценке возможности высокоточных температурных измерений акустическими методами в зимних гидрологических условиях при наличии ледяного покрова. Тестовые эксперименты проводились в северной части Амурского залива Японского моря в два этапа, разнесенных по времени — 5 и 18 марта, при наличии ледового покрова толщиной более 30 см.

Сценарии экспериментов были методически идентичны и представляли собой организованные стационарные акустические трассы для измерения скорости звука (температуры) по измеренным временам пробега импульсных сигналов между источниками и приемниками звука при известном расстоянии.

Методически эксперименты выполнялись следующим образом. С помощью ручного бура в ледовом покрытии делалась полынья необходимого размера, через которую погружался пьезокерамический излучатель, устанавливаемый вблизи дна, на глубине 7 метров (Рисунок 3.14).



Рисунок 3.14. — Постановка пьезокерамического излучателя

Ежеминутно производилось излучение сложных фазоманипулированных сигналов (М-последовательность, 255 символов, 4 периода несущей частоты на один символ последовательности). В эксперименте 5 марта несущая частота зондирующего сигнала составляла 2,5 кГц, а в следующем, 18 марта - 6 кГц. В качестве генератора сигналов использовался автономный блок, соединенный кабелем с излучателем (Рисунок 3.15).



Рисунок 3.15. — Автономный блок генерации сигналов и пьезокерамический излучатель

Прием сигналов осуществлялся гидрофоном, погруженным на глубину 11 м в сделанную полыню на расстоянии около 1200 метров от излучателя. Гидрофон, соединялся с радиогидроакустическим бумом (РГБ), оснащённым GPS приемником (Рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 — Приемная система на базе РГБ.

Информация с гидрофона и с приемника GPS по радиоканалу передавалась в пост обработки, размещенный в лабораторном корпусе института (ТОИ ДВО РАН) на удалении нескольких километров. По координатам, полученным с GPS, вычислялось расстояние между источником и приемником. На рисунке 3.17 приведена карта-схема размещения приборов. Характеристики приборов и информация об особенностях экспериментов сведены в таблице 3.3.



Рисунок 3.17. – Карта-схема эксперимента

Характеристики приборов и информация об особенностях экспериментов сведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. – Условия проведения экспериментов

дата	F_0 , кГц	ΔF , кГц	Длительно сть сигнала, с	Разрешающа я способность сигнала, мс	R, м
5 марта	2,5	1,25	0,408	1,6	1204
18 марта	6	3	0,17	0,66	1194

На рисунке 3.18 приведены профили скорости звука, измеренные над излучателем и над приемником с помощью STD-зонда. На глубине более 2-х метров в обоих случаях четко прослеживается слабый, близкий к полной изотермии, положительный градиент с изменением величины от 1441 м/с до 1442 м/с.

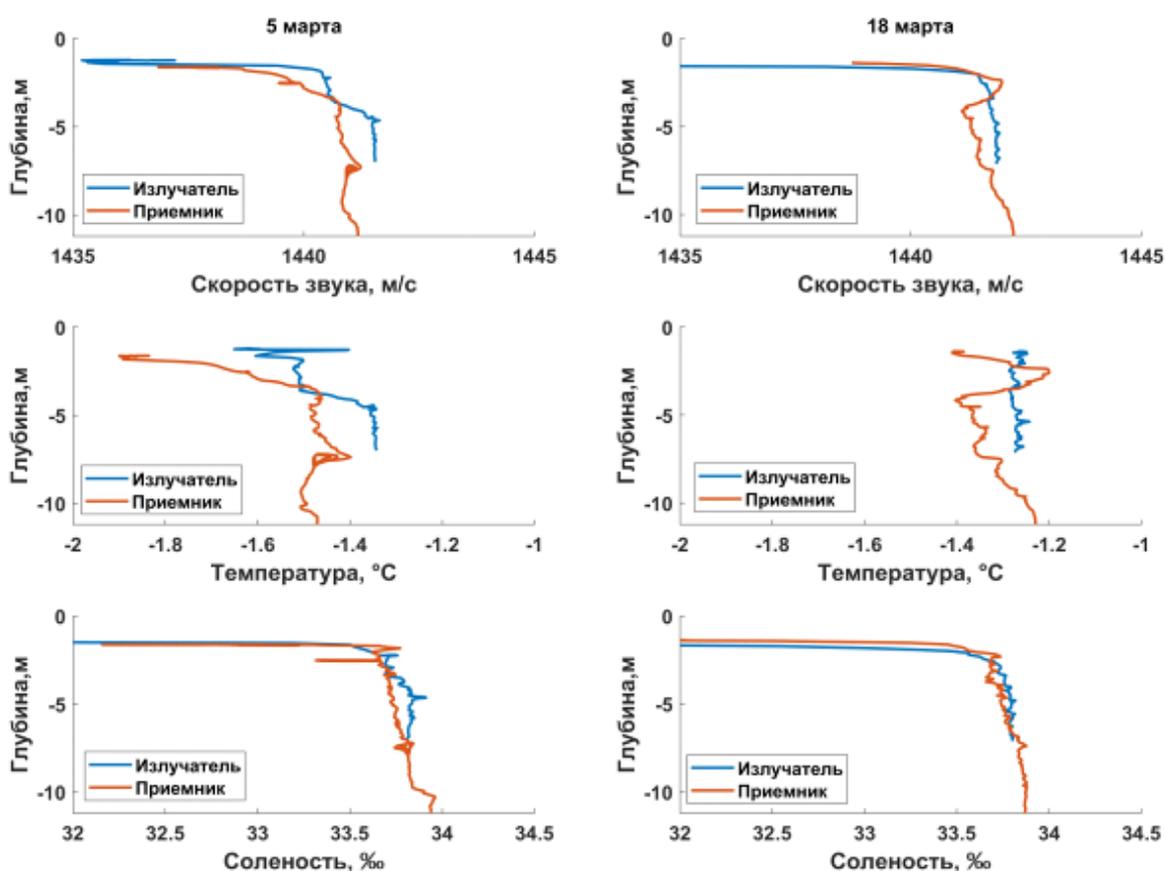


Рисунок 3.18. – Результаты STD-измерений 5 и 18 марта

Принятые в ТОИ ДВО РАН сигналы были подвергнуты корреляционной обработке (6) с целью получения структуры импульсных откликов (импульсной характеристики волновода).

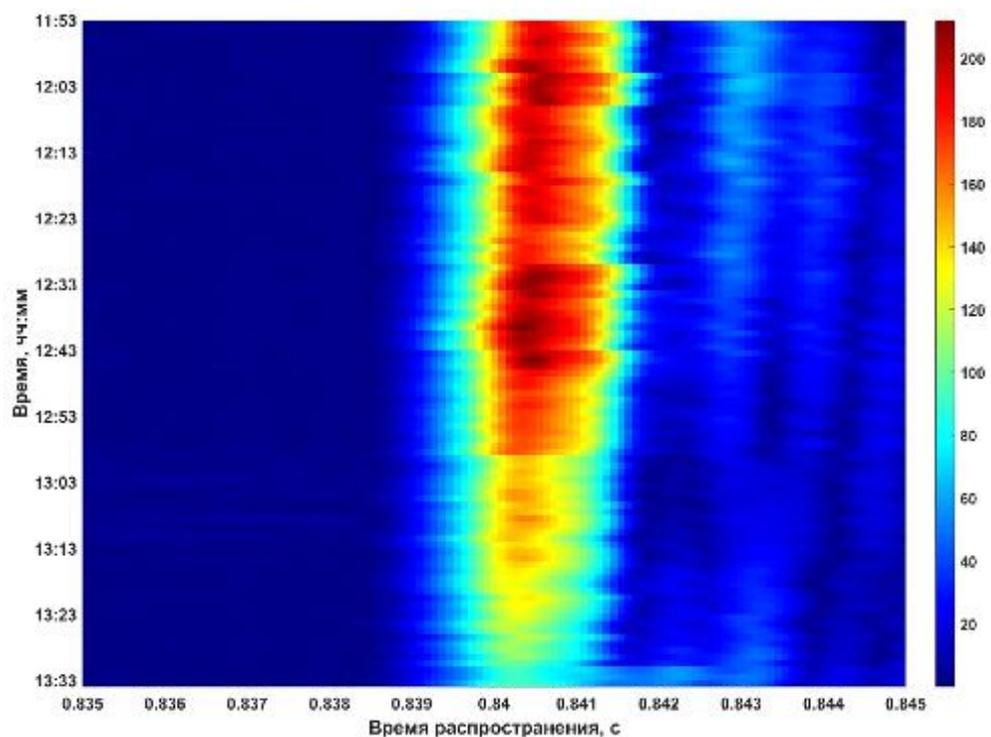


Рисунок 3.19 – Импульсная характеристика для эксперимента 5 марта

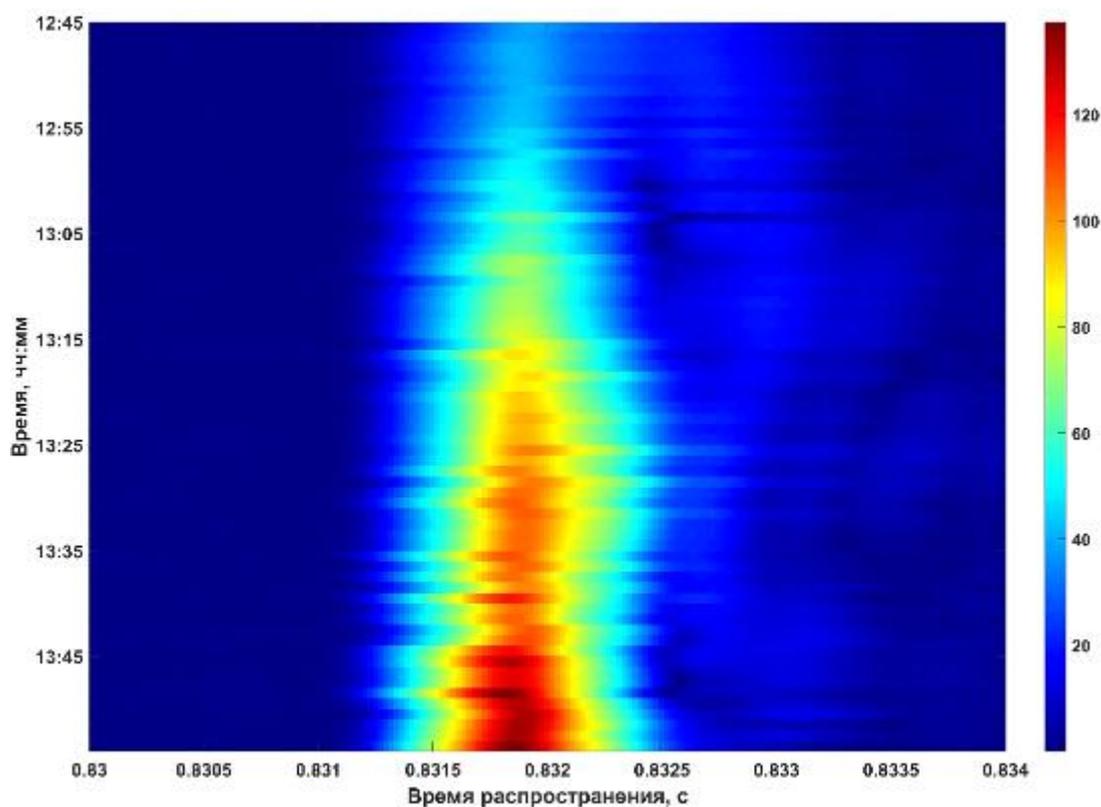


Рисунок 3.20 – Импульсная характеристика для эксперимента 18 марта

Сводные графики результатов обработки представлены на рисунках 3.19 и 3.20.

На рисунках 3.21 и 3.22 приведены более информативные примеры структуры импульсных откликов, полученных в экспериментах.

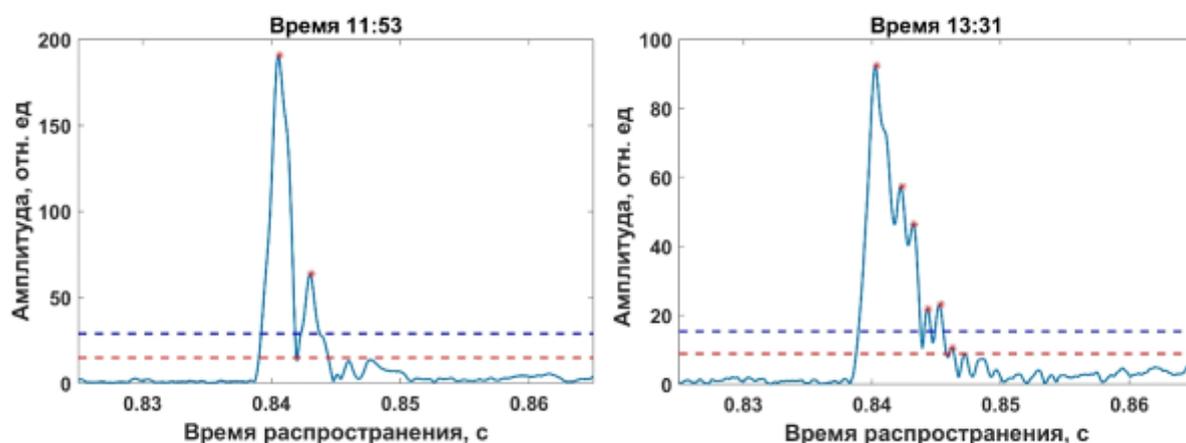


Рисунок 3.21. – Пример структуры ИХ для эксперимента 5 марта. Горизонтальными линиями отмечены уровни корреляционных шумов (синей - ортогональной последовательности, красной - шум фрагмента записи без сигнала)

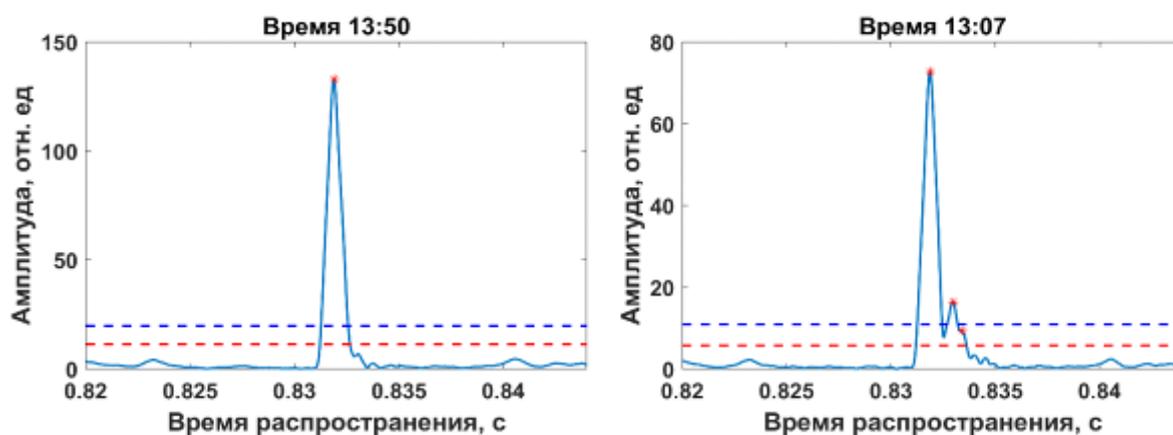


Рисунок 3.22. – Пример структуры ИХ для эксперимента 18 марта. Горизонтальными линиями отмечены уровни корреляционных шумов (синей - ортогональной последовательности, красной - шум фрагмента записи без сигнала)

Используя данные STD-зондирования и данных батиметрии, было проведено численное моделирование распространения сигналов на акустических трассах (рисунки 3.23 и 3.24). Численное моделирование выполнялось в лучевом приближении с использованием программы «RAY».

Так как на исследуемой трассе зафиксирован склон с равномерным наклоном, то для оптимизации вычислительного процесса, батиметрические параметры акустической трассы были выбраны в соответствии с глубинами в точках излучения и приема сигнала. В качестве входных батиметрических параметров выбрано полностью отражающее дно с углом наклона 0.2 градусов. Глубина в точке излучения 7 м, глубина излучателя 6 м, расстояние между излучателем и приемником 1.204 км для эксперимента 5 марта и 1.194 км для эксперимента 18 марта. Углы выхода из источника лежат в интервале $\pm 35^\circ$ для эксперимента 5 марта и $\pm 10^\circ$ для 18 марта, соответственно. Значение углов выбрано из практических соображений, для учета основной энергии в необходимом временном диапазоне.

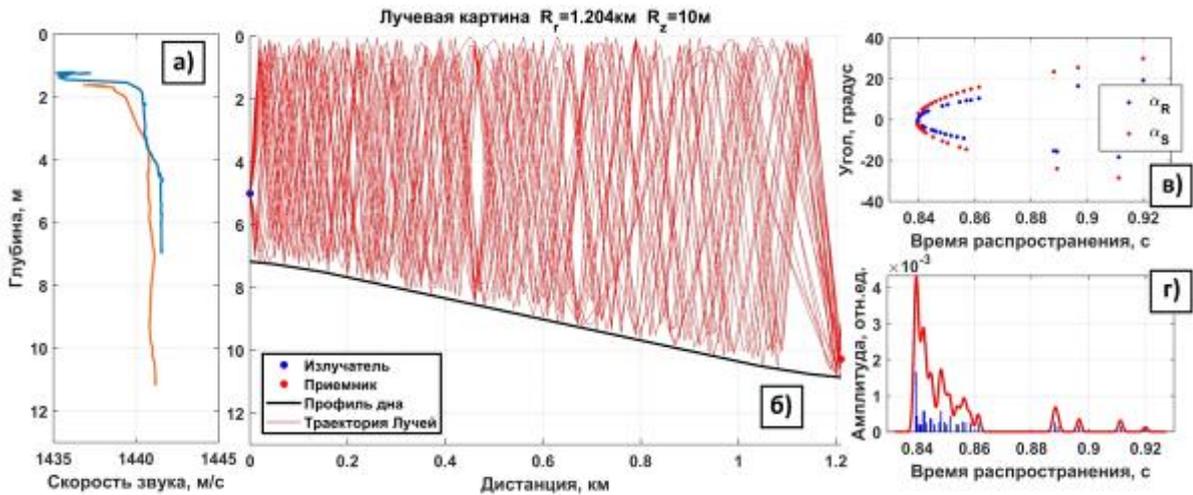


Рисунок 3.23. – Моделирование лучевых траекторий для эксперимента 5 марта. а) Вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точке приёма; б) рельеф дна и пример лучевой картины для данной акустической трассы; в) угловая структура поля в точке приёма; г) импульсная характеристика поля в точке приёма

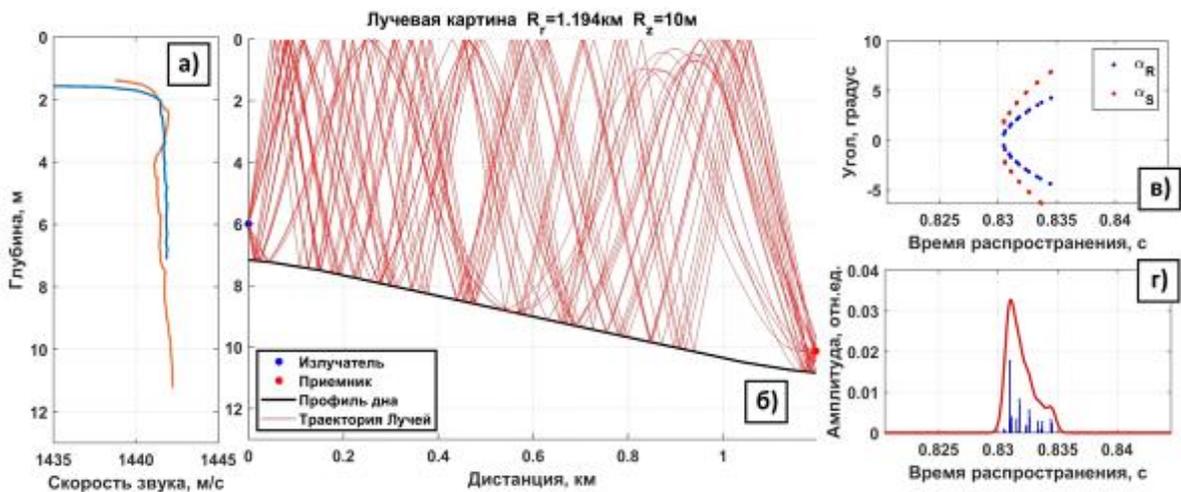


Рисунок 3.24. – Моделирование лучевых траекторий для эксперимента 18 марта. а) Вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точке приёма; б) рельеф дна и пример лучевой картины для данной акустической трассы; в) угловая структура поля в точке приёма; г) импульсная характеристика поля в точке приёма

Лучи, описывающие акустическое поле, в данных случаях можно разделить на две группы: лучи, вышедшие под углами, близкими к нулевым и лучи, распространяющиеся по всей толще волновода, неоднократно отражаясь от дна и поверхности. Так как коэффициент затухания зависит от угла падения (чем больше значение угла падения, тем выше коэффициент затухания), то лучи первой группы слабо затухают и переносят основную часть энергии сигнала. Кроме того, лучи этой группы быстрее всего доходят до приемника и формируют

первый, максимальный приход акустической энергии. Затухание второй группы лучей больше, а их вклад в регистрируемое на приемнике поле значительно меньше, так как они имеют большой угол падения и неоднократно отражаются.

На рисунке 3.25 приведено сравнение структуры смоделированных импульсных характеристик волновода с импульсными характеристиками, полученными в результате натурального эксперимента.

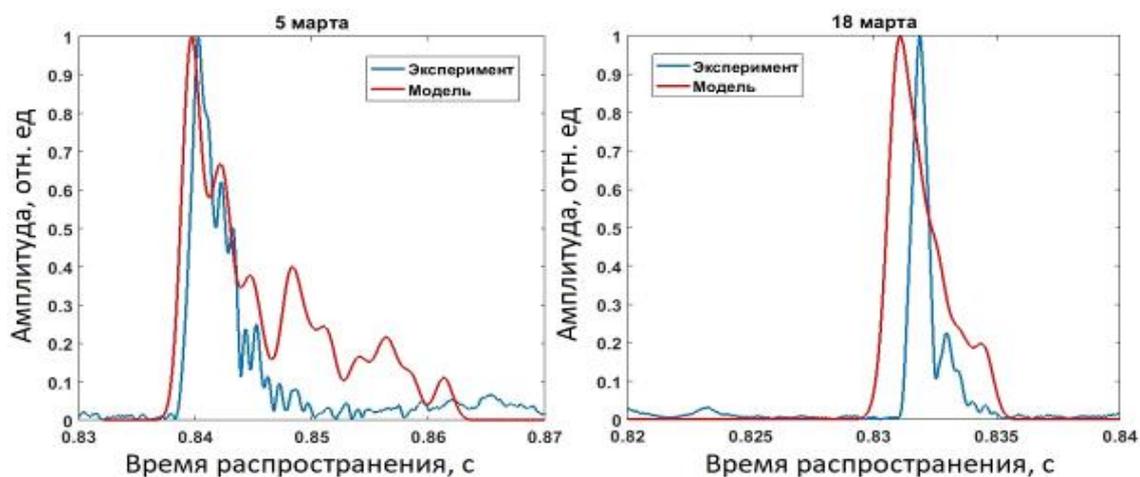


Рисунок 3.25. – Сравнение ИХ, полученных в ходе численного моделирования с ИХ, полученными в ходе эксперимента. Левая панель - 5 марта, правая – 18 марта

Полученные модельные отклики имеют схожие характеристики с полученными характеристиками экспериментально: максимальный первый приход, близкое время распространения, похожая структура. Это говорит о правильности выбора параметров модели.

На рисунке 3.26 изображены трехмерные t - z - α диаграммы в координатах: ось « x » - время распространения (t), ось « y » - горизонт приема (z), ось « z » (градации цвета) – угол выхода луча из излучателя. При моделировании t - z - α диаграмм, диапазон углов выхода был выбран одинаковым ($\pm 8^\circ$) для возможности наглядного сравнения импульсных откликов двух экспериментов во временном диапазоне максимальной концентрации акустической энергии.

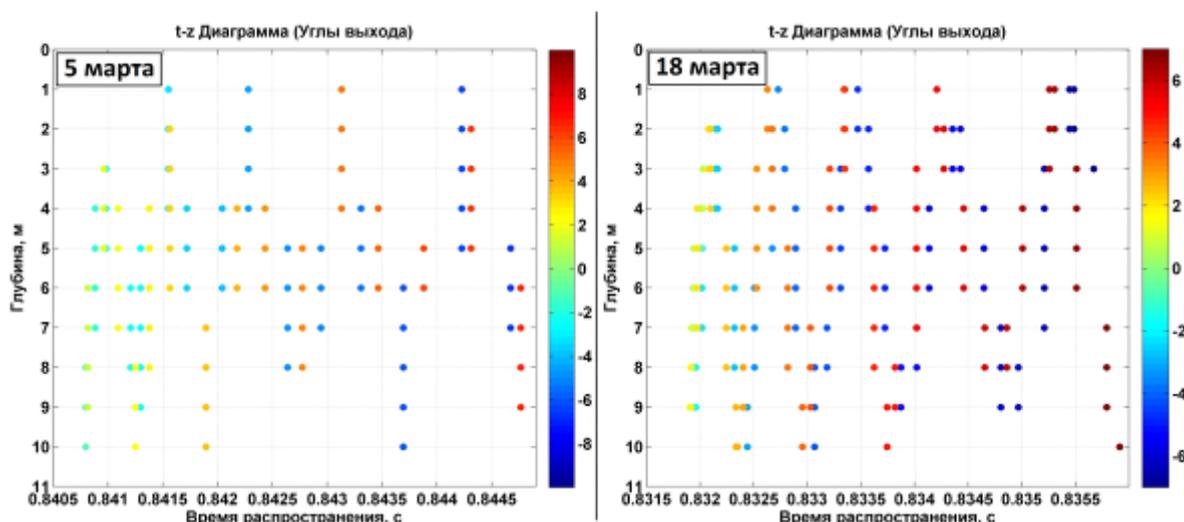


Рисунок 3.26 – трехмерные t-z- α диаграммы в координатах «время распространения - горизонт приема - угол выхода луча». Левая панель - 5 марта, правая – 18 марта

По данным модели первому максимальному приходу импульсной характеристики соответствуют углы выхода и прихода близкие к нулевым. Промоделировав его отдельно и посчитав длину его траектории, было установлено, что она отличается на 1 метр от горизонтальной дистанции (Рисунок 3.27).

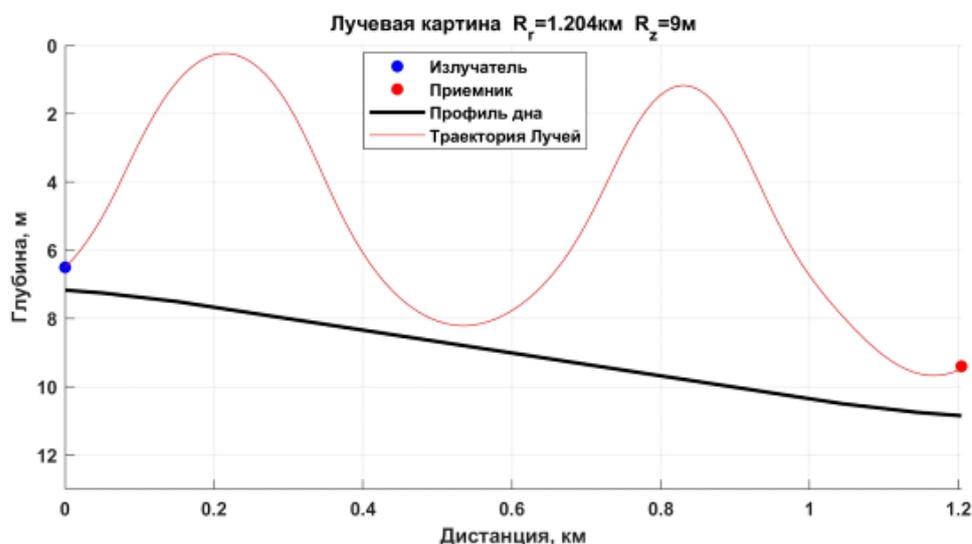


Рисунок 3.27. – Траектория луча, прошедшего по кратчайшему пути. Соответствует первому пику ИХ

Учитывая эту поправку к дистанции и полученные времена распространения, советуемые первому максимуму ИХ, были вычислены скорости распространения сигналов вдоль акустических трасс для каждого эксперимента (Рисунок 3.28).

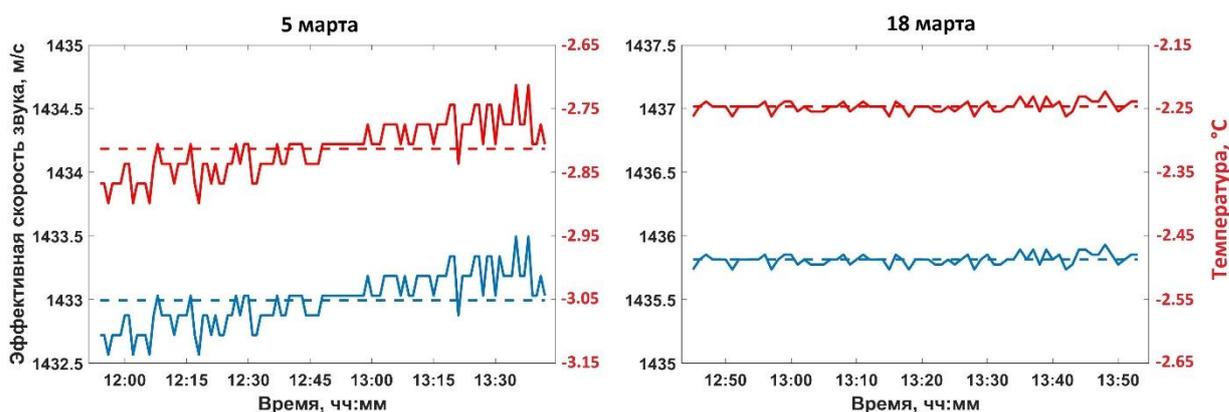


Рисунок 3.28. – Измеренные значения скоростей звука и соответствующих температур в двух экспериментах. Синяя линия – без учета поправки в 1 м. Красная линия – с учетом поправки в 1 м

Из рисунков видно, что 5 марта зафиксировано увеличение скорости звука за время измерения на 0.9 м/с, что соответствует увеличению средней температуры среды на приблизительно 0.2 °С, в то время как 18 марта скорость звука остается почти неизменной. Это свидетельствует о высокой чувствительности метода к изменчивости температурных режимов.

Среднее значение эффективной скорости звука (с учетом поправки в 1 м) 5 марта составило 1434.18 м/с. Используя значение солёности 33.7 ‰, средней глубины 4 метра и произведя перерасчет по алгоритму Чена-Миллера (1) получаем температуру -2.84 °С.

Среднее значение эффективной скорости звука (с учетом поправки в 1 м) 18 марта составило 1437.02 м/с. Используя значение солёности 33.7 ‰, средней глубины 4 метра и произведя перерасчет по алгоритму Чена-Миллера (1) получаем температуру -2.25 °С.

Полученные значения отличаются от данных STD на более чем 1 °С. Но стоит отметить, что при увеличении длины акустической трассы в эксперименте 5 марта всего на 5.1 метров, а в эксперименте 18 марта всего на 4.4 метров значения скорости звука на трассах полностью совпадают с данными STD измерений. Невязки в 5.1 и 4.4 метров вполне укладываются в погрешности приемников системы GPS (до 10 метров).

Для повышения точности можно воспользоваться приемником GPS, поддерживающим дифференциальную коррекцию. Поправки, получаемые с помощью современных высокоточных дифференциальных систем, достигают точности порядка 1 см. При необходимости и возможности использования подобных систем, описанная в работе методика позволяет добиться предельной точности в определении температуры среды.

Таким образом, в эксперименте зафиксировано:

- Показано, что с помощью методов численного моделирования можно увеличить точность определения длины акустической трассы, что влияет на эффективность температурного мониторинга на коротких акустических трассах. С увеличением дистанции необходимость предельной точности определения дистанции отпадает и можно считать распространение сигналов по прямолинейной траектории;
- обоснована и реализована уникальная система мониторинга температурных режимов зимой в Амурском заливе Японского моря. Эффективность системы обусловлена возможностью непрерывной передачи гидроакустической информации из-под льда в лабораторный корпус института на несколько километров;
- разработана и испытана методика повышения точности измерения температур путём учёта искривления лучей между источником и приемником системы на малых (несколько километров) расстояниях.

Выводы по главе

Проведены комплексные исследования особенностей формирования низкочастотных широкополосных полей в подводных звуковых каналах при решении задач позиционирования подводных объектов и акустической термометрии.

В ходе исследования, направленного на решение задач позиционирования ИГАС при их функционировании на глубинах до 1000 метров, были сформулированы следующие важные выводы:

1. Обсуждаемый эксперимент технически и методически является продолжением описанного в [9], но получен для существенно отличающихся климатических условий, обусловленных последствием мощного тайфуна на диагностируемой акватории. Это значительно расширяет возможности для совершенствования теории и практики решения подобных задач.

2. Выявлены важные для практики особенности формирования импульсного отклика волновода после воздействия мощного тайфуна, прошедшего через исследуемую акваторию. Отсутствие придонного звукового канала на шельфе (обычно формируемого в летние месяцы) из-за перемешивания воды привело к тому, что структура импульсных характеристик волновода на всех глубинах представляет собой пачку импульсов длительностью 0.5 секунды с максимальным по амплитуде импульсом, расположенным ближе к середине. При этом зафиксировано, что времена и эффективные скорости распространения максимальных импульсов приблизительно одинаковы на всех глубинах и могут эффективно применяться для

решения задач позиционирования ИГАС при их функционировании на глубинах до 1000 метров.

3. Результаты численного моделирования в лучевом приближении с использованием программы «RAY» показали, что рассчитанные эффективные скорости для каждого горизонта хорошо согласуются с эффективными скоростями, наблюдаемыми в эксперименте с точностью до 1 м/с. Очень важно, что было получено численное подтверждение расширения до 0,5 секунд импульсного отклика волновода и наличие максимального прихода в середине, полученных экспериментально. Это свидетельствует о перспективности применения программы «RAY» для моделирования и физической интерпретации процессов распространения низкочастотных акустических волн в сложных гидрологических и батиметрических условиях.

В ходе исследования, проведенного в интересах разработки методов и средств акустической термометрии для оперативного мониторинга и моделирования климатической изменчивости температурных режимов, были сформулированы следующие важные выводы:

1. Результаты тестового эксперимента продемонстрировали эффективность комплексного применения технических и вычислительных средств для повышения точности и расширения возможностей акустической термометрии в сложных волноводах.

2. Результаты акустико-гидрологического эксперимента подтвердили эффективность методических и технических подходов к практической реализации метода акустической термометрии протяженных морских акваторий. Получена и подтверждена инструментальными измерениями величина средней температуры (1.216°C с инструментальной погрешностью 0.007°C и среднеквадратичным отклонением 0.012°C) на оси ПЗК в Японском море на тысячекилометровой акустической трассе при пересечении вихревой системы.

3. Результаты проведенных исследований по акустической термометрии на трассе от побережья о-ва Сахалин до банки Кита-Ямато показывают чувствительность метода для регистрации и мониторинга крупномасштабных гидрофизических процессов, оказывающих влияние на климатическую изменчивость в Японском море. В зоне функционирования разработанной измерительной системы зафиксировано потепление трансформированных тихоокеанских вод в 2019–2022 гг. из-за смещения Полярного фронта к северу.

4. Результаты численного моделирования процесса распространения импульсных широкополосных сигналов на протяженной (свыше 1000 км) акустической трассе с использованием вычислительной программы «RAY» и данных гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO позволили выявить и классифицировать значительную по размерам (около 130 км) вихревую систему. Актуальность приведенных термометрических наблюдений связана с тем, что постоянное наличие теплого вихря в данном районе, его

размеры и заглубление могут иметь важное практическое значение для рыбохозяйственной деятельности в регионе.

В результате исследования, проведенного для оценки возможности высокоточных температурных измерений акустическими методами в зимних гидрологических условиях при наличии устойчивого ледяного покрова, была реализована и апробирована в натуральных условиях уникальная система мониторинга температурных режимов в северной части Амурского залива Японского моря. В ходе эксперимента показано, что с помощью методов численного моделирования можно увеличить точность определения длины акустической трассы, что влияет на эффективность температурного мониторинга на коротких акустических трассах. Разработана и испытана методика повышения точности измерения скорости звука (температуры) путём учёта искривления лучей между источником и приемником системы на малых (несколько километров) расстояниях.

Заключение

Основные результаты научно-квалификационной работы (диссертации) можно сформулировать следующим образом:

- Изучены основные методы исследования особенностей формирования низкочастотных широкополосных полей в подводных звуковых каналах различного происхождения.
- Проведен качественный анализ применяемых в исследовании технических и программных средств. Разработан ряд предложений по модернизации автономных цифровых регистраторов, разработанных в ТОИ ДВО РАН. Доказана эффективность применения вычислительной программы «RAY», основанной на лучевом методе моделирования акустических полей, для исследования особенностей распространения низкочастотных импульсных сигналов в сложных волноводах.
- Проведены комплексные экспериментальные исследования особенностей формирования низкочастотных широкополосных полей в подводных звуковых каналах различного происхождения при решении задач позиционирования подводных объектов и акустической термометрии морских акваторий. Выявлены важные для практики особенности формирования импульсного отклика волновода после воздействия мощного тайфуна, прошедшего через исследуемую акваторию. Исследования продемонстрировали эффективность комплексного применения технических и вычислительных средств для повышения эффективности и расширения возможностей методов акустической томографии в сложных волноводах.
- Разработана и испытана методика повышения точности измерения скорости звука (температуры) путём учёта искривления лучей между источником и приемником системы на малых (несколько километров) расстояниях. При необходимости и возможности использования современных высокоточных дифференциальных систем позиционирования, описанная в работе методика позволяет добиться предельной точности при мониторинге температурных режимов морской среды.

В результате проделанной работы были выполнены все поставленные задачи.

Список используемой литературы

1. Авилов, К.В. Разработка вычислительных моделей обнаружения подводных источников звука и их применение к оценке скрытности морских подвижных объектов / К.В. Авилов, М.Н. Волженский, Ю.Е. Глазов, Е.А. Мельникова // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2012. - №1. - С.147-157.
2. Агеев, М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др. под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2007. – 398 с.
3. Акуличев, В.А. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами / В.А. Акуличев, С.И. Каменев, Ю.Н. Моргунов // Докл. Акад. наук. - 2009. - Т.426. - №6. 821–823с.
4. Акуличев, В.А. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирование импульсной характеристики в глубоком море / В.А. Акуличев, В.В. Безответных, А.В. Буренин, Е.А. Войтенко, Ю.Н. Моргунов // Акуст.журн. - 2010. - Т.56. - №1. - С.51-52.
5. Бабий, В.И. Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане / В.Л. Бабий // Морской гидрофизический институт НАН Украины. – Севастополь, 2009. - Серия "Современные проблемы океанологии". - Выпуск № 7. – 142с.
6. Бабий, В.Л. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане / В.Л. Бабий // Гидрометеоиздат. - 1983г. - 200с.
7. Бархатов, А.Н. Акустика в задачах / А.Н. Бархатов, Н.В. Горская, А.А. Горюнов и др. / под ред. С.Н. Гурбатова и О.В. Руденко // М: Наука, Физматлит, 1996. - С.336.
8. Безответных, В.В. Экспериментальные исследования импульсной характеристики волновода японского моря с использованием псевдослучайных последовательностей в навигации подводных объектов / В.В. Безответных, А.В. Буренин, А.А. Голов, Ю.Н. Моргунов, М.С. Лебедев, П.С. Петров // Акустический журнал. - 2021. - Т.67. №3. - 291-297с.
9. Безответных, В.В. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море / В.В. Безответных, А.В. Буренин, Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка // Акуст. журн. - 2009. - Т.55. - №3. - 374-380с.
10. Богородский, В.В. Подводные электроакустические преобразователи (Расчет и проектирование) / В.В. Богородский, Е.А. Корепин, В.И. Якушев // Ленинград: Судостроение. - 1983. - 248с.
11. Бреховских, Л.М. Теоретические основы акустики океана / Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов // М: Наука, 2007. - С.370.
12. Бурдинский, И.Н. Анализатор статистических данных для оценки характеристик гидроакустического канала передачи / И.Н. Бурдинский, И.В. Карабанов, М.А. Линник, А.С.

Миронов, Ф.В. Безручко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614179. – 2010.

13. Бурдинский, И.Н. Модель информационного обмена подводного робота с обеспечивающим судном / И.Н. Бурдинский, И.В. Карабанов, М.А. Линник, А.С. Миронов, Ф.В. Безручко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010616220. – 2010.

14. Бурдинский, И.Н. Моделирование работы приемопередатчика высокоскоростной гидроакустической системы связи / И.Н. Бурдинский, М.А. Линник // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий : Материалы X Всероссийской научно-технической конференции : в 2 ч. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2009. – Ч.1. – С.158–163.

15. Бурдинский, И.Н. Принципы функционирования и источники ошибок гидроакустических систем позиционирования / И.Н. Бурдинский // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2009. – № 3(14). – С.47–54.

16. Бурдинский, И.Н. Программный комплекс для определения энергетических параметров канала связи / И.Н. Бурдинский, И.В. Карабанов, М.А. Линник, А.С. Миронов, Ф.В. Безручко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614177. – 2010.

17. Бурдинский, И.Н. Программный модуль для анализа эффективности использования высокочастотных гидроакустических сигналов / И. Н. Бурдинский, И. В. Карабанов, М. А. Линник, А. С. Миронов, Ф. В. Безручко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615907. – 2012.

18. Буренин, А.В. Особенности формирования эффекта акустического «оползня» для дальнего распространения звука из шельфа в глубокое море / А.В. Буренин, С.С. Шкрамада, Ю.Н. Моргунов // Подводные исследования и робототехника. - 2022. - №1(39). - 51-57с.

19. Буренин, А.В. Экспериментальные исследования особенностей применения векторных приемников в задачах томографии океана / А.В. Буренин, Ю.Н. Моргунов, Д.С. Стробыкин // 2007. Акуст. журнал. Т. 53. №6. С.786-790.

20. Буренин, А.В. Экспериментальное тестирование вычислительной программы «RAY» для решения задач акустической дальнометрии на протяженных трассах, включающих шельф и глубокое море / А.В. Буренин, М.С. Лебедев, В.В. Разживин, С.С. Шкрамада, Ю.Н. Моргунов // Акустический журнал. - 2023. - №5(69). - 509–514с.

21. Вакман, Д.Е. Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации. / Д.Е. Вакман // М.: Сов. радио, 1965. – 303с.
22. Варакин, Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. / Л.Е. Варакин // М.: Радио и связь, 1985. – 384с.
23. Велес, Д.Х. Методы и устройства унифицированной обработки связных и навигационных сигналов в малогабаритных спутниковых станциях: автореф... дис. канд. техн. наук. / Д.Х. Велес. – Москва: Московский энергетический университет, 2006.
24. Гантмахер, В.Е. Шумоподобные сигналы анализ синтез обработка / В.Е. Гантмахер, Н.Е.Быстров, Д.В. Чеботарев // – СПб.: Наука и техника, 2005. – 400с.
25. Глушков, А. Разработка и исследование быстрых цифровых алгоритмов обнаружения и демодуляции узкополосных сигналов: автореф... дис. канд. техн. наук./ А. Глушков. – Воронеж: Воронежский институт МВД РФ, 2006.
26. ГСССД 117-88. Таблицы стандартов данных. Вода. Скорость звука при температурах 0 – 100 0С и давлениях 0.101325 – 100 МПа // М.: Изд-во стандартов, 1989
27. Дзюин, С.В. Использование тестовых фазоманипулированных шумоподобных сигналов в системах защиты информации / С.В. Дзюин, К.В.Мухин // Доклады ТУСУРа. – 2008. – № 2(18). – С.7–8.
28. Ильичев, В.И. Статистическая теория обнаружения гидроакустических сигналов. / В.И. Ильичев, А.Я. Калюжный, Л.Г. Красный, В.Ю. Лапий // М.: Наука, 1992. – 415с.
29. Измерители скорости звука SVP-70, SVP-71 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://all-pribors.ru/opisanie/64976-16-svp-70-svp-71-74524/>.
30. Измеритель скорости звука в воде [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://bastion-karpenko.ru/corvette-mg-543em-05/>.
31. Измеритель скорости звука в воде МГ-543ЭМ [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.oceanpribor.ru/text/44.htm/>.
32. Ипатов, В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / В.П. Ипатов // М.: Техносфера, 2007. – 488с.
33. Карabanов, И.В. Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов: монография / И.В. Карabanов, А.С. Миронов // Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. – 140с.
34. Келлер, Дж. Распространение волн и подводная акустика / Под ред. Дж. Келлера и Дж. Пападакиса. Пер. с англ. / Под ред. Л.М. Бреховских. // М.: Мир, 1980. - С.180.
35. Корякин, Ю.А. Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы. / Ю.А. Корякин, С.А. Смирнов, Г.В. Яковлев // СПб.: Наука, 2004. – 410с.

36. Кошмогоров, В.С. Методы обработки гидроакустических сигналов, принимаемых в зоне Френсля приемных и излучающих систем: дис. ... д-ра техн. наук. / В.С. Кошмогоров. – Владивосток, 2010. – 271с.
37. Макаров, А. И. Передача информации в гидроакустическом канале / А.И. Макаров, В.Д. Дворников, В.К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2004. – № 2. – С. 103–118.
38. Мили, П. Подводные инженерные исследования / П. Мили; пер.с. англ. М.Г. Жиббаева, А.Д. Старкова // – Л.: Судостроение, 1984.
39. Моргунов, Ю.Н. Исследование влияния гидрологических условий на распространение акустических сигналов из шельфа в глубокое море / Ю.Н. Моргунов, В.В. Безответных, А.В. Буренин, Е.А. Войтенко // - Акуст.журн. - 2016. - Т. 62. - №3. - С.341-347.
40. Моргунов, Ю.Н. Исследования пространственно-временной структуры акустического поля, формируемого в глубоком море источником широкополосных импульсных сигналов, расположенным на шельфе Японского моря / Ю.Н. Моргунов, А.А. Голов, А.В. Буренин, П.С. Петров // Акуст.журн. - 2019. - Т.65. - № 5. - С.641-649.
41. Моргунов, Ю.Н. Экспериментальное тестирование акустической термометрии в масштабе Японского моря с размещением приемной системы на оси подводного звукового канала / Ю.Н. Моргунов, А.А. Голов, Е.А. Войтенко, М.С. Лебедев, В.В. Разживин, Д.Д. Каплуненко, С.С. Шкрамада // Акустический журнал. - 2023. - №5(69). - 655–663с.
42. Мосолов, С.С. Некоторые аспекты и перспективы применения сложных сигналов в гидроакустике / С.С. Мосолов, А.В. Скиаря, Е.В. Тутынин // Материалы IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», 29 ноября – 3 декабря, 2010г.– ИРЭ РАН, 2010г. – С.170–174.
43. ОЛИМЕКСИНО-STM32 (OLIMEXINO-STM32 development board) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.infinite-electronic.ru/datasheet/62-OLIMEXINO-STM32.pdf/>.
44. Петров, П.С. Экспериментальное и теоретическое исследование времен прихода и эффективных скоростей при дальнем распространении импульсных акустических сигналов вдоль кромки шельфа в мелком море / П.С. Петров, А.А. Голов, В.В. Безответных, А.В. Буренин, С.Б. Козицкий, М.А. Сорокин, Ю.Н. Моргунов // Акуст. журн. - 2020. - Т.66. - №1. - 20–33с.
45. Половинка, Ю.А. Метод и программа для мониторинга параметров водной среды в мелководных акваториях по данным акустического зондирования / Ю.А. Половинка, А.А. Азаров, М.С. Лебедев // Подводные исследования и робототехника. - 2012. - №1. - С.57-67.
46. Римский-Корсаков, А.В. Акустические подводные низкочастотные излучатели. / А.В. Римский-Корсаков, В.С. Ямщиков, В.И. Жулин, В.И. Рехтман / Научный редактор: Е.А. Корепин // Ленинград: Судостроение. - 184с.

47. Тагильцев, А.А. Измеритель скорости звука / А.А. Тагильцев, М.Ю. Черанев, С.С. Шкрамада // Сборник Трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2022. - С.701-707.
48. Тагильцев, А.А. Экспериментальное тестирование распределенной вертикальной автономной приемной системы / А.А.Тагильцев, В.В. Безответных, Ю.Н. Моргунов, Д.С. Стробыкин // Подводные исследования и робототехника. - 2019. - № 2 (28). - С.47-53.
49. Урик, Р. Д. Основы гидроакустики / Роберт Дж. Урик; пер. с англ. Н. М. Гусева [и др.]. // Ленинград : Судостроение, 1978. – (Библиотека инженера-акустика). - 445 с.
50. Цифровые датчики кавитации и гидрофоны [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://zetlab.com/product-category/tsifrovyie-datchiki/tsifrovyie-datchiki-i-izmeritelnyie-moduli/tsifroviye-datchiki-kavitacii/>.
51. Черанев, М.Ю. Цифровой гидрофон / М.Ю. Черанев, Р.А. Гончаров, Г.П. Швецов, С.С. Шкрамада // Физика геосфер: материалы докладов XII Всероссийского симпозиума. 6-10 сентября 2021 г., Владивосток, Россия. - Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2021. - С.125-126.
52. Шкрамада, С.С. Автономные цифровые гидроакустические регистраторы / С.С. Шкрамада, М.Ю. Черанев // Океанологические исследования: материалы IX конференции молодых ученых. 29-30 апреля 2021 г., Владивосток, Россия. - Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2021. - С.201-204.
53. Шкрамада, С.С. Исследование структуры акустического поля на основе гидроакустического эксперимента в Японском море / С.С. Шкрамада, Ю.Н. Моргунов, А.В. Буренин // Акустический журнал. — 2024. — Т.70. - № S5. — С.14.
54. Шкрамада, С.С. Численное моделирование распространения сложных акустических сигналов для решения задач термометрии и дальнометрии / С.С. Шкрамада // Сборник тезисов докладов V Международной научной конференции «Наука будущего» и VIII Всероссийского молодежного научного форума «Наука будущего – Наука молодых» – Орел, 2023г. – С.272.
55. Захаров, Н.В. Перспективные подводные робото-технические системы и сферы их применения / Н.В. Захаров, В.А. Капустин // Морская биржа. – 2008. – № 1. – С. 66–69.
56. Бреховских, Л.М. Теоретические основы акустики океана. / Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов // М.: Наука, 2007. - 370 с.
57. Baggeroer, A. Acoustic telemetry - An overview / A. Baggeroer // IEEE Journal of Oceanic Engineering, Massachusetts Institute of Technology. – 1984. – № 9. – P. 229–235.
58. Baggeroer, A.B. Ocean climate change: Comparison of acoustic tomography, satellite altimetry, and modeling / A.B. Baggeroer, T.G. Birdsall, C. Clark, J.A. Colosi, B.D. Cornuelle, D. Costa, B.D. Dushaw, M. Dzieciuch, A.M.G. Forbes, C. Hill, B.M. Howe, J. Marshall, D. Menemenlis, J.A. Mercer,

- K. Metzger, W. Munk, R.C. Spindel, D. Stammer, P.F. Worcester, C. Wunsch // ATOC Consortium. - 1998. - Science.281. - 1327–1332pp.
59. Berg, O. Spread Spectrum in Mobile Communication / O. Berg and at el. // London: IEE, 1998. – 445p.
60. Bowlin, J.B. Generating eigenray tubes from two solutions of the wave equation / J.B. Bowlin // J. Acoust. Soc. Am. - 1991. - Vol.89. - 2663-2669pp.
61. Bowlin, J.B. Ocean acoustical ray-tracing software RAY / J.B. Bowlin, J.L. Spiesberger, T.F. Duda, L.E. Freitag // Woods Hole Oceanographic Technical Report, WHOI-93-10. - 1993.
62. Brekhovskikh, L.M. Fundamentals of Ocean Acoustics. / L.M. Brekhovskikh, Y.P. Lysanov // – Third Edition. – Springer, 2003. – P.293.
63. Britenkov, A.K. Comparison and analysis of electroacoustic characteristics of high power density compact low frequency hydroacoustic transducers / A.K. Britenkov, V.A. Farfel, B.N. Bogolyubov // [CrossRef] Appl. Phys. - 2021. - №3. - 72–77pp.
64. Brown, M.G. Long-range acoustic transmission in the Northwest Atlantic / M.G. Brown, W.H. Munk, J.L. Spiesberger, P.F. Worcester // J. Geophys. Res. - 1980. - Vol.85. - 2699-2703pp.
65. Buchal, R.N. Boundary layer problems in diffraction theory / R.N. Buchal, J.B. Keller // Commun. Pure Appl. Math. - 1960. - Vol.13. - 85-114pp.
66. Chen, C.-T. Speed of sound in seawater at high pressures / C.-T. Chen, F.J. Millero // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1977. – Vol. 62 , Iss. 5. – P. 1129-1135.
67. Dolgikh, G. Analysis of Deep-Sea Acoustic Ranging Features for Enhancing Measurement Capabilities in the Study of the Marine Environment / G.I. Dolgikh, Yu.N. Morgunov, A.A. Golov, A.V. Burenin, S.S. Shkramada // Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — Vol. 12, Iss. 12. — Art.no. 2365.
68. Dolgikh, G. Methodology for the Practical Implementation of Monitoring Temperature Conditions over Vast Sea Areas Using Acoustic Thermometry / G. Dolgikh, Y. Morgunov, A. Burenin, V. Bezotvetnykh, V. Luchin, A. Golov, A. Tagiltsev // J. Mar. Sci. Eng. - 2023. - V.11. - P.137.
69. Dolgikh, G. Pilot Acoustic Tomography Experiment in the Sea of Japan at 1073 km Distance / G. Dolgikh, Yu. Morgunov, A. Golov, V. Bezotvetnykh, E. Voytenko, M. Lebedev, V. Razzhivin, D. Kaplunenko, A. Tagiltsev, S. Shkramada // Switzerland. MDPI. Journal of Marine Science and Engineering. - 2023. - T.11. - №7. - Art.no.1325
70. Duda, T.F. Measured wavefront fluctuations in 1000-km pulse propagation in the Pacific Ocean / T.F. Duda et al. // J. Acoust. Soc. Am. - 1992. - Vol.92. - 939-955pp.
71. Feynman, R.P. The Feynman Lectures in Physics / R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands // Reading, MA: Addison-Wesley, 1965.

72. Fofonoff, N.P. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater / N.P. Fofonoff, R.C. Millard Jr // UNESCO Technical Papers in Marine Sciences. – 1983. - Iss. 44. - P. 53.
73. George, S.K. Wong. Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure / S.K. Wong George, Zhu Shi-ming // Journal of the Acoustical Society of America. – 1995-03-01. – Vol. 97, iss. 3. – P. 1732 – 1736.
74. Glisic, S.G. Adaptive WCDMA: Theory and Practice / S.G. Glisic // Wiley, 2003. – 640p.
75. Gurvan, M. NEMO Ocean engine / M. Gurvan, R. Bourdalle-Badie, Chanut J. Jerome et al. // Scientific Notes of IPSL Climate Modelling Center. - 2017. - V.27.
76. Howe, B.M. Instrumentation for the Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC) prototype Pacific Ocean network / B.M. Howe, S.G. Anderson, A.B. Baggeroer, J.A. Colosi, K.R. Hardy, D. Horwitt, F.W. Karig, S. Leach, J.A. Mercer, K. Metzger, Jr. L.O. Olson, D.A. Peckham, D.A. Reddaway, R.R. Ryan, R.P. Stein, J.D. Watson, S.L. Weslander, P.F. Worcester // OCEANS'95 Conference Proceedings, San Diego, CA, 9–12 October 1995. - 1483–1500pp.
77. Ipatov, V.P. Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications / V.P. Ipatov // – John Willy & Sons Ltd, 2004. – 398p.
78. Kaneko, A. Coastal acoustic tomography / A. Kaneko, X.H. Zhu, J. Lin // Coast. Acoust. Tomogr. - 2020. - 1–362pp.
79. Karney, Ch.F.F. Algorithms for geodesics / Ch.F.F. Karney // J. Geod. - 2013. - V.87. - 43–55pp.
80. Kasam, T. Weight Distribution Formula for Some Class of Cyclic Codes / T. Kasam // Tech. Report No. R-285, Univ. of Illinois, 1966. – 29p.
81. Leroy, C.C. A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans / C.C. Leroy, S.P. Robinson, M.J. Goldsmith // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2008. - Vol.124. - Iss.5. - P.2774–2782.
82. Meel, Ir. J. Spread Spectrum – Introduction and Application. / Ir. J. Meel // Sirius Communication, 1999. – 33p.
83. Pederson, M.A. Acoustic intensity anomalies introduced by constant velocity gradients / M.A. Pederson // J. Acoust. Soc. Am. - 1961. - Vol. 33. - 465-474pp.
84. Proakis, John G. Wiley Encyclopedia of Telecommunications. Volume 1 / ed. John G. Proakis // John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 630p.
85. Schafer, W. Narrowband and Broadband Discrimination with a Spectrum Analyzer or EMI Reciver / W. Schafer // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Portland, 2006. EMC 2006. – Vol. 2. – P. 249–255.
86. Schulze, H. Theory and Applications of OFDM and CDMA / H. Schulze, C. Lueders // Wideband Wireless Communications. – 1st edition. – Wiley, 2005. – 420p.

87. Sparrock, R.C. Stability of time fronts on a large vertical array at long range in the ocean: M.S. Thesis / R.C. Sparrock // University of California, San Diego, 1990.
88. Spiesberger, J. L. Kaneohe acoustic thermometer further validated with rays over 3700 km and the demise of the idea of axially trapped energy / J.L. Spiesberger, F.D. Tappert // Journal of the Acoustical Society of America. – 1996. – V.99. – I.1. – P.173.
89. Spiesberger, J. Basin-scale tomography: A new tool for studying weather and climate / J.L. Spiesberger, K. Metzger // J. Geophys. Res. - 1991. - Vol.96. - 4869–4889pp.
90. Tappert, F.D. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source / F.D. Tappert, J.L. Spiesberger, M.A. Wolfson // Journal of the Acoustical Society of America. – 2002. – V.111. – №2. – P.757.
91. UNESCO. 1981. The practical salinity scale 1978 and international equation of State Seawater 1980 // Techn. Pap. mar. sci. – 36–25pp.
92. Welch, L. Lower Bounds on the Maximum Cross Correlation of Signals / L. Welch // IEEE Trans. on Info. Theory, 1974. – №6. – P.397–399.
93. Worcester, P.F. A test of basin-scale acoustic thermometry using a large-aperture vertical array at 3250-km range in the eastern North Pacific Ocean / P.F. Worcester, B.D. Cornuelle, M.A. Dzieciuch, W.H. Munk, B.M. Howe, J.A. Mercer, R.C. Spindel, K. Metzger, T.G. Birdsall // J. Acoust. Soc. Am. - 1999. - V.105. - №6. - 3185–3201pp.
94. Zehntner, C. Digital communication and multipath propagation / C. Zehntner, C. Party, M. Maier // RTO MP-26, 1999. – 6p.

Приложение А

Коэффициенты формулы ЮНЕСКО

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
C_{00}	1402,388	A_{02}	$7,166 \cdot 10^{-5}$
C_{01}	5,03830	A_{03}	$2,008 \cdot 10^{-6}$
C_{02}	$-5,81090 \cdot 10^{-2}$	A_{04}	$-3,21 \cdot 10^{-8}$
C_{03}	$3,3432 \cdot 10^{-4}$	A_{10}	$9,4742 \cdot 10^{-5}$
C_{04}	$-1,47797 \cdot 10^{-6}$	A_{11}	$-1,2583 \cdot 10^{-5}$
C_{05}	$3,1419 \cdot 10^{-9}$	A_{12}	$-6,4928 \cdot 10^{-8}$
C_{10}	0,153563	A_{13}	$1,0515 \cdot 10^{-8}$
C_{11}	$6,8999 \cdot 10^{-4}$	A_{14}	$-2,0142 \cdot 10^{-10}$
C_{12}	$-8,1829 \cdot 10^{-6}$	A_{20}	$-3,9064 \cdot 10^{-7}$
C_{13}	$1,3632 \cdot 10^{-7}$	A_{21}	$9,1061 \cdot 10^{-9}$
C_{14}	$-6,1260 \cdot 10^{-10}$	A_{22}	$-1,6009 \cdot 10^{-10}$
C_{20}	$3,1260 \cdot 10^{-5}$	A_{23}	$7,994 \cdot 10^{-12}$
C_{21}	$-1,7111 \cdot 10^{-6}$	A_{30}	$1,100 \cdot 10^{-10}$
C_{22}	$2,5986 \cdot 10^{-8}$	A_{31}	$6,651 \cdot 10^{-12}$
C_{23}	$-2,5353 \cdot 10^{-10}$	A_{32}	$-3,391 \cdot 10^{-13}$
C_{24}	$1,0415 \cdot 10^{-12}$	B_{00}	$-1,922 \cdot 10^{-2}$
C_{30}	$-9,7729 \cdot 10^{-9}$	B_{01}	$-4,42 \cdot 10^{-5}$
C_{31}	$3,8513 \cdot 10^{-10}$	B_{10}	$7,3637 \cdot 10^{-5}$
C_{32}	$-2,3654 \cdot 10^{-12}$	B_{11}	$1,7950 \cdot 10^{-7}$
A_{00}	1,389	D_{00}	$1,727 \cdot 10^{-3}$
A_{01}	$-1,262 \cdot 10^{-2}$	D_{10}	$-7,9836 \cdot 10^{-6}$

Приложение Б

Уравнения движения для луча в неоднородной среде могут быть выведены с помощью применения вариационного исчисления из принципа наименьшего времени (принципа Ферма), который Фейнман сформулировал следующим образом: «... луч, движущийся по определённому пути, обладает тем свойством, что если мы внесём малое изменение ... в луч любым способом, ... то не произойдёт изменения времени в первом порядке.» [71]. Математически эта идея выражается равенством нулю вариации времени:

$$\delta T = \delta \int dt = 0,$$

где интеграл в правой части берётся по пути луча с фиксированными пределами интегрирования, а δ — любая (дифференцируемая) вариация пути, которая оставляет конечные точки фиксированными. Чтобы найти путь, преобразуем интеграл по dt в интеграл по длине пути ds , используя показатель преломления $n = \frac{dt}{ds} = 1/c$. Тогда:

$$\delta T = \delta \int n ds.$$

Длину пути можно выразить через декартовы координаты x_i как $ds = (dx_i dx_i)^{1/2}$, где использовано правило Эйнштейна о суммировании по повторяющимся индексам. Вариация этого уравнения даёт:

$$\delta ds = dx_i \delta dx_i ds^{-1} = \dot{x}_i \delta dx_i = \dot{x}_i \delta d\dot{x}_i ds,$$

где точка над величиной обозначает полную производную этой величины по s . Вариацию времени можно записать как:

$$\delta T = \int (\delta n + n \dot{x}_i \delta \dot{x}_i) ds = \int (\delta x_i \partial_i n + n \dot{x}_i \delta \dot{x}_i) ds.$$

Первый член подынтегрального выражения представляет изменение времени из-за изменения показателя преломления на новом пути. Второй член отражает изменение времени из-за изменения длины пути. Зависимость от $\delta \dot{x}_i$ устраняется с помощью соотношения:

$$\frac{d}{ds} (n \dot{x}_i \delta x_i) = \delta x_i \frac{d}{ds} (n \dot{x}_i) + n \dot{x}_i \delta \dot{x}_i,$$

а также интегрирования второго члена по частям. В результате получаем:

$$\delta T = \int \delta x_i (\partial_i n - \frac{d}{ds} (n \dot{x}_i)) ds.$$

Член с полной производной исчезает из-за предположения, что вариация δx_i равна нулю на пределах интегрирования. Уравнения движения можно получить, потребовав, чтобы это выражение для вариации времени обращалось в ноль для любого набора вариаций δx_i . Это возможно только если член, умножающий вариацию, равен нулю вдоль всего пути интегрирования. Приравнивая его к нулю, получаем уравнения движения для луча:

$$\frac{d}{ds} (n \dot{x}_i) = \partial_i n.$$

Это можно переписать в более наглядной форме:

$$\ddot{x}_i = \frac{\partial_i n}{n} - \dot{x}_i \left(\dot{x}_j \frac{\partial_j n}{n} \right).$$

Компоненты \dot{x}_i образуют единичный вектор, направленный вдоль луча. Второй член справа — это проекция $\nabla n/n$ на направление \dot{x} . Таким образом, \ddot{x} равна той части $\nabla n/n$, которая перпендикулярна пути луча.

Для приведения этих уравнений к форме, удобной для численных расчётов (односторонних), определим горизонтальную ось r и вертикальную ось z , где θ — угол луча относительно горизонтали. Тогда $\dot{x} = \hat{r} \cos \theta + \hat{z} \sin \theta$, и уравнения движения принимают вид:

$$n(-\hat{r} \sin \theta + \hat{z} \cos \theta) \frac{d\theta}{ds} = \hat{r} \partial_r n + \hat{z} \partial_z n - (\hat{r} \cos \theta + \hat{z} \sin \theta) (\cos \theta \partial_r n + \sin \theta \partial_z n).$$

r -компонента этого уравнения даёт выражение для $d\theta/ds$:

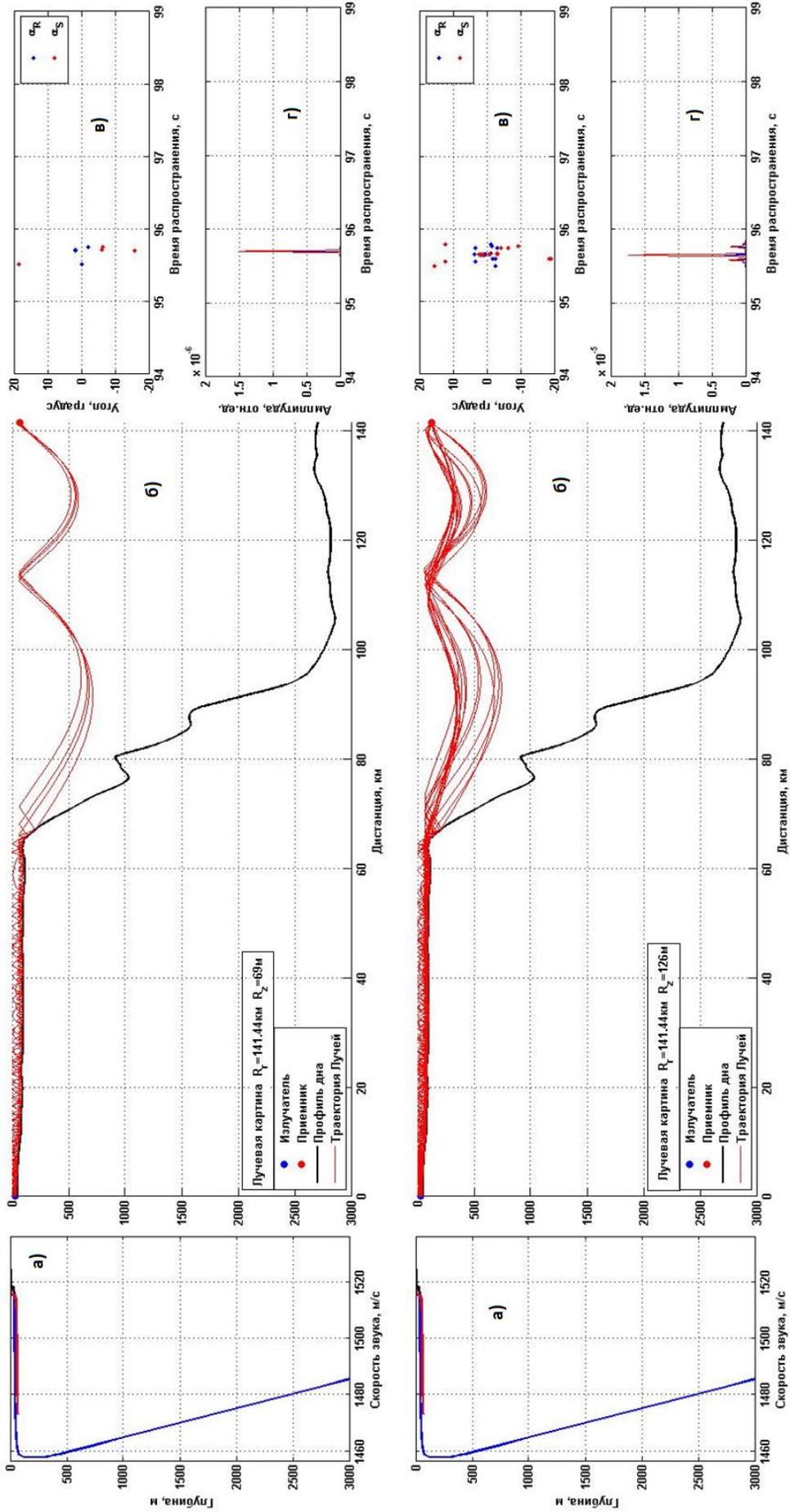
$$n \frac{d\theta}{ds} = \partial_r n \sin \theta - \partial_z n \cos \theta.$$

Простая геометрия позволяет записать $\frac{d\theta}{ds} = \frac{\cos \theta d\theta}{dr}$ и $\frac{\partial n}{n} = -\frac{\partial c}{c}$. Окончательно:

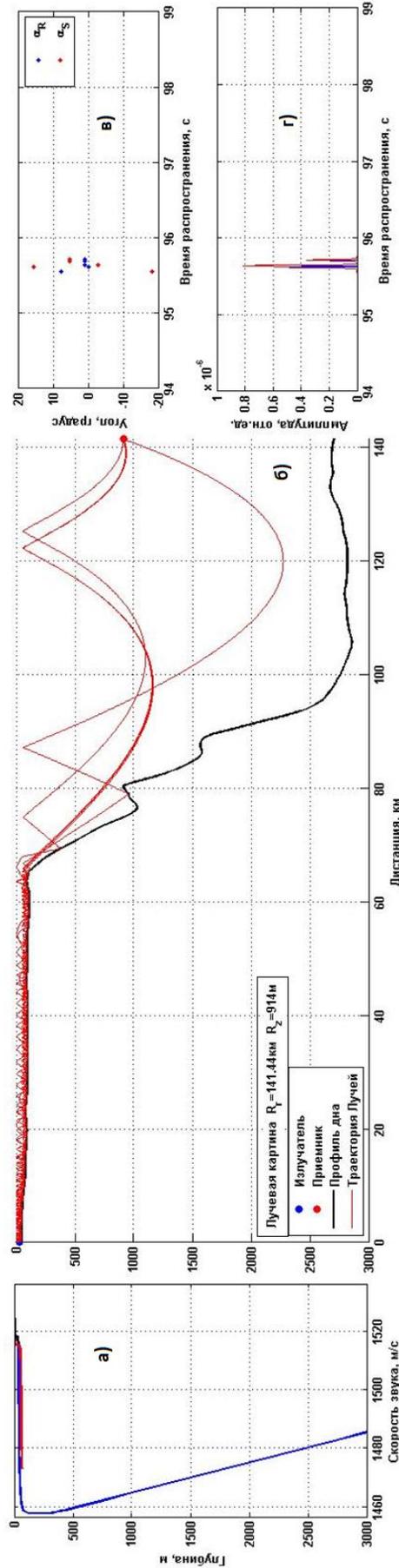
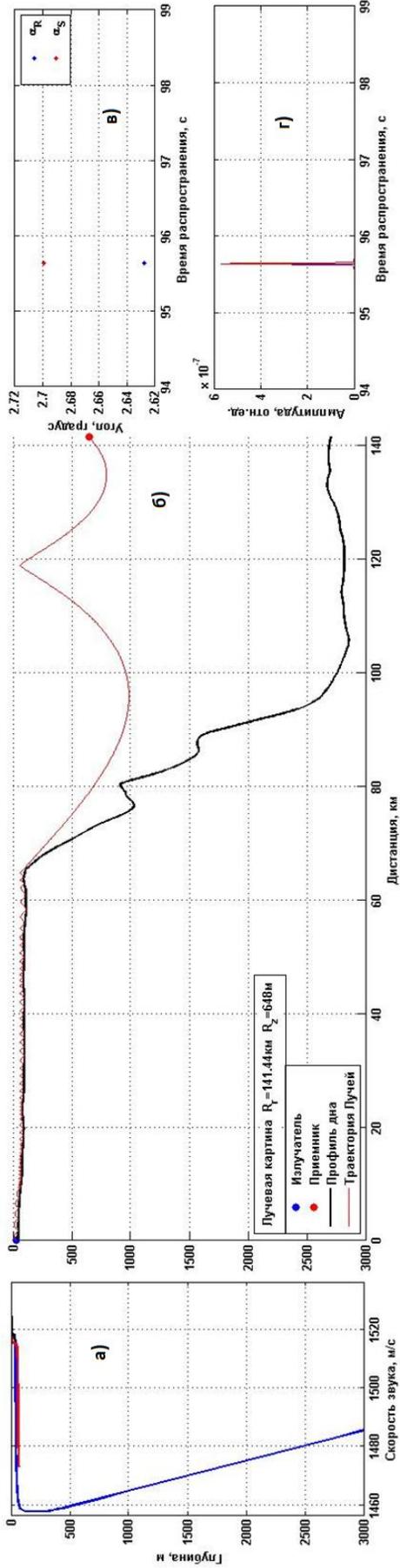
$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{\partial_r c}{c} \tan \theta - \frac{\partial_z c}{c}.$$

Остальные два уравнения движения, приведённые в основном тексте работы, следуют из определения θ и простых геометрических соотношений.

Приложение В



Результаты численного моделирования: а) вертикальные распределения скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (синяя, красная и зеленая кривая); б) рельеф дна и лучевая картина распространения собственных лучей; в) угловая структура поля в точке приема (красные точки углы выхода из излучателя, синие – углы входа в приемник); г) импульсная характеристика волновода в точке приема.



Результаты численного моделирования: а) вертикальные распределения скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (синяя, красная и зеленая кривая); б) рельеф дна и лучевая картина распространения собственных лучей; в) угловая структура поля в точке приема (красные точки углы выхода из излучателя, синие – углы входа в приемник); г) импульсная характеристика волновода в точке приема.