

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»

**Научный доклад
об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы (диссертации)**

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

Владивосток – 2025

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

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 и представлялись на научных мероприятиях, включая авторитетные всероссийские и международные конференции, такие как: XII Всероссийский симпозиум «Физика геосфер» (г. Владивосток, 2021 [A6]), IX конференция молодых ученых «Океанологические исследования» (г. Владивосток, 2021 [A7]), Всероссийская научная конференция «XXXIV сессия Российского акустического общества» (г. Москва, 2022 [A5]), V Международная научная конференция «Наука будущего» и VIII Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего – Наука молодых» (г. Орел, 2023 [A10]), X конференция молодых учёных «Океанологические исследования» (г. Владивосток, 2023 [A8]) Всероссийская научная конференции «XXXVI сессия Российского акустического общества» (г. Москва, 2024 [A9]).

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в натурных экспериментах, моделировал распространение акустической энергии в лучевом приближении с помощью программы «RAY», 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.

Структура и объем научно-квалификационной работы

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Общий объем НКР 108 страниц, из них 71 страница текста, 44 рисунка, 6 таблиц и 3 приложения. Список литературы включает 94 наименований на 8 страницах.

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.

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

1.1. Основные принципы распространения звука в морской среде

Наиболее широко применяемым уравнением для нахождения скорости звука является формула Чена-Миллера, разработанная в 1977 году и доработанная в последующих исследованиях [28]. Эта формула выражает скорость звука $c(T, S, P)$ как функцию температуры (T , °C, в диапазоне от 0°C до 40°C), солёности (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 [31]. В 1995 году, после принятия международной температурной шкалы 1990 года, коэффициенты морской среды были уточнены. Конечная форма формулы ЮНЕСКО имеет следующий вид [32]:

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

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

Погрешность этой формулы в открытом океане не превышает 0.5 м/с, что подтверждено экспериментально.

Практическое применение этого уравнения реализуется в получении с помощью STD-зондов актуальной гидрологической картины. Данные температуры, солёности 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 [18].

Итак, скорость звука в воде определяется сложным взаимодействием температуры, солёности 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.

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 [20].

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:

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

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 [20]:

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

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 [7].

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:

$$\cos \theta_{\text{кр}} = \frac{C_{\text{min}}}{C_0}, \quad (4)$$

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, 15, 16]. Суть этого явления заключается в захвате энергии сигнала волноводом, включающем шельфовую зону, континентальный склон и глубокое море [39]. Впервые идея захвата акустической энергии сигнала при описанных условиях распространения была предположена в работе [38]. Подробное описание механизма возникновения данного эффекта и детальное описание результатов численного моделирования натурного эксперимента [38], полученных с помощью акустической модели параболического уравнения в университете Майами (UMPE) [10], были приведены в статье Тапперта и др. [39]. 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: является устойчивым к неровностям дна; концентрирует большую часть акустической энергии около оси ПЗК, что позволяет передавать сигнал на огромные расстояния; способствует малому времени затягивания сигнала; 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, 21] 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.

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 [21].

Согласно работе [22], 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 [9, 11]: 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.

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. Далее 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, при этом 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. При этом

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.

Как следует из формулы (5), точность определения расстояния и координат напрямую зависит от точности измерения времени прихода сигнала. Исследование [25] демонстрирует: пропорциональную зависимость между погрешностью измерения времени δ_t и погрешностью определения расстояния δ_r , а также то, что наибольшая точность достигается при малых значениях δ_t .

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 и создания гибридных систем, сочетающих преимущества разных частотных диапазонов.

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 [12], 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 [13, 14].

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 М-последовательностями сложных сигналов при исследовании акустических полей в океане

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.

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.

Фазоманипулированные сигналы на основе М-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) М-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, М-последовательности часто называют псевдослучайными.

Экспериментальные исследования [8] подтвердили, что эти последовательности по своим статистическим характеристикам близки к белому гауссовскому шуму, что обеспечивает им высокую помехоустойчивость в гидроакустических навигационных системах.

Основу алгоритма формирования М-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) и 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 [A1, A2, A4, A9, A10, A11, A12], были использованы фреймы в составе нескольких фазоманипулированных псевдослучайными М-последовательностями сложных сигналов.

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:

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

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.

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

2.1.1. Описание измерителя скорости звука

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. Основные технические характеристики ИСЗ приведены в таблице 2.1.

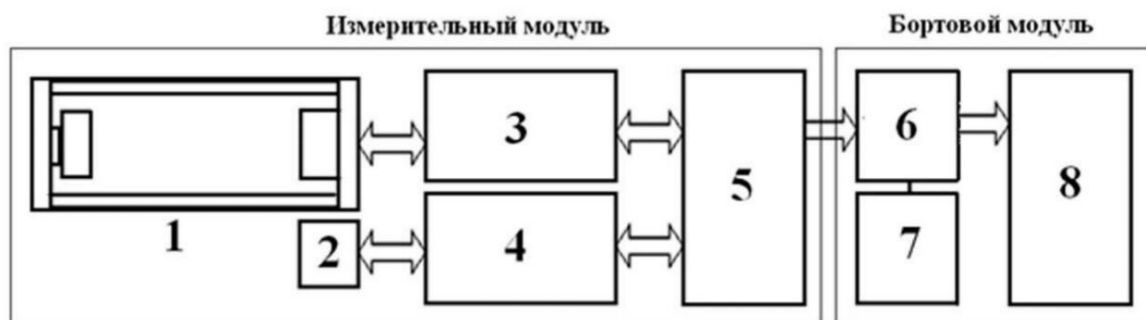


Рисунок 2.2. – Структурная схема ИСЗ. 1 – односторонний датчик скорости звука (акустическая база), 2 – датчик давления, 3 – формирователь синхрокольца, 4 – преобразователь давления, 5 – микропроцессор, 6 – драйвер линии, 7 – модуль питания, 8 – ЭВМ (ноутбук/планшет)

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	Ø75 x 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 разворачивания и работы гидроакустического оборудования [A5].

2.1.2. Описание цифрового гидрофона

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 преобразователь 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 2.3.



Рисунок 2.3. – Автономные цифровые гидрофоны

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

Градуировка трактов ЦГ выполнена на лабораторных испытательных стендах [А6].

2.1.3. Описание автономных цифровых гидроакустических регистраторов

Разработанные специалистами ТОИ ДВО РАН автономные цифровые гидроакустические регистраторы эксплуатируются уже более 5 лет. 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 [19], 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.

Автономные цифровые гидроакустические регистраторы (Рисунок 2.4) 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 [А7].



Рисунок 2.4. – Разработанный автономный цифровой гидроакустический регистратор в разборе

Характеристики разработанных регистраторов приведены в таблице 2.3.

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.

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

2.1.4. Описание излучателя низкочастотных акустических сигналов

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 натурных экспериментов, показан на Рисунке 2.5. Излучатель был подробно описан в статье [A11].

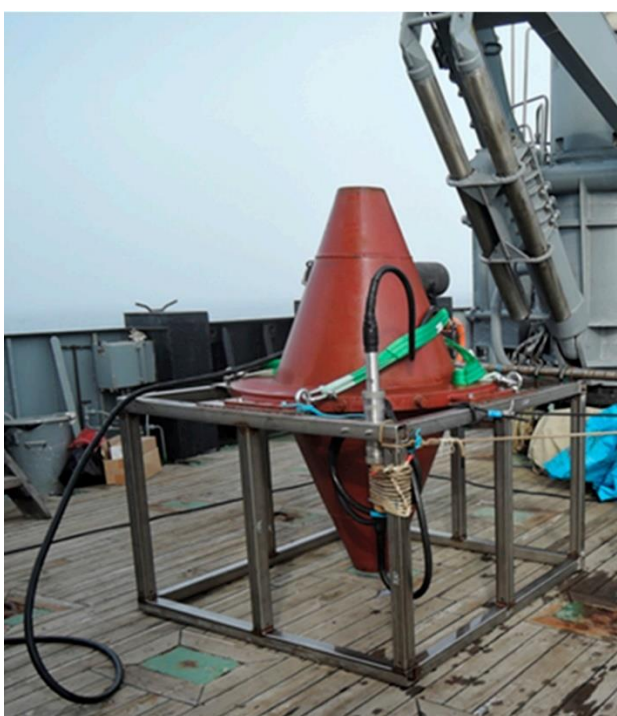


Рисунок 2.5. - Внешний вид излучателя низкочастотных акустических сигналов, используемого при проведении натурных экспериментов

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 [24] 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.

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 [27].

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 [30] и детально рассмотрена на ранних этапах развития методов акустической томографии [26].

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.

Хотя идея сглаживания профилей скорости звука для получения гладких волновых фронтов существует давно [37], в программе реализован автоматизированный вариант такого сглаживания, с интеграцией эффективных численных методов, что позволяет оперативно моделировать распространение лучей с данными, получаемыми в ходе натурного 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.

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 $g(\cdot)$ 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 натурных 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:

$$c^{(3)}(z) = c_i + \beta_i(z - z_i), \text{ сохраняя структуру исходной аппроксимации.}$$

• 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:

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

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 устраняли 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 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 $dr = r_1 - r$:

$$z_{\text{луч}} - z_{\text{дно}} = z_{\text{miss}} \approx z_0 + dr z_1 + dr^2 z_2.$$

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 [24].

2.2.2. Тестирование программы «RAY»

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 волновода (ИХВ) 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.

Гидрологические и батиметрические условия проведения экспериментов представлены на рисунке 2.6. Можно отметить существенные различия вертикальных разрезов скорости звука (ВРСЗ) из-за влияния холодного промежуточного слоя в приповерхностных водах Охотского моря.

Методика проведения натурных 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. Далее, рассчитывается

огибающая взаимно-корреляционной функции, которая является оценкой импульсной характеристики волновода с разрешением по времени, соответствующим параметрам зондирующего сигнала.

Оценены времена «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.

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 2.6). 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 2.6, 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.

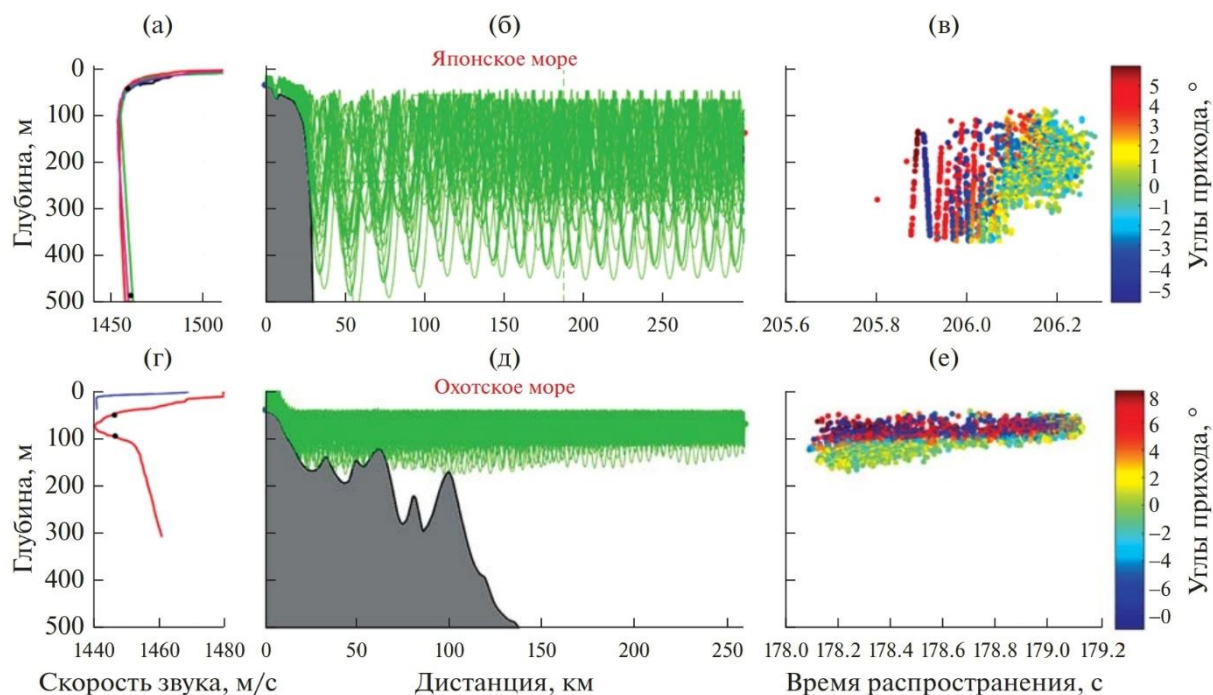


Рисунок 2.6. – Результаты численного моделирования: (а) и (г) - ВРСЗ; (б) и (д) – лучевые картины; (в) и (е) – трехмерные t - z - α диаграммы (время распространения – горизонт приема – угол скольжения луча на приемнике) Японского и Охотского морей соответственно.

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 2.6, в), е)). Очень важно, что результаты натурных экспериментов показали практически те же значения времен «затягивания»: $\tau_0 \approx 1.2$ с; $\tau_d \approx 0.4$ 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. 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 [A10].

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.

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.

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.

Далее производилась свертка (6) принятых сигналов с маской излученного для определения импульсного отклика волновода на заданных глубинах (Рисунок 3.1).

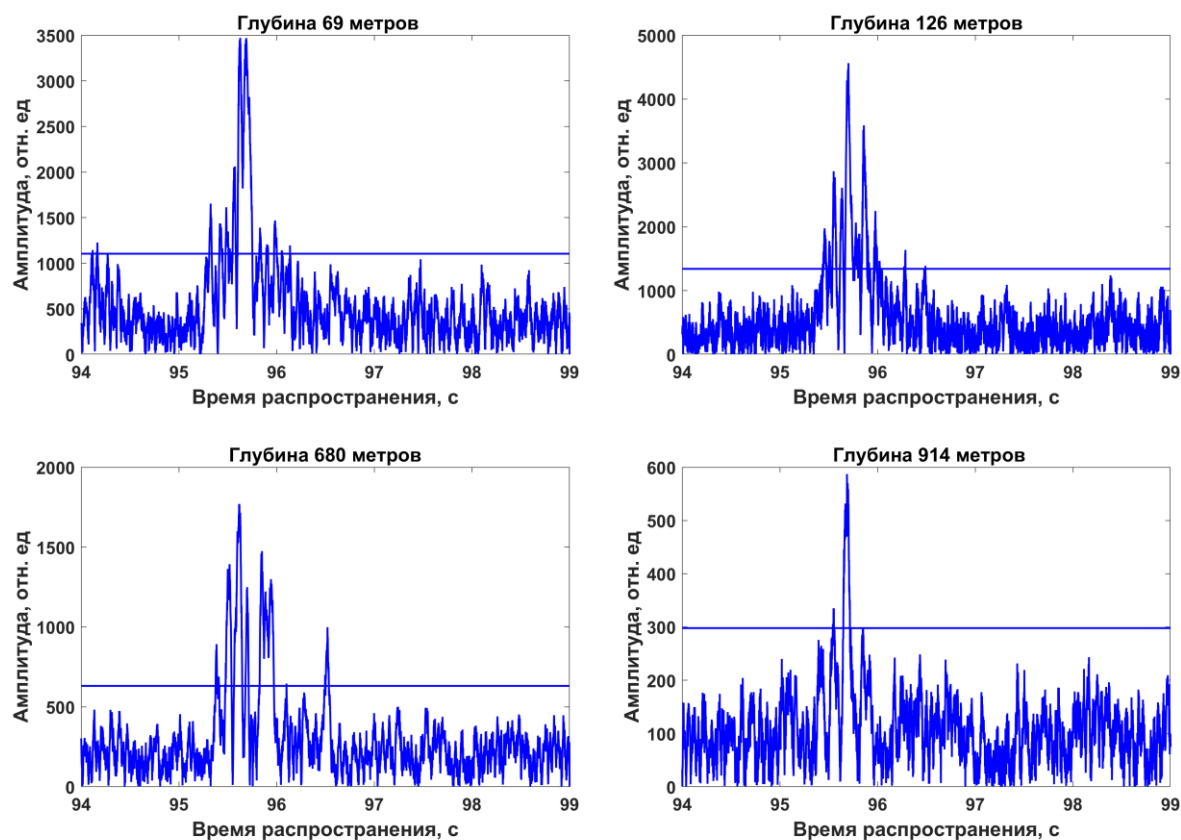


Рисунок 3.1. – Импульсные характеристики волновода

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 [15, 23, 34, 40]. 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 3.2) 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 $\tau_{\text{МАКС}}$, 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: $V_{\text{ЭФ}} = R/\tau_{\text{МАКС}}$.

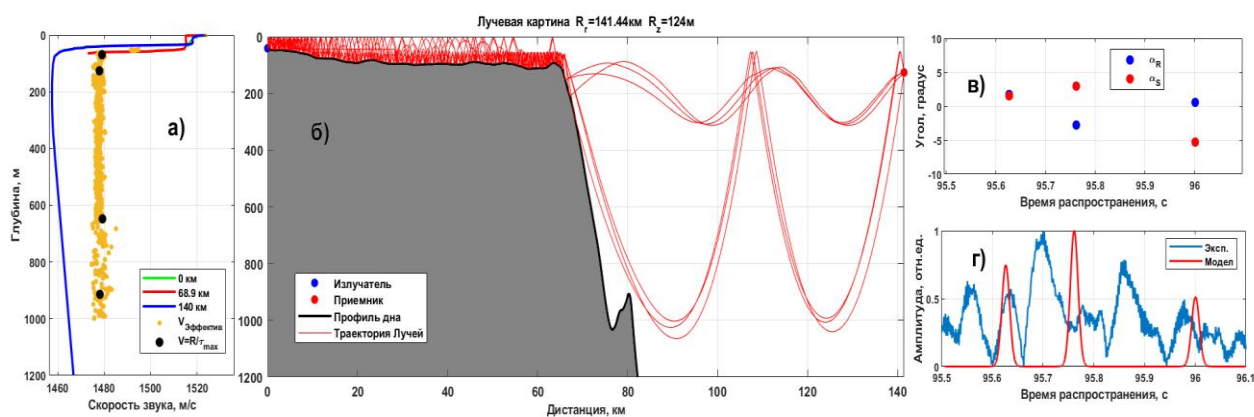


Рисунок 3.2. - Результаты численного моделирования: а) вертикальные разрезы скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (синяя, красная и зеленая кривая); вычисленное в лучевом приближении вертикальное распределение эффективной скорости звука (оранжевые точки); экспериментально измеренные значения 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 3.2. 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. 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.

Ранее, в работах [4, 5, 6, 15] 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) удалениях от ИНС и больших глубинах (до 1000м). Обсуждаемый эксперимент технически и методически является продолжением описанного в [6], 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 [A11].

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» [A9].

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 [33] 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 3.3. 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, 15, 16, 17, 29].



Рисунок 3.3. – 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 (огibaющие 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 3.4).

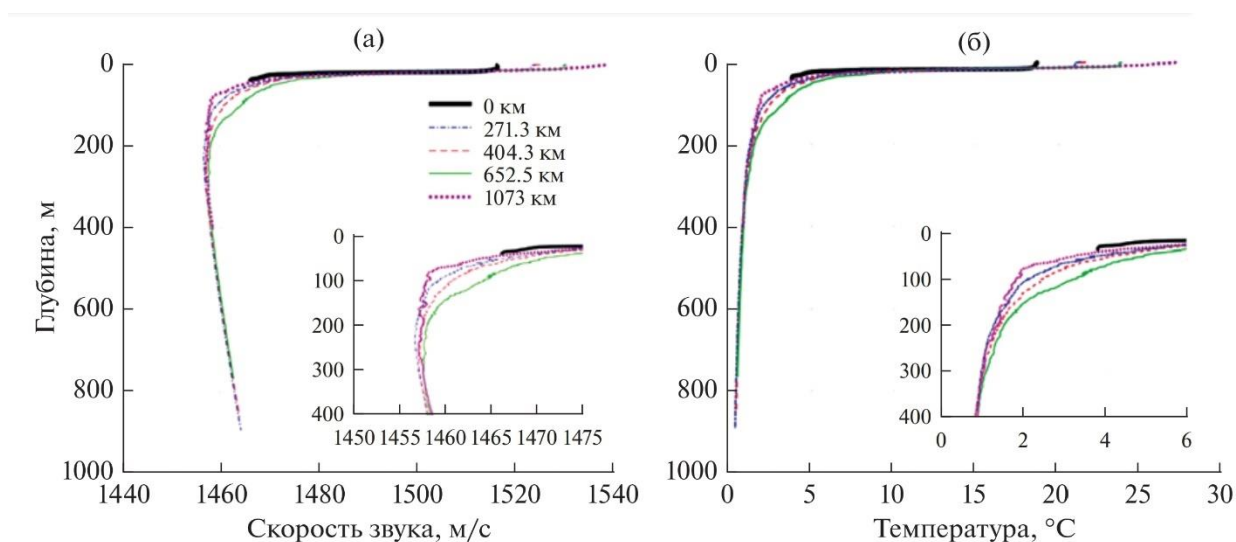


Рисунок 3.4. – Измеренные вертикальные распределения скорости звука (а) и температуры (б) по глубине в заданных точках

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. 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.

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 CTD (красные точки на рисунке 3.5(а) и 3.5(б)), и позволяет предположить наличие на этом участке трассы топографической антициклонической вихревой системы с теплым ядром в центре.

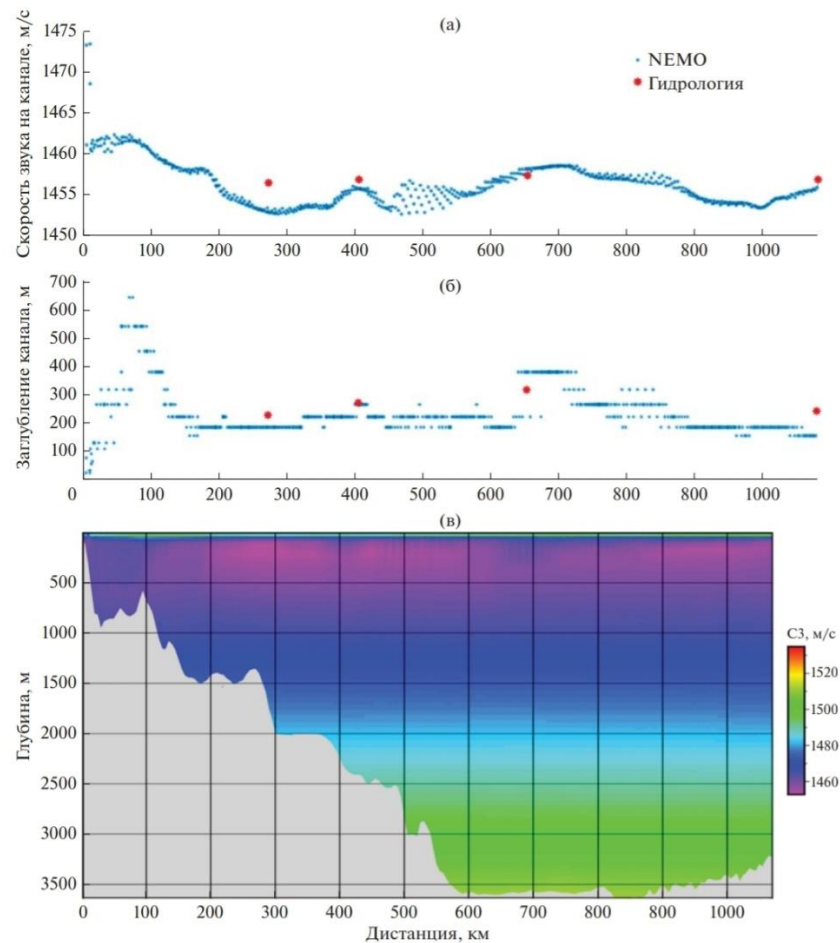


Рисунок 3.5. – Данные гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO и базы данных земной топографии GEBCO: (а) – изменение скорости звука на оси ПЗК; (б) – изменение глубины залегания оси ПЗК; (в) – поле скорости звука и рельеф дна вдоль акустической трассы

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.

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 (трасса 3 на рисунке 3.3).

Каждые 6 мин излучался фрейм в составе нескольких фазоманипулированных псевдослучайными М-последовательностями сигналов, в том числе: длиной 1023 символа с заполнением 4-мя и 16-ю периодами несущей частоты на символ (далее М1023 и М1023_16) и 127 символов с 40 периодами на символ (далее М127). Все сигналы имели несущую частоту 400 Гц, но различные полосы частот: М1023 – полосу [300, 500] Гц (длина символа 0.01 с); М127 – полосу [390, 410] Гц (длина символа 0.1 с), М1023_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.

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. Координаты дрейфа буя ежесекундно фиксировались системой GPS и учитывались при расчетах расстояния между излучателем и приемной системой.

На каждый момент прихода акустического сигнала рассчитывалась дистанция от источника до приемника. Расчет дистанции производился с помощью алгоритма [36] 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 3.6).

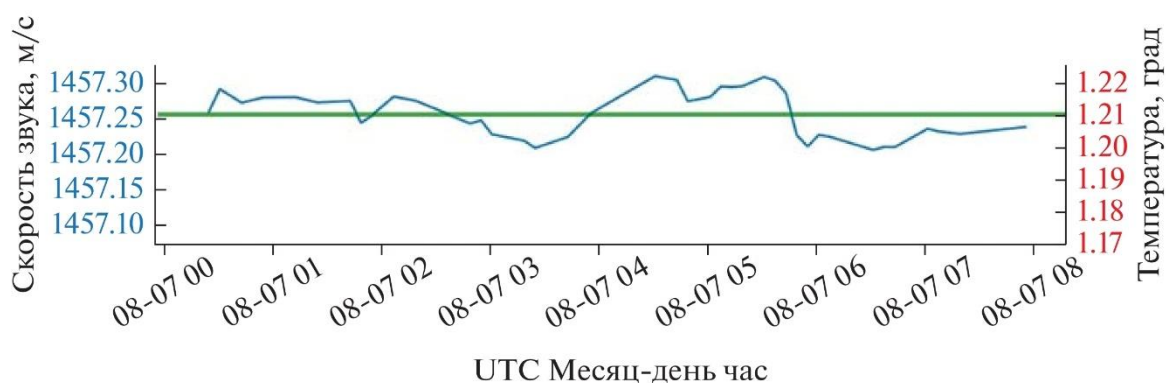


Рисунок 3.6. – Скорость звука и температура на оси ПЗК, рассчитанные по последнему приходу акустических сигналов (синий – окно усреднения по часовому интервалу, зеленый – среднее значение по всем измерениям)

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 [35]:

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

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 солёности, которая практически не меняется по трассе в течение года (34.0–34.1‰), давления (глубины) и скорости звука, погрешность расчета температуры для сигнала М1023 с длительностью символа 0.01 с составит величину $\Delta t = 0.007^\circ\text{C}$. Для сигнала М127 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, 15, 16, 17], 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 3.7).

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 3.7 (г) и 3.7 (д)). При этом углы скольжения лучевых приходов имели значения от 0 (первый приход) до 5 градусов (Рисунок 3.7 (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 3.7 (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.

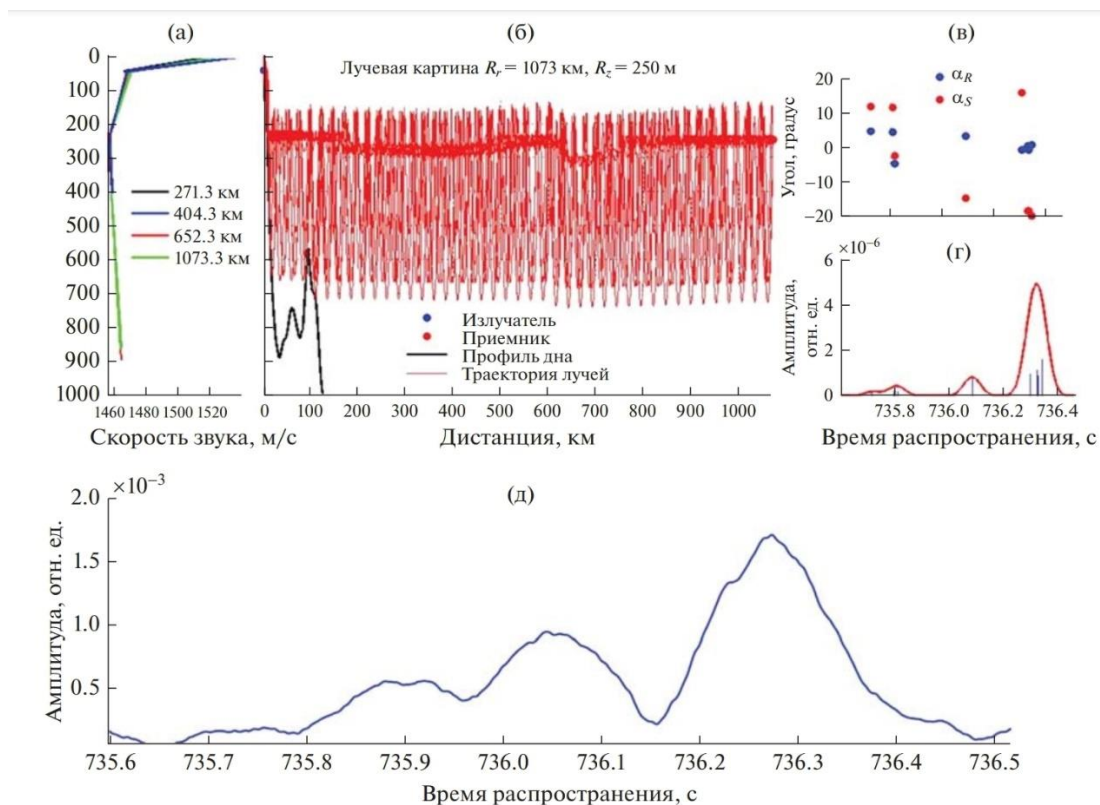


Рисунок 3.7. – Результаты моделирования распространения акустической энергии в лучевом приближении на трассе длиной 1073 км с использованием программы «RAY»: (а) – ВРСЗ в точках вдоль трассы, (б) – лучевая картина распространения собственных лучей; (в) – углы выхода и прихода; (г) – смоделированная ИХВ; (д) – экспериментально полученный импульсный отклик для сигнала M127 (для сравнения ИХВ)

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

Подробные результаты проведенных исследований описаны в статьях [A4, A12]

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» [A10].

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.

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.

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

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 3.8 приведены профили скорости звука, измеренные над излучателем и над приемником с помощью CTD-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.

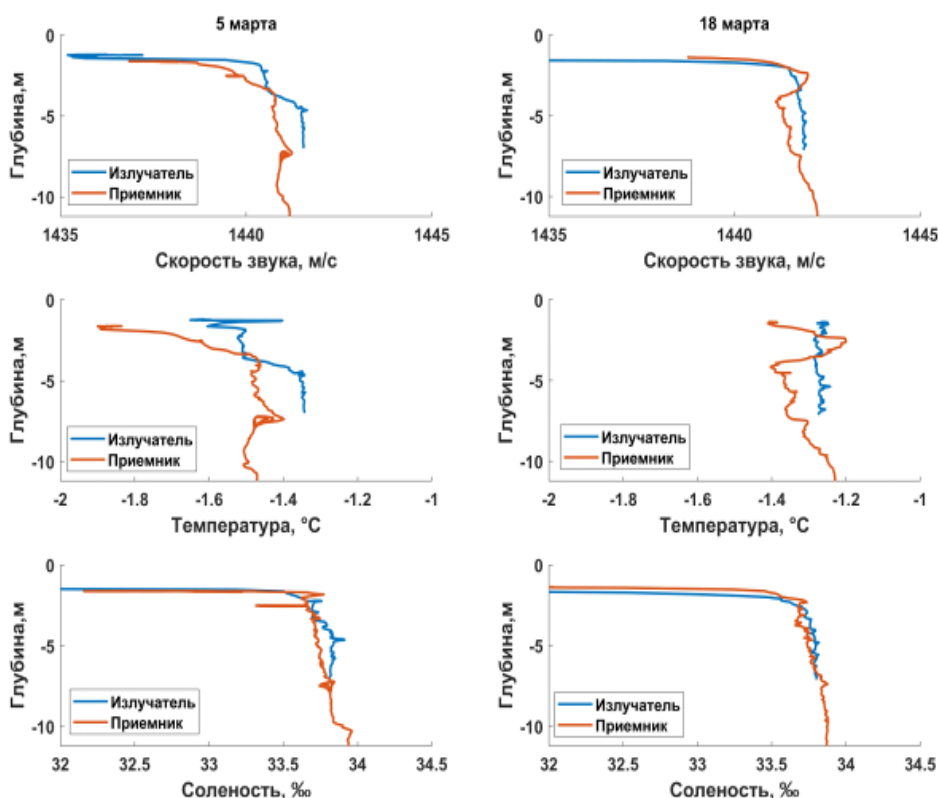


Рисунок 3.8. – Результаты CTD-измерений 5 и 18 марта

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

На рисунках 3.9 и 3.10 приведены более информативные примеры структуры импульсных откликов, полученных в экспериментах.

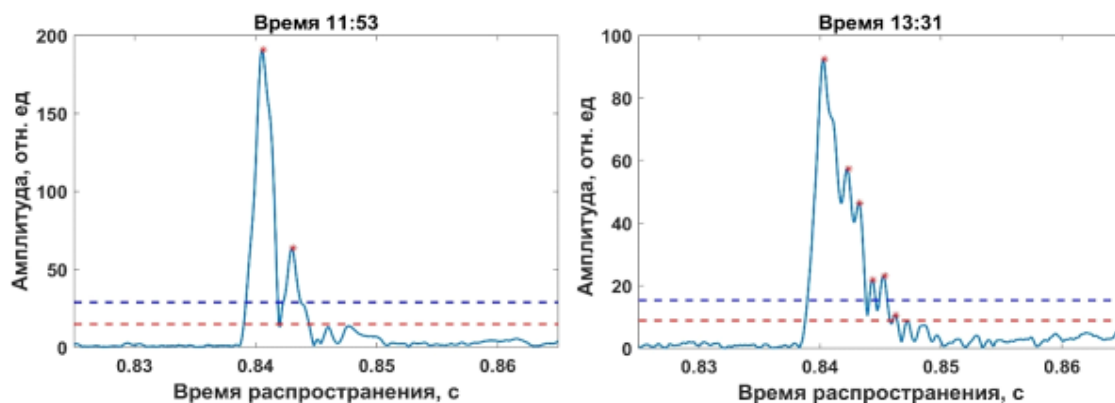


Рисунок 3.9. – Пример структуры ИХ для эксперимента 5 марта. Горизонтальными линиями отмечены уровни корреляционных шумов (синей - ортогональной последовательности, красной - шум фрагмента записи без сигнала)

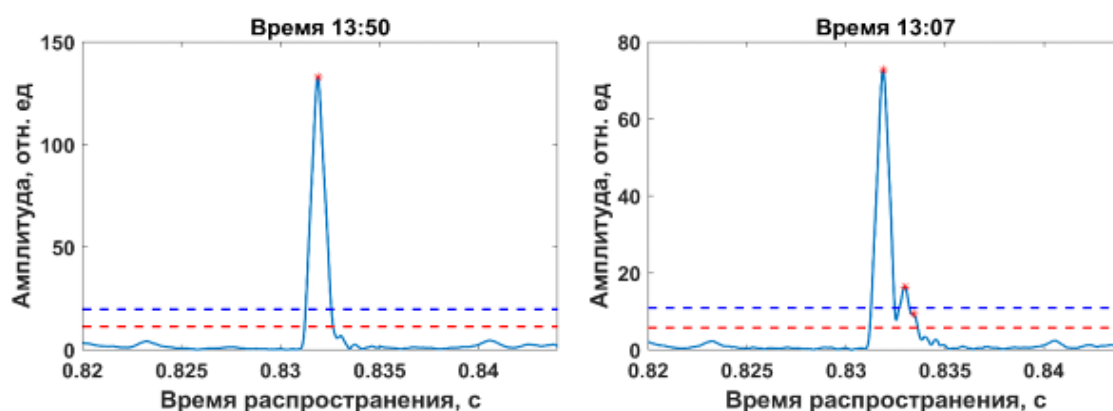


Рисунок 3.10. – Пример структуры ИХ для эксперимента 18 марта. Горизонтальными линиями отмечены уровни корреляционных шумов (синей - ортогональной последовательности, красной - шум фрагмента записи без сигнала)

Используя данные СТД-зондирования и данных батиметрии, было проведено численное моделирование распространения сигналов на акустических трассах (рисунки 3.11 и 3.12). Численное моделирование выполнялось в лучевом приближении с использованием программы «RAY».

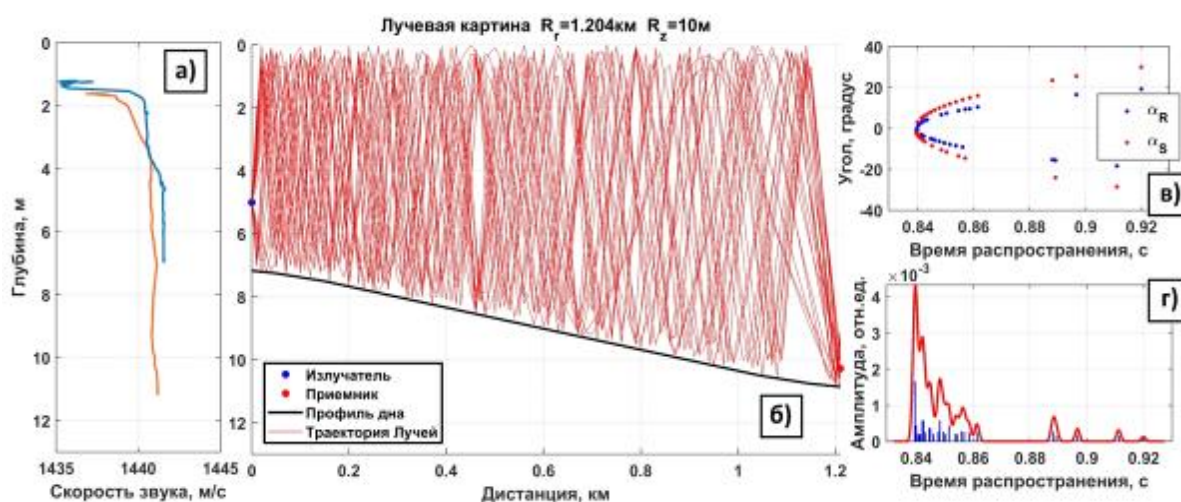


Рисунок 3.11. – Моделирование лучевых траекторий для эксперимента 5 марта. а) Вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точке приёма; б) рельеф дна и пример лучевой картины для данной акустической трассы; в) угловая структура поля в точке приёма; г) импульсная характеристика поля в точке приёма

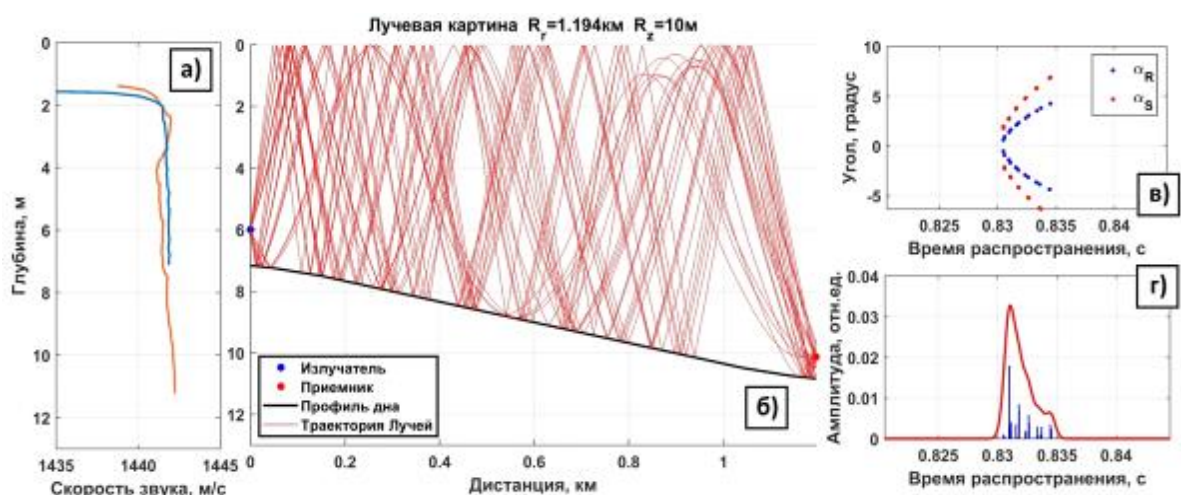


Рисунок 3.12. – Моделирование лучевых траекторий для эксперимента 18 марта. а) Вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точке приёма; б) рельеф дна и пример лучевой картины для данной акустической трассы; в) угловая структура поля в точке приёма; г) импульсная характеристика поля в точке приёма

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.

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 больший угол падения и неоднократно отражаются.

На рисунке 3.13 приведено сравнение структуры смоделированных импульсных характеристик волновода с импульсными характеристиками, полученными в результате натурного эксперимента.

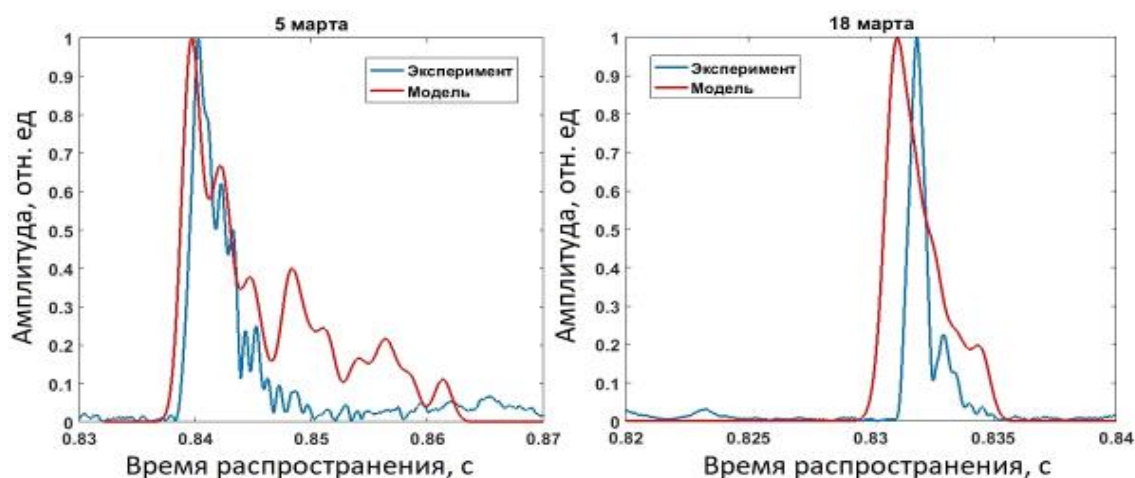


Рисунок 3.13. – Сравнение ИХ, полученных в ходе численного моделирования с ИХ, полученными в ходе эксперимента. Левая панель - 5 марта, правая – 18 марта

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.

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 3.14).

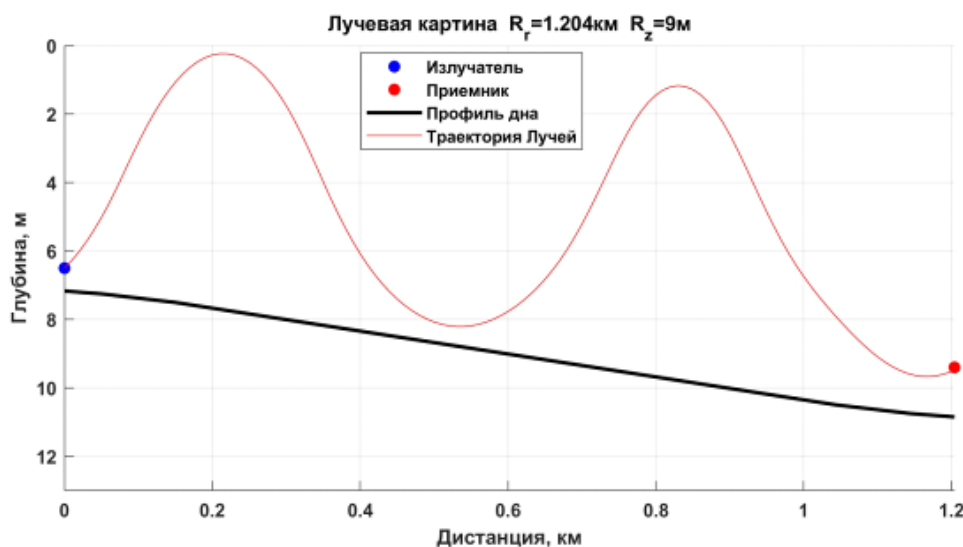


Рисунок 3.14. – Траектория луча, прошедшего по кратчайшему пути. Соответствует первому пику ИХ

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 3.15).

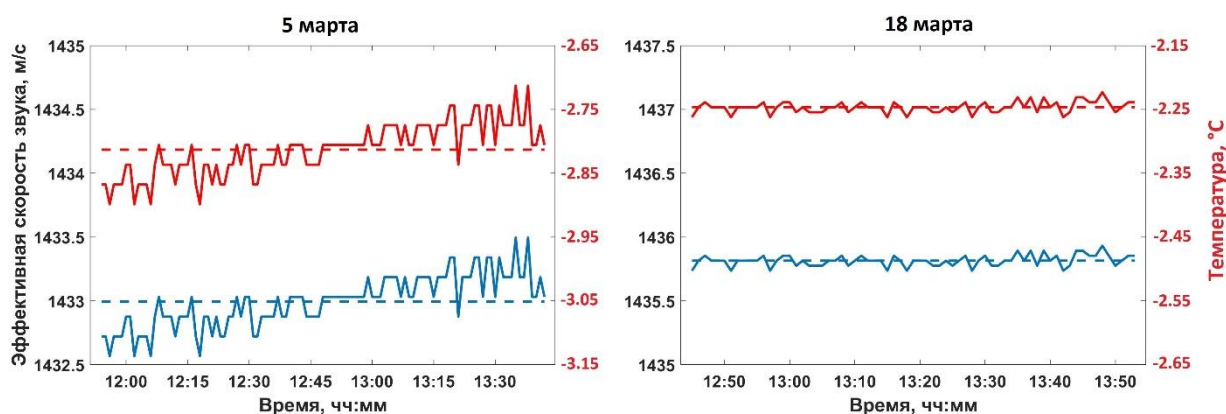


Рисунок 3.15. – Измеренные значения скоростей звука и соответствующих температур в двух экспериментах. Синяя линия – без учета поправки в 1 м. Красная линия – с учетом поправки в 1 м

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 °C, 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 солености 33.7 ‰, средней глубины 4 метра и производя 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 солености 33.7 ‰, средней глубины 4 метра и производя перерасчет по алгоритму Чена-Миллера (1) получаем температуру -2.25 °С.

Полученные значения отличаются от данных CTD 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 CTD 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.

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. 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.
6. 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.
7. Бреховских, Л.М. Теоретические основы акустики океана / Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов // М: Наука, 2007. - С.370.
8. 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.І. – С.158–163.
9. Бурдинский, И.Н. Принципы функционирования и источники ошибок гидроакустических систем позиционирования / И.Н. Бурдинский // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2009. – № 3(14). – С.47–54.
10. 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.
11. Корякин, Ю.А. Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы. / Ю.А. Корякин, С.А. Смирнов, Г.В. Яковлев // СПб.: Наука, 2004. – 410с.

12. 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.
13. Макаров, А. И. Передача информации в гидроакустическом канале / А.И. Макаров, В.Д. Дворников, В.К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2004. – № 2. – С. 103–118.
14. Мили, П. Подводные инженерные исследования / П. Мили; пер.с. англ. М.Г. Жибаяева, А.Д. Старкова // – Л.: Судостроение, 1984.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Урик, Р. Д. Основы гидроакустики / Роберт Дж. Урик; пер. с англ. Н. М. Гусева [и др.]. // Ленинград : Судостроение, 1978. – (Библиотека инженера-акустика). - 445 с.
21. 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.
22. Baggeroer, A. Acoustic telemetry - An overview / A. Baggeroer // IEEE Journal of Oceanic Engineering, Massachusetts Institute of Technology. – 1984. – № 9. – P. 229–235.
23. 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.

24. 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.

25. Brekhovskikh, L.M. Fundamentals of Ocean Acoustics. / L.M. Brekhovskikh, Y.P. Lysanov // – Third Edition. – Springer, 2003. – P.293.

26. 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.

27. Buchal, R.N. Boundary layer problems in diffraction theory / R.N. Buchal, J.B. Keller // Commun. Pure Appl. Math. - 1960. - Vol.13. - 85-114pp.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. Kaneko, A. Coastal acoustic tomography / A. Kaneko, X.H. Zhu, J. Lin // Coast. Acoust. Tomogr. - 2020. - 1–362pp.

36. Karney, Ch.F.F. Algorithms for geodesics / Ch.F.F. Karney // J. Geod. - 2013. - V.87. - 43–55pp.

37. Pederson, M.A. Acoustic intensity anomalies introduced by constant velocity gradients / M.A. Pederson // J. Acoust. Soc. Am. - 1961. - Vol. 33. - 465-474pp.
38. 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.
39. 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.
40. 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.

Список публикаций

- A1. 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.
- A2. 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.
- A3. Моргунов Ю.Н. Особенности гидроакустической дальнометрии на пересекающих вихревые структуры сверхдальних трассах / Ю.Н. Моргунов, А.В. Буренин, А.А. Голов, М.С. Лебедев, Д.Д. Каплуненко, В.В. Разживин, **С.С. Шкрамада** // Подводные исследования и робототехника. - 2023. №1 (43). 60-66 с.
- A4. 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.
- A5. 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.
- A6. 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.

A7. 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.

A8. Шкрамада С.С. Особенности распространения псевдослучайных сигналов на пересекающих вихревые структуры сверхдальних трассах / **С.С. Шкрамада**, А.В. Буренин, Ю.Н. Моргунов // Океанологические исследования: материалы X конференции молодых ученых. 24 – 28 апреля 2023 г., Владивосток, Россия. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2023. – 212 с.

A9. 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.

A10. 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.

A11. 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.

A12. 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