

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ТИХООКЕАНСКИЙ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.И. ИЛЬЧИВА
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 551.463, 551.466.31

№ госрегистрации 01201363046

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор ТОИ ДВО РАН

В. Акуличев



академик РАН

В.А. Акуличев

«11» 09/2015

ОТЧЕТ

о научно-исследовательской работе

по теме:

ИЗУЧЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, РАЗВИТИЯ,
ТРАНСФОРМАЦИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ,
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО И
МЕЛКОГО МОРЯ, А ТАКЖЕ РАЗВИТИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СВЯЗИ,
ЛОКАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

промежуточный

Научные руководители:

академик РАН

В. Акуличев

В.А. Акуличев

Зав. лаб.

д.т.н.

Ю.Н. Моргунов

Ю.Н. Моргунов

Зам. директора



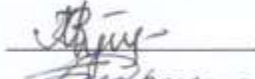

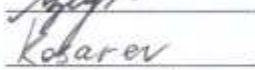

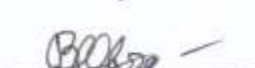
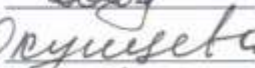



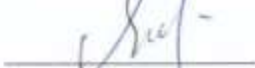



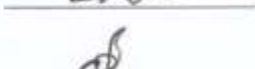

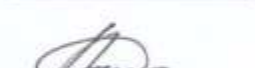
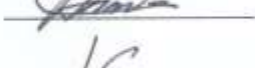


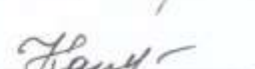
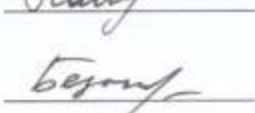
чл.-корр. РАН








Г.И. Долгих

Г.И. Долгих

Владивосток 2015

Список исполнителей

Зам. директора д-р физ.-мат. наук чл.-корр. РАН		Г.И. Долгих	(разд. 1,2)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		С.Г. Долгих	(разд. 1,2)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		В.А. Чупин	(разд. 1,2)
Науч. сотр.		С.С. Будрин	(разд. 1,2)
Инж.-электроник		А.Г. Закурко	(разд. 1,2)
Инж.-электроник		О.В. Косарев	(разд. 1,2)
Инженер		О.В. Новикова	(разд. 1)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		В.В. Овчаренко	(разд. 1,2,3)
Вед. Инженер		О.П. Окунцева	(разд. 1)
Науч. сотр. канд. техн. наук		А.А. Плотников	(разд. 3)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		В.А. Швец	(разд. 3)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		С.В. Яковенко	(разд. 3)
Зав. лаб. канд. физ.-мат. наук		А.С. Саломатин	(разд. 6,7)
Ст. науч. сотр.		В.И. Юсупов	(разд. 6,7)
Ст. науч. сотр.		Б.Я. Ли	(разд. 6,7)
Мл. науч. сотр.		Д.В. Черных	(разд. 6,7)
Науч. сотр.		С.В. Борисов	(разд. 9)
Зав. лаб. д-р физ.-мат. наук		А.Н. Рутенко	(разд. 9)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		Д.Г. Ковзель	(разд. 9)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		М.Ю. Фершалов	(разд. 9)
Зав. лаб. д-р техн. наук		Ю.Н. Моргунов	(разд. 11)
Ст. науч. сотр.		С.И. Каменев	(разд. 11,12)
Ст. науч. сотр. канд. техн. наук		В.В. Безответных	(разд. 11)

Зав. лаб. канд. техн. наук		А.А. Тагильцев	(разд. 11)
Зав. лаб. д-р физ.-мат. наук		В.А. Буланов	(разд. 10)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		И.В. Корсков	(разд. 10)
Ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук		П.Н. Попов	(разд. 10)
Науч. сотр.		А.В. Стороженко	(разд. 10)
Вед. инженер		О.В. Левушкин	(разд. 10)
Зав. лаб. д-р физ.-мат. наук		И.О. Ярощук	(разд. 4,5)

Реферат

Отчет 159 с., 1 ч., 113 рис., 10 табл., 110 источников.

ЛАЗЕРНЫЙ ДЕФОРМОГРАФ, ЛАЗЕРНЫЙ НАНОБАРОГРАФ, ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОСФЕРЫ, ЛАЗЕРНЫЙ ГИДРОФОН, СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ БУХТ, ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ, ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГИИ, ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ, ИНФРАГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ, НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ

Выполнены исследования рассеяния звука в шельфовой зоне Японского моря и проведено изучение взаимодействия мощного звука с микронеоднородной жидкостью. Выявлены закономерности рассеяния звука во взаимосвязи с пространственной структурой и динамикой звукорассеивающих слоев в заливе Петра Великого. Сравнительный анализ результатов исследований в Японском море и восточной Арктике выявили существенно большее рассеяние звука и связанные с ним концентрации планктона на шельфе восточной Арктики. Установлены зависимости порога и кинетики протекания акустической кавитации от зародышевого состава и параметра нелинейности жидкости. Показано сильное влияние динамических эффектов и фазовых превращений на нелинейную динамику фазовых включений. Получены зависимости параметра нелинейности и коэффициента нелинейного рассеяния звука на включениях от резонансных свойств и эффективности фазовых превращений (парогазовые пузырьки и центры кристаллизации).

Акустические методы на основе линейного и нелинейного рассеяния и распространения звука являются мощными методами диагностики структурно неоднородных сред. Морская вода является сложной средой, одновременно содержащей различные фазовые включения – пузырьки и твердые взвеси, включения биологического происхождения – зоо и фитопланктон, продукты распада биологических систем, а также рыбу и другие морские организмы различного размера. Такие гетерогенные микронеоднородности морской среды приводят к рассеянию звука, дополнительному затуханию, дисперсии скорости звука, появлению дополнительной нелинейности среды, а также к изменению целого ряда других акустических характеристик морской среды, важных для проведения исследований и измерений в акустике океана. Кроме того, существуют гомогенные неоднородности, имеющие то же фазовое состояние, но отличающиеся по плотности, скорости звука, температуре и прочими физическими параметрами. Ярким его представителем является мелкомасштабная турбулентность, всегда присутствующая в том или ином масштабе в верхних слоях морской воды. Все указанные неоднородности отличаются друг от друга по характерным размерам, пространственному распределению в деятельном слое океана, частоте появления в выделенном объеме морской среды.

Содержание

Стр.

Введение.....	7
1 Изучение воздействия атмосферных и морских волновых процессов на пространственно-временную структуру гидроакустических полей шельфовых областей.....	9
2 Экспериментальное исследование характеристик водной среды и верхнего слоя земной коры на трассах «излучатель-приёмник» на основе использования гидроакустических и сейсмоакустических источников.....	28
3 Развитие дистанционных методов по изучению гидрофизических характеристик водных акваторий, строения и структуры морского дна в интересах решения томографических и инверсионных задач.....	40
3.1 Обработка данных гидрологических измерений.....	50
4 Разработка геоакустической и акустико-океанологической модели залива Посьета.....	57
4.1 Разработка геоакустической модели залива Посьета и гидроакустические исследования.....	59
5 Численное и статистическое моделирование распространения звуковых волн в пространственно-неоднородных упругих средах.....	64
6 Поиск и исследование зон пузырьковой разгрузки метана в ДВ морях и российском секторе Арктики акустическими методами.....	69
6.1 Метод количественной акустической оценки профиля концентрации растворенного в водной толще метана в зонах его пузырьковой разгрузки.....	69
6.2 Верификация метода акустической оценки концентрации метана в водной толще на примере зоны его пузырьковой разгрузки в Охотском море.....	74
7 Лабораторные и натурные исследования образования газогидратов на поверхности пузырьков.....	82
7.1 Лабораторные исследования процессов образования и разложения газогидратов.....	82
7.2 Численное моделирование процессов образования и разложения газогидратов.....	85
8 Выполнение натурных исследований по изучению взаимодействия акустических полей с внутренними волнами в неоднородных геоакустических волноводах.....	92
8.1 Результаты анализа натурных измерений.....	96
9 Выполнение численного 2-D и 3-D моделирования акустических полей в неоднородных геоакустических волноводах с внутренними волнами, характерными	

для шельфа.....	101
10 Исследования рассеяния звука в шельфовой зоне Японского моря. Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия мощного звука с микронеодно-родной жидкостью, выявления закономерностей кавитационных процессов в морской воде.....	105
10.1 Изучение рассеяния звука в заливе Петра Великого Японского моря.....	105
10.1.1 Аппаратура и район исследований.....	107
10.1.2 Исследования звукорассеивающих слоев.....	109
10.2 Изучение нелинейного взаимодействия звука с морской водой и выявление взаимосвязи акустической кавитации с зародышевым составом и параметром нелинейности жидкости.....	114
11 Экспериментальная апробация методов диагностики и учета влияния среды на технические характеристики гидроакустических средств навигации и связи в условиях шельфа, глубокого моря и переходной зоны. Исследование эффекта «оползня».....	129
11.1 Учет влияния среды на технические характеристики гидроакустических средств.....	129
11.2 Рекомендации по практическому применению эффекта «оползня».....	132
11.3 База данных гидрофизических параметров морской среды в районах предполагаемого функционирования гидроакустических средств навигации и связи.....	136
12 Разработка помехозащищенных акустических датчиков. Анализ шумов спокойного дыхания водолаза в интересах обнаружения и оценки состояния.....	141
13 Исследование влияния функциональных проб на полосовые характеристики форсированного выдоха.....	154
Заключение.....	156

Введение

Закономерностям возникновения, развития и распространения ветровых волн посвящено огромное количество статей и монографий. За основу первоисточника знаний по некоторым вопросам распространения ветровых морских поверхностных волн можно принять монографию Бюдена, хотя некоторые авторы могут отдать предпочтение другим монографиям других авторов. Но надо заметить, что суть основных познаний о динамике поверхностных ветровых волн от этого не изменится, а в данной статье мы остановимся на некоторых отличиях классических представлений динамики поверхностного волнения от полученных экспериментальных данных (остановимся лишь на изменении периода ветрового волнения). Согласно классическим представлениям развитие ветрового волнения происходит по следующему сценарию: 1) в начальной фазе период ветрового волнения растёт, абсолютное значение которого зависит от скорости ветра, времени его действия и величины разгона; 2) при выходе поверхностных волн за пределы действия циклона (тайфуна) их период непродолжительное время растёт за счет быстрого затухания высокочастотных волновых компонент; 3) распространение волн дальше происходит по дисперсионному закону: волны с большими периодами движутся с большими скоростями, а волны с меньшими периодами движутся с меньшими скоростями. Т.е. согласно классическим представлениям можно на основе применения дисперсионного закона легко определить расстояние до места действия циклона, хотя бы приближённо. Посмотрим, так ли это просто? И только ли от дисперсии зависит изменение периода ветрового волнения? В своём начальном повествовании мы считаем, что период ветрового волнения конкретного цуга остаётся постоянным на всём его продвижении от циклона до прибойной зоны, места ее разрушения.

При исследованиях вариаций интенсивности тональных акустических сигналов распространявшихся вдоль стационарных акустических трасс и измеренных с помощью гидрофонов вертикальных акустико-гидрофизических измерительных систем типа «Моллюск» мы заметили, что в ряде случаев наблюдаются синхронные и синфазные вариации на всех 8 гидрофонах практически перекрывающих весь слой воды. По-видимому, это свидетельствует об изменениях потерь из-за взаимодействия распространяющегося звука с пространственно-временными неоднородностями поля скорости звука, формируемыми различными гидродинамическими процессами характерными для шельфовых зон и прежде всего внутренними волнами. Изучению этого явления посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ.

В этой работе приводятся результаты натурных измерений проведенных с помощью автономного излучателя и автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной

системы «Моллюск-07» на стационарной трассе пересекающей относительно глубоководную бухту Витязь.

В ходе выполнения различных работ по регистрации береговыми лазерными деформографами гидроакустических сигналов, создаваемых в воде низкочастотными гидроакустическими излучателями, было установлено, что с понижением частоты доля трансформированной гидроакустической энергии в сейсмоакустическую энергию возрастает. Задачами проведенной работы являлось: 1) провести испытания новой излучающей гидроакустической системы, 2) создать методику проведения экспериментальных работ с гидроакустическими излучателями 22 Гц и 33 Гц, 3) получить ряды экспериментальных данных, необходимых для дальнейшего изучения частотной зависимости доли трансформированной гидроакустической энергии, 4) оценить возможности двухкоординатного лазерного деформографа по регистрации гидроакустических сигналов различной сложности, создаваемых в условиях глубокого и мелкого моря низкочастотным гидроакустическим излучателем с центральной частотой излучения 22 Гц.

Изучение рассеяния звука составляет основу дистанционного метода диагностики структуры и динамики микронеоднородных сред. Между различными типами неоднородностей в океане существует определенная иерархия по интенсивности или "силе рассеяния" звука. Значительный интерес представляют исследования рассеяния, обусловленные резонансными включениями – газовыми пузырьками, рыбами, имеющими плавательный пузырь, зоопланктон с газовыми полостями. Интерес вызван тем, что сечение рассеяния звука на таких неоднородностях в океане намного превышает сечения рассеяния на других типах неоднородностей (Бреховских и Лысанов, 1982, 2007). Даже сравнительно небольшая концентрация таких включений в морской воде может привести к значительной интенсивности объемной реверберации.

1 Изучение воздействия атмосферных и морских волновых процессов на пространственно-временную структуру гидроакустических полей шельфовых областей

Гидроакустические волны, трансформируясь на границе геосфер, возбуждают в соседних геосферах волны на соответствующих частотах в линейном случае или генерируют волны на других частотах в нелинейном случае. Ранее при выполнении модельно-теоретических оценок трансформации энергии гидроакустических волн [1, 2] не учитывалось влияние на распространение и трансформацию гидроакустических волн различных динамических процессов морской среды при различной удаленности гидроакустических излучателей от береговых приемников. В настоящее время проводятся различные теоретические исследования распространения низкочастотных сигналов в мелком море [3]. Здесь представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием высокочувствительной измерительной аппаратуры, созданной на основе лазерно-интерференционных методов, по изучению влияния различных гидрофизических и атмосферных параметров на закономерности распространения и трансформации гидроакустических волн на границе геосфер, создаваемых низкочастотными гидроакустическими излучателями в воде на различных удалениях от приёмных систем. Береговые приёмные системы – лазерные деформографы - обладают широким частотным диапазоном и имеют линейную амплитудно-частотную характеристику в рабочем диапазоне частот. Цель работы заключалась в изучении закономерностей трансформации энергии гидроакустических колебаний в энергию сейсмических колебаний в различное время года по единой методике проведения экспериментальных работ.

Для проведения работы была использована приборная база сейсмоакустико-гидрофизического комплекса ТОИ ДВО РАН [4], в состав которого входит двухкоординатный лазерный деформограф [5], работающий при проведении экспериментальных исследований в непрерывном режиме. Прибор имеет два измерительных плеча длиной 52,5 и 17,5 м, ориентированных почти ортогонально (92°) друг другу с отклонением от осей «север-юг» и «запад-восток» на 18 градусов. Деформограф расположен под землей в прибрежной зоне в точке с координатами 42°35'СШ и 131°09'ВД на высоте 76 м над уровнем моря и способен регистрировать вариации деформации земной коры с точностью до 10^{-12} в широком частотном диапазоне (0-1000 Гц) и практически неограниченном динамическом диапазоне. На рис. 1.1 приведён общий вид центрального узла интерферометров лазерного деформографа.



Рисунок 1.1 – Интерферометры лазерного деформографа плеча 52,5 м (слева) и плеча 17,5 м (справа)

Низкочастотная излучающая система с электромагнитным преобразователем предназначена для генерации гармонических и фазоманипулированных гидроакустических волн в гидросфере на частоте 33 Гц (рис. 1.2). Система предназначена для работ при глубинах погружения излучателя от 2 до 25 м и имеющая эффективное звуковое давление в полосе около 3700 Па (191 дБ/1 мкПа).



Рисунок 1.2 – Гидроакустическая излучающая система с центральной частотой излучения 33 Гц

На трассе распространения гидроакустических колебаний использовался профилометр Valeport miniSVP для измерения гидрофизических параметров морской среды. Это 24-битовый профилирующий регистратор температуры, скорости звука и глубины погружения

Для обработки экспериментальных данных применялся пакет прикладных программ «Deformograph», имеющий возможности обработки информации, полученной с лазерно-интерференционных устройств, с применением следующих процедур: 1) статистическая обработка данных (дисперсия, среднее, ошибка среднего, коэффициент вариации, доверительный интервал, среднеквадратичное отклонение, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, статистика локальных экстремумов), 2) децимация, 3) спектральный анализ, 4) низкочастотная, высокочастотная и полосовая фильтрация с различными окнами (прямоугольное, треугольное, Хэмминга, Кайзера, Чебышева), 5) моделирование (линейно-частотная модуляция, модельный много-гармонический ряд).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В условиях проведения идентичных по содержанию экспериментальных работ в разное время года и суток, была выработана определённая схема проведения эксперимента, позволяющая максимально приблизить пространственные характеристики распространения акустических колебаний в каждом эксперименте. В соответствии с существующей теорией [6], свидетельствующей о том, что при расположении источника звука близко к поверхности воды, т.е. при $h/\lambda < 0.5$ (где h – заглубление источника, λ – длина гидроакустической волны), его поле соответствует полю диполя и амплитуда звукового давления тем меньше, чем меньше h , была выбрана оптимальная глубина рабочего погружения излучателя 15 м, при которой наблюдается наибольший уровень сигнала при практически постоянной мощности излучения. В ходе разработки плана работ по генерации гидроакустических колебаний учитывалось максимальное попадание станций излучения в зону диаграммы направленности береговых лазерных деформографов.

В соответствии с положением измерительных осей лазерных деформографов были выбраны координаты станций излучения при проведении экспериментов на расстоянии 2 км по направлению «север-юг» относительно берегового лазерного деформографа и далее через 2 км каждая последующая точка при удалении станций излучения на юг (рис. 1.3).

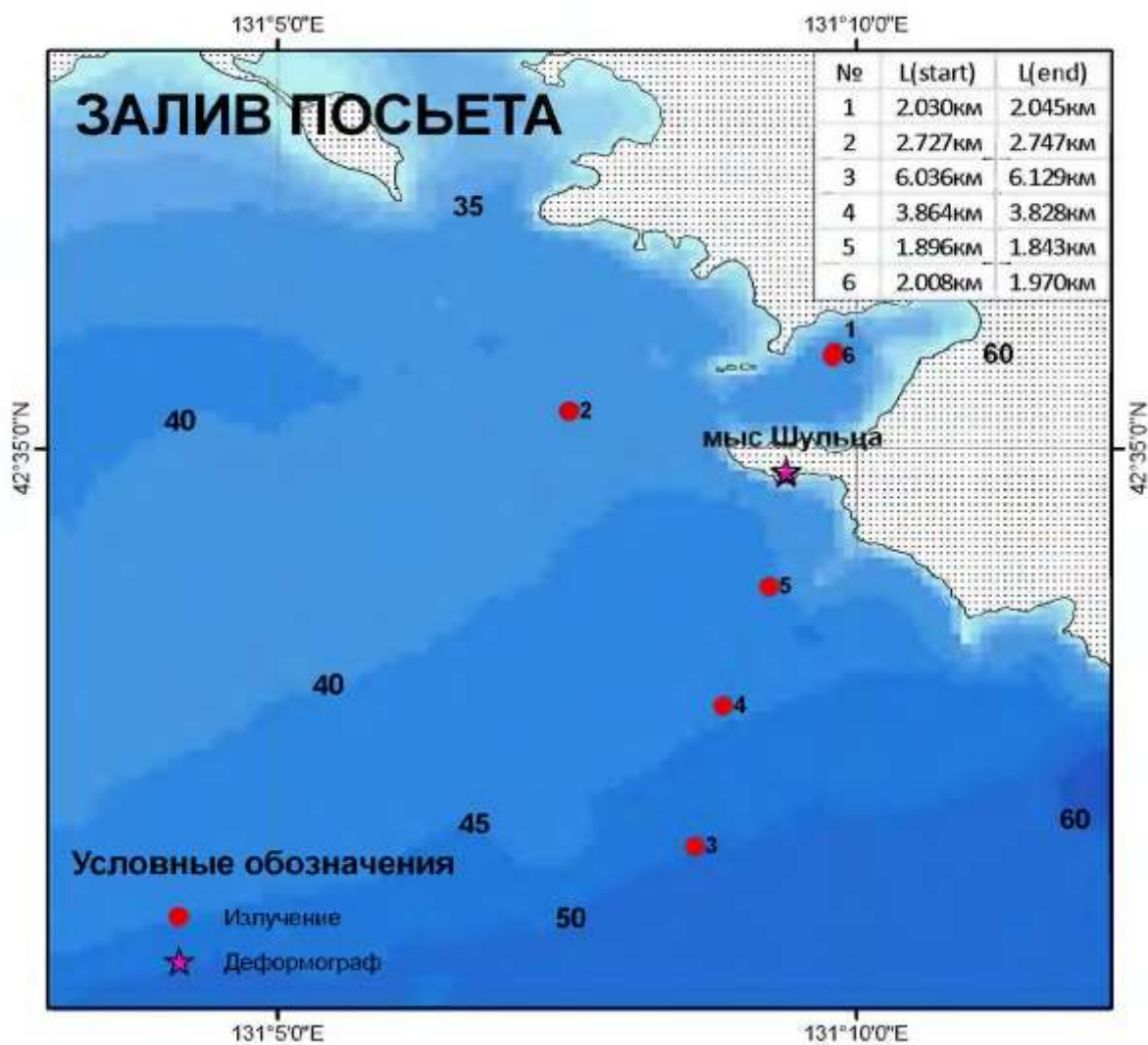


Рисунок 1.3 – План проведения экспериментальных работ

В период с 2012 по 2013 гг. в разные месяцы были выполнены серии экспериментальных работ в заранее определённых точках в соответствии с рекомендациями методики проведения экспериментальных работ по излучению гидроакустических волн и приёму трансформированных сейсмоакустических волн двухкоординатным лазерным деформографом. Излучаемый гидроакустический сигнал имел следующую форму: тональное излучение – 300 с, пауза – 20 с, излучение М-последовательности – 84 с.

На рис. 1.4а показана динамическая спектрограмма записи контрольного гидрофона для фиксации времени начала и окончания работы излучателя. На рис. 1.4б – 1.4г - динамические спектрограммы записи гидроакустического излучения береговым лазерным деформографом при удалении источника излучения на 6, 4 и 2 км, соответственно.

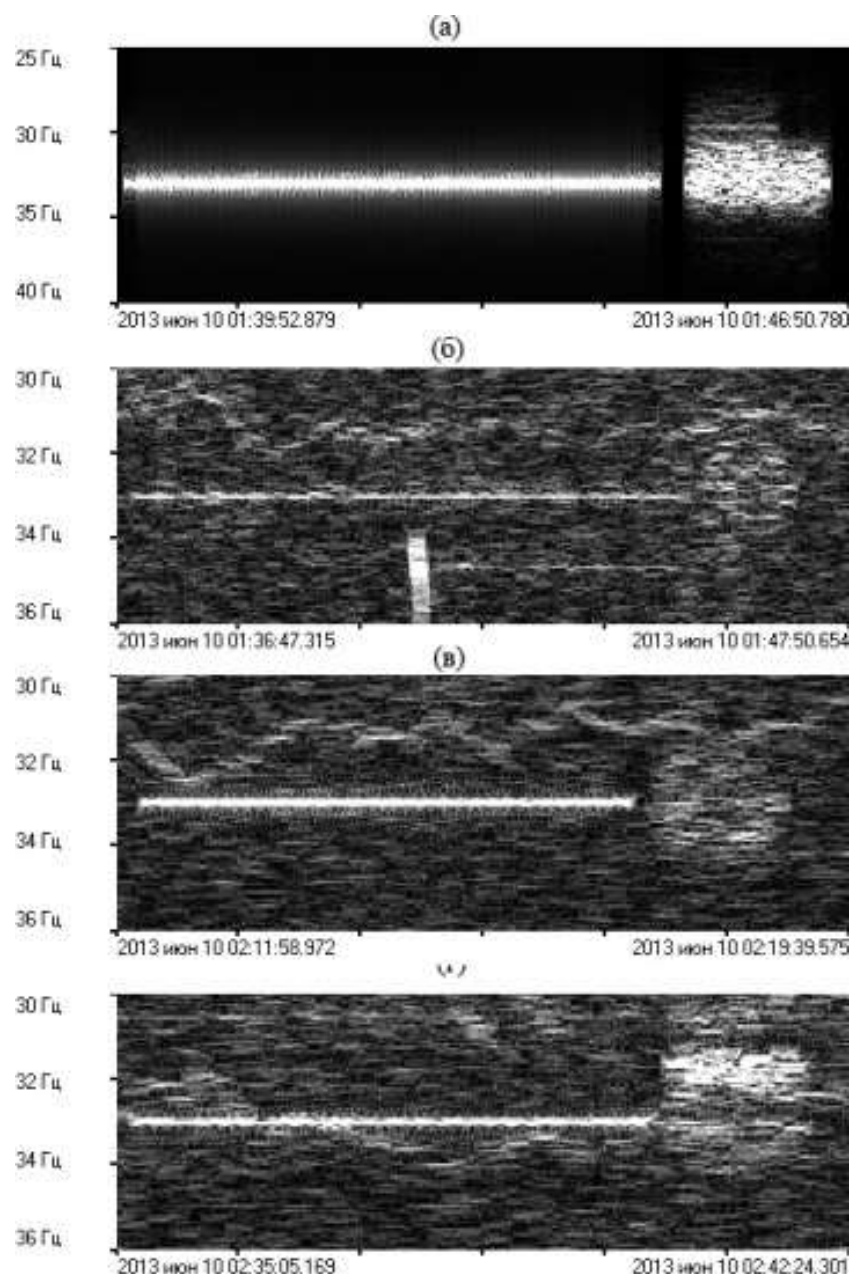


Рисунок 1.4 – Динамические спектрограммы записи гидроакустического излучения: а) контрольный гидрофон, б) лазерный деформограф при удалении от источника 6 км, в) лазерный деформограф при удалении от источника 4 км, г) лазерный деформограф при удалении от источника 2 км

На трассе распространения гидроакустического сигнала проводилось измерение вертикального распределения температуры воды. На рис. 1.5а и 1.5б показаны графики распределения температуры в октябре 2012 г. и в июне 2013 г., соответственно.

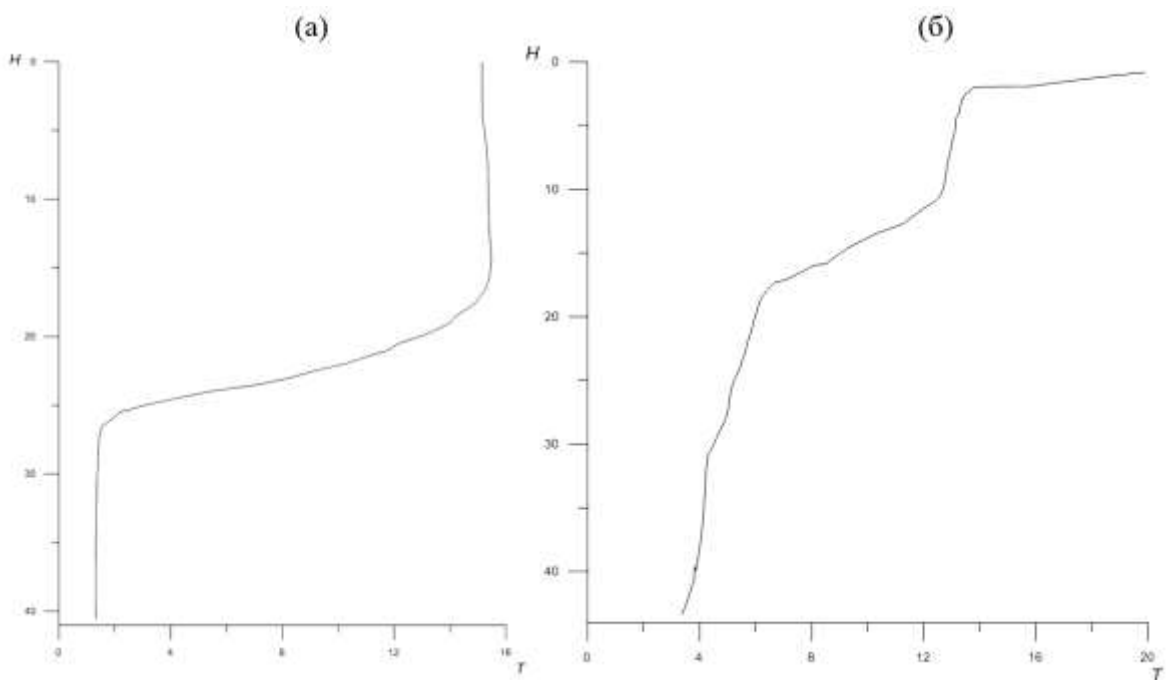


Рисунок 1.5 – Распределение температуры на трассе распространения гидроакустического сигнала в заливе Посьета Японского моря в октябре 2012 г. (а) и июне 2013 г. (б)

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для процесса распространения звука при условии, что глубина моря меньше или соразмерна с длиной волны, характерны сложность теоретического анализа и трудности математического описания акустических свойств, как границ, так и среды, заключенной между ними, так как процесс сопровождается отражениями звука от поверхности моря и дна. В акустике широко используется метод мнимых источников, используемый при расчете звукового поля, образованного действительным источником и бесконечным рядом зеркальных источников. Но применение данного метода приводит к значительному усложнению анализа. Флуктуации параметров среды и излучателя позволяют перейти к усредненным законам спада интенсивности и давления, имеющих большое практическое значение.

Учитывая сложность оценки поля в указанных условиях, используется один из эмпирических усредненных законов спада энергии, полученные Маршем и Шулькиным [7]:

$$p^2(r) = \frac{P_0^2 r_0^2}{r^2} 10^{-0,1\beta r} A_L, \text{ где } A_L - \text{ фактор аномалии в ближнем поле, } A_L = 10 \lg \frac{P}{P_{\text{безгр}}}, \text{ дБ; } r - \text{ расстояние}$$

до точки измерения, м; a_t – коэффициент затухания; D – параметр, определяемый из выражения $D = 0,58(H + L)^{1/2}$; β – коэффициент затухания акустической энергии, 1/км. Расстояние r , входящее в множители затухания определяется в километрах. В выражение для параметра D , определяющегося в километрах, входят H – глубина моря в месте излучения, м; L – толщина

изотермического слоя, примыкающего к поверхности, м. Это выражение справедливо для значений $r < D$.

Параметры фактора аномалии в ближнем поле и коэффициента затухания в “промежуточном” море определяются в зависимости от частоты излучения по данным таблицы значения фактора аномалии и коэффициента затухания в мелком море [8].

Значение акустической мощности на расстоянии 1 м от геометрического центра излучателя, при использовании выражения усредненного закона спада акустической энергии принимает следующий вид: $P_a = (4\pi P_0^2 / \rho c) \times 10^{-10^{-4}} \times 10^{0.1A_L}$.

Отношение энергии распространяющейся сейсмоакустической волны к излученной мощности приповерхностного источника гидроакустического излучения в зоне расположения лазерного деформографа для станций излучения составляет от $1,5 \cdot 10^{-2}$ на ближайшей станции излучения до $0,7 \cdot 10^{-3}$ на самой удаленной станции излучения.

При анализе записей деформографа на частоте излучения исследовалась величина амплитуды тонального сигнала в течение одинаковых интервалов времени в ходе работы гидроакустического излучателя. На рис. 1.6 приведен график изменений амплитуды принятого сигнала на частоте работы гидроакустического излучателя во время проведения каждого из этапа работ.

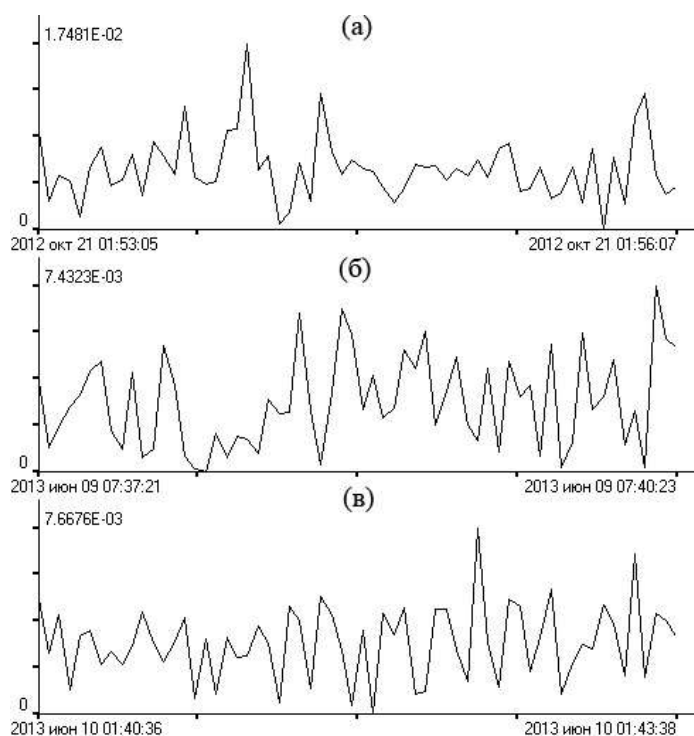


Рисунок 1.6 – Вариации амплитуды гидроакустического сигнала, принятого лазерным деформографом при работе излучателя на станции № 3: а) 21 октября 2012 г., б) 09 июня 2013 г., в) 10 июня 2013 г.

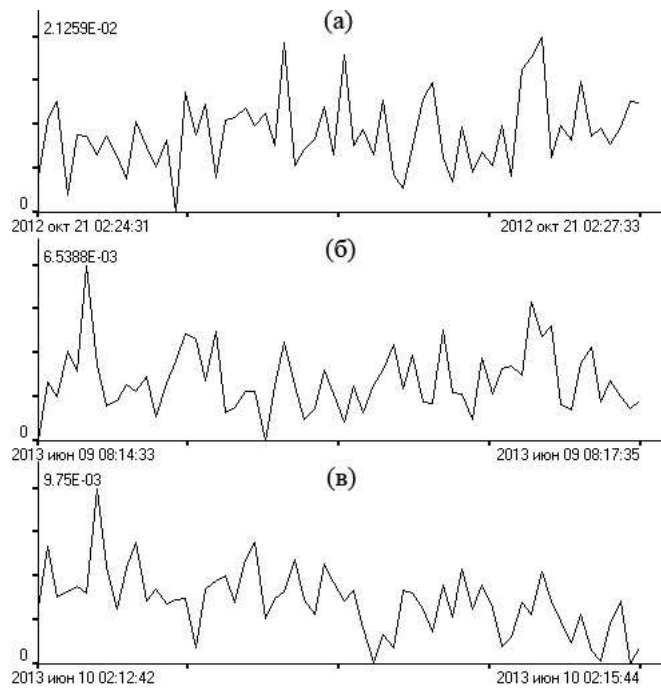


Рис. 1.7 – Вариации амплитуды гидроакустического сигнала, принятого лазерным деформографом при работе излучателя на станции № 4: а) 21 октября 2012 г., б) 09 июня 2013 г., в) 10 июня 2013 г.

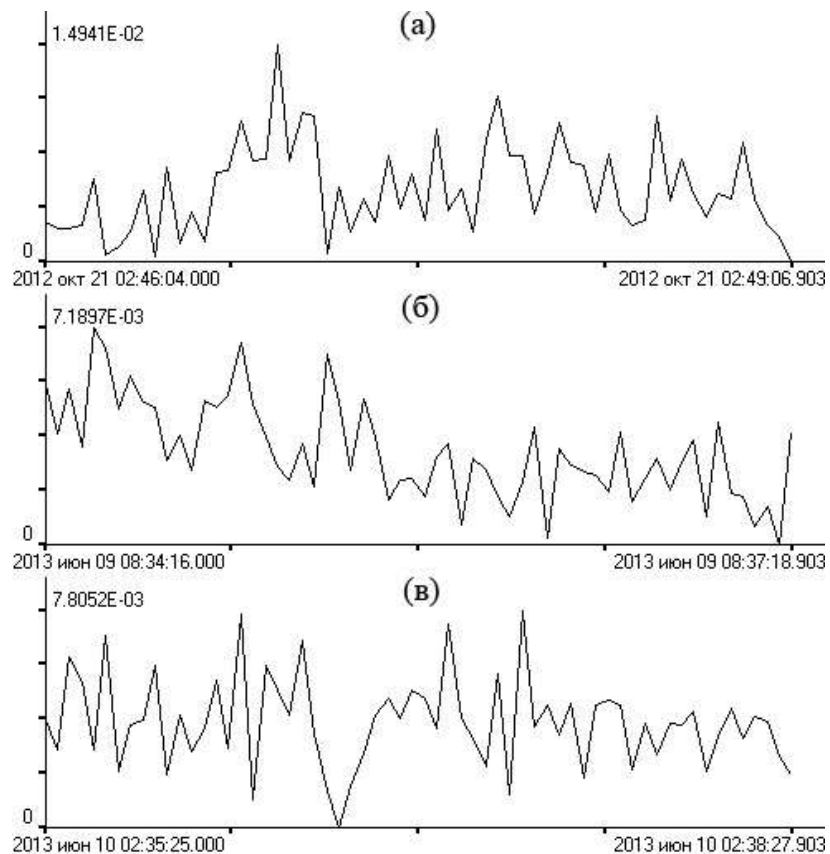


Рисунок 1.8 – Вариации амплитуды гидроакустического сигнала, принятого лазерным деформографом при работе излучателя на станции № 5: а) 21 октября 2012 г., б) 09 июня 2013 г., в) 10 июня 2013 г.

На рис. 1.7 приведены результаты обработки записей лазерного деформографа при работе излучающей системы на станции № 4.

На рис. 1.8 отображены графики вариаций амплитуды принятого сигнала при проведении всех этапов экспериментальных работ на станции 5.

Список использованных источников

1. Долгих Г.И., Чупин В.А. Экспериментальная оценка преобразования гидроакустического излучения в сейсмоакустическую волну // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 5. С. 628–632.
2. Долгих Г.И., Батюшин Г.Н., Долгих С.Г., Дзюба В.П., Чупин В.А. Трансформация сейсмоакустической энергии в гидроакустическую // ДАН. 2008. Т. 243. № 6. С. 815–816.
3. Григорьев В.А., Кацнельсон Б.Г. Флуктуации звука, обусловленные взаимодействием мод на движущихся нелинейных внутренних волнах в мелком море // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 3. С. 262–271.
4. Долгих Г.И., Батюшин Г.Н., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы "атмосфера-гидросфера-литосфера" // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 3. С. 120–122.
5. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли, 1998. № 11. С. 76–81.
6. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение. 1976.
7. Marsh H.W., Shulkin M. Shallow water transmission // J. Acoust. Soc. Am. 1962. V. 34. P. 863.
8. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.

2 Экспериментальное исследование характеристик водной среды и верхнего слоя земной коры на трассах «излучатель-приёмник» на основе использования гидроакустических и сейсмоакустических источников

Экспериментальный комплекс включает следующие устройства: гидроакустическая излучающая система, береговой двухкоординатный лазерный деформограф, профиломер.

Гидроакустическая излучающая система разработана в 2013 г. Предназначена для генерации длительных ГА сигналов в полосе частот $\Delta f_{0.7}$ порядка 1 Гц при центральной частоте f_0 полосы в диапазоне 19 - 26 Гц (в зависимости от глубины погружения излучателя). Амплитуда объемных колебательных смещений излучателя - до 0.0123 м^3 . На частоте 20 Гц, в безграничном водном пространстве это соответствует излучаемой акустической мощности W_A 1000 Вт.

Внешний вид, схематические изображения разрезов, и наружные габариты [1] излучателя приведены на рис.2.1 и 2.2.



Рисунок 2.1 – Внешний вид излучателя

Излучатель (его масса 260 кг, вес в воде – 40 кг) содержит цилиндрический корпус 1 и пару излучающих поршней 2, колеблющихся во взаимно-противоположных направлениях и создающих синфазные потоки объемной колебательной скорости. Колебания возбуждает преобразователь электромагнитного типа с П-образными наборными половинами сердечника 3 и четырьмя катушками 4. Между краями поршней зажат набор цилиндрических пружин 5. Зазоры между фланцами корпуса 1 и краями поршней уплотнены резинотканевыми воротниками 6.

Сжатие пружин достигается за счет пониженного на $\Delta P = 0.05 \text{ мПа}$ давления воздуха в полости излучателя относительно гидростатического на глубине его погружения. Катушки в каждой паре на половине сердечника 3 соединены последовательно. Подвод тока к ним осуществляют посредством упругих проводников, выведенных через уплотнения на поршнях 2.

Коммутация проводников выполнена непосредственно на излучателе и соответствует последовательному соединению пар. В качестве первичных источников постоянного тока используют батарею последовательно соединенных (в количестве от 3 до 22 штук, в зависимости от необходимой мощности) кислотных аккумуляторов напряжением по 12 В, емкостью 90 А/час. Источник представляет собой мостовой ключ, выполненный на двух полумостовых IGBT-модулях и снабжен компенсирующей батареей конденсаторов, защитным автоматом и амперметром постоянного тока.

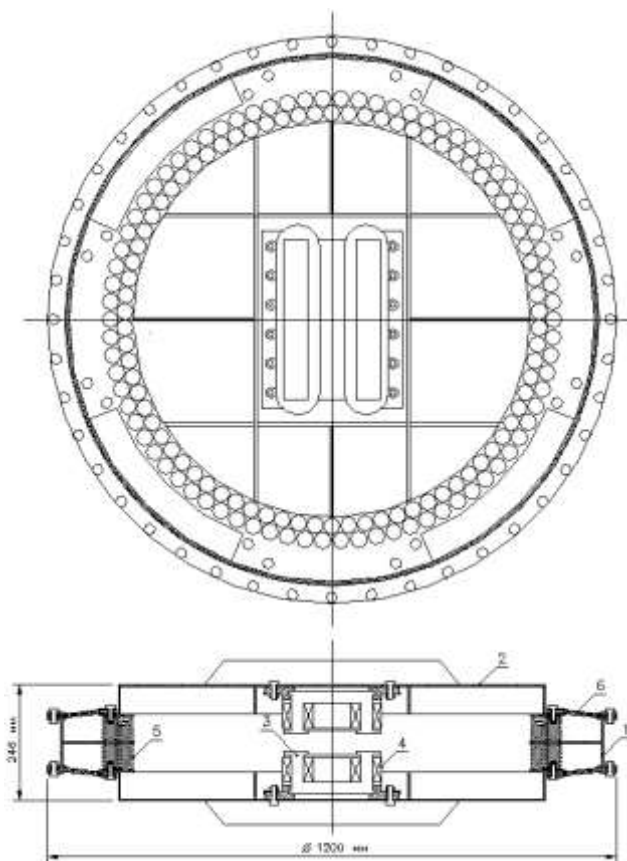


Рисунок 2.2 – Наружные размеры и схематическое изображение сечений излучателя: 1-корпус, 2-излучающие поршни, 3-сердечник преобразователя, 4-катушка преобразователя, 5-пружина, 6-резинотканевая мембрана

В процессе излучения знакопеременное давление на внешних поверхностях поршней 2 величины ΔP не превышает. Поэтому резинотканевые мембраны 6 постоянно прогнуты внутрь излучателя и амплитуда их колебательного смещения по знаку равна смещению соответствующих поршней, а по величине изменяется от нуля на линиях закрепления мембран на корпусе 1 до смещения s поршней 2 на линиях закрепления мембран 6 на поршнях. Таким образом, объемная колебательная скорость излучателя равна:

$$Q_m = \omega s \left(S + \frac{s}{2} \right),$$

где S - площадь поверхностей поршней, а s - площадь поверхностей мембран. Для излучателя эффективная площадь излучающей поверхности $(S + s/2)$ равна 1.745 м^2 .

Береговой двухкоординатный лазерный деформограф [2] горизонтального типа установлен на МЭС ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца» в подземных гидротермоизолированных помещениях в месте с географическими координатами $42^{\circ}34'50''\text{N}$, $131^{\circ}9'25''\text{E}$ на высоте 76 м над уровнем моря. Плечи лазерного деформографа практически ортогональны друг другу и ориентированы по линиям север-юг (СЮ) и запад-восток (ЗВ). Оптическая часть деформографа построена по принципу неравноплечего интерферометра Майкельсона с использованием в качестве источника излучения частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров Melles Griot. Луч лазера распространяется по изолированным световодам длиной 52,5 и 17,5 м, собранным под землей из труб сделанных из нержавеющей стали. Прибор способен регистрировать микродеформации земной коры с точностью измерения до 10^{-10} , в широком частотном диапазоне и практически неограниченном динамическом диапазоне измерения.

На рисунке 2.3 приведена оптическая схема однокоординатного лазерного деформографа неравноплечего типа.

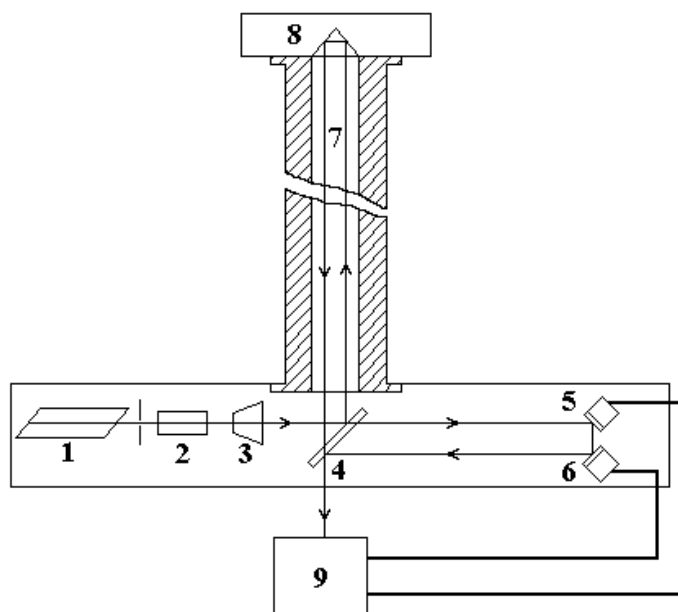


Рисунок 2.3 – Оптическая схема лазерного деформографа неравноплечего типа: 1 – лазер; 2 – оптический затвор; 3 – коллиматор; 4 – полупрозрачная плоско-параллельная пластина; 5,6 – плоско-параллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах; 7 – световод; 8 – уголкового отражатель; 9 – система регистрации

Деформограф включает в себя интерференционный узел с частотно-стабилизированным лазером, коллиматор, оптический затвор (диафрагма, поляризатор, пластина $\lambda/4$), плоскопараллельные юстировочные зеркала. Угловые отражатели каждого плеча лазерного

деформографа также установлены в отдельных термоизолированных камерах. Лазерный деформограф измеряет изменение плеча между интерференционным узлом и отражателем, установленных на отдельных фундаментах. А принцип измерения состоит в измерении набега фазы луча лазера с помощью лазерно-интерференционных методов.

Для измерения профиля температуры и скорости звука на станциях излучения применялся профиломер скорости звука «miniSVP» компании Valeport (рисунок 2.4). Профиломер оснащен тремя датчиками: датчиком скорости звука, датчиком температуры PRT и датчиком давления. Датчик скорости звука измеряет в диапазоне 1375-1900 м/с с разрешением 10^{-3} м/с и точностью 10^{-2} м/с. Датчик температуры измеряет в диапазоне от -5°C до $+35^{\circ}\text{C}$ с разрешением 10^{-3} $^{\circ}\text{C}$ и точностью 10^{-2} $^{\circ}\text{C}$. Датчик давления измеряет давление до 600 бар с разрешением 0,001% и точностью 0,05%. Регистрация данных производится с заданной частотой до 8 Гц во время погружения/поднятия прибора по всей толще воды во внутреннюю память устройства. При этом регистрация данных происходит практически в каждой точке.



Рисунок 2.4 – Профиломер

Для синхронизации времени работы пространственно-удалённых установок использовалась программа TimeLordGPS, синхронизирующая время работы компьютера с помощью GPS-приёмника четвертого поколения G-STAR BU-353S4 на базе чипа серии SIRF.

Первый этап работ (подготовительный) включал проведение излучения двумя излучателями 22 Гц и 33 Гц на 4 станциях на расстоянии 10 км от береговой приемной системы (рисунок 2.5). Возле побережья с маломерного судна велась контрольная запись излучаемого сигнала гидрофоном.

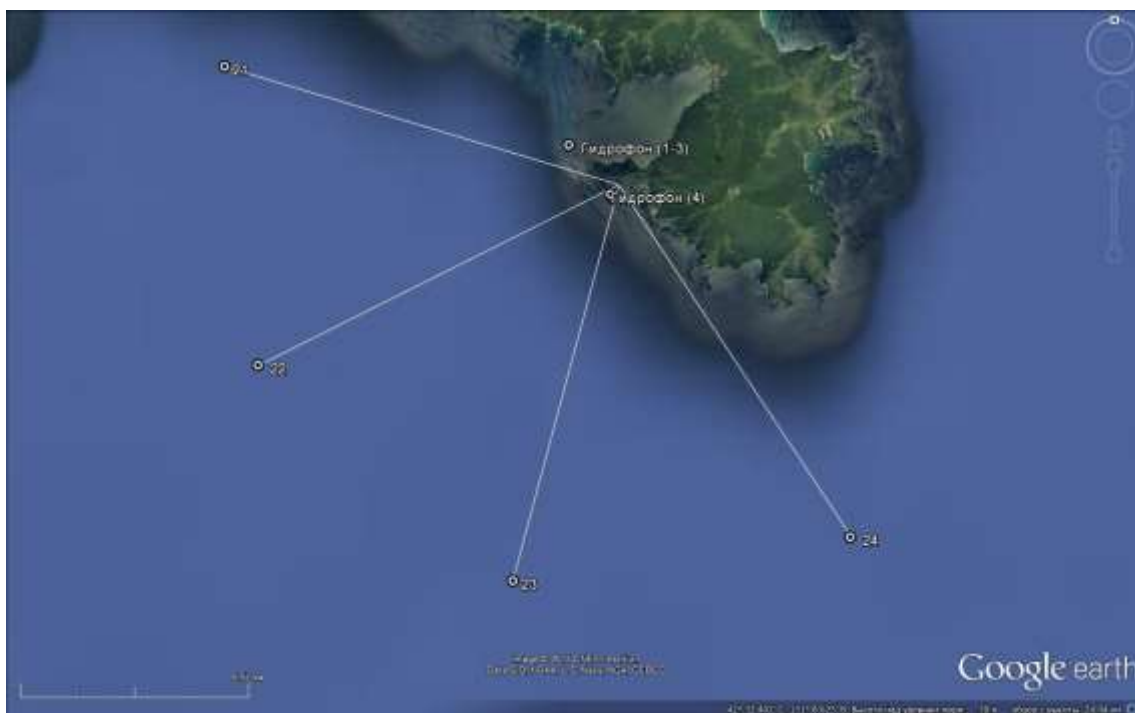


Рисунок 2.5 – Схема положения станций гидроакустического излучения относительно береговой станции МЭС «м. Шульца»

При излучении использовалась следующая последовательность сигнала.

- 1) Тон 11 Гц – 300 с
- 2) Пауза 30 с
- 3) m_11_8_10_1_sin_0.5_0.1
- 4) Пауза 30 с
- 5) m_11_6_10_1_sin_0.5_0.1

Общая продолжительность 649.091 с

Второй этап работ заключался в проведении длительного морского похода в Японском море. Предполагалось выполнить несколько станций излучения низкочастотной гидроакустической излучающей системой с центральной частотой излучения 22 Гц, при последовательном удалении от береговой приемной станции на одинаковые расстояния, в условиях мелкого и глубокого моря (относительно длины излучаемых волн). На рисунке 2.6 показана карта-схема движения судна при проведении экспериментальных работ.

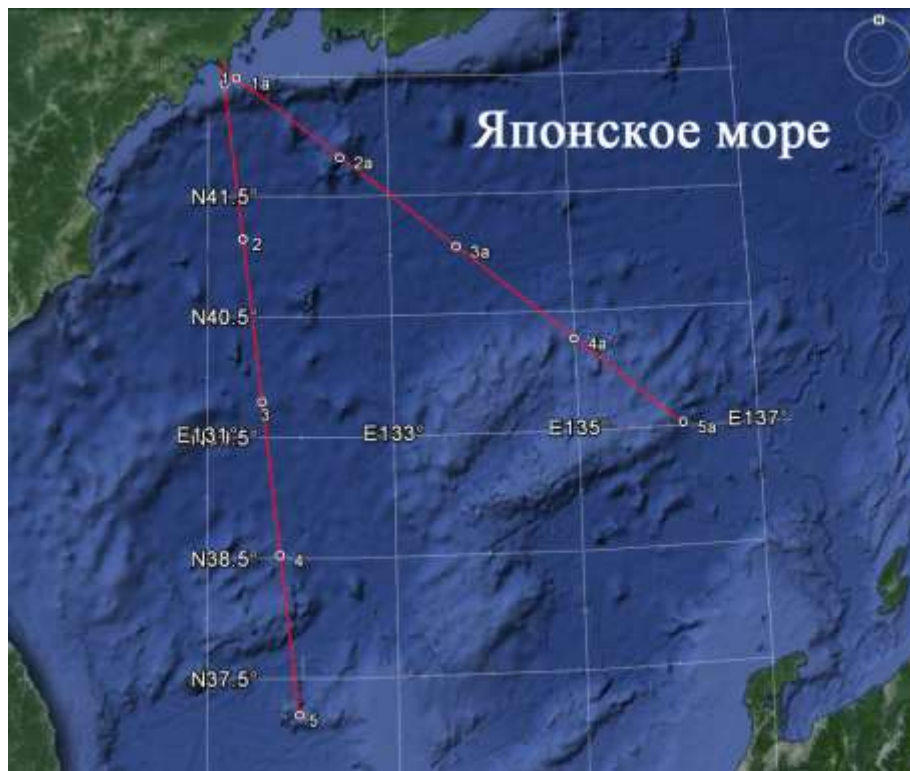


Рисунок 2.6 – Карта схема морских научных исследований в Японском море

В соответствии со схемой судно движется от станции 1, находящейся в 17 км от м. Шульца п-ова Гамова до станции 5, последовательно выполняя излучения. Затем судно переходит на станцию 5а и движется обратно к побережью Приморского края с последовательным выполнением работ на станциях. Помимо излучения гидроакустического сигнала проводятся работы по гидрологическим измерениям с определением параметров температуры и скорости звука в поверхностной части моря. В таблице 2.1 приведены координаты станций излучения.

Таблица 2.1 – Характеристики станций излучения

№ станции	Географическая широта (в градусах, минутах и долях минут)	Географическая долгота (в градусах, минутах и долях минут)
1	42°26,245'	131°10,812'
2	41°08,669'	131°22,996'
3	39°47,782'	131°35,108'
4	38°32,015'	131°46,117'
5	37°12,272'	131°57,690'
5а	39°31'	136°08,801'
4а	40°16,133'	134°59,035'
3а	41°03,707'	133°43,468'
2а	41°49,035'	132°27,687'
1а	42°29,343'	131°18,916'

Для работы излучателя подготовлена последовательность излучаемого сигнала в следующем виде:

Описание последовательности IS_11_sin_201411_89300

- 1) Тон 11 Гц – 300 с
- 2) Пауза 300 с
- 3) m_11_8_10_1_sin_0.5_0.1
- 4) Пауза 300 с
- 5) m_11_9_10_1_sin_0.5_0.1

Общая продолжительность 1596.365 с

где m-последовательности 3) и 5) расшифровываются: m_Частота_Разрядность_ЧислоПериодовНаСимвол_ИсходноеСостояние_Форма_КоэффСдвигаФазы_ШиринаСдвигаФазы. Излучатели удваивают частоту, число периодов на символ и сдвиг фазы.

Мгновенный спектр M-последовательности (псевдослучайной последовательности) представляет собой модуляцию синусоидального сигнала несущей частоты кодовой M-последовательностью, состоящей из $B = 2^n - 1$ символов; в конце каждого символа производится изменение фазы колебаний на 0° или 180° по псевдослучайному закону. Длительность элементарного символа выбирается кратной периоду излучаемой частоты T_0 .

Волновые размеры излучателя малы, поэтому его акустическая мощность определяется выражением:

$$W_A = \frac{K\rho\omega^2 Q_m^2}{(8\pi c)}$$

где ρ - плотность воды, c - скорость звука в ней, ω - циклическая частота колебаний поршней, K - коэффициент (рисунок 2.7), учитывающий влияние жесткого дна водоема (кривая 1) и поверхности воды (кривая 2).

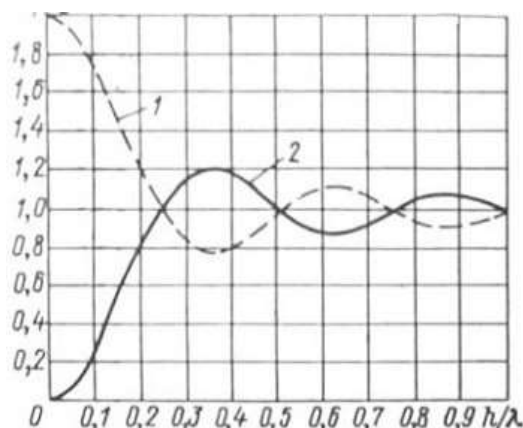


Рисунок 2.7 – Значения коэффициента K в зависимости от отношения расстояния h до граничной поверхности к длине звуковой волны λ

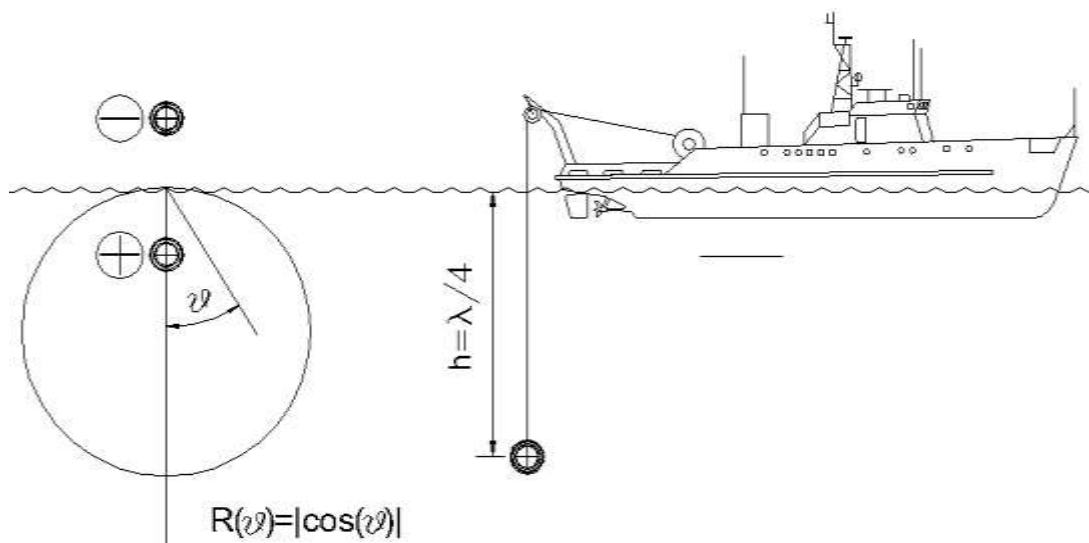


Рисунок 2.8 – Направленность излучения

При работе на любой глубине излучатель и противофазный ему мнимый источник (рисунок 2.8) совместно образуют антенну, минимум характеристики направленности которой лежит в горизонтальной плоскости. При расположении излучателя на глубинах, близких к 17 м (к четверти длины звуковой волны), максимум характеристики направленности направлен вертикально вниз.

10 октября 2014 г. были проведены работы по излучению гидроакустических волн на частоте 22 Гц в на 4 станции с координатами: станция 21 N42°36.329, E131°02.370; станция 22 N42°32.355, E131°02.899; станция 23 N42°29.560, E131°07.480; станция 24 N42°30.159, E131°13.150.

При подготовке к основному излучению к питанию излучающей системы попеременно подключали разное количество аккумуляторов. На рисунке 2.9 видна работа системы с разной мощностью излучения при подключении 2, 6 и 14 аккумуляторных батарей.

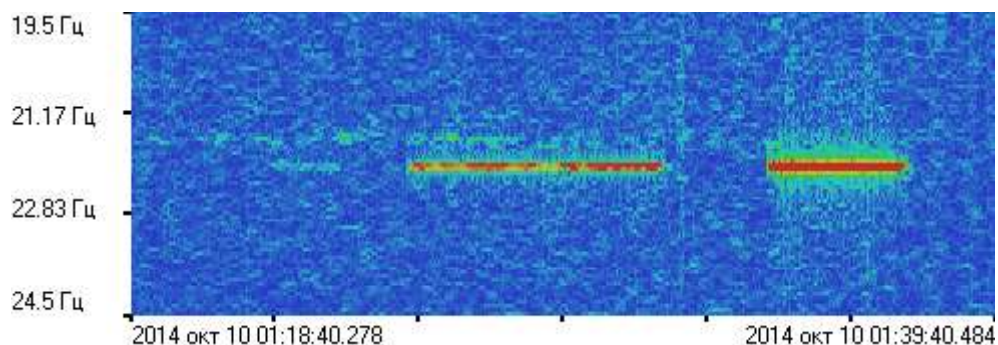


Рисунок 2.9 – Динамическая спектрограмма лазерного деформографа СЮ при тестовом включении тонового сигнала излучающей системы 22 Гц

При основной работе на станциях были получены следующие спектрограммы записей лазерного деформографа (рисунки 2.10 – 2.13).

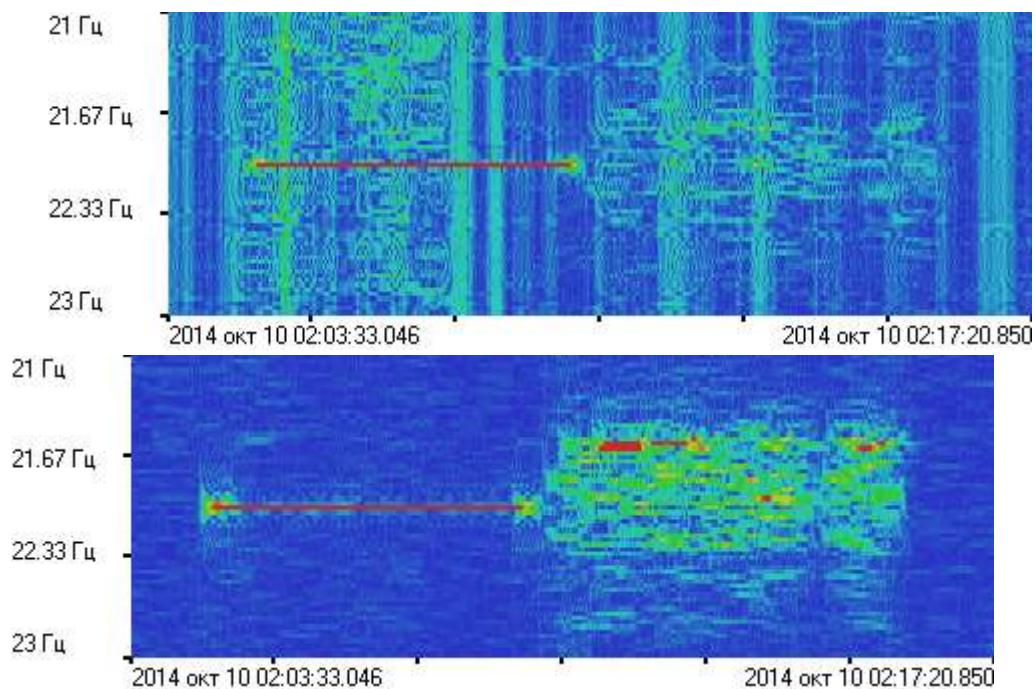


Рисунок 2.10 – Динамическая спектрограмма записей плеч лазерного деформографа 3В (вверху) и СЮ (внизу) при работе излучателя 22 Гц на станции 21

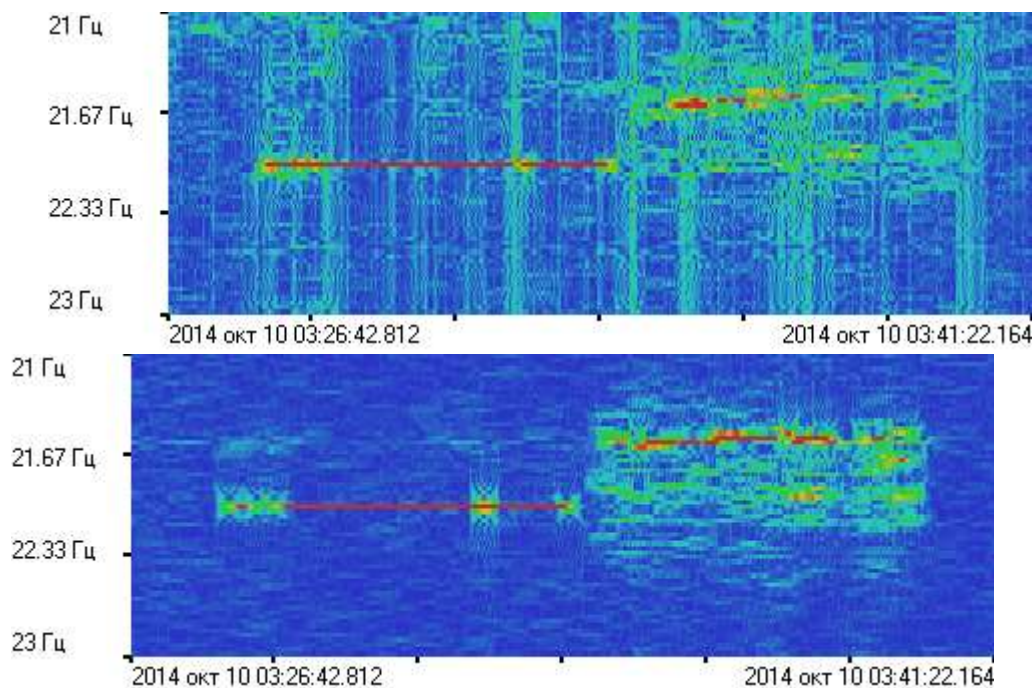


Рисунок 2.11 – Динамическая спектрограмма записей плеч лазерного деформографа 3В (вверху) и СЮ (внизу) при работе излучателя 22 Гц на станции 22

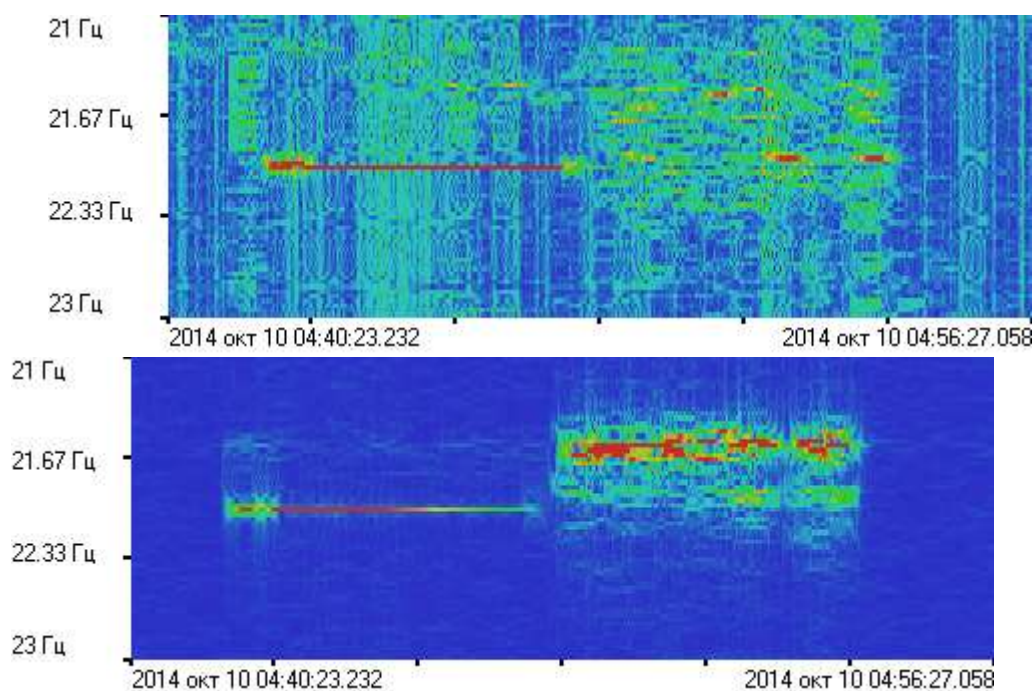


Рисунок 2.12 – Динамическая спектрограмма записей плеч лазерного деформографа 3В (вверху) и СЮ (внизу) при работе излучателя 22 Гц на станции 23

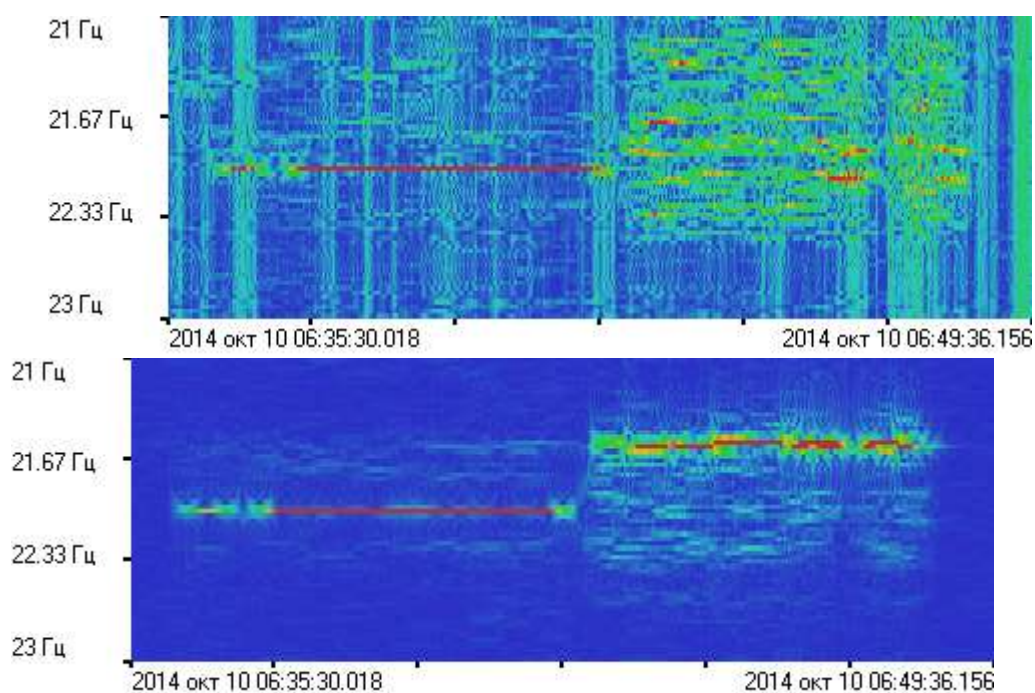


Рисунок 2.13 – Динамическая спектрограмма записей плеч лазерного деформографа 3В (вверху) и СЮ (внизу) при работе излучателя 22 Гц на станции 24

11 октября 2014 г. экспериментальные работы были повторены, но с использованием излучающей системы 33 Гц. Были получены следующие динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (рисунки 2.14 – 2.16).

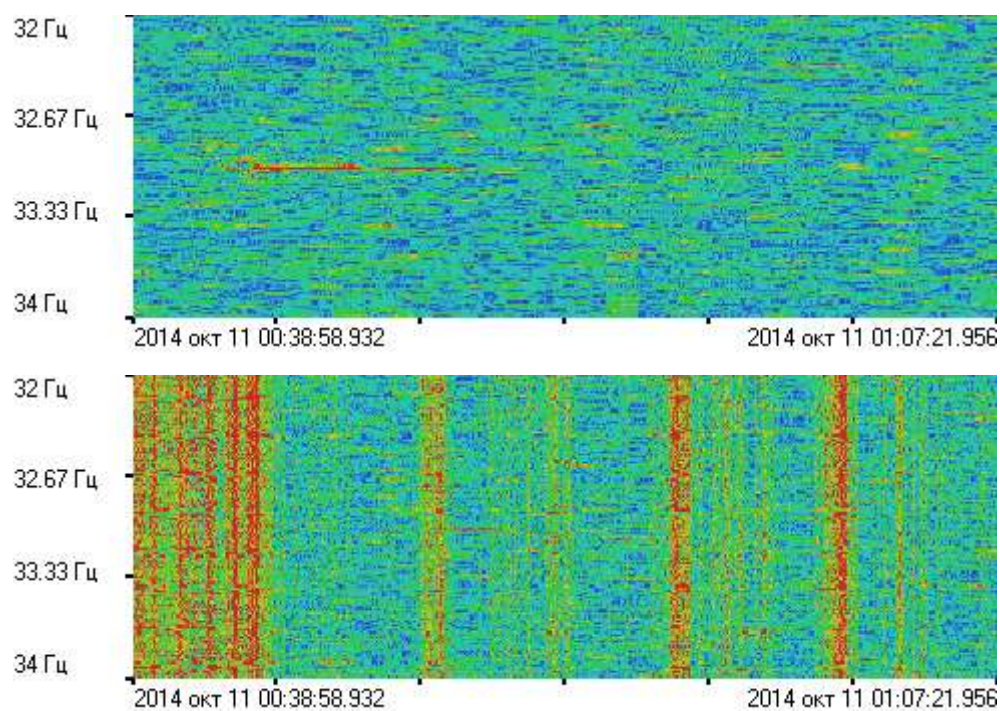


Рисунок 2.14 – Динамическая спектрограмма записей плеч лазерного деформографа ЗВ (вверху) и СЮ (внизу) при работе излучателя 33 Гц на станции 21

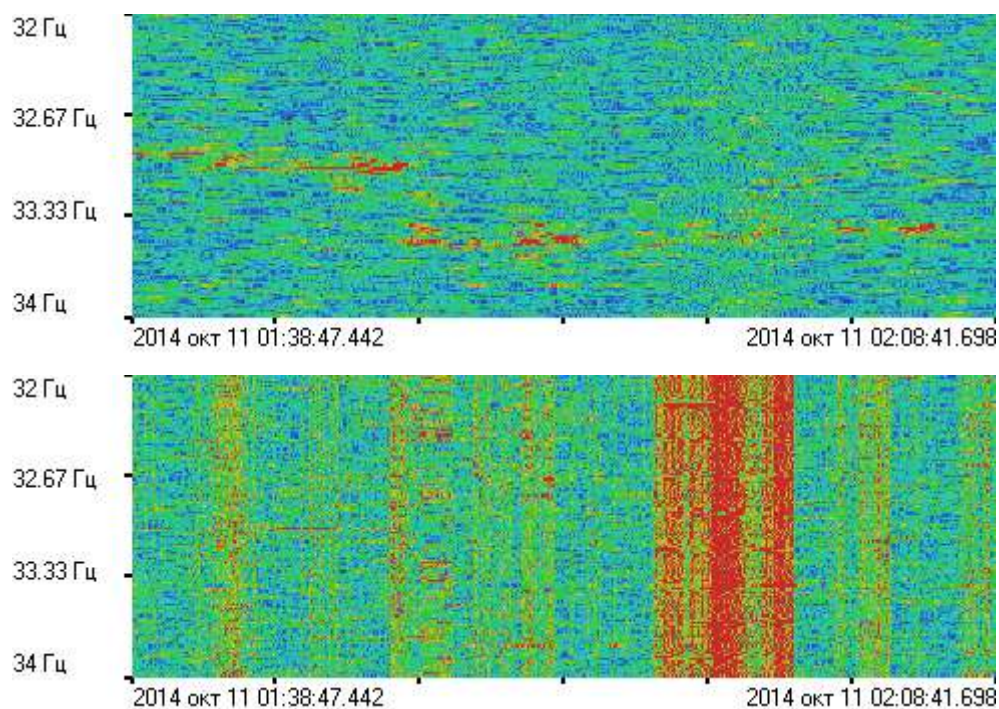


Рисунок 2.15 – Динамическая спектрограмма записей плеч лазерного деформографа ЗВ (вверху) и СЮ (внизу) при работе излучателя 33 Гц на станции 22

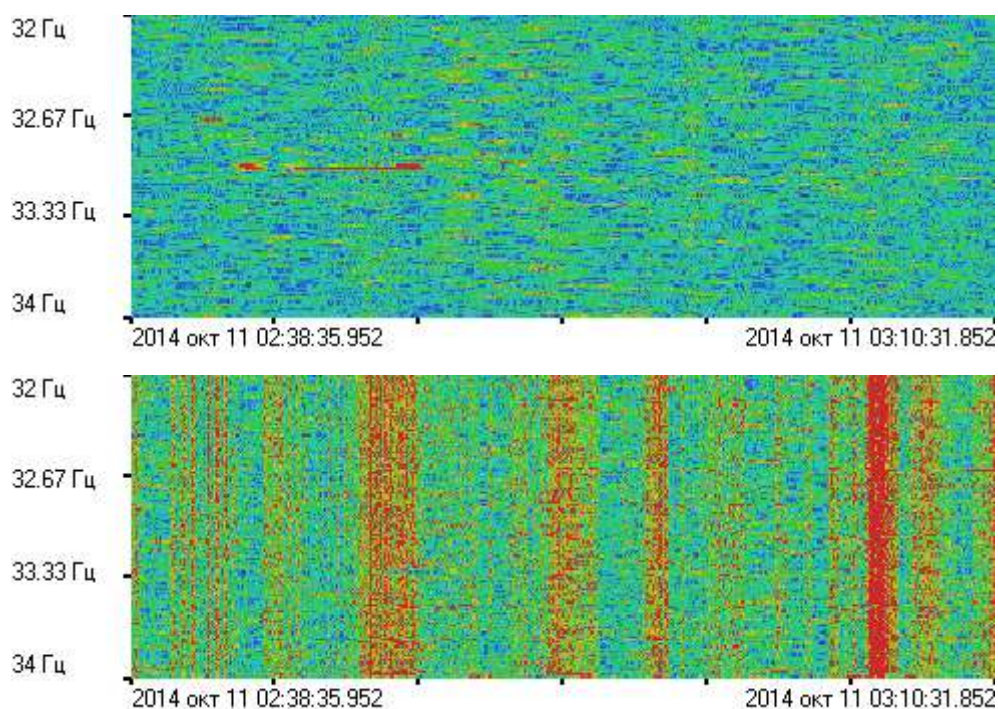
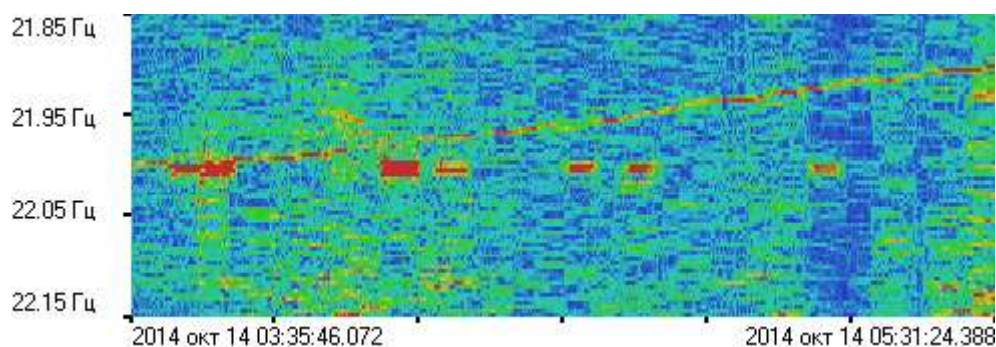


Рисунок 2.16 – Динамическая спектрограмма записей плеч лазерного деформографа ЗВ (вверху) и СЮ (внизу) при работе излучателя 33 Гц на станции 23

При работе излучающей системы с центральной частотой излучения 22 Гц видно, что излучаемая акустическая энергия выше, чем излучающей системы 33 Гц. Поэтому при проведении данного этапа работ сделаны выводы о перспективности и преимуществе использования гидроакустической излучающей системы 22 Гц на больших расстояниях от приемных береговых станций.

Также, 14 октября 2014 г. выполнено пробное излучение гидроакустического сигнала 22 Гц на расстоянии 23 км от береговой приемной станции в точке с координатами N42°27.629, E130°55.854 под берегом о. Фуругелья. Сигнал излучался по описанной методике работы излучателя 22 Гц при глубине моря 30 м. Излучаемый сигнал сразу трансформировался в дно, пересекал чашу залива Посьета с глубинами до 51 м и регистрировался тремя компонентами лазерного деформографа.



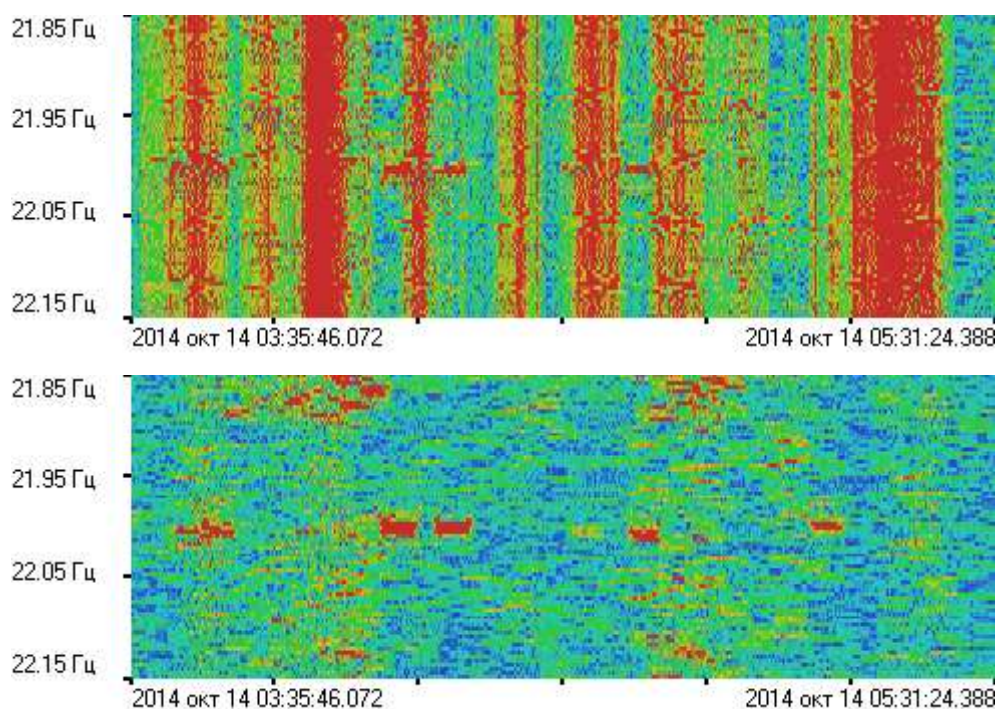


Рисунок 2.17 – Динамическая спектрограмма записей плеч лазерного деформографа СЮ2 (вверху), 3В (средний) и СЮ (внизу) при работе излучателя 22 Гц на станции 23

18 ноября 2014, рамках выполнения второго этапа работ, в б. Витязь была произведена погрузка и размещение оборудования, проверка и настройка аппаратуры, вывод излучателя в рабочий режим. Из-за значительного риска выхода из строя усилителя при работе более чем от 14 аккумуляторов принято решение работать на всех точках только от 14 аккумуляторов. Предыдущие испытания показали, что прирост амплитуды излучаемого сигнала при переходе от 14 к 18 аккумуляторам слишком незначителен (~ 5%), и не оправдывает повышенного риска выхода усилителя из строя, тем более в условиях морской экспедиции с жёсткой план-программой.

Излучатель опускался с кормовой П-рамы судна (рисунок 2.18). Для уменьшения колебаний на волнении и сноса течением снизу к излучателю подвешивался груз ~ 32 кг (начиная с точки 5а ~ 64 кг). Кабели (силовой и сигнальные) были заведены в лабораторное помещение на корме. Воздушный шланг оставался на палубе.



Рисунок 2.18 – Рабочее крепление излучателя на палубе судна

Запись контрольного гидрофона велась на линейный вход звуковой карты ноутбука NEC PC-VA75H, чувствительность была выставлена на максимум, перед входом установлен делитель напряжения с коэффициентом 1:11.1.

Гидрологический зонд опускался с борта судна на шнуре длиной 94 м. Приведем характеристики работ на станциях излучения ГА сигнала. Указываются от двух до трех координат во время работы ГА излучающей системы, с указанием местного времени в момент регистрации координат.

Станция 1, 19.11.2014, судно в дрейфе, N42°25'34.3", E131°09'46.2" (10:22:35), глубина 91 м, N42°25'24.8", E131°09'49.4" (10:34:49), N42°25'13.6", E131°09'52.8" (10:50:04).

Таблица 2.1 – Характеристики излучателя при работе на станции 1.

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
10:22:30	IS_11_sin_201411_89300	14	12		9	1.4

На рисунке 2.19 приведена спектрограмма записи контрольного гидрофона при работе на станции 1.

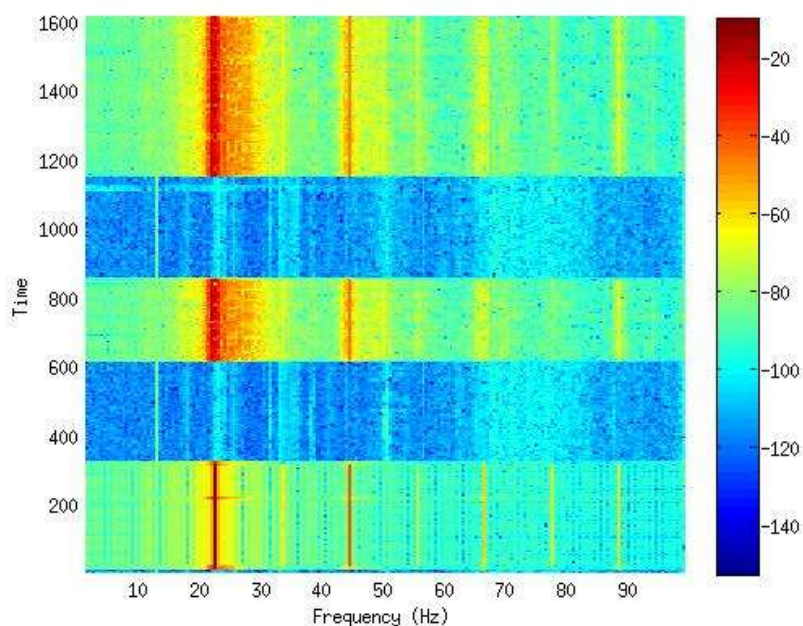


Рисунок 2.19 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 1

Станция 2, 19.11.2014, судно в дрейфе, N41°09'21.0", E131°21'00.2" (20:07:10), глубина 3339 м, N41°09'36.8", E131°20'42.3" (20:18:56), N41°09'58.1", E131°20'19.4" (20:33:47).

Таблица 2.2 – Характеристики излучателя при работе на станции 2

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
20:07:05	IS_11_sin_201411_89300	14	12		9	1.4

На рисунке 2.20 приведена спектрограмма записи контрольного гидрофона при работе на станции 2.

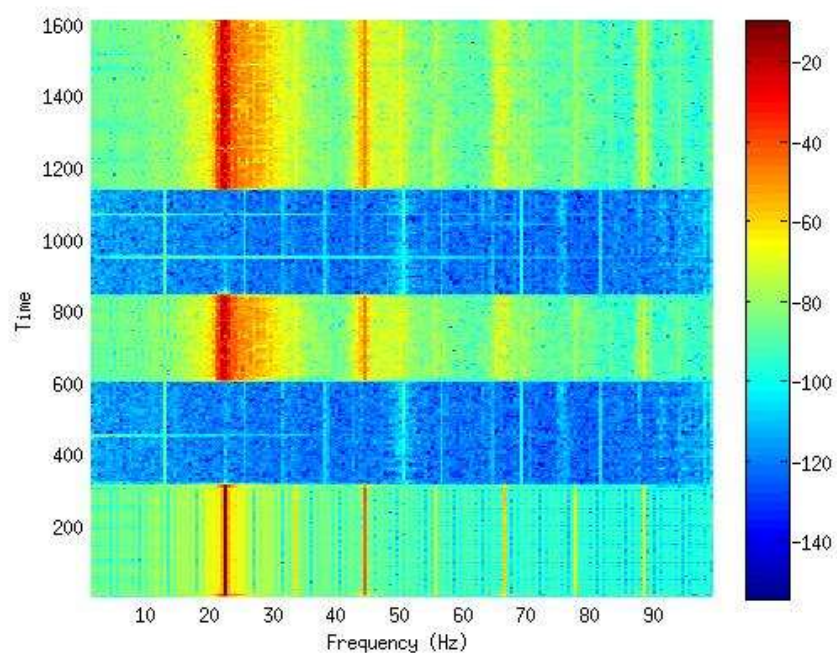


Рисунок 2.20 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 2

Станция 3, 20.11.2014, судно в дрейфе, N39°49'43.4", E131°33'47.5" (06:49:14), глубина 2916 м, N39°49'46.9", E131°33'46.3" (06:59:12), N39°49'52.1", E131°33'45.5" (07:16:03).

Таблица 2.3 – Характеристики излучателя при работе на станции 3

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
06:49:10	IS_11_sin_201411_89300	14	12	.5	9	1.5

На рисунке 2.21 приведена спектрограмма записи контрольного гидрофона при работе на станции 3.

Станция 4, 20.11.2014, судно в дрейфе, N38°32'29.6", E131°46'10.3" (16:37:05), глубина 2122 м, N38°32'28.1", E131°46'20.3" (16:47:55), N38°32'25.2", E131°46'34.7" (17:02:48).

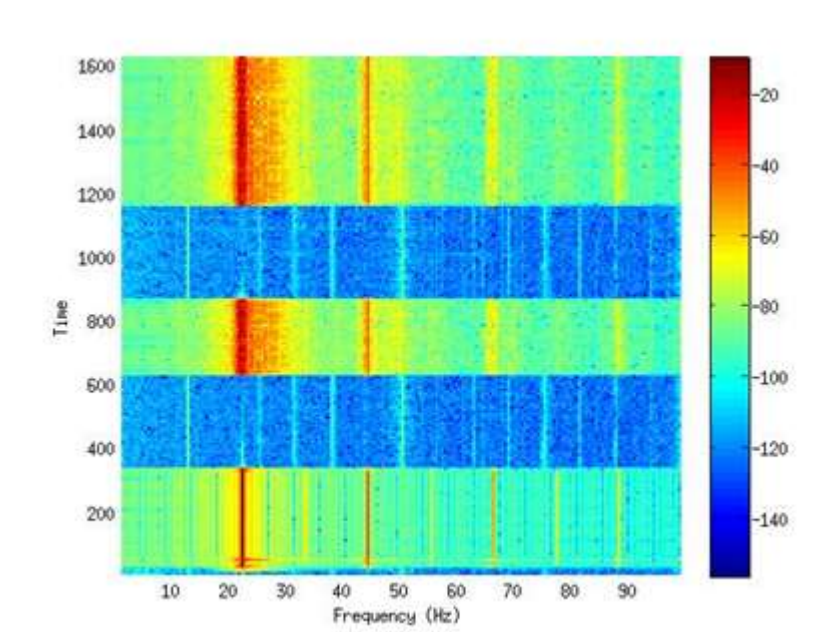


Рисунок 2.21 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 3

Таблица 2.4 – Характеристики излучателя при работе на станции 4

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
16:36:00	IS_11_sin_201411_89300	14	12		9	1.5

На рисунке 2.22 приведена спектрограмма записи контрольного гидрофона при работе на станции 4.

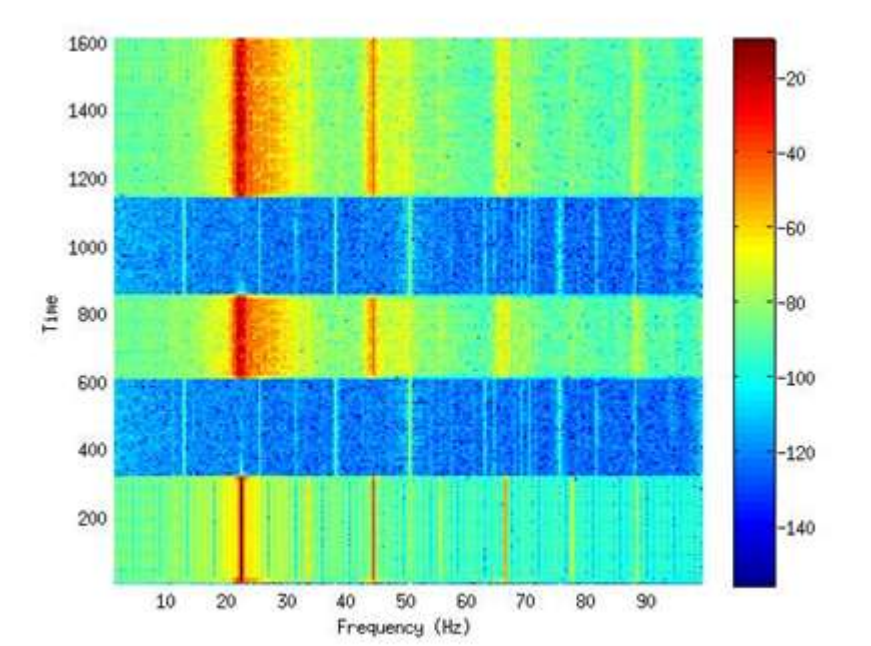


Рисунок 2.22 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 4

В точке 5 работы не проводились по причине близости координат станции к сопредельному государству.

Станция 5а, 21.11.2014, судно в дрейфе, N39°28'18.6", E136°10'55.5" (19:04:08), глубина 2232 м, N39°28'02.9", E136°11'36.5" (19:29:50). Волнение моря при работе составляло 4 балла. Сильный дрейф судна вызывал наклон троса излучателя от 15° до 50° от вертикали, вследствие чего излучатель изменял глубину и выходил из рабочего режима, что вызывало сильные броски тока усилителя. Чтобы не допустить повреждений аппаратуры, количество питающих аккумуляторов было уменьшено до 12 штук, а ёмкость компенсирующих конденсаторных батарей увеличена до 420 мкФ, давление в полости излучателя понижено до 1.25 кгс/см².

Таблица 2.5 – Характеристики излучателя при работе на станции 5а

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
19:03:10	IS_11_sin_201411_89300	12			5 – 10	1.25

На рисунке 2.23 приведена спектрограмма записи контрольного гидрофона при работе на станции 5а.

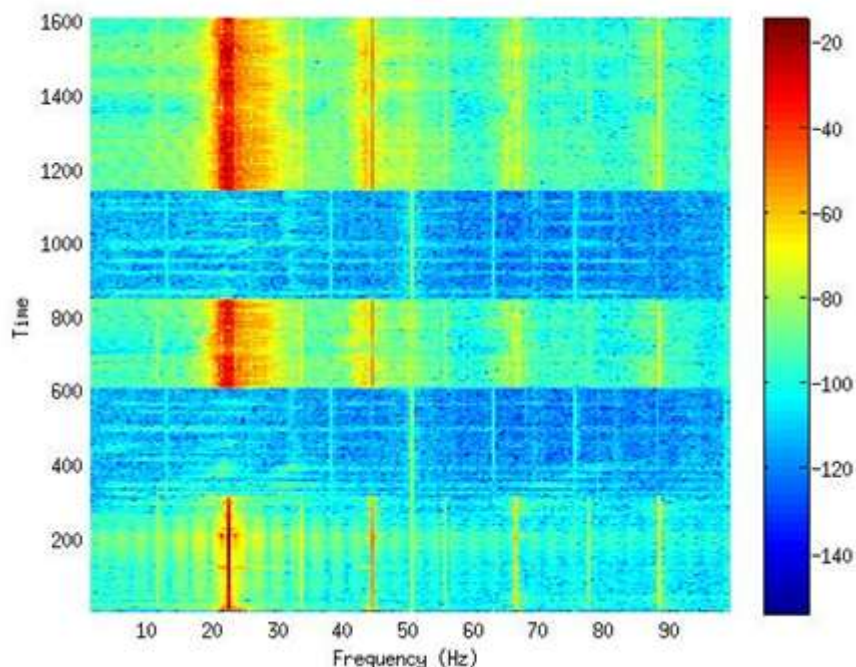


Рисунок 2.23 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 5а

Станция 4а, 22.11.2014, судно в дрейфе, N40°16'22.7", E134°56'46.6" (06:34:11), глубина 1381 м, N40°16'26.4", E134°57'05.8" (06:46:30), N40°16'31.1", E134°57'27.9" (07:00:53).

Таблица 2.6 – Характеристики излучателя при работе на станции 4а

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
06:34:10	IS_11_sin_201411_89300	14	12		8 – 12	1.42

На рисунке 2.24 приведена спектрограмма записи контрольного гидрофона при работе на станции 4а.

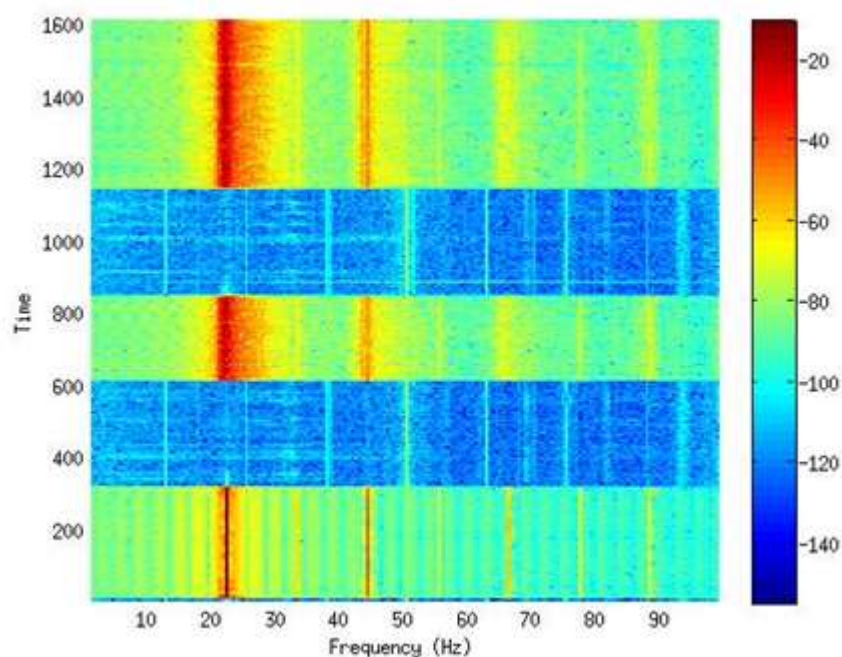


Рисунок 2.24 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 4а

Станция 3а, 22.11.2014, судно в дрейфе, N41°02'42.7", E133°40'59.0" (16:30:05), глубина 3475 м, N41°02'23.8", E133°41'05.7" (16:43:51), N41°02'05.4", E133°41'09.7" (16:56:49). Волнение 3 балла. Излучатель работает не очень стабильно. Наклон троса излучателя достигал 30° от вертикали.

Таблица 2.7 – Характеристики излучателя при работе на станции 3а

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
16:30:00	IS_11_sin_201411_89300	14			8 – 12	1.45

На рисунке 2.25 приведена спектрограмма записи контрольного гидрофона при работе на станции 3а.

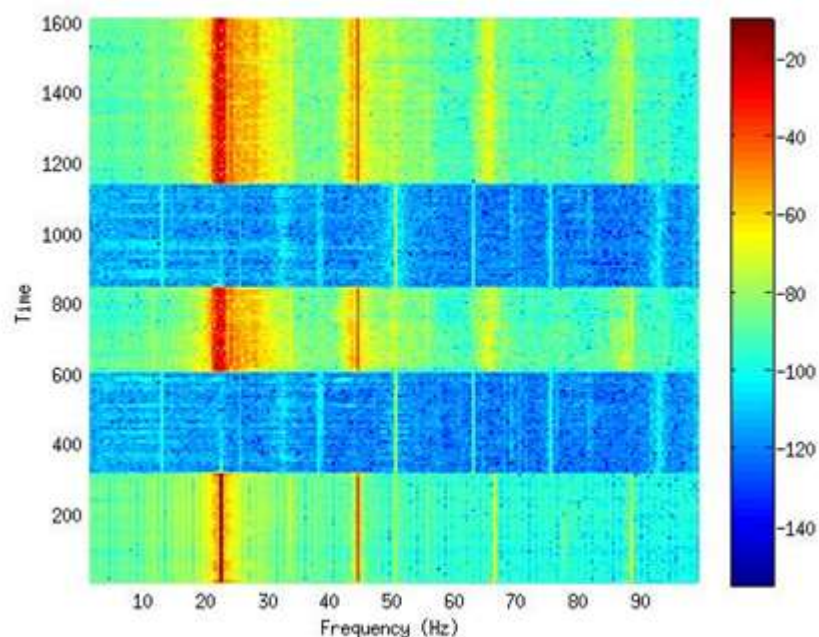


Рисунок 2.25 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 3а

Станция 2а, 23.11.2014, судно в дрейфе, N41°48'56.4", E132°26'33.2" (01:36:48), глубина 2419 м, N41°48'49.3", E132°26'30.0" (01:49:20), N41°48'41.0", E132°26'29.9" (02:03:39).

Таблица 2.8 – Характеристики излучателя при работе на станции 2а

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
01:37:00	IS_11_sin_201411_89300	14	13		9	1.5

Станция 1а, 23.11.2014, судно в дрейфе, N42°29'11.6", E131°18'42.8" (09:57:17), глубина 66 м, N42°29'07.9", E131°18'24.9" (10:10:43), N42°29'05.9", E131°18'04.5" (10:24:26).

Таблица 2.9 – Характеристики излучателя при работе на станции 1а

Время	Сигнал	Na	Uh	Ua	I	Pc
09:57:20	IS_11_sin_201411_89300	14	13		11	1.48

На рисунках 2.26 и 2.27 приведены спектрограммы записи контрольного гидрофона при работе на станциях 2а и 1а соответственно.

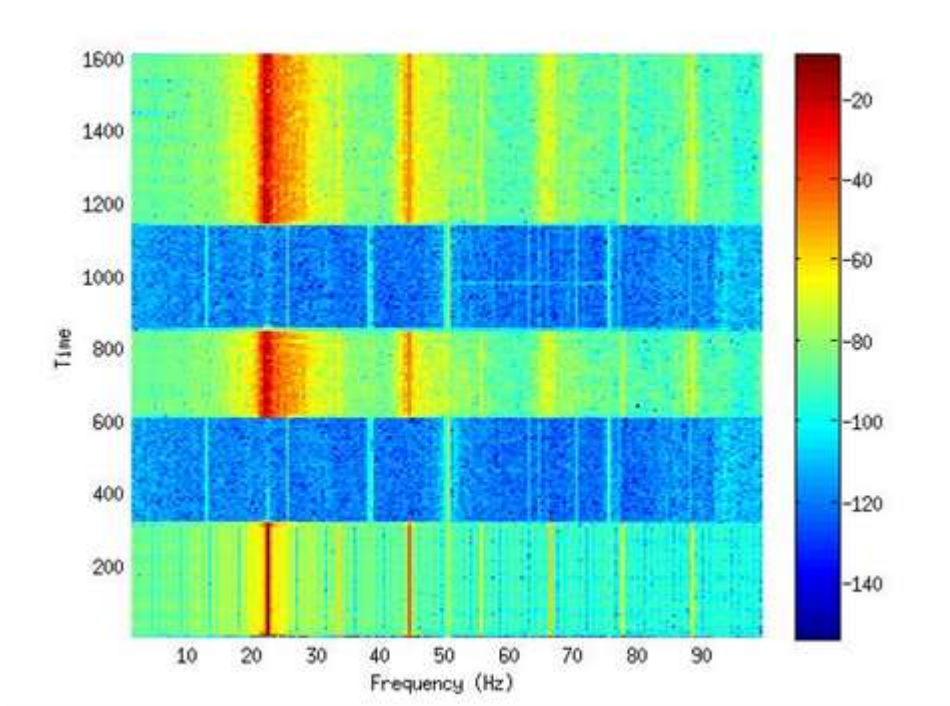


Рисунок 2.26 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 2а

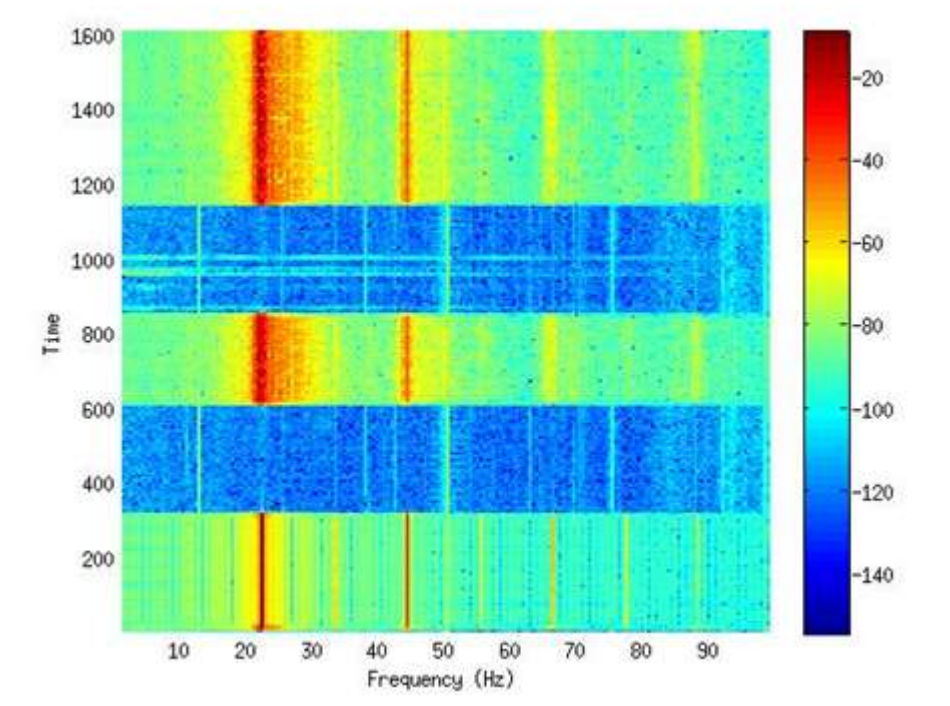


Рисунок 2.27 – Спектрограмма записи контрольного гидрофона на станции 1а

Во время длительного перехода между станциями 4 и 5а была выполнена калибровка акселерометра, установленного на излучателе. Акселерометр отделили от излучателя и укрепили на платформе калибратора, стоящего на деревянном покрытии палубы судна. Рядом развернули

приборный стенд, содержащий генератор Г6-28, источник постоянного тока и осциллограф С1-65А, используемый также для наблюдения сигнала акселерометра при излучении на станциях.

Путем изменения частот резонанса колебаний в калибраторе (установкой под винт акселерометра стальных шайб) подтверждено предположение о том, что (с точностью порядка 1%) при постоянной амплитуде гармонических колебаний, в диапазоне около 20 Гц (14-18.2 Гц) амплитуда напряжения на выходе акселерометра пропорциональна второй степени частоты колебаний.

Установлены: напряжение постоянного тока 15 В, частота сигнала генератора (соответствует частоте резонансных колебаний в калибраторе) $f_k=15.1$ Гц, характер сигнала генератора – прямоугольник амплитудой 1.05 В.

При этом размах (двойная амплитуда) осевых колебаний акселерометра $2\xi_k=12$ мм, размах переменного напряжения на выходе акселерометра $U_k=0.25$ В.

При излучении на частоте $f_u=22$ Гц на станциях величина напряжения постоянного тока, питающего мостовой ключ, составляла 172 В (источник напряжения – 14 шт. аккумуляторных батарей, соединенных последовательно). Размах переменного напряжения на выходе акселерометра составлял при этом $U_u=0.45-0.5$ В. Точное определение размаха сигнала на выходе акселерометра было затруднено высокочастотными составляющими сигнала, которые несущественны, но хорошо видны вследствие того, что амплитуда напряжения на выходе акселерометра пропорциональна второй степени частоты колебаний.

Размах колебаний поршней вычисляется из следующего соотношения:

$$\xi_u = \xi_k U_u f_k^2 / (U_k f_u^2).$$

Получаем: $\xi_u=5.09 - 5.65$ мм.

Путем вычислений по формуле:

$$W_A = K\rho\omega^2 Q_m^2 / (8\pi c)$$

получаем следующее: на частоте 22 Гц величина излучаемой акустической мощности составляла 762 – 939 Вт.

При этом размах входного напряжения на гидрофоне 12 В. Эту цифру можно считать результатом калибровки гидрофона для условий излучения на станциях.

В целом работы были проведены практически без задержек движения судна. Были сделаны выводы, что нормальная работа с ГА излучателем возможна только при небольшом волнении и в отсутствие дрейфа. Уже при умеренном ветре начинается значительный дрейф судна (до 3,5 км/ч во время рейса), что вызывает значительное изменение глубины погружения излучателя, вследствие отклонения удерживающего троса от вертикального положения. Для минимизации таких воздействий желательно наличие у судна подруливающего устройства или плавучего якоря

для удержания носом к ветру. Также использовать систему пневматической компенсации с постоянно активированным воздушным компрессором и снабжения корпуса излучателя и снабжения корпуса излучателя пером для ориентации его в набегающем потоке.

3 Развитие дистанционных методов по изучению гидрофизических характеристик водных акваторий, строения и структуры морского дна в интересах решения томографических и инверсионных задач

Для промежуточной и полной обработки экспериментальных данных записи лазерного деформографа применялся пакет прикладных программ «Deformograph» (рисунок 3.1), в котором предусмотрено выполнение следующих процедур: 1) статистическая обработка данных (дисперсия, среднее, ошибка среднего, коэффициент вариации, доверительный интервал, среднеквадратичное отклонение, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, статистика локальных экстремумов), 2) децимация, 3) тренды различных порядков, 4) корреляция, 5) выделение огибающей, 6) спектральный анализ (периодограмма, Бурга, МТМ, МЕМ), 7) двухканальный анализ, 8) анализ случайной и детерминированной составляющих, 9) спектр максимального правдоподобия, 10) когеграмма, 11) фазовая диаграмма, 12) двумерная и трехмерная спектрограмма, 13) низкочастотная, высокочастотная и полосовая фильтрация с различными окнами (прямоугольное, треугольное, Хэмминга, Кайзера, Чебышева), 14) моделирование (линейно-частотная модуляция, модельный много гармонический ряд, 15).

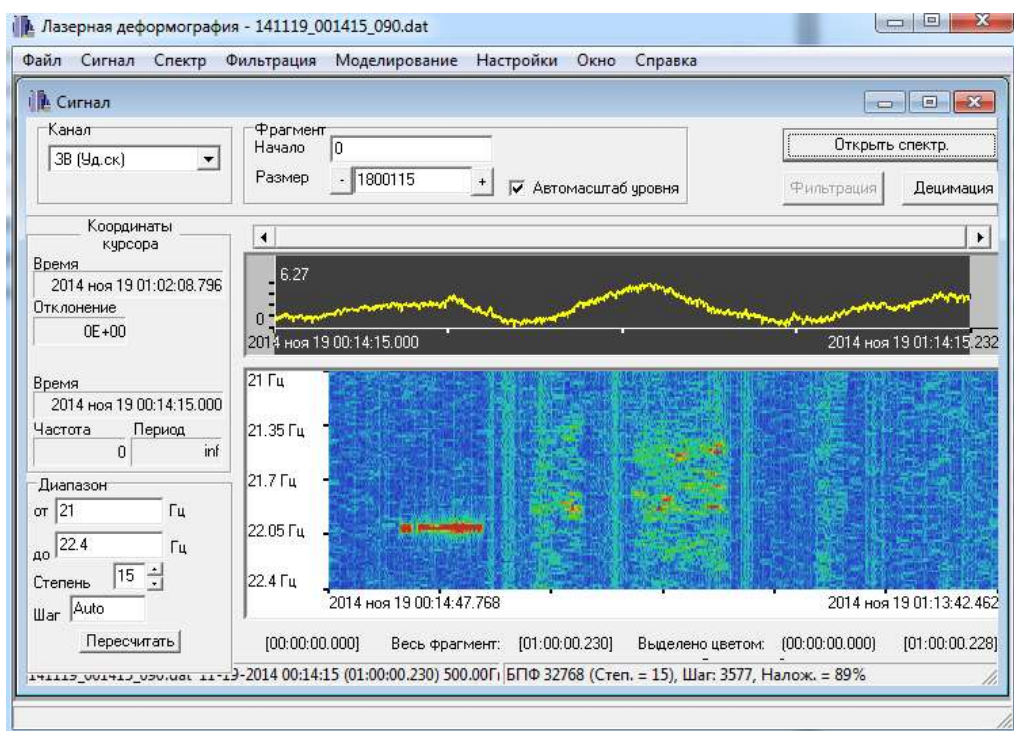


Рисунок 3.1 – Общий вид интерфейса пакета программ «Deformograph»

Для первичной обработки данных лазерного деформографа первоначально выполнялись процедуры поиска необходимых участков данных лазерного деформографа с принятым сигналом гидроакустической системы. Поиск осуществлялся путем выборки данных по времени излучения, с учетом, что излучающие и приемные системы синхронизированы по спутниковому времени. Затем файлы обрабатывались с помощью указанного пакета программ в следующей последовательности:

- 1) Удаление скачков сбросов в каждом исследуемом канале записи;
- 2) Поиск полезного сигнала на динамической спектрограмме участка записи каждого плеча лазерного деформографа.
- 3) Исследование спектра полезного сигнала для определения амплитуд тонального сигнала и M-последовательности.

Приведем результаты обработки данных. На рисунке 3.2 показаны динамические спектрограммы записи лазерного деформографа 17,5-метрового плеча запад-восток и 52,5-метрового плеча север-юг, соответственно.

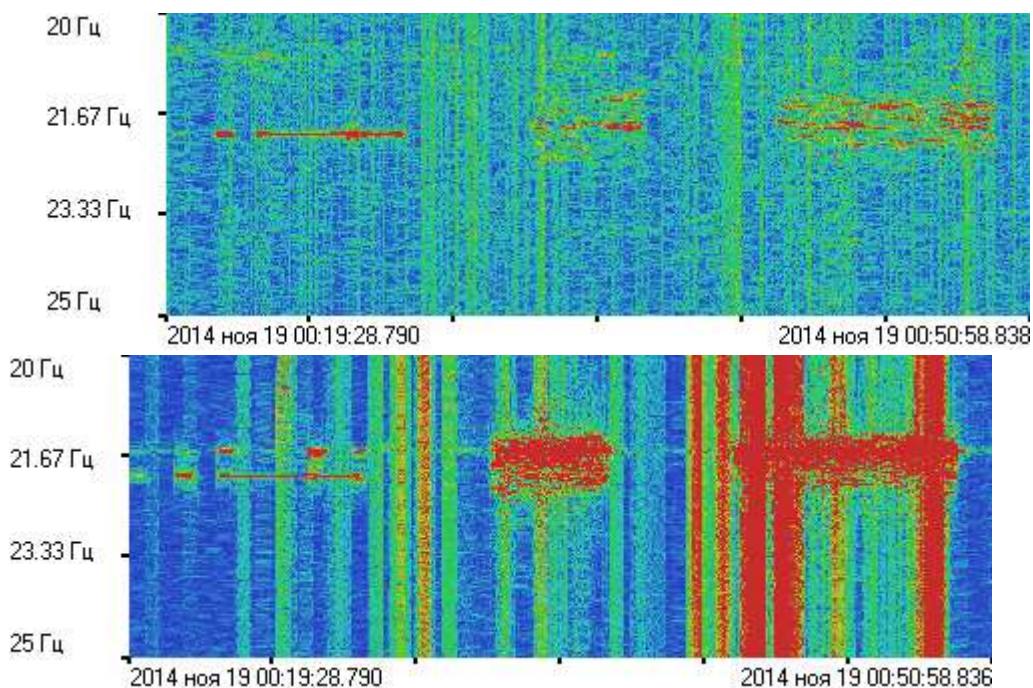


Рисунок 3.2 – Синхронные участки записи лазерного деформографа ЗВ (верхний рисунок) и СЮ (нижний рисунок) при работе излучателя на станции 1

На рисунках видно форму приходящего сигнала в виде одного участка тонового излучения и двух последовательных участков M-последовательности. Приведем синхронные спектры этих участков записи. На рисунке 3.3 показаны спектры участков записи тонового излучения плеча ЗВ и СВ, соответственно.

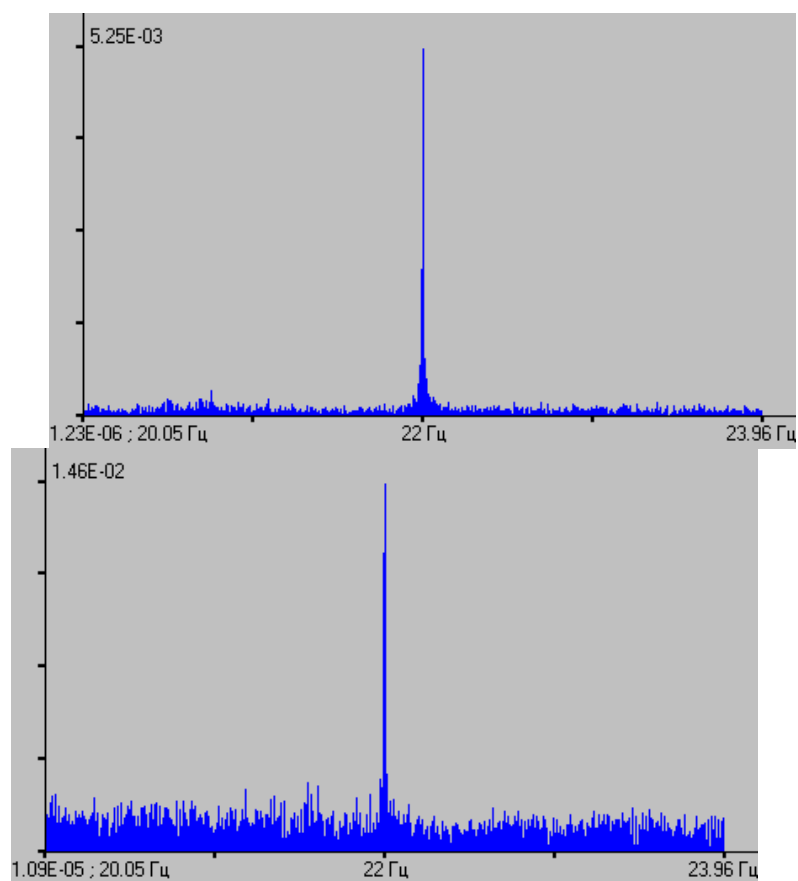


Рисунок 3.3 – Спектр синхронных участков записи тонового излучения плеч ЛД ЗВ (верхний рисунок) и СЮ (нижний рисунок) при работе излучателя на станции 1

На рисунке 3.4 приведем спектры синхронных участков записи М-последовательности, излучаемой гидроакустической излучающей системой обоими плечами лазерного деформографа в той же последовательности.

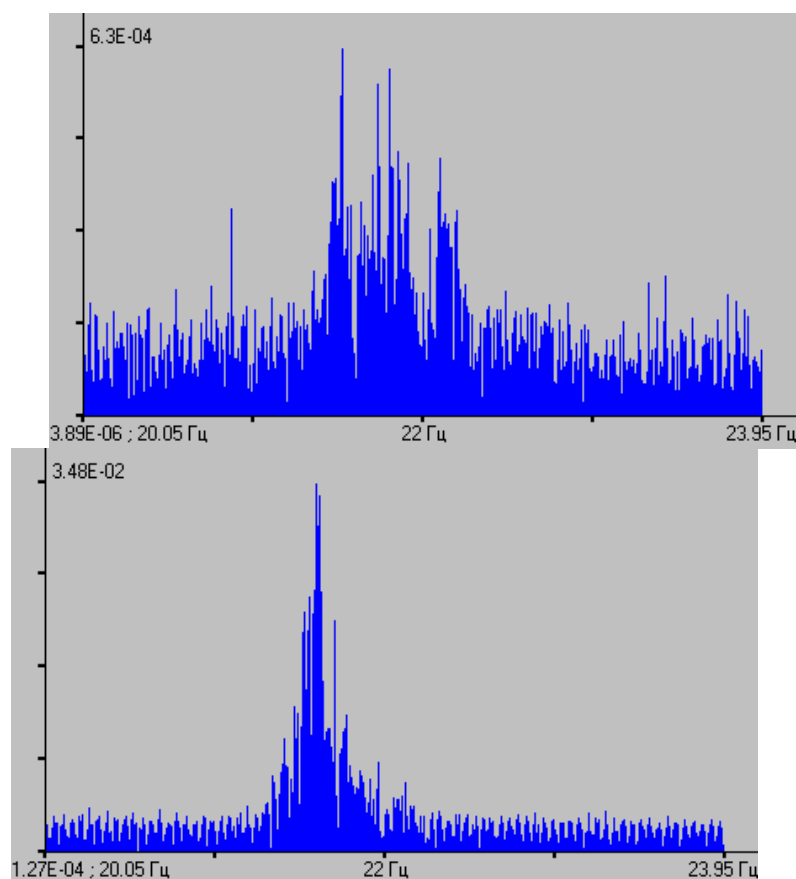


Рисунок 3.4 – Спектр синхронных участков записи излучения М-последовательности плеч ЛД ЗВ (верхний рисунок) и СЮ (нижний рисунок) при работе излучателя на станции 1

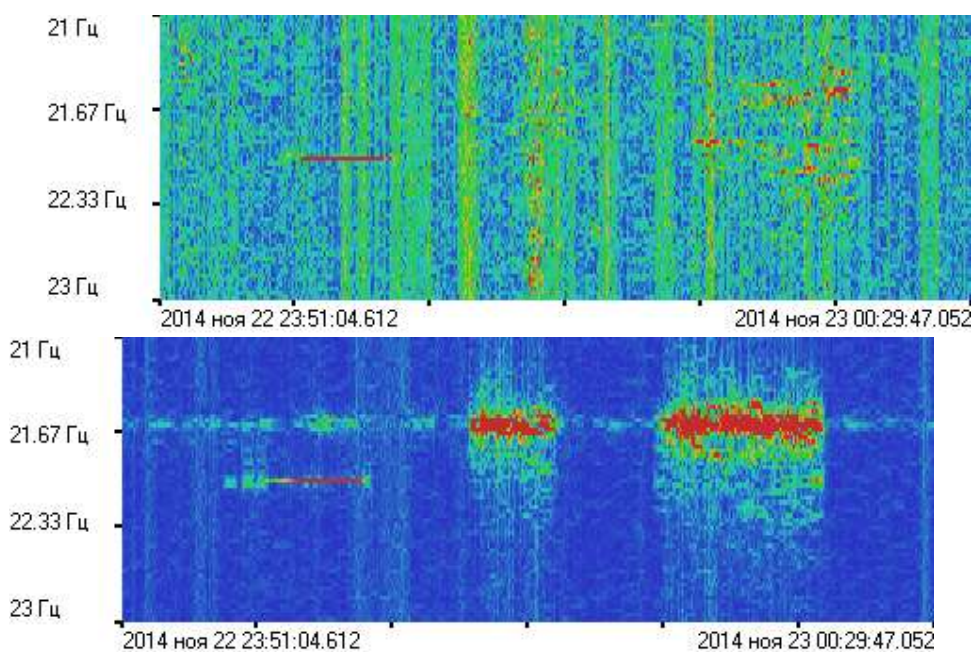


Рисунок 3.5 – Синхронные участки записи лазерного деформографа ЗВ (верхний рисунок) и СЮ (нижний рисунок) при работе излучателя на станции 1а

На рисунке 3.5 приведены динамические спектрограммы синхронных участков записи плеч лазерного деформографа при работе излучателя в точке 1а. Приведем синхронные спектры

участков записи лазерного деформографа при излучении тонового сигнала гидроакустическим излучателем (рисунок 3.6).

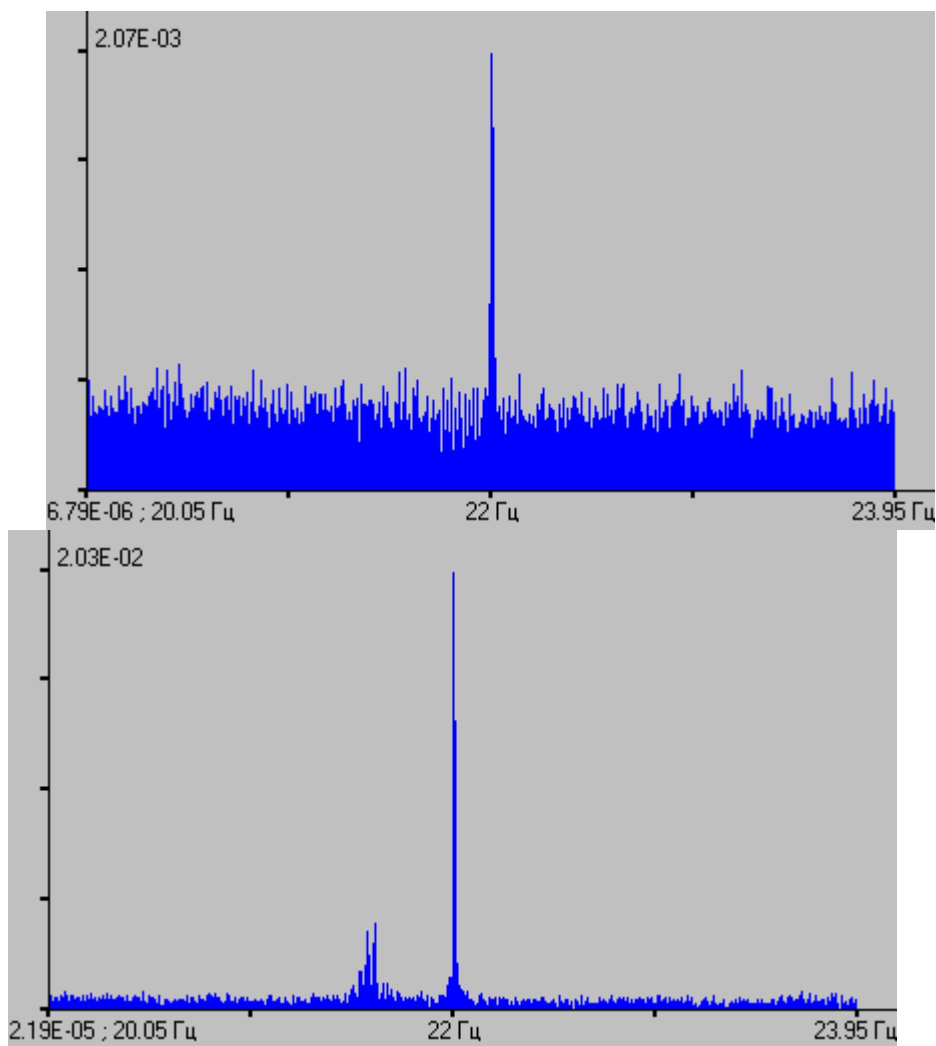


Рисунок 3.6 – Спектр синхронных участков записи тонового излучения плеч ЛД ЗВ (верхний рисунок) и СЮ (нижний рисунок) при работе излучателя на станции 1а.

На рисунке 3.7 приведем синхронные участки записи лазерного деформографа при излучении М-последовательности на станции 1а.

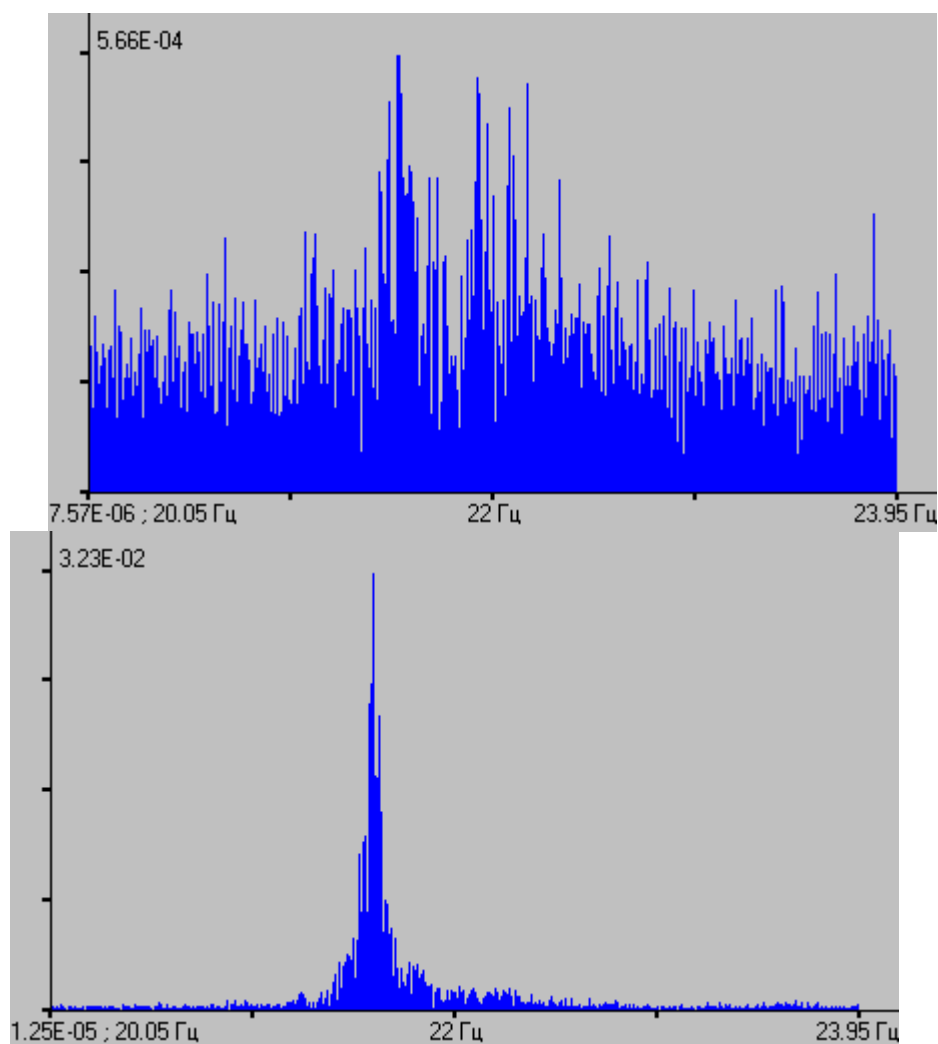


Рисунок 3.7 – Спектр синхронных участков записи излучения М-последовательности плеч ЛД ЗВ (верхний рисунок) и СЮ (нижний рисунок) при работе излучателя на станции 1а

Станции излучения, начиная от 2 и 2а, находятся в точках, где глубина моря много больше длины волны излучаемого сигнала, составляющей около 68 м. А согласно методики, работа излучателя осуществляется на глубине чуть превышающей четверть длины волны. Поэтому максимум характеристики направленности направлен вниз. Следовательно, распространение сигнала в приповерхностном пространстве в данном случае сводится к минимуму. Нами не было обнаружено полезного сигнала в записях лазерного деформографа при работе излучателя на станциях 2, 3, 4, 4а, 3а и 2а. При работе судна на станции 5а, на береговой приемной станции произошла аварийная ситуация и в начале работы излучателя запись приемника не велась. Но при излучении второго участка М-последовательности система записи данных лазерного деформографа была настроена. На записях обоих плеч лазерного деформографа была получена запись сигнала на частоте излучения 22 Гц, но также смещающегося в более низкую частотную область при излучении М-последовательности. Станция 5а расположена с западной части возвышенности Ямато. Сделан вывод, что сигнал излучателя, трансформируется в дно в районе

глубин 200-300 м. На рисунке 3.8 приведены динамические спектрограммы синхронной записи обоих плеч лазерного деформографа.

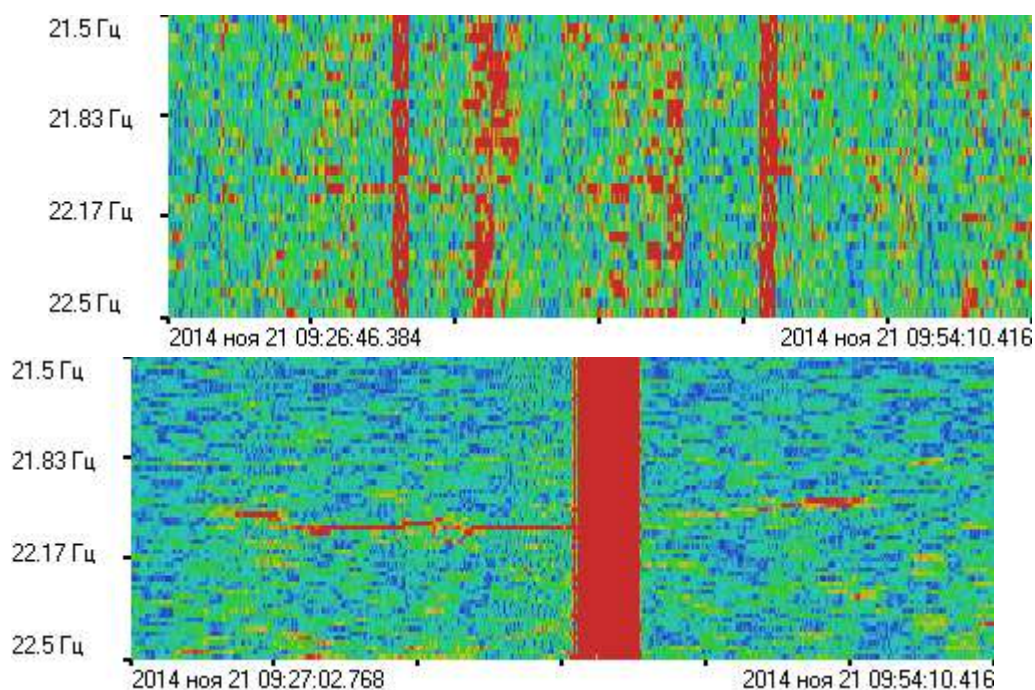


Рисунок 3.8 – Синхронные участки записи лазерного деформографа ЗВ (верхний рисунок) и СЮ (нижний рисунок) при работе излучателя на станции 5а

На рисунке 3.9 приведем спектр синхронных участков записи плеч лазерного деформографа.

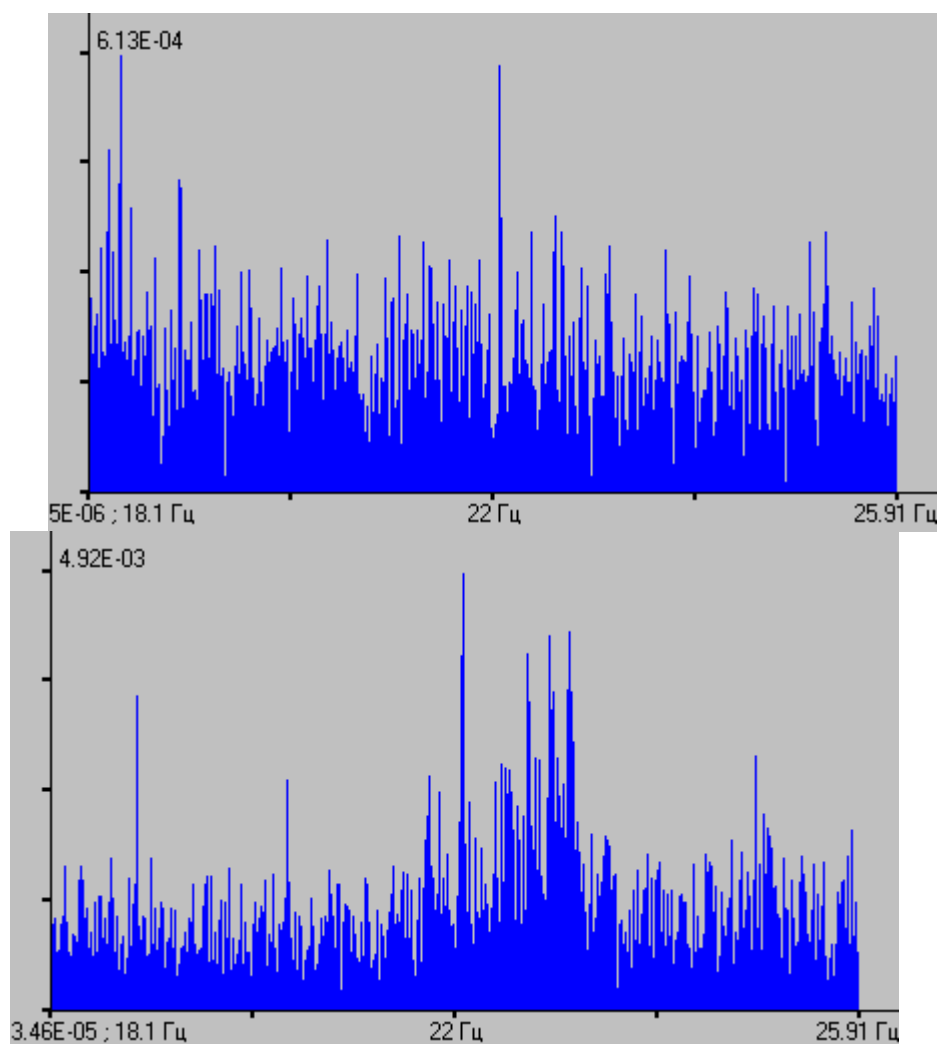


Рисунок 3.9 – Спектр синхронных участков записи излучения М-последовательности плеч ЛД ЗВ (верхний рисунок) и СЮ (нижний рисунок) при работе излучателя на станции 5а

Для определения времени прихода излученных акустических сигналов на береговые станции данные были отфильтрованы методом свертки с записями контрольного гидрофона на каждой станции излучения. Приведем описание данной процедуры, выполняемой посредством пакета программ «Derformograph». Для обработки, файлы данных контрольного деформографа и лазерного деформографа были приведены к одинаковой частоте посредством функции «Передескретизация». Далее данные были обработаны полосовым фильтром, пропускающим частоту излучения фазоманипулированного сигнала. После выполнения указанных процедур, файлы записей лазерного деформографа были обработаны функцией «Свертка» процедуры «Функция коэффициента корреляции». Определено, что регистрация полезного сигнала выполнена при работе излучателя на станциях, где глубина моря сопоставима с излучаемой длиной волны.

Результаты свертки для станций 1 и 1 а приведена в таблице 4.1.

Таблица 3.1 – Результаты свертки для станций 1 и 1а

Ст.	К анал	Вре мя начала излучения образца (+10 мин, +19 мин)	Время ожидания пика	От счет max -2	Δt (max-2)- (max-1), с	От счет max -1	Δt , (max- 1)-max, с
	С Ю2	0:32 :30	0:32:41 ,43				
	З В	0:32 :30	0:32:41 ,43				
	С Ю	0:32 :30	0:32:41 ,43				
	С Ю2	0:41 :30	0:41:41 ,43	82 3088	1,60 6	82 3891	2,1
	З В	0:41 :30	0:41:41 ,43			82 3944	5,174
	С Ю	0:41 :30	0:41:41 ,43				
a	С Ю2	0:07 :20	0:07:31 ,27				
a	З В	0:07 :20	0:07:31 ,27				
a	С Ю	0:07 :20	0:07:31 ,27			12 24339	2,802
a	С Ю2	0:16 :20	0:07:31 ,27				
a	З В	0:16 :20	0:07:31 ,27			14 89382	2,34
a	С Ю	0:16 :20	0:07:31 ,27			14 90347	2,222
Ст.	К анал	Отс чет, max	Δt , max- (max+1), с	От счет, max+1	Δt , (max+1)- (max+2) с	От счет, max+2	Время, max, UTC
	С Ю2	5581 43					0:32:51.286
	З В	5581 32					0:32:51.264
	С Ю	5587 93					0:32:52.586
	С Ю2	8249 41	3,314	82 6598			0:41:44.882
	З В	8265 31					0:41:48.062

	С Ю	8233 16					0:41:41.632
a	С Ю2						
a	З В	1224 473	3,834	12 26390			0:07:39.946
a	С Ю	1225 740	2,152	12 26816			0:07:42.480
a	С Ю2	1490 485	0,422	14 90696			0:16:31.970
a	З В	1490 552	1,51	14 91307	2,76	14 92687	0:16:32.104
a	С Ю	1491 458	2,172	14 92544	11,8 76	14 98482	0:16:33.916

Во всех случаях регистрации излученного сигнала выявлено до 4 максимумов прихода М-последовательности. М-последовательность второй очереди излучения имеет больше максимумов прихода на береговую станцию, чем сигналы первой очереди. Скорость звука в воде изменялась в диапазоне от 1459 м/с у поверхности моря до 1452 м/с у дна. Для расчета ожидаемого времени прихода фазоманипулированного сигнала в водной среде была принята средняя скорость звука 1455 м/с. Исследуем времена прихода каждого максимума М-последовательности. Для раскочки сигнала до максимума, согласно записи контрольного гидрофона, требуется около 1 с. Последовательность распространения каждого прихода М-последовательности можно описать в соответствии с геологическими особенностями морского дна [3].

М-последовательность первого образца первой станции излучения имеет один максимум прихода через 21,286 – 22,586 с после начала излучения. Данный результат соответствует скорости распространения сигнала 770-817 м/с.

Второй образец фазоманипулированного сигнала первой станции излучения имеет три максимума прихода на компоненту СЮ с первым приходом через 11,176 с (в скобках укажем скорость прихода изучаемого сигнала (1556 м/с), вторым приходом через 12,782 с (1361 м/с) и третьим приходом 14,882 с (1169 м/с) после начала излучения. Время регистрации первого прихода сигнала компонентой ЗВ составляет 12,888 с (1350 м/с). Второй приход сигнала зарегистрирован через 18,062 с (963 м/с)

По результатам исследования времен прихода сигнала со станции излучения 1а при излучении первого образца М-последовательности, время первого прихода на компоненту ЗВ составляет 19,946 с (822 м/с), второй приход зарегистрирован через 23,78 с (693 м/с). На компоненте СЮ первый приход зарегистрирован через 11,114 с (1475 м/с), второй приход через 13,916 (1178 м/с) и третий приход через 16,068 с (1020 м/с).

При исследовании времен прихода второго образца сигнала со станции 1а выявлено четыре времени прихода на каждой компоненте, что связано с прохождением трассы распространения гидроакустического сигнала через полуостров Гамова. На компоненте ЗВ время первого прихода сигнала составляет 9,764 с (1679 м/с), второй приход зарегистрирован через 12,104 с (1354 м/с), третий приход через 13,614 с (1204 м/с), после начала излучения и четвертое время прихода 16,374 (1001 м/с). Данные по компоненте СЮ следующие. Время первого прихода 11,694(1402 м/с), время второго прихода 13,916 1178 м/с), время третьего прихода 16,088 (1019 м/с), время четвертого прихода 27,964 586 м/с).

На данных обеих станций видно, что второй образец фазоманипулированного сигнала имеет больше максимумов прихода, чем первый образец. Можно утверждать, что с учетом глубины моря на станции излучения 1, гидроакустический сигнал практически не распространяется в воде, а сразу переходит в дно, так как ожидаемое время прихода в воде не соответствует экспериментальным замерам при приеме первого образца станции излучения.

3.1 Обработка данных гидрологических измерений

Приведем результаты выполнения гидрологических измерений на каждой станции излучения. Данные измерения накапливались во внутренней памяти профилометра. Позже, данные прибора были переписаны на компьютер с помощью интерфейсной программы, комплектующей прибор, и представлены в графическом виде с помощью программы Grapher.

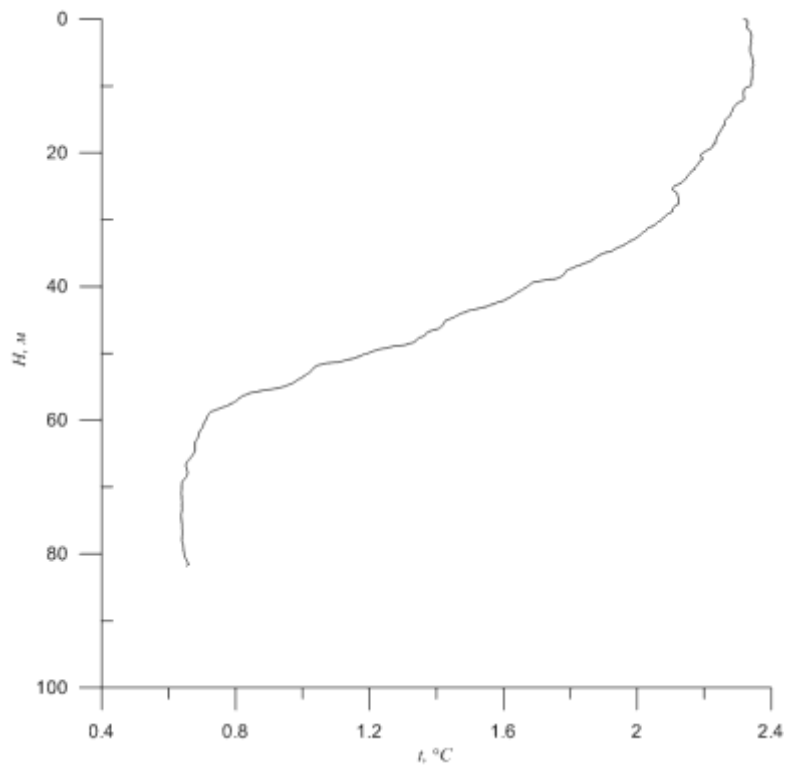


Рисунок 3.10 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 1

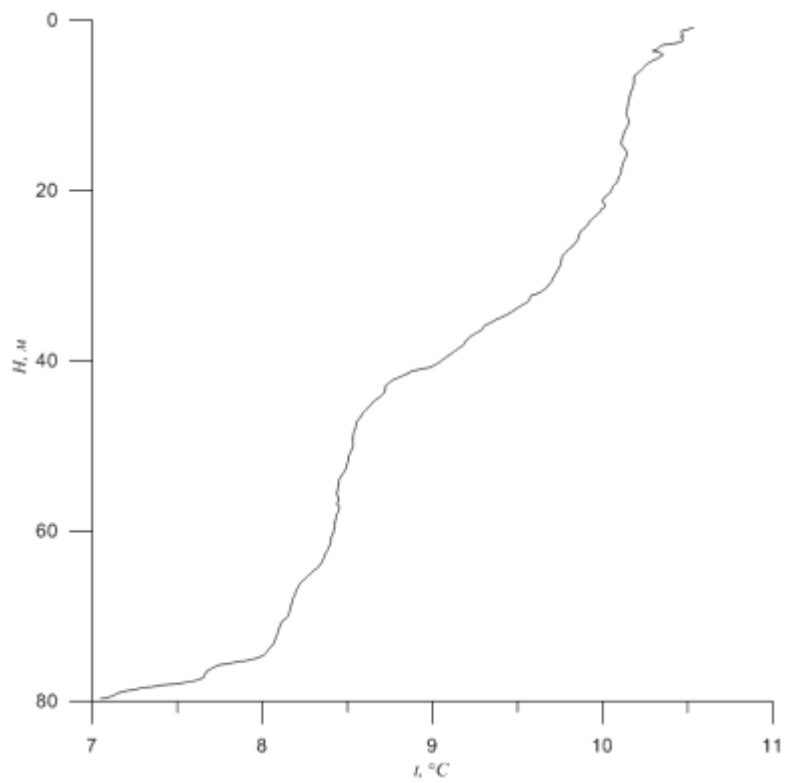


Рисунок 3.11 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 2

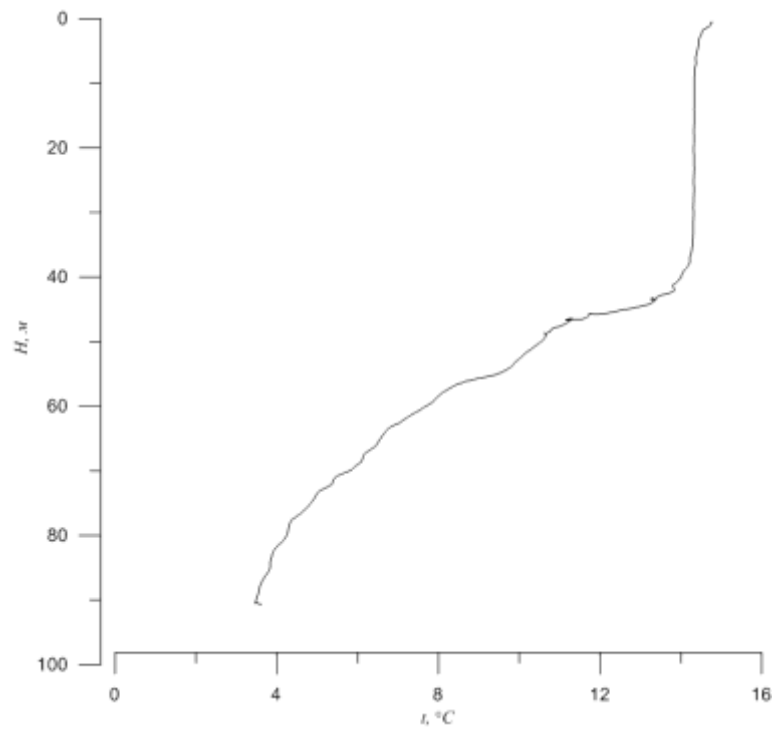


Рисунок 3.12 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 3

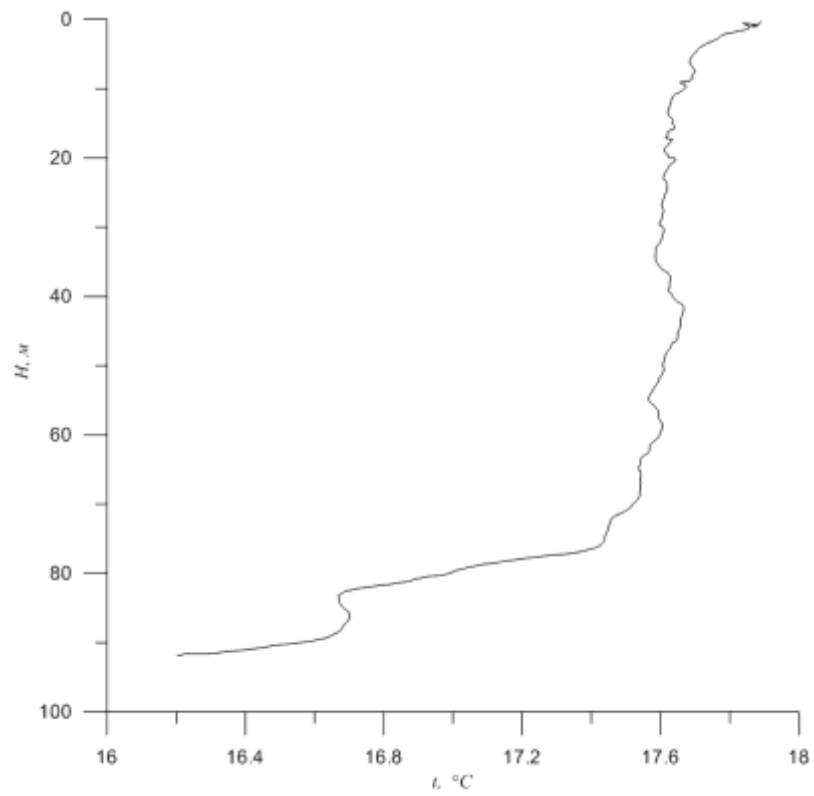


Рисунок 3.13 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 4

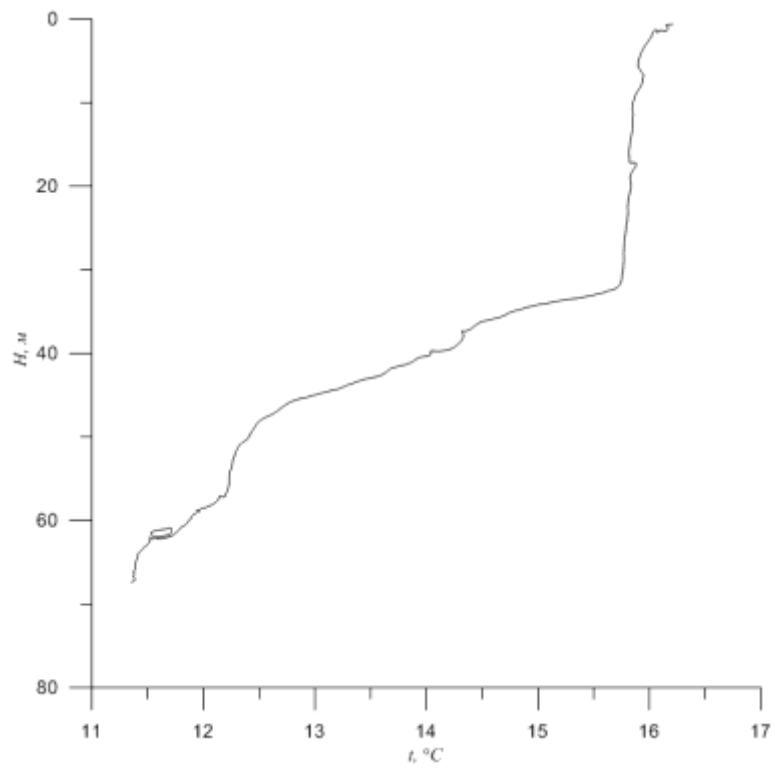


Рисунок 3.14 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 5а

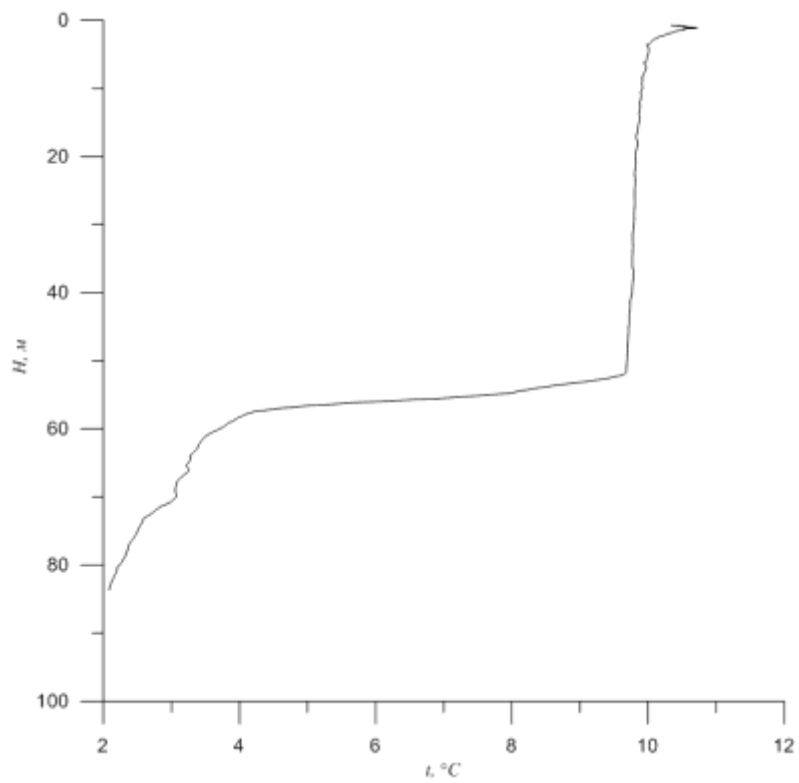


Рисунок 3.15 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 4а

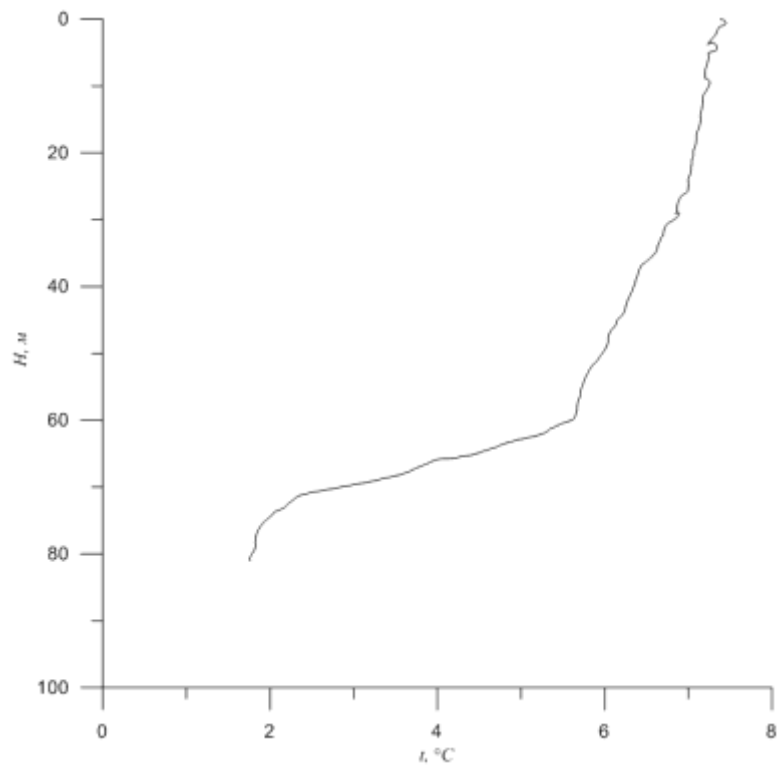


Рисунок 3.16 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 3а

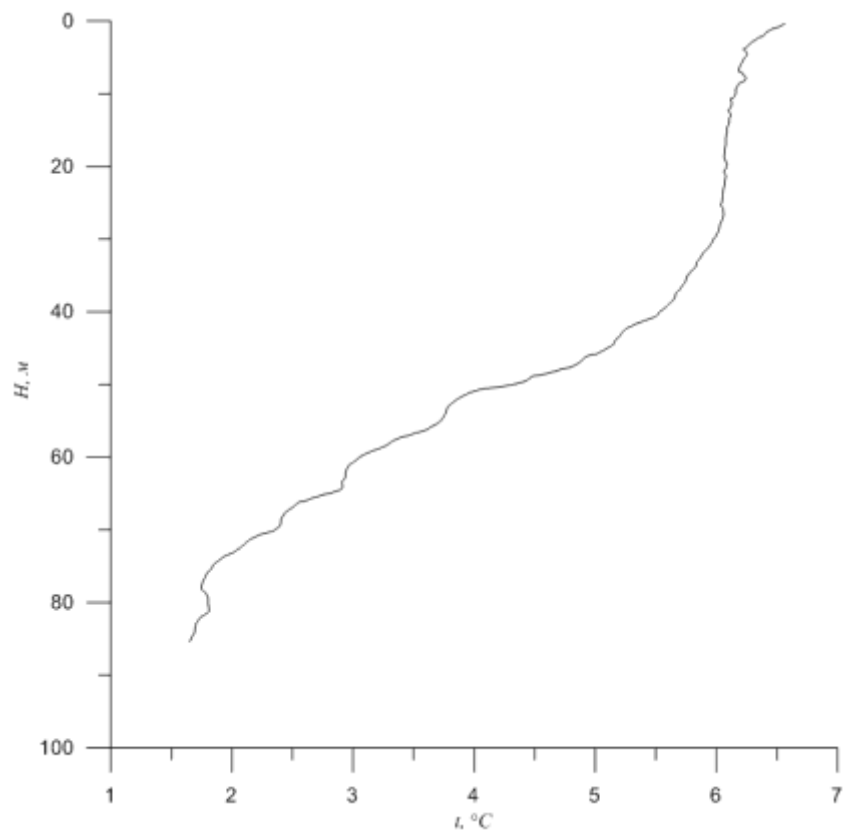


Рисунок 3.17 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 2а

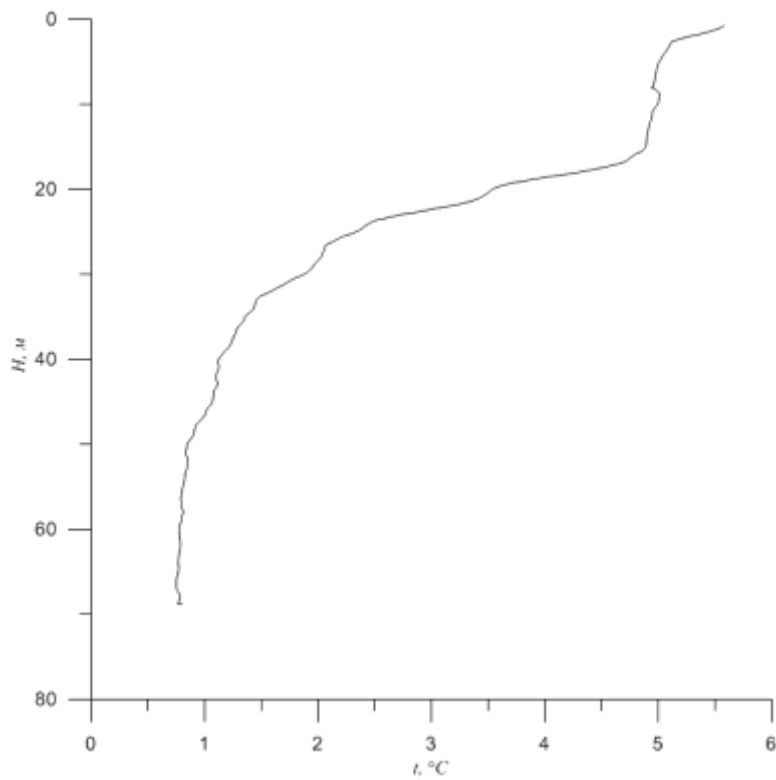


Рисунок 3.18 – Диаграмма зависимости температуры от глубины на станции 1а

На рисунке 3.19 показан профиль распределения температуры по горизонтам кратным 5 м до глубин, которых удалось достичь при длине фала 94 м. По оси абсцисс указаны станции от 1а до 5а, а по оси ординат температура водной среды.

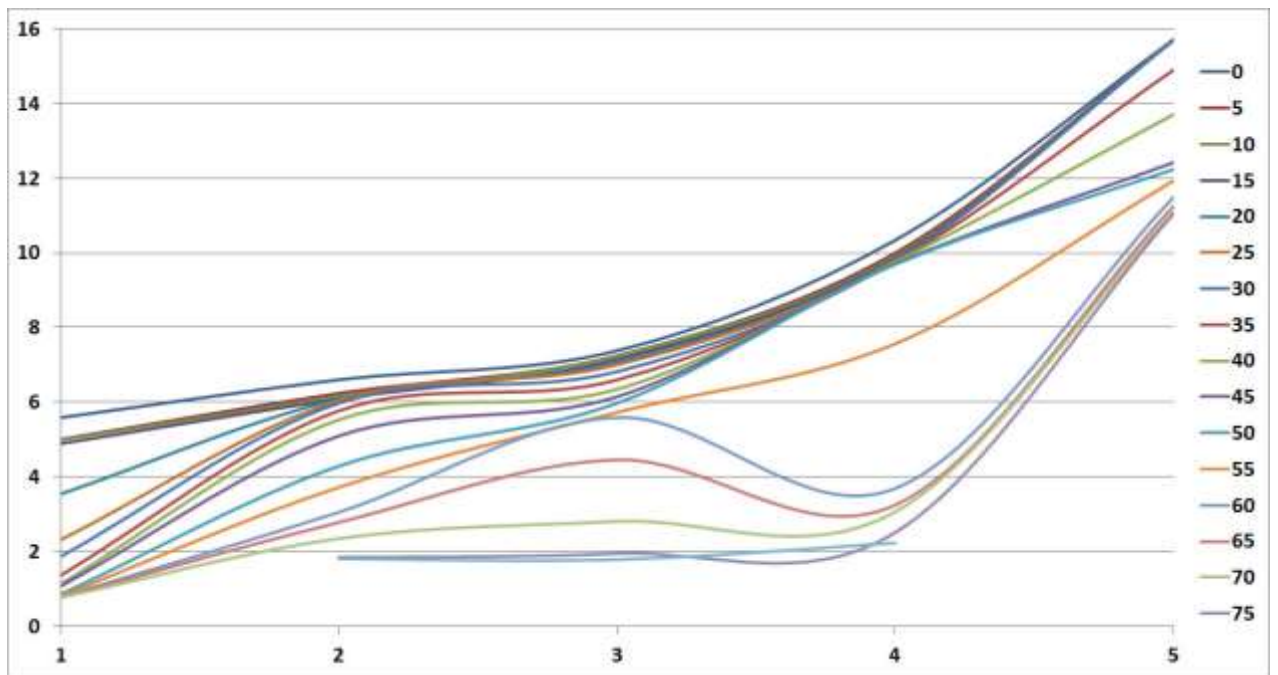


Рисунок 3.19 – Профиль распределения температуры по глубине от станции 1а до станции 5а

Список использованных источников

1. Пенкин С.И. Излучающая гидроакустическая система ГИ-2. Техническое описание и временная инструкция по эксплуатации. 2013 г.
2. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. №11. С.76-81.
3. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Чупин В.А., Швырёв А.Н., Ярощук И.О. О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна // ДАН. 2013. Т. 452. № 3. С. 321-325.

4. Разработка геоакустической и акустико-океанологической модели залива Посьета

Распространение низкочастотного звука на океаническом шельфе определяется свойствами волновода, а именно акустическими свойствами океанологической среды: водного слоя и осадков. Изменчивость водной среды определяется различными по временным и пространственным масштабам гидрофизическими процессами: приливы, ветровые волны, сейши и др. Рассмотрим важный механизм изменчивости акустических свойств среды – апвеллинг. Апвеллинг является довольно мощным по масштабам гидрофизическим процессом в заливе Посьета. Обычно он проявляется осенью, когда ветер на побережье усиливается и становится северных и северо-западных направлений.

Для анализа мезомасштабных особенностей поля приводного ветра на акватории залива Петра Великого и пространственно-временной изменчивости областей апвеллинга использовались:

Данные наблюдений за скоростью и направлением ветра на метеостанциях (МС) “Посьет”, “Aanderaa” (северо-западное и северо-восточное побережье залива Посьета соответственно, рис. 4.1) и “Владивосток” за период 1-20 октября 2011 г., а также 12 ноября 2006 (только МС “Посьет” и “Владивосток”). Используются архивные данные, доступные на сервере “Погода России”, <http://meteo.infospace.ru>, и данные метеостанции ТОИ ДВО РАН (“Aanderaa”). Измерения радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), установленного на спутнике Envisat, (2003-2011 г.г.) Размер пикселя изображений 12,5x12,5 м в режиме узкой полосы обзора (ширина до 100 км) и 75x75 м в режиме широкой полосы (405 м).. По измерениям РСА восстанавливались поля скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря с использованием геофизической модельной функции SMOD5 (Hersbach, 2003). Изображения в тепловом инфракрасном диапазоне (10,3-11,3 мкм), полученные радиометром AVHRR ИСЗ серии NOAA (2000-2011 г.г.), пространственное разрешение около 1 км (данные были получены из Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН – <http://www.satellite.dvo.ru/>).

Изображения в тепловом инфракрасном диапазоне (10,78-11,28 мкм), полученные спектрометрирами MODIS со спутников Terra и Aqua (2003-2011 г.г.), пространственное разрешение 1 км (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>).

Данные гидрологических измерений *in situ*, выполненных сотрудниками ТОИ ДВО РАН в период с 1 сентября по 20 октября 2011 г., согласованные по времени со спутниковыми наблюдениями 2011 г. Основным источником инструментальных данных явились наблюдения за изменчивостью гидрологической структуры вод с помощью СТД-зондов на нескольких разрезах, выполненных через залив Посьета, а также четырех термогирлянд, установленных там же на

глубинах от 19 до 42 метров, с количеством термодатчиков от 10 до 30. Расстояния между датчиками на самой близкой к берегу гирлянде составляло 0.5 м, а на трех других – 3 м по вертикали.

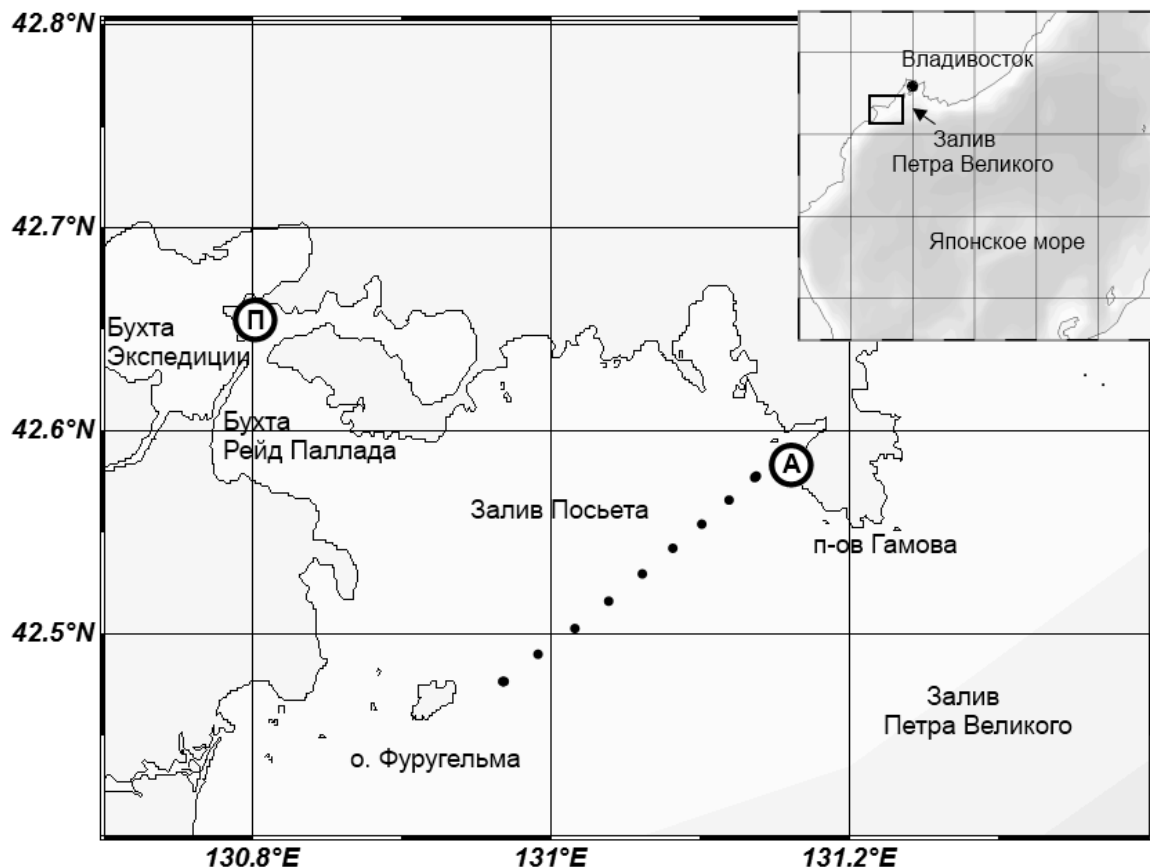


Рисунок 4.1 – Карта исследуемого района. Показаны точки выполнения гидрологических зондирований

Поле скоростей ветра, полученное по спутниковым данным и метеостанции, является типичным для данного региона в условиях преобладающего воздушного потока северо-северо-западного направления. На постоянном разрезе, выполняемом от б. Витязь до о. Фуругельма, через залив Посьета (точки выполнения зондирований показаны на рис. 4.1) 1 сентября, 14 и 18 октября хорошо видно, как изменялась термическая структура за эти полтора месяца (рис. 4.2).

Если в начале сентября термоклин находился на глубинах от 7-10 м до 20-30 м, то 14 октября он сузился и располагался на глубинах от 10 до 15-20 м. Во время апвеллинга 18 октября термоклин в мористой части залива опустился на глубины 20-25 м и вышел на поверхность моря на расстоянии 2-3 км от берега у полуострова Гамова с образованием термического фронта. При этом температура воды в верхнем слое понизилась с более чем 13°C до 8°C в центральной части залива и до 5-6°C в прибрежной части. В придонном слое температура воды понизилась с 3.5-4°C до менее 2°C.

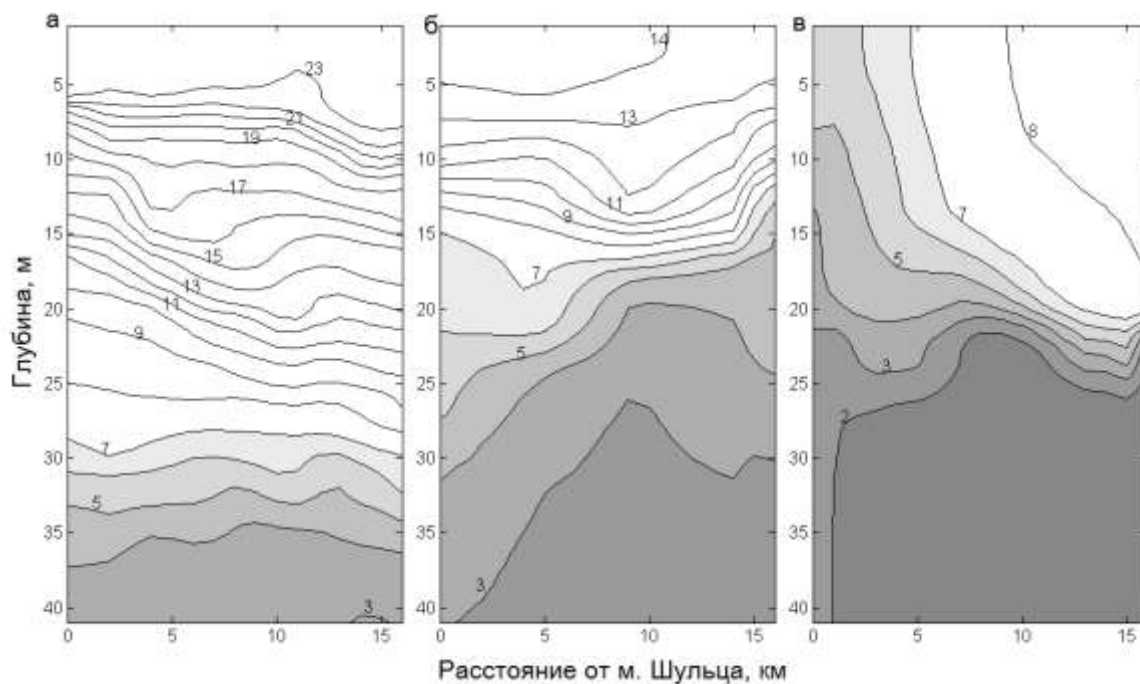


Рисунок 4.2 – Распределение температуры воды на разрезах от м. Шульца (1 станция на расстоянии около 2 км от мыса) до о. Фуругельма в сентябре-октябре 2011 г: 1.09 (а), 14.10 (б), 18.10 (в)

Скорость развития апвеллинга можно оценить по данным верхних датчиков термогирлянд, находившихся на глубине 3-3.5 м от поверхности моря. Максимальные колебания температуры воды, обусловленные приливными колебаниями и прохождением внутренних волн, отмечены в прибрежной области. Здесь же отмечена и минимальная температура воды 2.7° С, наблюдавшаяся в течение 10 часов. Понижение температуры воды в удаленных точках от берега началось на 5-6 часов позже, чем в прибрежной точке, а минимальные значения температуры воды отмечены на 4 часа позже. Скорости перемещения теплых вод верхнего слоя от берега и холодных придонных вод к берегу в среднем составляли 0.15-0.20 м/с.

Таким образом, проведенный инструментальный мониторинг октябрьского локального апвеллинга в заливе Посьета позволил оценить скорость его развития, диапазон изменения температуры и ряд других параметров, которые могут представлять интерес в силу существенного влияния такого явления, как апвеллинг, на акустические свойства водного слоя залива [1].

4.1 Разработка геоакустической модели залива Посьета и гидроакустические исследования

Схема типового эксперимента представлена на рис.4.3. На расстоянии порядка 3 км от берега (мыс Шульца) располагалась вертикальная приемная антенна. Антенна представляет собой автономную восьмиэлементную базу, нижний гидрофон которой располагался в 2 м от дна, а

расстояние между гидрофонами составляло 4.5 м. Излучение производилось в различных направлениях от приемной антенны, с помощью низкочастотного преобразователя электромагнитного типа, погружаемого в точки излучения на глубину 10 м, и развивающего эффективное звуковое давление до 1 кПа в полосе частот 25 – 40 Гц. Частота дискретизации регистрируемых сигналов составляла от 700 до 1024 Гц. Излучались сигналы с несущей частотой 26 и 33 Гц, фазоманипулированные М-последовательностями длиной 63, 127, 255 и 511 символов, с 4 – 10 периодами несущей частоты на символ. Конструктивные особенности излучателя обеспечивали существенный уровень излучения третьей гармоники (78 и 99 Гц соответственно), также являющийся фазоманипулированным. Экспериментальные гидроакустические исследования с применением низкочастотных излучателей показали свою эффективность при изучении распространения акустического сигнала в осадочном слое, а так же его поведения на границах раздела.

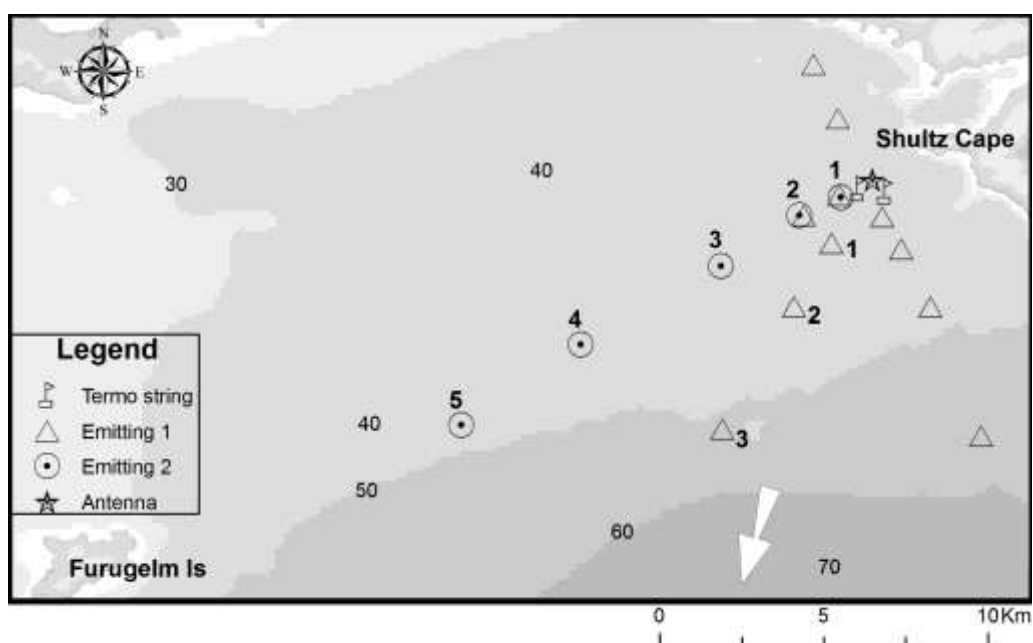


Рисунок 4.3 – Схема эксперимента

Кроме того, в эксперименте проводились гидрологические измерения с помощью зонда РБР с борта судна, на каждой точке излучения. Так же были установлены две автономные термогирлянды, разработанные в ТОИ ДВО РАН, точки постановки показаны на рисунке флажками.

В условиях мелкого моря использование низкочастотных акустических излучателей, где длина волны сигнала больше глубины моря, волновод представляет собой слоистый «пирог», который включает в себя водный слой и толщу донных осадков. Моделирование акустического сигнала основано на работах Тютекин и Мачевариани, а данные для расчета взяты из сформированной геоакустической модели на участке залива ПВ. Математическое моделирование

распространения акустического сигнала проводили для точек излучения 1 и 3 по трассе мыс Шульца – о. Фуругельма, в силу их наиболее простоты. В модели волновод представлен в первом случае водным слоем 40 м. и осадками мощностью 50 м. в точке излучения 1, состоящим из very fine and fine sand познеплейстоцено-голоценового возраста (QIII-IV) и во втором случае для точки излучения 3 глубина моря составляет 40 м. и 160 м. донных отложений, где наблюдается 3 слоя осадков: very fine and fine sand познеплейстоцено-голоценового возраста (QIII-IV), coarse sand нижнего-среднего плейстоцена (QI-II) and gravel-pebble неогенового возраста (N2) (рис 3). Средние значения для слоев, используемых при расчетах, взятые из геоакустической модели, для слоя QIII-IV: $V_p = 1690$ m/s, $V_s = 415$ m/s, $\rho = 1.98$ g/cm³; QI-II: $V_p = 1850$ m/s, $V_s = 520$ m/s, $\rho = 2.15$ g/cm³; N2: $V_p = 3000$ m/s, $V_s = 1800$ m/s, $\rho = 2.33$ g/cm³. Гранитный слой (γP_2) для нашей задачи является упругим полупространством с акустическими характеристиками: $V_p = 5400$ m/s, $V_s = 3300$ m/s, $\rho = 2.79$ g/cm³. В воде средние значения скорости звука в летний период составляет примерно 1500 m/s. Схема геоакустической модели в точке излучения 3 по трассе AA представлена на рисунке 3 б по которой проводилось численное моделирование.

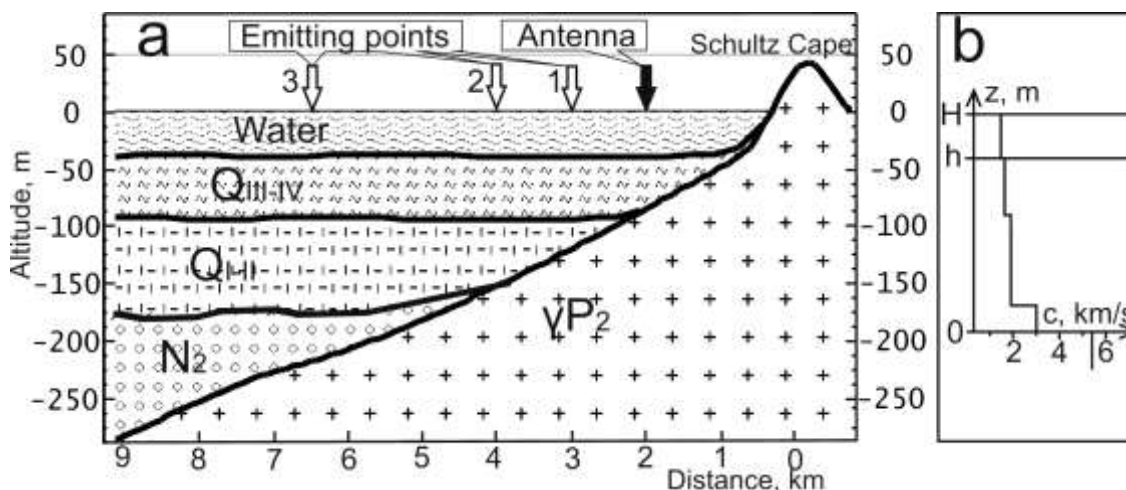


Рисунок 4.4 а – Геологическая модель по акустической трассе AA, б – Геоакустическая модель дна в точке излучения 3 по акустической AA

Рассмотрим плоский слоисто-неоднородный слой, представленный на рис. В расчетах использовался метод тензорных импедансов, который позволяет свести краевую задачу теории упругости к задаче Коши для матричного и скалярного уравнений типа Риккати

$dY/dz = Y\Lambda Y + SY + YQ + P$, где Y – (2×2) матрица тензора импедансов упругого слоя; $\Lambda(z), S(z), Q(z), P(z)$ – известные матрицы, характеризующие свойства неоднородного упругого слоя и частоту. Непосредственно в водном слое тензор импедансов вырождается в скалярный импеданс, а матричное уравнение переходит в обычное уравнение Риккати.

При интерпретации полученных экспериментальных данных, а именно при расчете скоростей распространения акустического сигнала, авторы использовали геометрическое приближение к решению обратной сейсмоакустической задачи (при этом для упрощения необходимо считать задачу одномерной). Звуковые волны третьей гармоники излученного сигнала (99 Гц), формирующие главный максимум корреляционных функций, распространяются с групповой скоростью «водных» мод (условно 1500 м/с), который в расчетах принимался за «реперную точку», с которой брали ноль отсчетов при корреляционной свертке излученного и принятого сигналов и их гармоник. Пример регистрируемых корреляционных функций показан на рисунке 4.5.

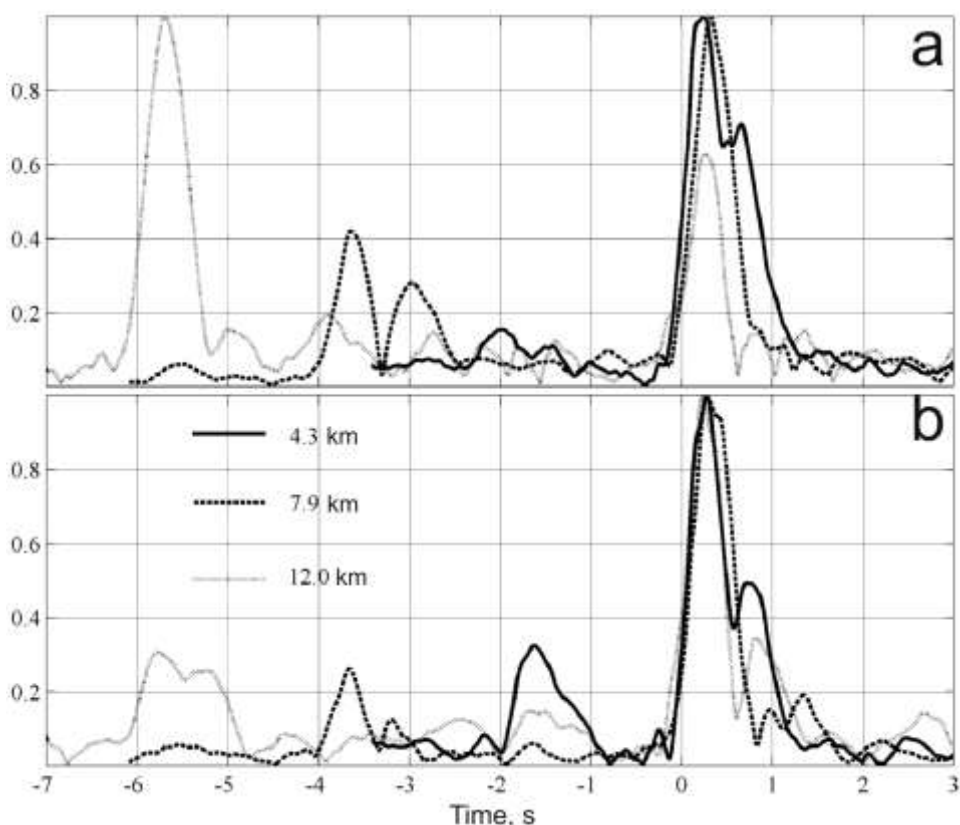


Рисунок 4.5 – Корреляционные функции: а) – 20 метров от дна б) – 2 метра от дна

Всего было зафиксировано на приемной антенне по два прихода акустического сигнала с точек излучения 1-3 и 5 по трассе АА и 1, 2 по трассе ВВ. Расчетная скорость распространения первого принятого сигнала с точек излучения 1 и 2 по трассам АА и ВВ варьируется в пределах 2600-2800 м/с и при увеличении дистанции рассчитанная скорость прихода первого сигнала увеличивается до 2900 м/с. В точках излучения 4 по трассе АА и 3 по трассе ВВ было зафиксировано приемной антенны три прихода волны. Волна, зафиксированная второй на графиках корреляционных функций, для данного случая, по нашим расчетам распространялась со скоростью примерно 2400 м/с. Основной сигнал распространялся со скоростью примерно 1520 м/с. Применение низкочастотного излучателя в эксперименте позволило качественно проследить,

как мы полагаем из теоретических расчетов, распространение поверхностных волн по акустической трассе мыс Шульца – о. Фуругельма, проходящие по границе разделов гранит – донные осадки – вода (волны Стоунли и Шолте) [2,3].

Список использованных источников

1. Храпченков Ф.Ф., Ярощук И.О., Кошелева А.В., Дубина В.А. Ветровой апвеллинг в заливе Петра Великого по спутниковым и морским наблюдениям // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 33-40.

2. Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярощук И.О. Пространственно-временной анализ геоморфологии океанического дна залива Петра Великого Японского моря // Океанология. 2014. Т. 54, № 4. С. 538-545.

3. Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Shvyrev A.N., Pivovarov A.A. Low-frequency hydroacoustic experiments on the shelf using the data of geoacoustic sediment model // Chinese Physics Letters. 2014. Т. 12, № 31. Art.no. 124301.

5 Численное и статистическое моделирование распространения звуковых волн в пространственно-неоднородных упругих средах

Рассмотрим морскую среду, состоящую из водного слоя и слоя жидких осадков, с горизонтальными поверхностями. Пусть в водной среде с постоянной плотностью ρ_0 , в среднем постоянная скорость звука испытывает слабые двумерные флуктуации $c(z,x) = c_0 + \delta c(z,x)$, $|\delta c/c_0| \ll 1$. Слой жидких осадков является однородным с постоянными значениями плотности, скорости звука и поглощения: ρ_1, c_1, γ_1 . Далее полагаем, что случайное поле $\varepsilon(x,z) = -2\delta c(z,x)/c_0$ гауссово и описывается следующей анизотропной корреляционной функцией ($\langle \varepsilon(x,z) \rangle = 0$)

$$B_\varepsilon(z_1 - z_2, x_1 - x_2) \equiv \langle \varepsilon(z_1, x_1) \varepsilon(z_2, x_2) \rangle = \sigma_\varepsilon^2 \exp\left[-(L_z^{-1}|z_1 - z_2| + L_x^{-1}|x_1 - x_2|)\right],$$

где величины L_z и L_x характеризуют масштабы пространственной корреляции в направлениях z и x .

Волновое поле точечного монохроматического источника, размещенного в точке (z_0, x_0) , запишем в виде разложения по локальным модам

$$p(z, x) = \sum_m G_m(x) \varphi_m(z, x), \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi_m(z, x) + [k^2(z, x) - \kappa_m^2(x)] \varphi_m(z, x) = 0, \quad (5.1)$$

которые на поверхности ($z = H$) и на дне ($z = 0$) удовлетворяют следующим граничным условиям: $\varphi_m(H, x) = 0$, $\varphi_m(0, x) + g_0 \varphi'_m(0, x) = 0$, а случайная функция $k^2 = k_0^2(1 + \varepsilon(z, x))$, $k_0 = \omega/c_0$. Если теперь пренебречь взаимодействием мод и обратным рассеянием, то коэффициенты $G_m(x)$ в формуле (1) определяются стандартным образом

$$G_m(x) = A_m \exp\left\{i \int_{x_0}^x d\zeta \kappa_m(\zeta)\right\}, \quad A_m = i [2\pi i \kappa_m(x) x]^{-1/2} \varphi_m(z_0, x_0) / 2\rho_0. \quad (5.2)$$

Запишем теперь второй момент поля давления в виде некогерентной и когерентной сумм

$$\langle |p|^2 \rangle = \sum_n \langle |G_n|^2 |\varphi_n|^2 \rangle + \sum_{n,m (n \neq m)} \langle (G_n G_m^*) (\varphi_n \varphi_m^*) \rangle \quad (5.3)$$

Простейший анализ структуры рядов (3) позволяет сделать следующие выводы. Для малых флуктуаций $\varepsilon(z,x)$ средние значения функций G_n и φ_n равны своим невозмущенным значениям, а их относительные флуктуации малы [1,2]. Поэтому, очевидно, что первая (некогерентная) сумма в (5.3) близка к значениям в отсутствие флуктуаций среды. Во второй сумме, когерентной, существенные изменения (относительно детерминированной задачи) возможны лишь за счет накапливающихся статистических эффектов в экспоненциальных членах ряда ($G_n G_m^*$) при $n \neq m$.

Для более детального исследования этого вопроса запишем интегро-дифференциальное уравнение для квадрата продольного волнового числа $\kappa^2(x)$

$$\frac{\partial}{\partial x} \kappa_m^2(x) = \int_0^H dz \varphi_m^2(z, x) \frac{\partial}{\partial x} k^2(z, x) \quad (5.4)$$

Заметим, что уравнение (5.4) является следствием уравнения Гельмгольца (5.1).

В первом порядке метода возмущений по ε из (5.4) следует тождество

$$\kappa_m^2(x) - \kappa_m^2(x_0) = k_0^2 \int_0^H dz \varphi_{0m}^2(z) [\varepsilon(z, x) - \varepsilon(z, x_0)] \quad (5.5)$$

где $\varphi_{0m}(z)$ – собственная функция детерминированной задачи, когда $\varepsilon(z, x) = 0$. Из (5.5) и (5.1), в частности, следует, что

$$\kappa_m^2(x) = \kappa_{0m}^2 + \delta \kappa_m^2(x), \quad \delta \kappa_m^2(x) = k_0^2 \int_0^H dz \varphi_{0m}^2(z) \varepsilon(z, x) \quad (5.6)$$

В силу малости случайных вариаций $\delta \kappa_m^2(x)$ следуют необходимые нам далее формулы для представления горизонтального волнового числа в виде его среднего и флуктуаций

$$\kappa_m(x) = \kappa_{0m} + \delta \kappa_m(x), \quad \delta \kappa_m(x) = \frac{\delta \kappa_m^2(x)}{2 \kappa_{0m}} \quad (5.7)$$

Из-за поглощения звука в осадках (параметр γ_1), горизонтальное волновое число будет гауссовым комплексным $\kappa_m(x) = \kappa_m^{(1)}(x) + i \kappa_m^{(2)}(x)$, а его случайные вариации будут полностью описываться соответствующей ковариационной матрицей.

Учитывая малость случайных вариаций собственных функций (5.1), в когерентной сумме ряда (5.3) выполним следующую замену $\langle G_n G_m^* \varphi_n \varphi_m^* \rangle = \langle G_n G_m^* \rangle \varphi_{0n} \varphi_{0m}^*$. Для того чтобы вычислить среднее значение $\langle G_n G_m^* \rangle$, запишем явный вид случайной функции $G_n G_m^*$

$$G_n G_m^* = A_n A_m^* \exp \left\{ i \int_{x_0}^x d\zeta [\kappa_{0n}(\zeta) - \kappa_{0m}(\zeta)] \right\} \times \\ \times \exp \left\{ i \int_{x_0}^x d\zeta [\delta \kappa_n^{(1)}(\zeta) - \delta \kappa_m^{(1)}(\zeta)] - \int_{x_0}^x d\zeta [\delta \kappa_n^{(2)}(\zeta) - \delta \kappa_m^{(2)}(\zeta)] \right\} \quad (5.8)$$

Простейший анализ показывает, что величина $A_n A_m^*$ испытывает небольшие флуктуации согласно определению (5.2) и для дальнейшего она не существенна. Первая детерминированная экспонента просто определяет осцилляции $G_n G_m^*$ и также не важна для нашего анализа. Во второй же экспоненте для любого фиксированного x стоит случайное комплексное гауссово число, определяемое дисперсиями и корреляциями между действительной и мнимой частью. Хорошо известно, что усреднение такой экспоненты по ансамблю реализаций ε дает произведение трех экспонент, у одной из которых мнимый аргумент, а у двух других действительные аргументы, но с

разными знаками. Осциллирующая экспонента в $\langle G_n G_m^* \rangle$ нам не важна и мы ее опустим, а запишем лишь экспоненциальную зависимость от x таким образом

$$\langle G_n G_m^* \rangle \approx \exp \left\langle -\frac{1}{2} \left\{ \int_{x_0}^x d\zeta [\delta\kappa_n^{(1)}(\zeta) - \delta\kappa_m^{(1)}(\zeta)] \right\}^2 \right\rangle \exp \left\langle \frac{1}{2} \left\{ \int_{x_0}^x d\zeta [\delta\kappa_n^{(2)}(\zeta) - \delta\kappa_m^{(2)}(\zeta)] \right\}^2 \right\rangle. \quad (5.9)$$

Из формул (5.9) и (5.6) хорошо видно, что структура интегралов и их средних значений в обоих экспонентах (5.9) полностью идентична. Обозначим среднее от первого интеграла через $\Lambda(1)_{nm}$, а среднее от второго интеграла как $\Lambda(2)_{nm}$, тогда $\langle G_n G_m^* \rangle \sim \exp\{-(1/2)\Lambda(1)_{nm}\} \exp\{(1/2)\Lambda(2)_{nm}\}$.

Если ввести еще обозначения

$$a_{nm}(z) = \text{Re} \left[\kappa_{0n}^{-1} \varphi_{0n}^2(z) - \kappa_{0m}^{-1} \varphi_{0m}^2(z) \right], \quad b_{nm}(z) = \text{Im} \left[\kappa_{0n}^{-1} \varphi_{0n}^2(z) - \kappa_{0m}^{-1} \varphi_{0m}^2(z) \right],$$

то, учитывая формулу (5.6), $\Lambda_{nm}^{(1)}$ можно записать в следующем виде

$$\Lambda_{nm}^{(1)} = \frac{\kappa_0^4}{4} \int_0^H dz_1 \int_0^H dz_2 a_{nm}(z_1) a_{nm}(z_2) \int_{x_0}^x dx_1 \int_{x_0}^x dx_2 B_\varepsilon(z_2 - z_1, x_2 - x_1). \quad (5.10)$$

Хорошо известно, что в реальных условиях мелкого моря масштаб вертикальных случайных неоднородностей L_z достаточно мал (порядка одного метра), поэтому можно всегда считать, что $L_z H^{-1} \ll 1$. Учитывая этот факт, а также выражение для корреляционной функции B_ε , легко провести вычисления и получить следующие тождества

$$\begin{aligned} \Lambda_{nm}^{(1)} &= \sigma_\varepsilon^2 \kappa_0^4 L_z L_x \left[(x - x_0) - L_x + L_x \exp\left\{-(x - x_0)/L_x\right\} \right] \int_0^H dz a_{nm}^2(z), \\ \Lambda_{nm}^{(2)} &= \sigma_\varepsilon^2 \kappa_0^4 L_z L_x \left[(x - x_0) - L_x + L_x \exp\left\{-(x - x_0)/L_x\right\} \right] \int_0^H dz b_{nm}^2(z), \end{aligned} \quad (5.11)$$

с учетом которых в явном виде записываются экспоненциальные зависимости по x членов когерентной части ряда (5.3)

$$\langle G_n G_m^* \rangle \approx \exp\left[-(1/2) \Lambda_{nm}^{(1)}\right] \exp\left[(1/2) \Lambda_{nm}^{(2)}\right]. \quad (5.12)$$

Простейший анализ формул (5.11) показывает, что изменчивость $\Lambda_{nm}^{(1)}$ и $\Lambda_{nm}^{(2)}$ по x меняется от линейной зависимости при $(x - x_0)/L_x \gg 1$ до квадратичной при $(x - x_0)/L_x \ll 1$. Из тождества (5.12) следует, что для членов некогерентного ряда (5.3) первая экспонента (5.12) равна единице. Для членов когерентного ряда эта экспонента стремится к нулю с увеличением x . Таким образом, начиная с некоторых дистанций $x \geq x_1$, относительно детерминированной задачи вклад когерентной суммы начинает заметно уменьшаться из-за квадратичной зависимости в экспоненте, а вклад некогерентной суммы остается неизменным. Средняя интенсивность поля $\langle |p|^2 \rangle$ «выглаживается» как по вертикальной, так и по горизонтальной координатам. Такое поведение

функций свидетельствует о существенно не малых флуктуациях $|p|^2$. Аналогично, из формулы (5.12) можно проследить влияние на статистику $|p|^2$ мнимой части собственного числа κ_n . Показатель второй экспоненты в формуле (5.12) всегда положительный, но при $n=m$ он несколько больше, чем при $n \neq m$. Таким образом, с ростом дистанции за счет флуктуаций мнимых частей κ_n и κ_m увеличиваются все члены рядов (5.3). Однако увеличение некогерентной части осуществляется несколько больше, что является еще одним фактором сглаживания по трассе статистических моментов поля. Очевидно, что такое влияние флуктуаций мнимых частей может проявиться на дистанциях x_2 , которые много больше дистанций x_1 . Однако сама физика процесса здесь ясна и заключается в том, что поглощение в дне несколько поднимает уровень с увеличением дистанции x . Детальный анализ этих эффектов для конкретных числовых значений параметров задачи (5.1) возможно провести только на основе численного статистического моделирования.

Для проверки предложенных асимптотических оценок и учета реальных случайных вариаций среды предложен метод статистического моделирования. Метод базируется на локально-модовом подходе, в рамках которого для амплитуд мод справедливы причинные уравнения, удобные для численного моделирования.

В качестве примера исследовано распространение звука частоты 500 Гц в неоднородной среде с флуктуациями. На рис.5.1 показано, что в мелком море для реальных параметров флуктуаций скорости звука акустическое поле частоты 500 Гц испытывает сильные флуктуации уже на расстоянии в несколько километров. Средняя же интенсивность поля при этом быстро «выглаживается» с ростом дистанции, а ее спад заметно замедляется. Полученные аналитические оценки подтверждены результатами численного моделирования [1-3].

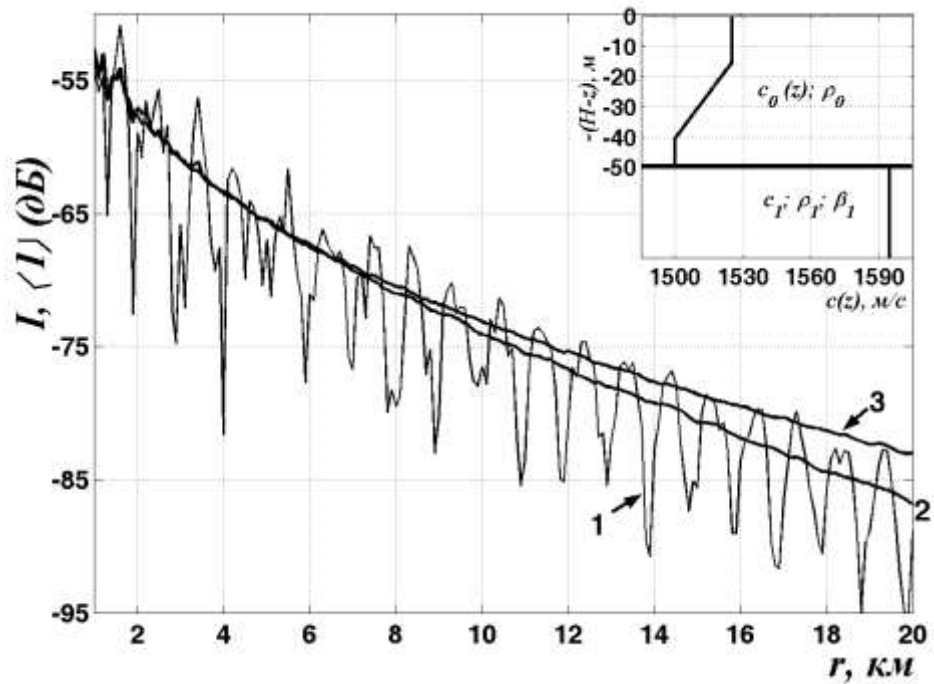


Рисунок 5.1 – Потери при распространении, представленные относительно значения интенсивности в свободном поле на расстоянии 1 м от источника. Осциллирующая кривая 1 – детерминированная модель $\varepsilon = 0$. Кривая 2 - наличие двумерных флуктуаций скорости звука $\varepsilon(r,z)$ с корреляционной функцией (1) и масштабами $L_r = 1000$ м, $L_z = 1$ м. Кривая 3 - наличие слоистых флуктуаций скорости звука $\varepsilon(z)$

Список использованных источников

1. Gulin O.E. and I.O.Yaroshchuk I.O. Simulation of underwater acoustical field fluctuations in shallow sea with random inhomogeneities of sound speed: depth-dependent environment// Journal of Computational Acoustics. 2014. Vol.22. No.1 1440002.
2. Gulin O.E. and I.O.Yaroshchuk I.O. Simulation of underwater acoustical field fluctuations in range-dependent random environment of shallow sea// Journal of Computational Acoustics. 2014. Vol.22. No.1. 1440006.
3. Гулин О.Э., Ярошук И.О. К теории низкочастотных акустических полей в случайно-неоднородном океане // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458, № 1. С. 97-101.

6 Поиск и исследование зон пузырьковой разгрузки метана в ДВ морях и российском секторе Арктики акустическими методами

6.1 Метод количественной акустической оценки профиля концентрации растворенного в водной толще метана в зонах его пузырьковой разгрузки

Поступающий из морского дна растворенный или газообразный метан переносится в верхние слои водной толщи в результате диффузии, с конвективными потоками, а также при растворении всплывающих пузырьков и газогидратов [1]. Профиль концентрации растворенного в водной толще метана, в общем случае, определяется механизмами его переноса, характеристиками течений, а также источников и стоков метана.

Водная толща, расположенная ниже приповерхностного хорошо перемешанного слоя, является эффективным барьером на пути диффузного поступления метана в верхние водные слои и атмосферу, поскольку характерное время окисления метана в воде значительно меньше характерных времен перемешивания глубинных водных масс [2]. Поэтому в случае преобладания диффузного механизма в условиях низкого вертикального коэффициента турбулентной диффузии повышенные концентрации растворенного метана должны регистрироваться только в достаточно узком придонном слое. Однако прямые измерения, проведенные в различных областях мирового океана, показали, что в местах газовыделения область со значительным превышением фоновых концентраций метана в водной толще нередко простирается до нескольких сотен метров от дна [6, 7].

Механизм формирования такого распределения растворенного метана может быть связан с пузырьковым транспортом, который для глубин ниже приповерхностного перемешанного слоя является наиболее эффективным инструментом доставки метана из осадочного слоя океана в верхние слои водной толщи и атмосферу [1]. Скорости всплытия пузырьков в газовом «факеле» (ГФ) достаточно высоки и составляют около 0.2 м/с [8, 9], следовательно, они за один час способны доставить метан на высоту более 700 м от поверхности дна. Поэтому, в водной толще на всем протяжении ГФ за счет растворения всплывающих пузырьков должна формироваться область повышенной концентрации растворенного метана.

В данном параграфе рассматривается метод расчета профиля концентрации растворенного в воде метана, обусловленного растворением всплывающих пузырьков, и сравнение полученного профиля с результатами прямых измерений концентрации растворенного метана в водной толще.

Для расчёта концентрации растворенного метана в водной толще воспользуемся следующей моделью.

Пусть в горизонтальный слой воды единичной толщины,двигающийся с постоянной скоростью V и находящийся на высоте h над горизонтальной поверхностью обширной зоны разгрузки метана на дне, поступает метан с постоянным по всей зоне потоком в воду с единицы площади $F_s(h)$. В этом случае концентрация метана $C(h)$ в этом слое воды над областью разгрузки в направлении течения будет линейно возрастать:

$$C(h) = \frac{F_s(h) \cdot L}{V}, \quad (6.1)$$

где L – расстояние от края области разгрузки вдоль направления течения до места измерения. Таким образом, для определения искомого профиля концентрации метана нужно найти профиль потока метана, поступающего в единицу водного столба, и скорость глубоководных течений.

Скорости глубоководных течений на полигоне определялись по результатам гидроакустической съемки ГФ дистанционным акустическим методом [10]. Метод основан на определении углов наклона ГФ в пространстве, которые определяются соотношением между скоростью всплытия пузырьков и скоростью течения. Такой метод также как и акустические методы, основанные на доплеровском эффекте, позволяет определять течения на ходу судна, однако такой метод на километровых глубинах обладает более высокой чувствительностью до одного см/с.

Традиционные методы измерения потока метана, основанные на установке специальных ловушек газа [11] или оптическом наблюдении за всплывающими пузырьками [12], оценивают поток по суммарному объему пузырьков, пересекающих горизонтальную плоскость в единицу времени (поток метана вверх). Однако для построения искомого профиля растворенного в воде метана требуется знание не потока метана вверх, связанного с вертикальным переносом метана всплывающими пузырьками, а потока метана в воду, связанного с растворением пузырьков. Поток метана в воду можно определить, взяв производную по глубине от профиля потока метана вверх. Построение такого профиля путем постановки ловушек или оптического наблюдения требует проведения серии измерений на различных глубинах, что на практике оказывается чрезвычайно трудозатратным и потому малопригодным.

Применение дистанционных акустических методов с этой точки зрения является предпочтительным. Традиционные методы дистанционного определения потока метана в ГФ [8, 13], основаны на оценке уровня обратного рассеяния звука (ОРЗ) от переносящих метан пузырьков. При этом для проведения такой оценки кроме акустических данных требуются дополнительные сведения о функциях плотности распределения пузырьков по скоростям всплытия, размерам и форме на каждом горизонте. Получить такие сведения на нескольких горизонтах и при значительном расстоянии от дна крайне затруднительно. Кроме того,

дифференцирование профиля потока метана вверх, необходимое для получения профиля потока в воду, вносит дополнительные ошибки. В работе [14] показано, что искомый профиль потока метана в воду можно оценить с помощью акустического зондирования без применения процедуры дифференцирования и при неизвестных распределениях пузырьков по размерам и скоростям всплытия.

Метод основан на измерении профиля сечения ОРЗ от ГФ на частотах выше резонансной частоты пузырьков, образующих ГФ. Поток метана в воду F_w связан с его диффузией через поверхность пузырьков. Следуя [15], для величины этого потока в грамм-молях в секунду от единицы высоты столба ГФ получим выражение:

$$F_w = 4\pi \int_0^\infty k_B s r^2 \left(C - \frac{P_b}{H} \right) N n(r) dr \quad (6.2)$$

Здесь: k_B – индивидуальный для каждого пузырька коэффициент, характеризующий скорость обмена метана через его поверхность; s – отношение площадей поверхности пузырька и сферы того же объема; r – эффективный радиус пузырька, равный радиусу шара того же объема; C – концентрация метана в воде; P_b – парциальное давление метана в пузырьках; H – постоянная Генри; N – количество пузырьков на единицу высоты ГФ, $n(r)$ – функция плотности распределения пузырьков по размерам.

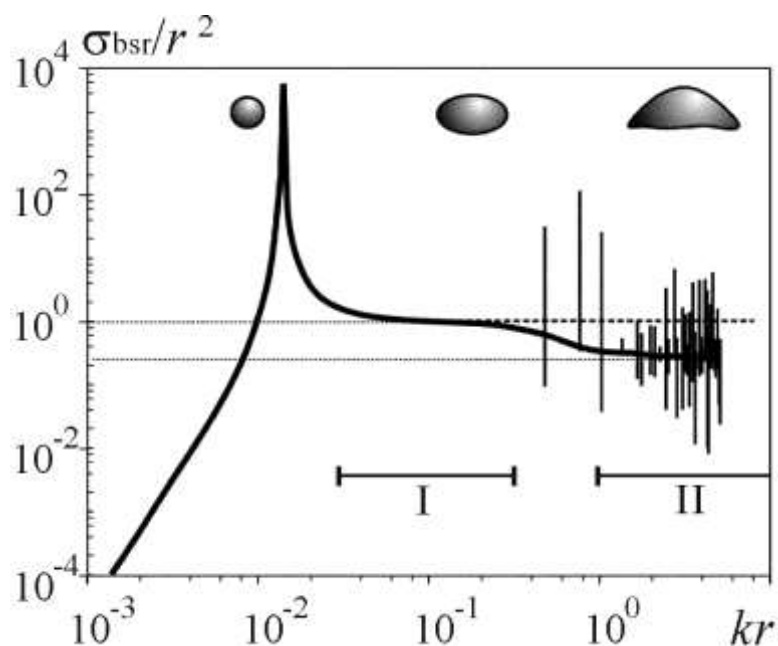
Для глубоководных ГФ (глубина больше 400 м) выражение (6.2) можно значительно упростить. Из-за высокого гидростатического давления P можно пренебречь, во - первых, поверхностным натяжением и, во - вторых, процессом встречной диффузии в пузырек растворенных в воде газов – азота, кислорода и др. Учитывая также, что газовые пузырьки у дна состоят в основном из метана, можно считать парциальное давление метана P_b равным гидростатическому давлению P на всем протяжении ГФ. Из - за небольших горизонтальных размеров ГФ [16, 17] пузырьки при наличии течений всплывают в “чистой” воде и, следовательно, членом C можно пренебречь. Что касается коэффициента k_B , то согласно [15], для “грязных” пузырьков с $r > 10$ мкм скорость обмена метана через поверхность слабо зависит от их размеров: $k_B \sim r^{-0.1}$. Для ГФ характерные радиусы пузырьков находятся в пределах 1-10 мм [18] и для этого диапазона размеров с точностью около 10% k_B можно считать постоянным и также вынести из-под знака интеграла. Отметим, что постоянство k_B приводит к постоянству скорости уменьшения радиуса пузырька из-за диффузии v_d , которая связана с k_B простым соотношением: $v_d = k_B RT / H$, где T – температура в градусах Кельвина; R – универсальная газовая постоянная.

С учетом выше изложенного, выражение (6.2) примет следующий вид:

$$F_w = \frac{4\pi P}{RT} v_d \int_0^\infty s r^2 N n(r) dr = \frac{v_d S_b}{V_M} \quad (6.3)$$

где S_b - суммарная площадь поверхности пузырьков, V_M – молярный объем газа на данном горизонте. Таким образом, задача определения потока сводится к определению v_d и суммарной площади поверхности S_b .

С помощью современных эхолотов легко получить профиль сечения ОРЗ от ГФ. По этому профилю при известных функциях $n(r)$ и s численными методами можно рассчитать профиль суммарной площади поверхности S . В принципе по акустическим наблюдениям можно оценить суммарную площадь поверхности и при неизвестном распределении пузырьков по размерам. На рисунке 6.1 представлен результат расчета сечения обратного рассеяния пузырька σ_{bsr} (иногда σ_{bsr} называют, также, дифференциальным сечением обратного рассеяния), нормированного на квадрат радиуса пузырька r , для $r > 0.1$ мм без учета вязкости и теплопроводности [19].



Отрезками показаны участки с квадратичной зависимостью σ от r . Над соответствующими областями kr (для частоты 20 кГц) условно показаны возможные формы всплывающих пузырьков

Рисунок 6.1 – Зависимость нормированного сечения ОРЗ сферического пузырька от значения kr

На графике выделяются два горизонтальных участка с квадратичной зависимостью сечения ОРЗ от радиуса пузырька. Первый занимает диапазон $2kr_r < kr < 0.5$, где r_r – резонансный радиус, второй - область геометрического рассеяния с $kr > 1$. Резонансными явлениями в области $kr > 0.5$ можно пренебречь, поскольку ширина пиков чрезвычайно мала, а в реальных случаях мала и их амплитуда [6]. Если распределение пузырьков полностью укладывается внутри одного из этих участков, то искомая суммарная поверхность пузырьков равна сечению ОРЗ, умноженному на соответствующий данному участку коэффициент.

Для участка I возможный диапазон размеров пузырьков - (отношение максимального радиуса к минимальному) с глубиной, из – за увеличения резонансного радиуса, сужается от около 20 у поверхности до 2 на глубине 1000 м. Основным недостатком работы в области геометрического рассеяния (участок II) является необходимость использования высоких частот. Как указывалось выше, для ГФ характерные радиусы пузырьков у источника на дне находятся в пределах 1 - 10 мм, что приводит к необходимости использовать частоты выше 200 кГц. При работе с поверхности такие частоты эффективны до глубин не более 100 - 150 м. При исследовании глубоководных ГФ обычно используются частоты 12 – 38 кГц. Как видно из рисунка 1, между участками I и II существует ступенька, которая в случае сферических пузырьков затрудняет использование этих участков одновременно.

Рассмотрим влияние формы пузырьков на акустическое рассеяние. Форма свободно всплывающих в воде пузырьков изменяется в зависимости от размеров от сферы для маленьких пузырьков ($r < 0.5$ мм) до сплюснутого эллипсоида для относительно больших пузырьков ($0.5 \text{ мм} < r < 8.5$ мм). При $r > 8.5$ мм пузырьки по форме напоминают усеченную снизу сферу [20]. Отношение вертикальной и горизонтальной осей эллипсоида e с увеличением r постепенно уменьшается от 1 для маленьких пузырьков до 0.75 для $r = 2$ мм [21]. Для пузырьков большего размера это отношение лежит в диапазоне 0.5 - 0.75 [15, 20, 21]. Эллипсоидальность пузырька приводит к увеличению его поверхности и сечения ОРЗ при зондировании с поверхности воды. Следуя работе [22] легко показать, что при вертикальном зондировании на участке I увеличение сечения ОРЗ из за не сферичности практически совпадает с увеличением поверхности пузырька и погрешность акустической оценки его поверхности для $e > 0.5$ не превышает 1%. На участке II форма пузырька оказывает более сильное влияние на ОРЗ. Легко показать, что для эллипсоида вращения с уменьшением e сечение ОРЗ растет по закону $e^{-8/3}$, что существенно быстрее, чем площадь его поверхности. Замечательно, что при $e = 0.6$ (величина близкая к наблюдаемой для крупных пузырьков) площадь поверхности пузырька равна сечению ОРЗ, умноженному на тот же коэффициент 4π , что и для участка I. Отметим, что и для самых крупных пузырьков, имеющих форму усеченной сферы, этот коэффициент также близок к 4π . Таким образом, для пузырьков, образующих глубоководный ГФ, на частотах ~ 20 кГц участок II на рисунке 6.1 приподнимается, ступенька между участками I и II исчезает, и оба участка практически ложатся на одну линию (пунктирная линия на рисунке 6.1). Это позволяет проводить акустические измерения суммарной поверхности пузырьков с неизвестным распределением по размерам и со значениями kr , попадающими на оба участка (рисунок 6.1). В этом случае выражение (6.4) принимает вид:

$$F_w = \frac{4\pi}{V_M} v_d \sigma, \quad (6.4)$$

где σ - сечение ОРЗ от столба ГФ единичной высоты. То есть, для определения потока метана в воду достаточно акустических измерений и литературных данных о величине v_d , которая в зоне стабильности газогидрата метана лежит в диапазоне $1 \div 1.5$ мкм/с [23, 24] или в диапазоне $1.5 \div 6.5$ мкм/с [25]. Для успешного применения данного метода необходимо выполнения условия, что основная масса пузырьков образующих ГФ имеет резонансные частоты ниже рабочей частоты эхолота. Если принять за минимальный радиус пузырьков метана один миллиметр, то для глубины до одного километра данное условие выполняется на рабочей частоте от 30 кГц и выше.

Таким образом, с учетом (6.1) и (6.4) искомый профиль концентрации метана $C(h)$ в водной толще над обширной областью разгрузки в виде многочисленных ГФ будет определяться выражением:

$$C(h) = \frac{4\pi}{V_M} v_d \cdot \overline{\sigma(h)} \cdot \mu \frac{L}{V}, \quad (6.5)$$

где $\overline{\sigma(h)}$ - усредненный по всем ГФ профиль сечения ОРЗ, μ - количество глубоководных ГФ на единице площади морского дна.

Описанный выше метод позволяет рассчитать придонные концентрации метана непосредственно по акустическим измерениям при неизвестных скоростях всплытия пузырьков и неизвестном их распределении по размерам.

6.2 Верификация метода акустической оценки концентрации метана в водной толще на примере зоны его пузырьковой разгрузки в Охотском море

Апробация метода акустической оценки концентрации метана в водной толще в областях его пузырьковой разгрузки была проведена на основе данных, полученных в Охотском море на полигоне с площадью 14000 км², расположенном у северо-восточного склона о. Сахалин (рисунок 6.2а). Данный полигон содержит подавляющее большинство известных ГФ Охотского моря [8, 26]. Профиль концентрации метана в водной толще рассчитывался на основе акустических данных, полученных на данном полигоне с помощью многочастотного стационарного комплекса, основу которого составляют эхолоты ELAC и Сарган - ЭМ. В период с 2002 по 2010 гг. в экспедициях на НИС "Академик М.А. Лаврентьев" на указанном полигоне было выполнено около 1000 регистраций более чем 400 ГФ. Положения, зарегистрированных на полигоне ГФ показаны на рисунке 40а.

На основе полученных акустических данных и метода, изложенного выше по формуле (6.4), были рассчитаны профили потока метана F_w от глубоководных ГФ для разных частот. При расчете профилей потока метана скорость уменьшения радиуса пузырька из-за диффузии v_d принималась равной 2 мкм/с, учитывалось также сферическое расхождение и затухание звука.

Основным условием использования формулы (6.4) является то, что большинство пузырьков имеют размеры больше резонансного. Для нижней границы распределения пузырьков в ГФ 1 мм используемая частота эхолота должна быть больше 30 кГц. Нами для сбора данных об уровне обратного рассеяния звука были использованы эхолоты с рабочими частотами ниже оптимальной частоты 30 кГц. Оценки резонансных радиусов пузырьков метана для частот 12 и 20 кГц дают соответственно 2.4 и 1.45 мм для глубины 850 м (средняя глубина океанологических станций и ГФ по которым определялись средние профили концентрации метана).

Оценим погрешность измерения суммарной площади пузырьков для этих рабочих частот в простейшем случае, когда плотность распределения пузырьков постоянна в диапазоне радиусов 1 – 10 мм и равна нулю вне него.

В качестве добротности пузырька возьмем ее максимальное значение, обусловленное потерями на переизлучение без учета механических потерь $Q = 1/ka$. При данных условиях получим для частоты 20 кГц ошибку + 15%, а для частоты 12 кГц + 65%.

На рисунке 6.2б приведены рассчитанные по акустическим данным профили потока метана в воду от типичного глубоководного ГФ на частотах 12 и 20 кГц.

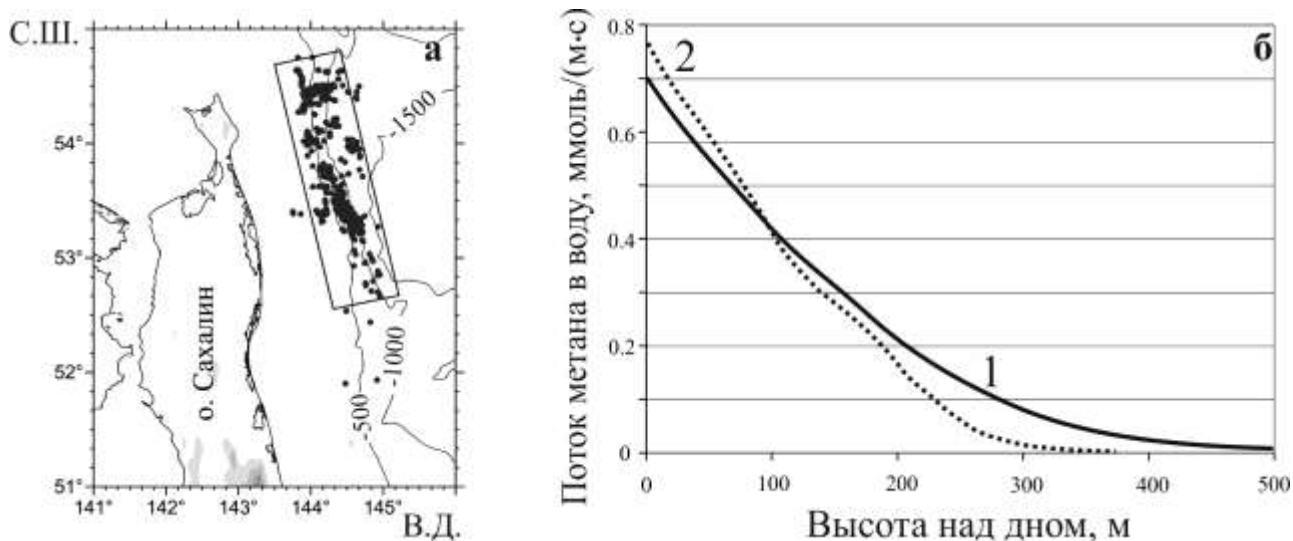


Рисунок 6.2 – Расположение ГФ (точки) на полигоне (а) и рассчитанные по данным ОРЗ для частот 12 (1) и 20 кГц (2) профили потока метана в воду от типичного ГФ (б)

Из рисунка 6.2б видно, что кривые 1 и 2 хорошо совпадают друг с другом. Хотя кривая 2 для 20 кГц при увеличении высоты над дном спадает несколько быстрее кривой 1 для 12 кГц, что связано, возможно, с более узкой шириной диаграммы направленности на частоте 20 кГц или большим влиянием резонансных пузырьков на частоте 12 кГц. Такое хорошее совпадение кривых

для разных частот свидетельствует, что в нашем случае резонансные эффекты в придонном слое толщиной около двухсот метров пренебрежимо малы.

Что касается профиля концентрации метана $C(h)$ в водной толще над обширной областью разгрузки, то, согласно выражений (6.4, 6.5) он определялся с помощью:

$$C(h) = \overline{F_w(h)} \cdot \mu \cdot \frac{L}{V} \quad (6.6)$$

где $\overline{F_w(h)}$ – усредненный профиль потока метана в воду по всем ГФ, μ – количество глубоководных ГФ на единице площади морского дна на полигоне, L – расстояние от края области разгрузки вдоль направления течения до места измерения, V – скорость глубоководного течения.

Поток метана в воду сильно зависит от высоты над дном, и при усреднении по глубине в этом случае возникли бы большие погрешности, связанные с усреднением значений потоков в воду на разных высотах от дна. Поэтому в качестве h в выражении (6.6) использовалась не глубина, а высота над дном. Это связано также с тем, что для усреднения использовались глубоководные ГФ, источники которых были расположены не строго на одной глубине, а в диапазоне глубин от 700 до 850 м.

Прямые измерения глубоководных течений в рассматриваемой области не проводились, однако, для определения профиля концентрации метана с помощью выражения (6.6), необходимо учитывать среднюю скорость глубоководного течения V . Для ее оценки был применен метод, описанный в [10]. Особенностью, которого является дистанционное определение V по данным акустического зондирования ГФ.

На рисунке 6.3 показано поле глубоководных течений для летнего времени года, полученное по описанному выше методу. Как видно из рисунка 6.3 при глубинах менее 1000 метров доминирующим является течение с севера на юг, совпадающее по направлению с действующим в пределах шельфа восточного Сахалина Восточно - Сахалинским поверхностным течением, однако при больших глубинах направление глубоководного течения меняется на противоположное и совпадает с Северо - Восточным поверхностным течением. Полученные скорости глубоководных течений оказались неожиданно высокими и достигали 30 см/с со средней скоростью глубоководного течения $V = 15$ см/с. При этом оказалось, что в среднем течение направлено на юго – юго - восток параллельно изобатам и длинной стороне полигона (прямоугольник на рисунке 6.2а).

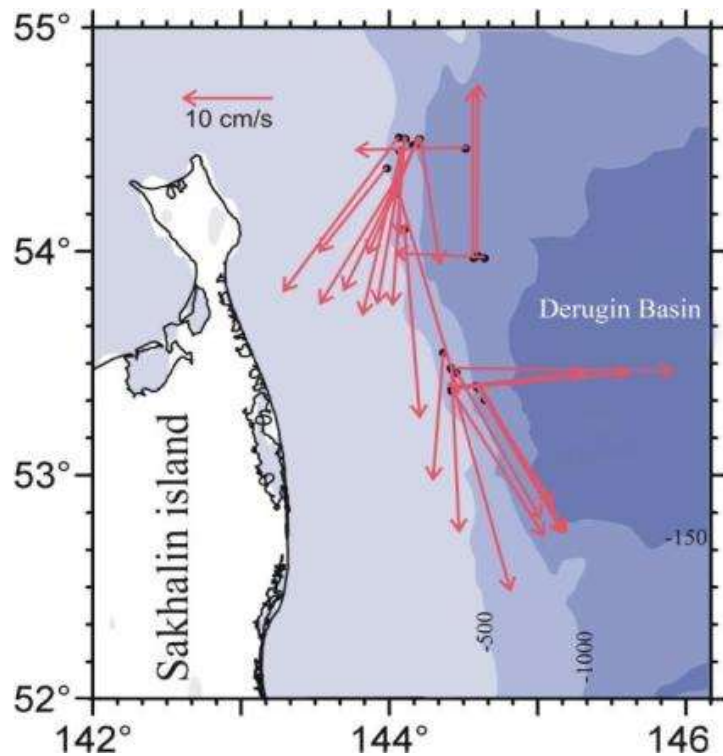


Рисунок 6.3 – Поле глубоководных течений в летнее время у северо-восточного склона о. Сахалин по данным акустических наблюдений за ГФ

Таким образом, в качестве исходных, для расчета профиля концентрации метана в водной толще на полигоне, использовались следующие оценочные данные:

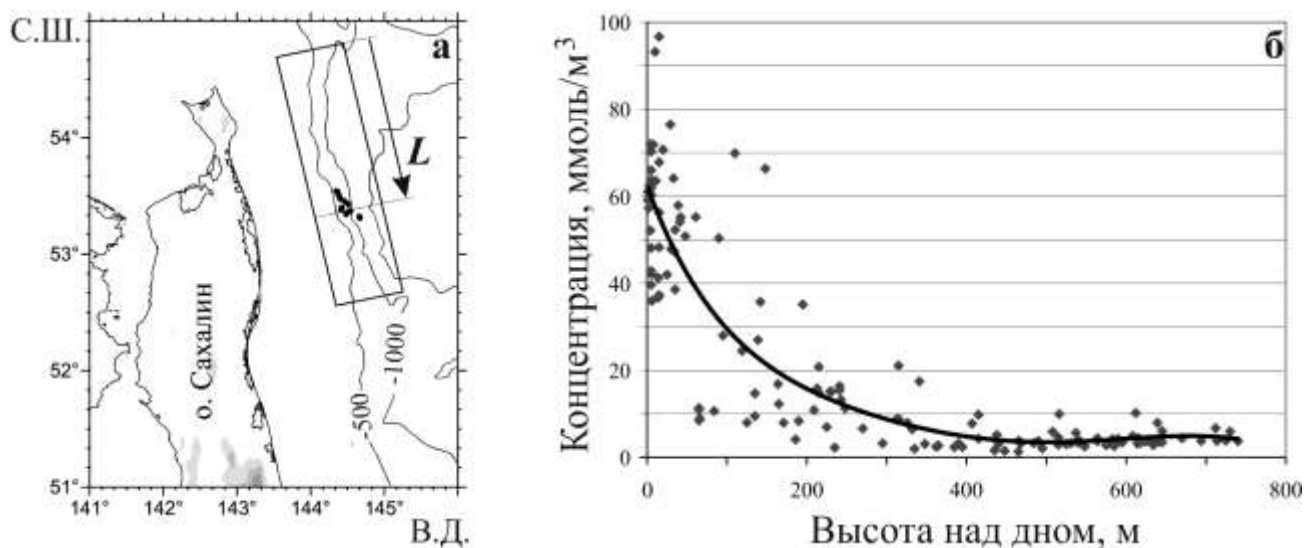
- Среднее расстояние от северной границы области пузырьковой разгрузки метана до океанологических станций $L = 150$ км;
- Количество глубоководных ГФ на одном квадратном километре $\mu=0.1$ [8];
- Скорость течения $V = 15$ см/с.

При этой скорости течения время прохода объема воды через область пузырьковой разгрузки метана до района океанологических измерений составляет 12 дней, что гораздо меньше характерного времени диссипации метана в морской воде, т.е. пренебрежение процессами диссипации метана полностью оправдано.

Верификация метода акустической оценки расчета профилей концентрации метана в водной толще проводилась на основании сравнений рассчитанных по акустическим данным профилей концентрации с данными прямых измерений концентрации метана в водной толще путем отбора на станциях проб воды на заданных горизонтах, с последующим газохроматографическим анализом на борту судна [27]. Эти данные были получены в экспедициях 2009 и 2010 годов на 14 глубоководных станциях (глубина больше 400 м), где проводился отбор проб воды на разных горизонтах, и далее определялась концентрация метана в этих пробах.

На рисунке 6.4а показаны положения океанологических станций на полигоне, а на рисунке 6.4б нанесены значения измеренных концентраций в зависимости от высоты над дном и

представлен полученный по ним усредненный профиль концентрации растворенного метана в морской воде. В качестве аппроксимирующей функции использовался полином шестой степени с достоверным уровнем аппроксимации $R^2 = 0.8$.



Стрелка L показывает направление глубоководных течений, а её длина 150 км соответствует среднему расстоянию от северной границы полигона (прямоугольник) до океанологических станций

Рисунок 6.4 – Расположение глубоководных станций (точки) на полигоне, на которых производилось измерение концентраций метана в морской воде (а), отдельные значения концентраций метана в воде и их усредненный профиль (б)

Используя рассчитанные профили потока метана в воду (рисунок 6.2) с помощью выражения (6.6) были получены искомые профили концентрации метана в морской воде от высоты над дном (рисунок 6.5, кривые 2 и 3).

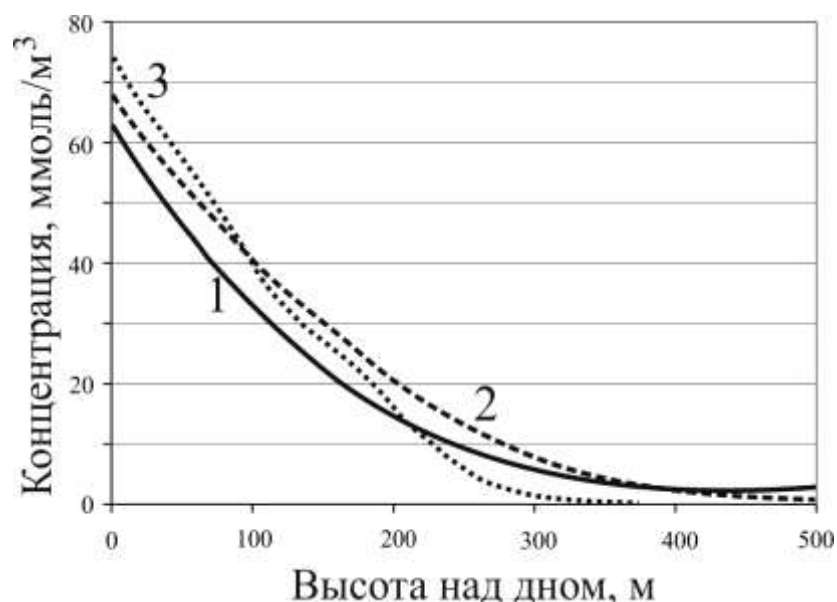


Рисунок 6.5 – Кривые, отображающие зависимость измеренной (1) и рассчитанных по данным ОРЗ для 12 (2) и 20 кГц (3) концентрации метана в морской воде от высоты над дном

На этот же рисунок нанесен полученный по данным прямых измерений усредненный профиль концентрации растворенного метана в морской воде (рисунок 6.5, кривая 1). Сравнение кривых, представленных на рисунке 6.5, позволяет сделать вывод о хорошем соответствии между расчетными и измеренными профилями, как по величине, так и по форме. Это подтверждает хорошую точность предложенного акустического метода оценки концентрации метана в водной толще и указывает на преобладающую роль пузырькового транспорта в формировании в придонной водной толще повышенной концентрации растворенного метана.

Список использованных источников

1. Judd A.G. The global importance and context of methane escape from the seabed // *Geo-Mar Lett.* 2003. V. 23. P. 147 - 154.
2. Valentine D.L., Blanton D.C., Reeburgh W.S., Kastner M. Water column methane oxidation adjacent to an area of active hydrate dissociation, Eel River Basin // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2001. V. 65. P. 2633 – 2640.
3. Dillon T.M. Vertical Overturns' A. Comparison of Thorpe and Ozmidov Length Scales // *Journal of Geophysical Research.* 1982. V. 87. № 12. P. 9601 – 9613.
4. Osborn T.R. Estimates of the Lockal Rate of Vertical Diffusion from Dissipation Measurement // *Journal of Physical Oceanography.* 1980. V. 10. P. 83 – 88.
5. Linke P., Sommer S., Rovelli L., McGinnis D.F. Physical limitations of dissolved methane fluxes: The role of bottom-boundary layer processes // *Marine Geology.* 2010. V. 272. P. 209 – 222.

6. Reeburgh W.S., Ward B.B., Whalen S.C., Sandbeck K.A., Kilpatrick K.A., Kerkhof L.J. Black Sea methane geochemistry // *Deep-Sea Research*. 1991. V. 38. № 2. P. 1189 – 1210.
7. 147. Scranton M.I., Brewer P.G. Occurrence of methane in the near-surface waters of the western subtropical North-Atlantic // *Deep Sea Research*. 1977. V. 24. № 2. P. 127 – 138.
8. Саломатин А.С., Юсупов В.И. Акустические исследования газовых “факелов” Охотского моря // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 5. С. 911–919.
9. McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y. et al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № 9. P. 9007 – 9017.
10. Саломатин А.С., Юсупов В.И., Черных Д.В. Оценка глубоководных течений по данным гидроакустической съемки газовых “факелов” // *Сборник трудов XXII сессии РАО*. 15-17 июня. Москва. 2010. Т. 2. С. 273 - 2 76.
11. Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P., Verbyla D., Chapin F.S. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // *Nature*. 2006. V. 443. P. 71 – 75.
12. Blanchard D.C., Woodcock A.H. Bubble formation and modification in the sea and its meteorological significance // *Tellus*. 1957. V. 9. P. 145 – 158.
13. Муякшин С. И., Заутер Э. Дистанционный акустический метод определения производительности подводного источника газовых пузырьков // *Океанология*. 2010. Т. 50. №. 6. С. 1045-1051.
14. Саломатин А. С., Юсупов В. И., Верещагина О. Ф., Черных Д. В. Акустическая оценка концентрации метана в водной толще в областях его пузырьковой разгрузки // *Акустический журнал*, 2014, том 60, № 5, с. 638–644.
15. Leifer I., Patro R.K. The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study// *Cont. Shelf Res.* 2002. V. 22. № 16. P. 2409 – 2428.
16. Муякшин С.И., Заутер Э., Бетиус А. и др. Некоторые результаты эхолокационной съемки источника метана, связанного с глубоководным грязевым вулканом “Хаакон Мосби” // *Сб. тр. XV сессии РАО. Акустика океана*. Москва. 2004. Т. 2. С.165 - 168.
17. Greinert J., Nutzal B. Hydroacoustic experiments to establish a method for the de-termination of methane bubble fluxes at cold seeps // *Geo-Marine Let.* 2004. V. 24. № 2. P. 75 – 85.
18. Leifer I., MacDonald I. Dynamics of the gas flux from shallow gas hydrate deposits: interactions between oily hydrate bubbles and the ocean environment // *Earth and Plane-tary Science Lett.* 2003. V. 210. P. 411 – 424.
19. Sage K.A., George J., Überall H. Multipole resonances in sound scattering from gas bubbles in a liquid // *Journal of Acoustic Society of America*. 1979. V. 65. № 6. P. 1413 – 1422.

20. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops, and Particles. N.Y.: Academic Press Inc., 1978. P. 380.
21. Alves S.S., Orvalho S.C.P. and Vasconcelos J.M.T. Effect of bubble contamination on rise velocity and mass transfer// Chem. Eng. Sci. 2005. № 60. P. 1 - 9.
22. Westbrook G., Thatcher K., Rohling E., Piotrowski A., Like H., Osborne A., Nisbet E., Minshull T., Lanoiselle M., James R., Hnerbach V., Green D., Fisher R., Crocker A., Chabert A., Bolton C. Beszczynska-Moller A., Berndt C., Aquilina A. Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. P 1 – 5.
23. Rehder G., Brewer P.W., Peltzer E.T., Friederich G. Enhanced lifetime of methane bubble streams within the deep ocean // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. № 15. P. 211 – 214.
24. Rehder G., Leifer I., Brewer P.G., Friederich G., Peltzer E.T. Controls on methane bubble dissolution inside and outside the hydrate stability field from open ocean field experiments and numerical modeling // Marine Chemistry Volume. 2009. V. 114. № 1. P. 19 – 30.
25. McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y. et al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № 9. P. 9007 – 9017.
26. Акуличев В.А., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Мальцева Е. В., Гресов А. И., Телегин Ю. А. Условия формирования газогидратов в Охотском море // Доклады Академии наук. 2014. Т. 454. № 3. С. 340 – 342.
27. Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. Methane in water column sand sediments of the north western Sea of Japan // Deep - Sea Research II. 2013. V. 86. P. 25 – 33.

7. Лабораторные и натурные исследования образования газогидратов на поверхности пузырьков

7.1 Лабораторные исследования процессов образования и разложения газогидратов

Экспериментально изучены особенности выхода пузырьков метана и углекислого газа из сопла в воду при температуре и давлении, соответствующих области стабильности газогидрата метана и вне ее. Для проведения экспериментальных исследований создан экспериментальный комплекс (рисунок 7.1). Комплекс состоит из прозрачной ячейки высокого давления, температура которой задается с пульта управления, баллона с газом, соединенным с системой подачи газа, на выходе которой находится сопло, установленное в нижней части охлаждаемой ячейки. Комплекс позволяет проводить исследования в диапазоне давлений 1 -100 атм. и температур от -10 до 20°C с регистрацией происходящих процессов на цифровую видеокамеру [1].

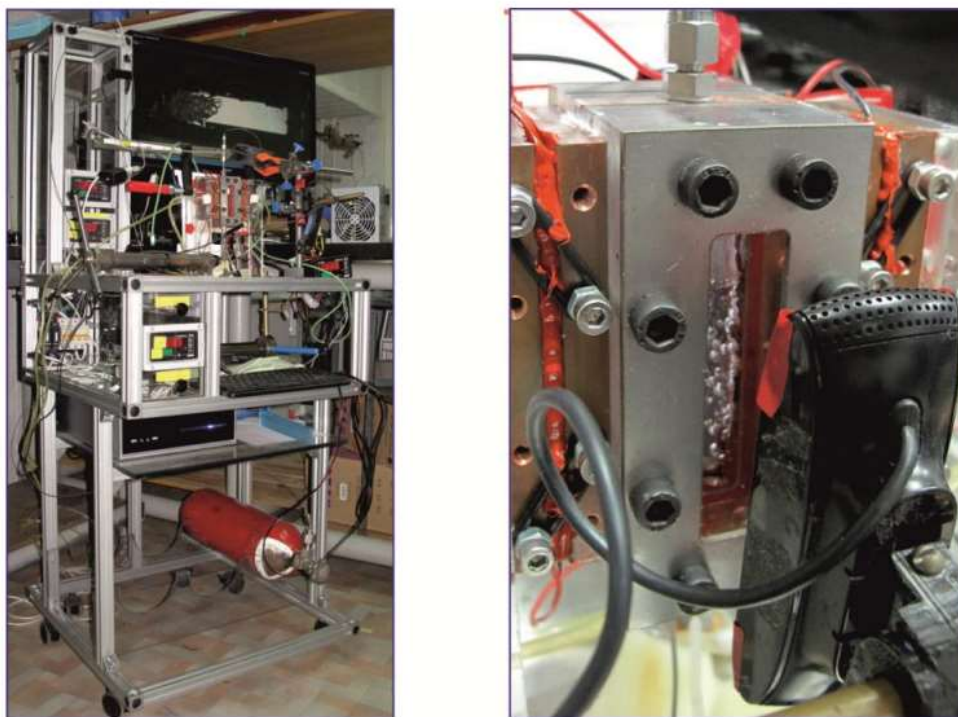


Рисунок 7.1 – Общий вид комплекса для изучения образования и разложения газогидратов

С помощью созданного комплекса выполнены модельные эксперименты по изучению кинетики образования и разложения газогидратов метана и углекислого газа на поверхности пузырьков. Показано, что в зоне стабильности газогидрата метана пузырьки метана могут не покрываться газогидратной коркой в течение нескольких часов. Установлено, что процесс образования газогидратной корки на поверхности пузырька инициируется ударом пузырька при всплытии или контактом с поверхностью газогидрата. Так пузырьки метана или углекислого газа при выходе из сопла и всплытии, находясь в зоне стабильности соответствующего газогидрата, не

имеют газогидратной корки (рисунок 7.2), по крайней мере, до высоты порядка 10 см (длина ячейки высокого давления).



Внизу видно, как пузырек метана выходит из сопла. Вверху – пузырьки метана, покрытые газогидратной коркой, собираются в стабильные «гроздь». Температура 0.1 °С, давление 70 атм.

Рисунок 7.2 – Пузырьки метана в воде в зоне стабильности газогидрата

Установлено, что в случае предварительной заморозки воды в ячейке высокого давления и в условиях стабильности газогидрата метана выходящие из сопла пузырьки могут сразу за несколько секунд покрываться газогидратной коркой, при этом они зачастую имеют причудливую форму (рисунок 7.3), существенно отличающуюся от «обычной», когда соотношение давления и температуры лежит вне области стабильности газогидрата.

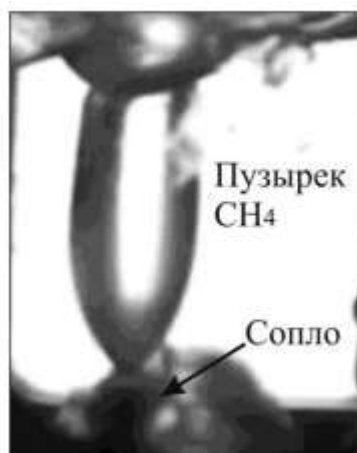
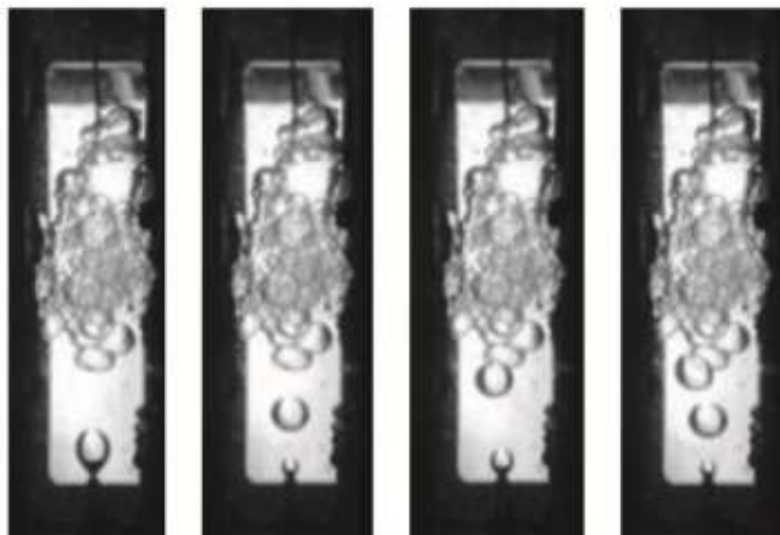


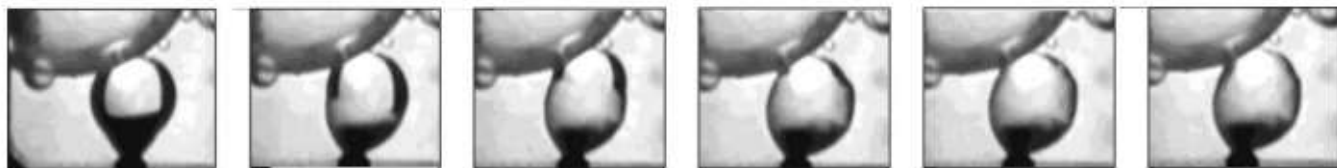
Рисунок 7.3 – Удлиненный пузырек с газообразным метаном в зоне стабильности газогидрата метана. Температура 0.1 °С, давление 70 атм

Аналогичная картина наблюдается и с углекислым газом. При достаточно высоком давлении (>30 атм.) углекислый газ при температуре около нуля переходит в жидкость, плотность которой немного ниже плотности воды. Поэтому в этих условиях пузырьки углекислого газа всплывают существенно медленнее метановых пузырьков, часто почти не изменяя своей первоначальной формы (рисунок 7.4). Так же, как и в случае с метаном, пузырьки, заполненные жидким углекислым газом, при соприкосновении с поверхностью газогидрата в верхней части ячейки, постепенно за несколько секунд покрываются газогидратной коркой (рисунок 7.5).



Показаны последовательные кадры. Температура $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление 50 атм. Верхняя часть ячейки заполнена пузырьками жидкого CO_2 , покрытыми газогидратной коркой

Рисунок 7.4 – Особенности отрыва, всплытия и покрытия коркой газогидрата жидкого CO_2 .



В нижней части под пузырьком виден кончик сопла. Время между кадрами 0.4 с.

Температура $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление 50 атм.

Рисунок 7.5 – Пузырек с жидким CO_2 у сопла постепенно покрывается коркой газогидрата

Очень интересные процессы наблюдаются в «тройной точке», когда может одновременно существовать газообразный, жидкий и газогидратный CO_2 . На рисунке 7.6 показан именно такой случай, когда при постоянном потоке CO_2 из сопла первоначально в ячейке с водой образовался соединенный с соплом большой пузырь из жидкого CO_2 , а затем в нем стали всплывать пузырьки с газообразным CO_2 . Постепенно пузырь увеличился в размерах, а верхнюю его часть стал занимать газообразный CO_2 .

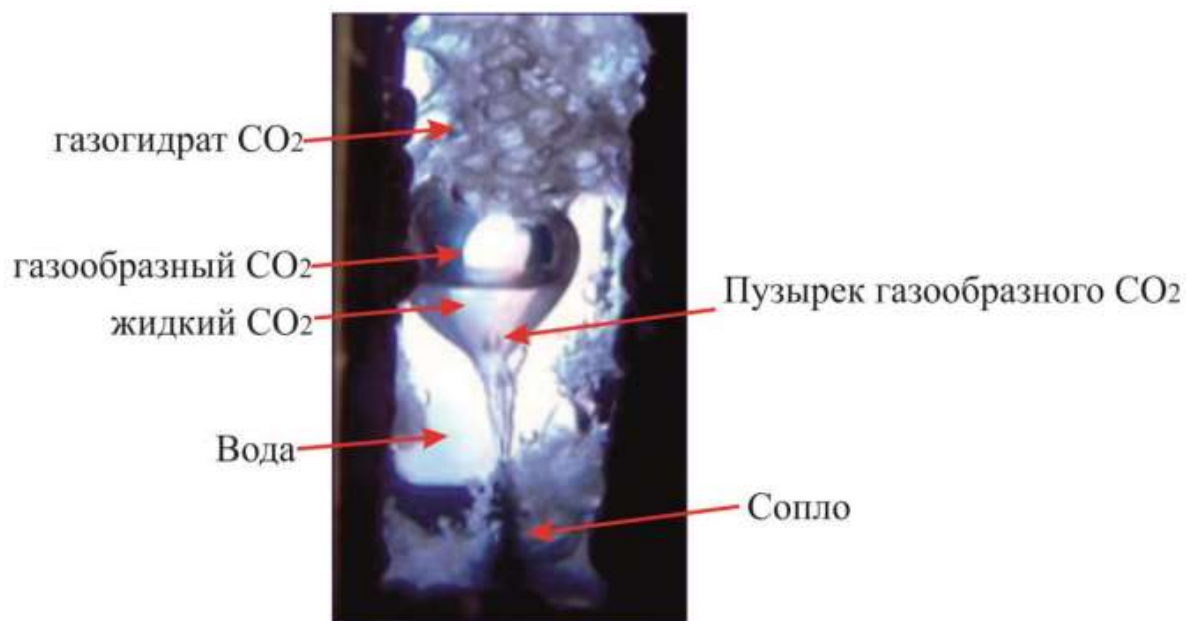


Рисунок 7.6 – Пузырек с газообразным CO_2 всплывает в пузыре с жидким (внизу капли) и газообразным CO_2 , находящегося в воде. Температура $4\text{ }^\circ\text{C}$, давление 30 атм

7.2 Численное моделирование процессов образования и разложения газогидратов

С использованием восьми ядерного суперкомпьютера Parsytec выполнено квантово – химическое моделирование кластеров метана с молекулами воды в приближении супермолекулы [2]. На рисунке 7.7 показаны структуры гидратного каркаса $\text{H}_2\text{O}(5^{12})$ и клатрата $\text{CH}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}(5^{12})$ с учетом ван-дер-ваальсовых радиусов атомов.

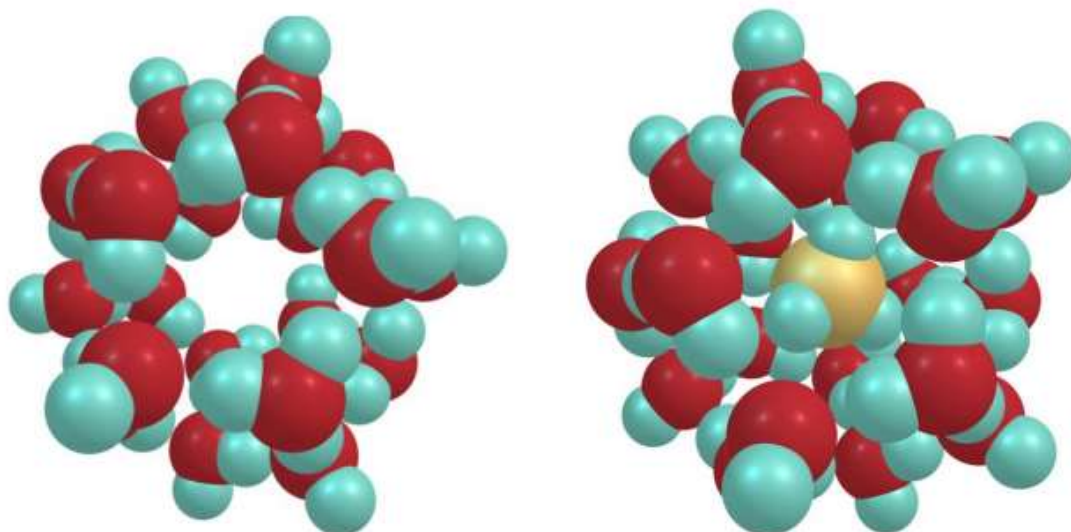


Рисунок 7.7 – Структуры гидратного каркаса $\text{H}_2\text{O}(5^{12})$ и клатрата $\text{CH}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}(5^{12})$ с учетом ван-дер-ваальсовых радиусов атомов

Изучение строения свободных гидратных оболочек $\text{H}_2\text{O}(5^{12})$ и клатрата $\text{CH}_4\cdot\text{H}_2\text{O}(5^{12})$ позволило впервые установить зависимость колебательных спектров оболочки и клатрата от степени сжатия и провести классификацию колебания гидратной оболочки и клатрата во всем диапазоне колебательного спектра. Показаны изменения не только валентных (как это имеет место в литературе), но и деформационных частот нормальных колебаний молекулы CH_4 в зависимости от размеров гидратной оболочки. На уровне электронного строения установлена природа химической связи в свободной гидратной оболочке $\text{H}_2\text{O}(5^{12})$ и клатрате $\text{CH}_4\cdot\text{H}_2\text{O}(5^{12})$. На рисунке 7.8 показан вид двух квазивырожденных ВЗМО клатрата метана при оптимальном значении параметра $h=2.8 \text{ \AA}$

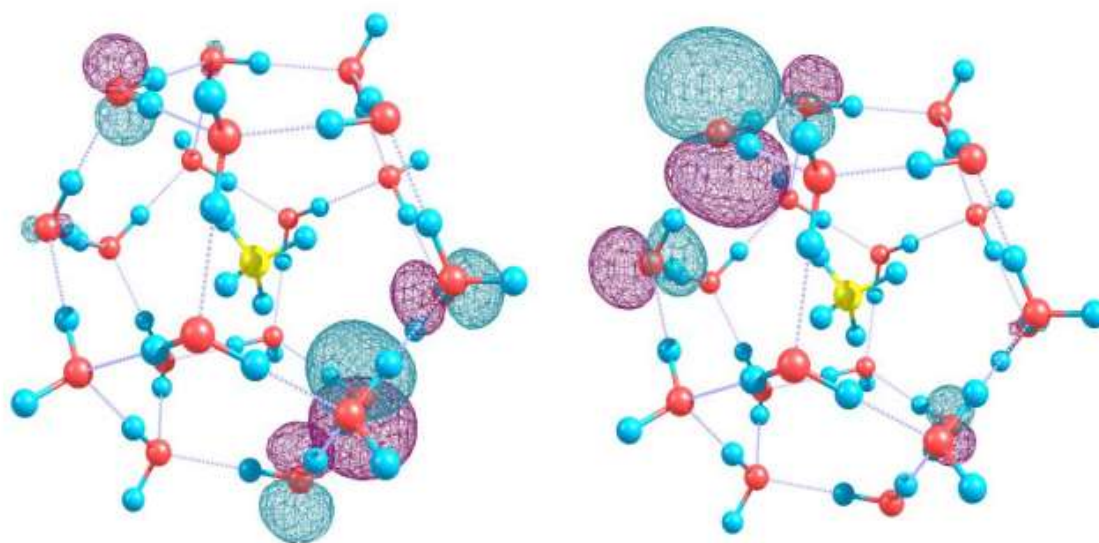


Рисунок 7.8 – Вид двух квазивырожденных ВЗМО клатрата при оптимальном значении размера гидратной оболочки $h=2.8 \text{ \AA}$

Проведен анализ изменения энергии образования гидратных оболочек $\text{H}_2\text{O} [5^{12}]$ и $\text{H}_2\text{O} [6^25^{12}]$ и энергии водородных связей при изменении размеров оболочек. Квантово-химически рассчитаны зависимости электронной энергии комплексов $\text{H}_2\text{O} [5^{12}]$, $\text{CH}_4\cdot\text{H}_2\text{O} [5^{12}]$, и, впервые, комплексов $\text{H}_2\text{O} [6^25^{12}]$ и $\text{CH}_4\cdot\text{H}_2\text{O} [6^25^{12}]$ от их размеров; определены оптимальные геометрические параметры кластеров.

Для определения потенциальных функций каркасов и клатратов, а также изменения энергии их образования из молекул при растяжении-сжатии оболочки $\text{H}_2\text{O} [5^{12}]$ и $\text{H}_2\text{O} [6^25^{12}]$ выполнен ряд расчетов с функционалами DFT - градиент-корреляционным функционалом Педью, Буке и Эрзенхофа с поправками на большие расстояния LC-wPBE и базисным набором 6-311+G(d,p), а также гибридным обменно-корреляционным функционалом Гримма с дисперсионной поправкой B97D и базисным набором 6-311++G(2d,2p) [3-4], предсказывающими

существенно разную интенсивность межмолекулярного взаимодействия в рассматриваемых оболочках и клатратах.

Из всех возможных изомеров кластеров нами смоделированы структуры гидратов, показанные на рисунке 7.9, в которых концевые связи О-Н(конец) наиболее равномерно распределены по поверхности додекаэдра H_2O [5¹²] и структуры H_2O [6²5¹²].

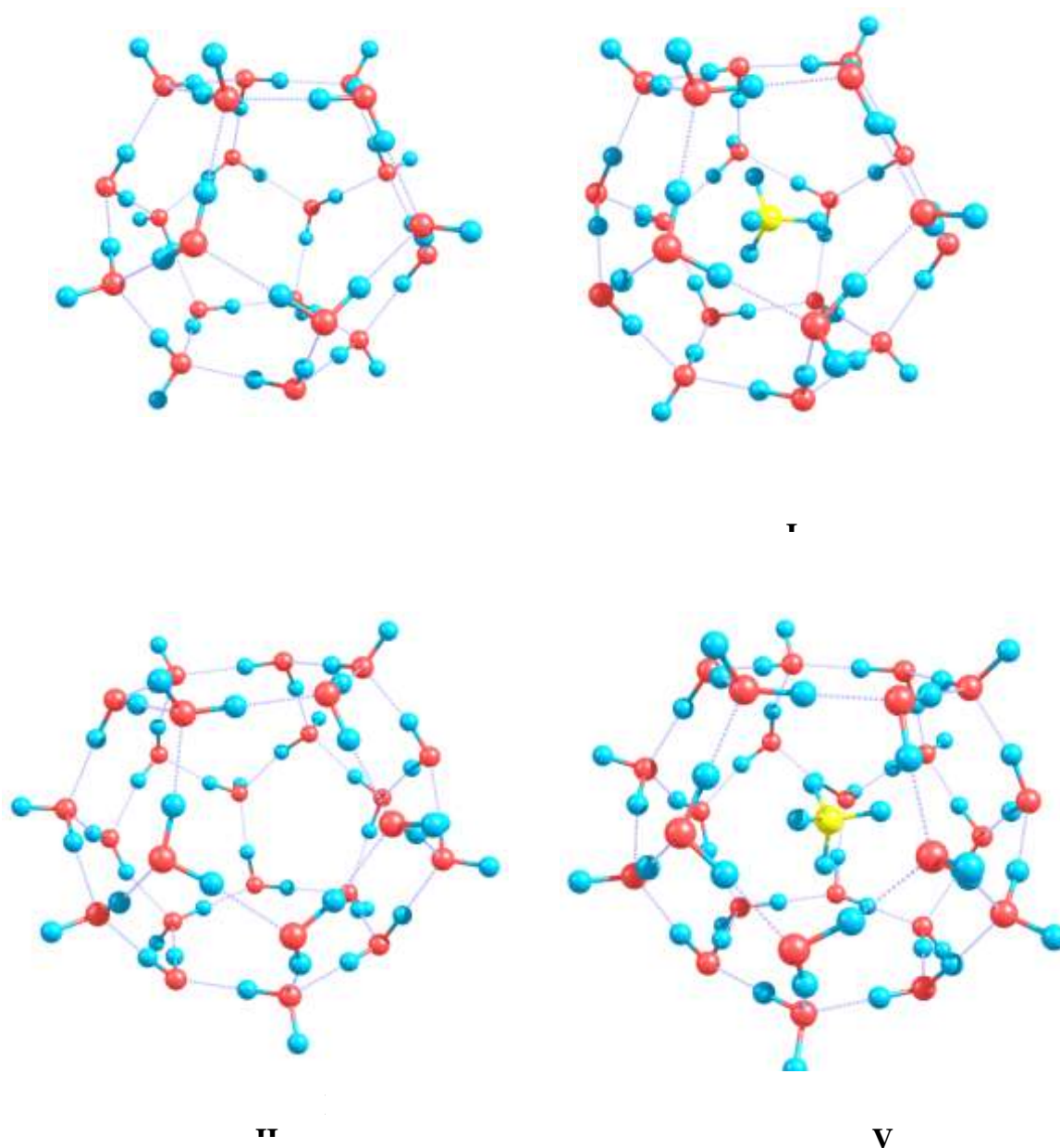
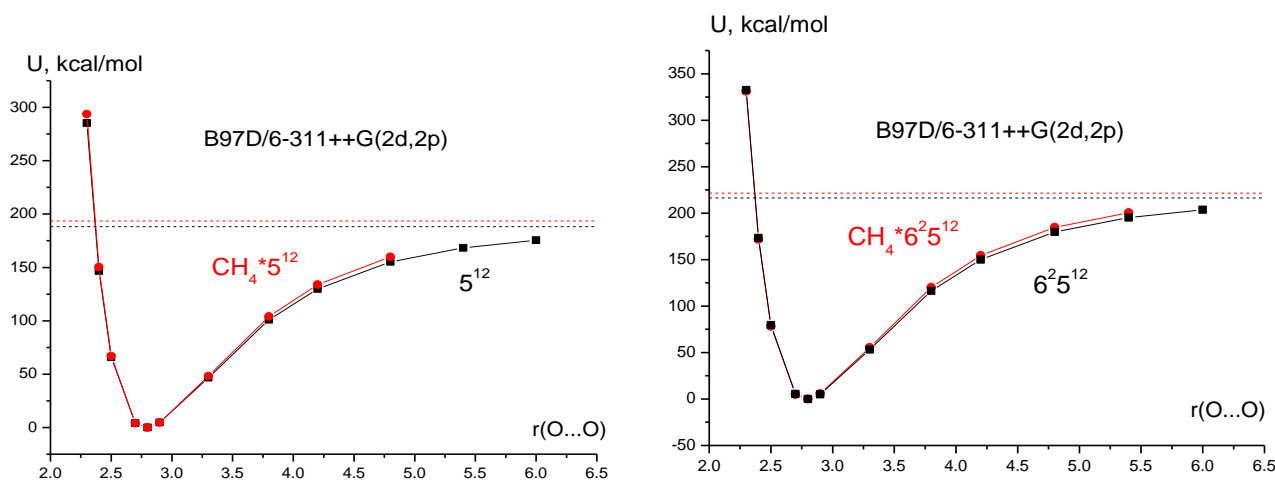


Рисунок 7.9 – Структуры гидратов H_2O [5¹²] (I) и H_2O [6²5¹²] (III) и клатратов $\text{CH}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [5¹²] (II) и $\text{CH}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [5¹²6²] (IV)

При моделировании изменений размеров гидратной оболочки H_2O [5¹²] предполагалось, что она сохраняет строение правильного додекаэдра (атомы О в вершинах), а оболочка H_2O [6²5¹²] сохраняет одинаковые расстояния О...О, как в двух правильных шестиугольниках, так и в 12 одинаковых пятиугольниках. Сканируемым параметром являлось расстояние между атомами

кислорода (и зависящая от него величина h от центра каркаса до центра пятиугольной/шестиугольной грани) при этом варьируемыми параметрами являлись длины связей О-Н(мост), О-Н(конц), валентные углы Н(мост)-О-Н(мост), Н(мост)-О-Н(конц) молекул H_2O , а в клатратах также расстояние С-Н молекулы CH_4 . Одна из связей С-Н молекулы метана ориентирована в центр верхней грани каркаса.

На рисунке 7.10 приведены зависимости относительной полной электронной энергии гидратных каркасов и соответствующих клатратов от расстояния $O...O$, полученные методом



B97D/6-311++G(2d,2p).

Рисунок 7.10 – Зависимости относительной электронной энергии гидратных каркасов и соответствующих клатратов от расстояния $O...O$. Расстояние по оси x отложено в ангстремах

Минимум энергии соответствует значениям $r(O...O) = 2.8 \text{ \AA}$ во всех четырех комплексах. Наличие/отсутствие молекулы CH_4 в центре гидратной оболочки не приводит к каким-либо заметным изменениям вида потенциальной функции. Наличие CH_4 повышает относительную энергию клатрата $CH_4 \cdot H_2O [5^{12}]$, лишь когда $r(O...O)$ становится меньше 2.6 \AA и больше 3.2 \AA , для клатрата $CH_4 \cdot H_2O [6^25^{12}]$ изменение энергии при внедрении метана еще менее заметно (повышение энергии наблюдается при $r(O...O)$ большим 3.6 \AA).

Данные зависимости свидетельствуют о том, что определяющими взаимодействиями в каждой их четырех структур являются взаимодействия между молекулами воды и их стремление находиться на определенном расстоянии друг от друга независимо от геометрии и объема каркаса $H_2O[5^{12}]$ или $H_2O [6^25^{12}]$ и наличия или отсутствия такого симметричного гостя, как молекула

CH₄. При этом заметное отличие в расстоянии C...O, которое составляет 3.92 Å в малом клатрате и 4.24 и 4.41 Å в большом для их оптимальной геометрии, не является существенным фактором.

При образовании каркаса H₂O [5¹²] возникает 30 водородных связей (ВС), а при образовании каркаса H₂O [6²5¹²] – 36 ВС. Для оптимальной структуры каркасов, которой соответствует r(O...O) = 2.8 Å, энергия ВС оценена по величине Δ_fE(каркас).

Величина Δ_fE для клатратов рассчитана как:

$$\Delta_f E(\text{клатрат}) = E_{\text{клатрат}} - n \cdot E_{\text{H}_2\text{O}} - E_{\text{CH}_4},$$

Энергия инкапсулирования CH₄ в каркас определена как разность электронных энергий оптимизированных структур:

$$\Delta_{\text{инкапс}} E = E_{\text{клатрат}} - E_{\text{каркас}} - E_{\text{CH}_4}$$

Для подтверждения возможности трансляционного движения молекулы CH₄ внутри каркаса H₂O [6²5¹²] нами построена потенциальная функция клатрата CH₄·H₂O [5¹²6²] от двух расстояний C...O (рисунок 7.11)

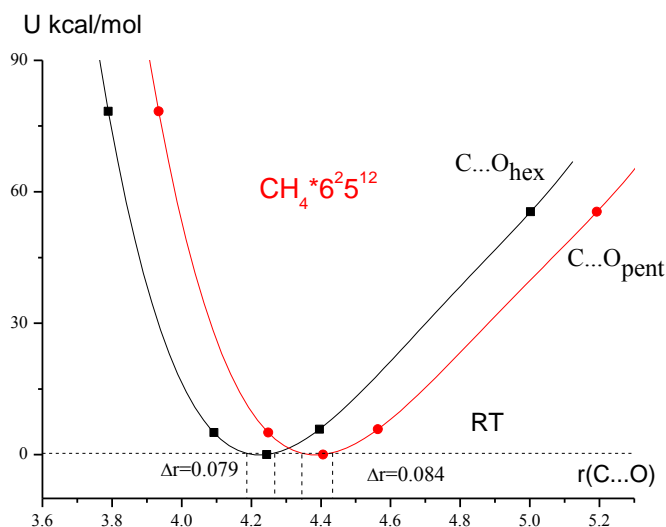


Рисунок 7.11 – Зависимости потенциальной энергии от расстояний C...O в клатрате CH₄·H₂O [6²5¹²]. Расстояние по оси x отложено в ангстремах

На рисунке 7.11 пунктиром отмечено значение тепловой энергии, соответствующее температуре рентгенографического эксперимента (123(2) К). Интервал вероятных значений межъядерного расстояния C...O_{hex} составляет 4.187 – 4.266 Å, а C...O_{pent} – 4.344 – 4.428 Å, указывая на способность молекулы метана незначительно перемещаться внутри полости гидрата в разных направлениях.

В расчетах каркасы H_2O [5^{12}] и H_2O [6^25^{12}] имели молекулы воды двух типов: с двумя мостиковыми связями $\text{O}-\text{H}_{\text{мост}}$ и с одной мостиковой и одной концевой связью $\text{O}-\text{H}_{\text{конц}}$ (рисунок 7.9). При увеличении размеров каркаса H_2O [5^{12}] различие между длинами концевых $\text{O}-\text{H}_{\text{конц}}$ и мостиковых $\text{O}-\text{H}$ (мост) связей уменьшается, а сами длины связей приближаются к значениям $r(\text{O}-\text{H})$ в свободной молекуле воды. В то же время длина водородной связи $\text{O}\cdots\text{H}$ в эксперименте выглядит больше, чем в расчетах. Однако данное несоответствие связано, в большей степени, не с расхождением между теорией и экспериментом, а с занижением расстояния $\text{O}-\text{H}$ в рентгеновском эксперименте из-за заметного смещения центра тяжести электронной плотности у атома H в сторону атома O , в результате чего связь $\text{O}-\text{H}$ кажется укороченной, а расстояние $\text{H}\cdots\text{O}$ увеличенным.

При инкапсулировании молекулы метана, согласно расчетам, длина связи $\text{C}-\text{H}$ с уменьшением размера оболочки H_2O [5^{12}] ~до 3.8 Å и оболочки H_2O [6^25^{12}] ~до 3.3 Å незначительно возрастает, а при дальнейшем сжатии каркасов начинает сокращаться. В малом каркасе сокращение длины связи $\text{C}-\text{H}$ выражено намного ярче, чем в большом каркасе. Поэтому изменение $r(\text{C}-\text{H})$ можно считать геометрическим отражением взаимодействия между молекулой метана и гидратной оболочкой.

Обращает на себя внимание тот факт, что экспериментальная величина $r(\text{C}-\text{H})$ в каркасе H_2O [5^{12}] [36] значительно (~на 0.09Å), а в каркасе H_2O [6^25^{12}] на ~ 0.16 Å превосходит экспериментальное значение $r(\text{C}-\text{H})$ свободной молекулы.

Проведенный анализ структурных особенностей четырех кластеров показывает, что наиболее надежно экспериментально определяемые параметры такие как расстояния $\text{O}\cdots\text{O}$ и $\text{C}\cdots\text{O}$ близки к равновесным параметрам, рассчитанным другими методами. Т.е. использованные методы расчета правильно передают геометрические размеры каркасов и клатратов и могут быть использованы для описания их электронных свойств.

Список использованных источников

1. Саломатин А.С., Черных Д.В., Юсупов В.И. Стенд для исследования образования и разложения газогидратов // Патент на полезную модель №143248. 2014.07.20. Бюл. №20.
2. Гиричева Н.И., Ищенко А.А., Юсупов В.И., Баграташвили В.Н., Гиричев Г.В. Структура и энергетика метановых гидратов // Известия ВУЗов. Химия и Химическая технология. 2014. Т. 57. №9. С. 3-9.
3. Tawada Y., Tsuneda T., Yanagisawa S., Yanai T., and Hirao K. A long-range-corrected time-dependent density functional theory // J. Chem. Phys., 2004. V. 120. N. 18. P. 8425-8433.

4. Vydrov O.A. and Scuseria G.E. Assessment of a long range corrected hybrid functional // J. Chem. Phys. 2006. V. 125. N. 23. P. 234109.

8 Выполнение натуральных исследований по изучению взаимодействия акустических полей с внутренними волнами в неоднородных геоакустических волноводах

Обсуждаются результаты исследований влияния изменений гидрологических условий на потери, которые испытывал звук при распространении вдоль стационарной трассы, организованной в бухте Витязь Японского моря. Измерения проводились с помощью автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы «Моллюск-07» и автономного излучателя электромагнитного типа, генерирующего частотно-модулированный сигнал – ЧМ_280-340 Гц. Частота модуляции была равна 0.3 Гц. Показано, что вариации значения потерь для звука с частотой 285-335 Гц, распространявшегося вдоль стационарной трассы длиной 1640 м пересекающей относительно глубоководную (до 36 м) бухту, вызываемые приливом, внутренними волнами и апвеллингом за 7 суток не превысили 3 дБ.

При исследованиях вариаций интенсивности тональных акустических сигналов распространявшихся вдоль стационарных акустических трасс и измеренных с помощью гидрофонов вертикальных акустико-гидрофизических измерительных систем типа «Моллюск» [1, 2] мы заметили, что в ряде случаев наблюдаются синхронные и синфазные вариации на всех 8 гидрофонах практически перекрывающих весь слой воды [3, 4]. По-видимому, это свидетельствует об изменениях потерь из-за взаимодействия распространяющегося звука с пространственно-временными неоднородностями поля скорости звука, формируемыми различными гидродинамическими процессами характерными для шельфовых зон и прежде всего внутренними волнами. Изучению этого явления посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ [4-7].

В этой работе приводятся результаты натуральных измерений проведенных с помощью автономного излучателя и автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы «Моллюск-07» на стационарной трассе пересекающей относительно глубоководную бухту Витязь

На рис. 8.1а показана карта района исследований с указанием точек постановки измерительных средств и трасы, на которой проводились измерения. В данном районе шельфа Японского моря наблюдается неправильный полусуточный прилив с высотой до 35 см, но в тоже время заметную роль в смещениях морской поверхности играют сгонно-нагонные явления, связанные с ветровыми течениями [8-10].

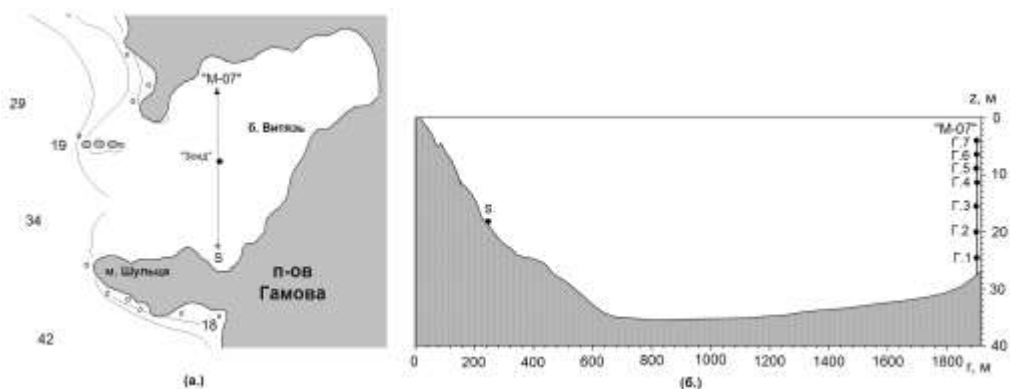


Рисунок 8.1 – Карта района исследований – (а.) с указанием точек постановок автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы «Моллюск-07» - «М-07», автономного излучателя «ЧМ_290-330» - S, точки гидрологического зондирования – «Зонд» и рельеф дна на акустической трассе S – «М-07» - (б.)

В данной работе обсуждаются результаты анализа акустических измерений, которые были проведены с помощью автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы «Моллюск-07» [2] и автономного излучателя частотно модулированного (ЧМ) сигнала [11]. Особенностью «Моллюск-07» является сочетание акустических измерений с измерениями температуры воды возле каждого гидрофона, контролем глубины положения верхнего и среднего гидрофонов, а также использованием оригинальной цифровой системы накопления данных, основанной на бортовой ЭВМ. «Моллюск-07» обеспечивает в течение 7 суток измерения вариаций акустического давления в частотном диапазоне 10-5000 Гц с потенциальным динамическим диапазоном равным 96 дБ. Анализ натуральных данных показал, что при усреднении за 1-5 секунд собственные шумы измерительных трактов температуры «М-07» позволяют проводить измерения вариаций температуры воды с разрешением равным ≈ 0.006 °С.

Ранее при исследованиях влияния внутренних волн на распространение звука мы уже применяли вертикальную акустико-гидрофизическую измерительную систему типа «Моллюск» и стационарные излучатели тональных и ЧМ- сигналов [3, 11-13].

Автономный излучатель ЧМ- сигналов предназначен для генерации частотно-модулированных и тональных акустических сигналов в диапазоне частот 280 – 360 Гц при его постановке на дно моря глубиной до 100 м [11]. MP-3 плеер обеспечивает воспроизведение записанного в его память звукового файла длительностью до нескольких суток и позволяет обеспечить излучение частотно-модулированных сигналов, без применения программируемых микроконтроллеров, которые обычно используются для формирования сложных сигналов. Файлы с записями излучаемого сигнала подготавливаются на компьютере.

На рис. 8.2 показаны спектры ЧМ- сигнала с частотой модуляции 0.3 Гц, принятого семью гидрофонами вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы «Моллюск-07» на стационарной трассе, протяженностью 1.64 км. На этом рисунке видно, что отношение сигнала к шуму превышает 40 дБ, это обеспечило высокую точность измерений его флуктуаций.

Поясним методику с помощью, которой мы оцениваем влияние гидрологических изменений на функцию потерь. Известно [4], что из-за рассеяния и рефракции акустических волн на пространственно-временных неоднородностях поля скорости звука, формируемых из пикноклина внутренними волнами интенсивность тонального сигнала принимаемого одним гидрофоном может варьировать более чем на 30 дБ, но эти флуктуации обусловлены вариациями интерференционной структуры, а не изменением потерь при распространении. Изменение потерь, может вызвать резонансное взаимодействие распространяющихся акустических мод, которое приводит к перекачке энергии из низших мод в моды более высокого порядка, энергия которых более эффективно рассеивается в дне [5-7].

Поскольку измерения проводились в весенних гидрологических условиях шельфа Японского моря (см. рис. 8.3), а длина акустической трассы составляла всего 1640 м то влиянием внутренних волн на потери, по-видимому, можно пренебречь по сравнению с крупномасштабными изменениями, которые вызывались приливными и ветровыми течениями.

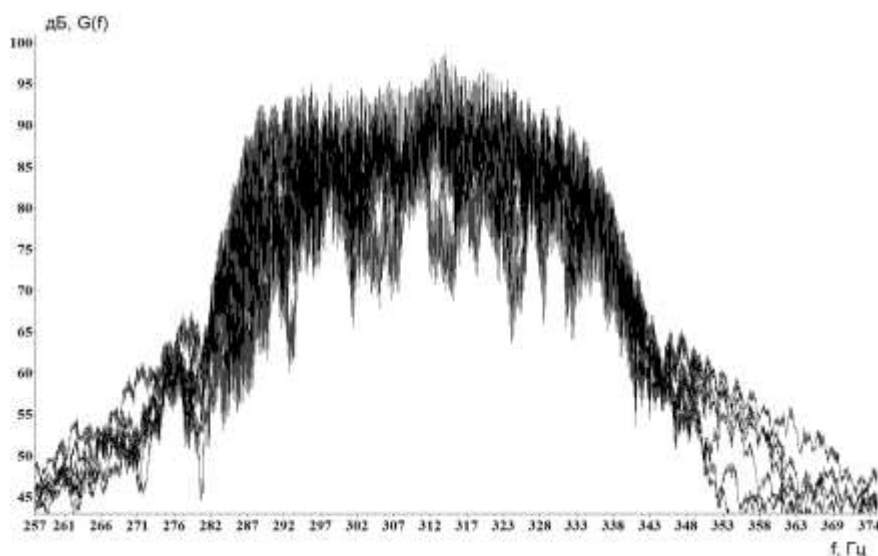


Рисунок 8.2 – Спектр акустического поля, измеренного с помощью гидрофонов «М-07» во время работы автономного излучателя «ЧМ_290-330» на трассе S – «М-07»

Изменения вертикального профиля температуры воды и уровня моря в б. Витязь, во время акустического эксперимента, контролировались с помощью вертикальной цепочки из 8

термодатчиков и двух датчиков гидростатического давления, которыми оснащен «Моллюск-07». Для исключения влияния вариаций пространственной интерференционной структуры, формируемого излучателем акустического поля в точке постановки «Моллюска-07», мы анализировали вариации специально оцениваемой физической величины, полученной из спектрального анализа вариаций акустического давления синхронно измеренных 7 гидрофонами «Моллюска-07».

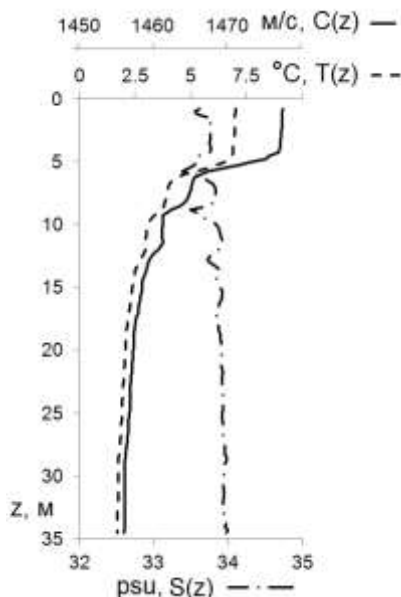


Рисунок 8.3 – Вертикальное распределение скорости звука – $C(z)$, температуры $T(z)$ и солёности $S(z)$ морской воды, измеренные 12.05.2012 в 11:20 на акустической трассе S – «М-07» в точке, обозначенной на рис. 8.1, как «Зонд»

На рис. 8.2 представлены спектры акустических сигналов измеренных с помощью 7 гидрофонов «Моллюска-07», показанных на рис. 8.1б. Мы можем проанализировать вариации узкополосного условно тонального акустического сигнала и это будет сделано ниже, но можем исследовать вариации значений дисперсии - $D(\Delta f, t)$ в заданном частотном диапазоне Δf .

$$D(\Delta f) = \int_{f_1}^{f_2} \hat{G}(f) df, \text{ где } \hat{G}(f) - \text{оценка спектра акустического сигнала, полученная в результате}$$

усреднения значений периодограмм - $G(f)$ рассчитанных с помощью БПФ (8192 значения) по

20 последовательным 2 секундным реализациям. Согласно формуле $\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\Lambda_l}{r}$, где $\Delta\omega$ -

ширина спектра сложного сигнала, ω - средняя частота излучаемого сигнала, r - расстояние

между точкой излучения и приема, $\Lambda_l = \frac{2\pi}{|q_l - q_{l+1}|}$ - период межмодовых биений [14, 15], в

нашем случае интегрированию в частотном диапазоне от 285 Гц до 335 Гц для акустического ЧМ сигнала с частотой модуляции равной 0.3 Гц эквивалентно пространственному усреднению акустического поля, формируемого тональным сигналом на участке протяженностью – 266 м.

Таким образом, усреднение по частоте исключает влияние вариаций пространственной структуры акустического поля, формируемого, например, на частоте 315 Гц, но еще есть вертикальная интерференционная структура и ее вариации тоже надо исключить. Для этого мы производим центрирование полученных значений $D(\Delta f, t)$: $\tilde{D}(\Delta f, t) = D(\Delta f, t) - \bar{D}(\Delta f)$, где $\bar{D}(\Delta f)$ среднее значение, полученное за весь период наблюдений (более 7 суток), а затем усредняем синхронные значения, полученные с помощью 7 гидрофонов (7 горизонтов

измерения): $\bar{\tilde{D}}(\Delta f, t) = \frac{\sum_{i=1}^7 \tilde{D}_i(\Delta f, t)}{7}$. По-видимому, эта функция дает объективное

количественное в дБ представление о влиянии изменений гидрологических условий на потери, которые испытывал звук с частотой 285-335 Гц, распространяясь вдоль акустической трассы S – «М-07». Ниже представляются результаты исследований проведенных по этой методике.

8.1 Результаты анализа натуральных измерений

Рассмотрим результаты анализа акустических и гидрологических измерений, проведенных на стационарной трассе организованной в мае 2012 г. в б. Витязь Японского моря. На рис. 8.1 видно, что эта трасса пересекает относительно глубоководную (>30 м) бухту и имеет протяженность 1640 м.

На рис. 8.4 видно, что в соответствии с фазами прилива и апвеллингом, вызванным резким и продолжительным воздействием 19.05.2012г. на поверхность моря ветра скорость которого превышала 15 м/с, средняя температура в слое воды перекрываемом 8 термодатчиками «Моллюска-07» варьировала от 3 до 6.5 °С. С 15 по 18 мая наблюдалась практически штилевая и солнечная погода и, по-видимому, положительный тренд соответствующий увеличению средней температуры воды, вызван не только прогревом воды на поверхности моря, но и горизонтальной адвекцией заполняющей бухту Витязь относительно теплой поверхностной водой из мелководной области залива Посьета.

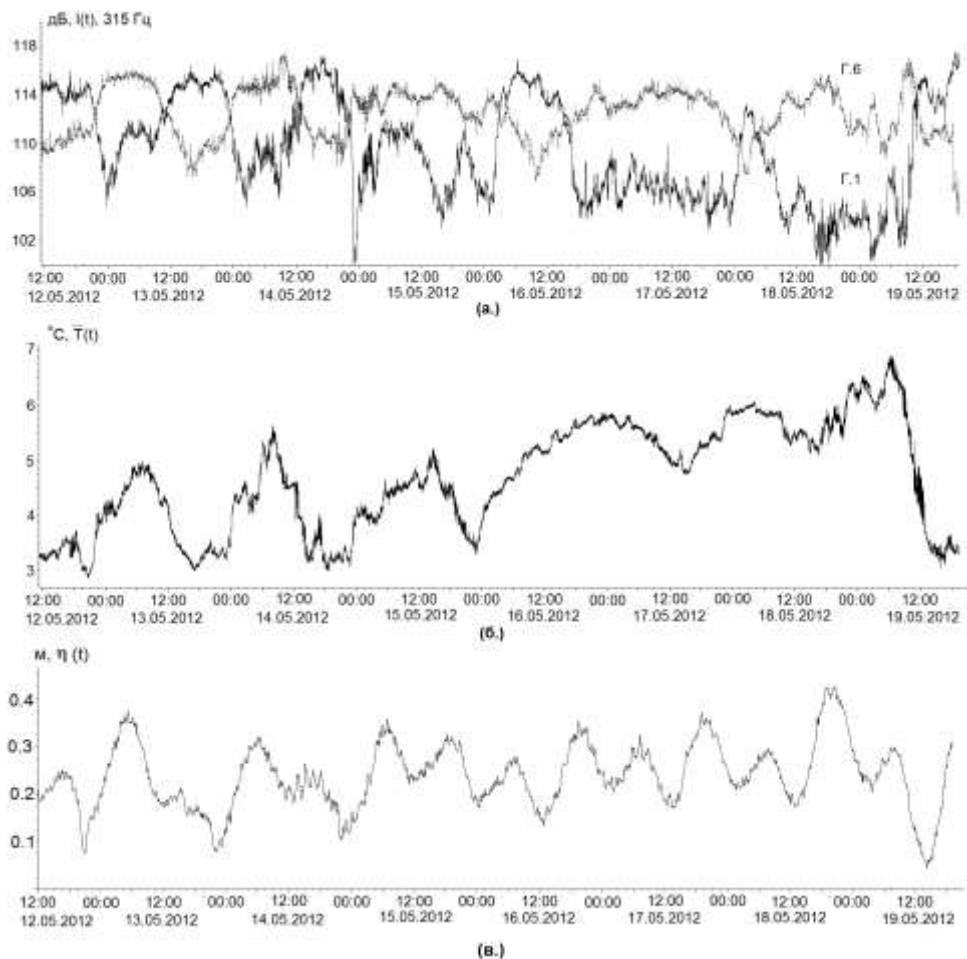


Рисунок 8.4 – Вариации интенсивности тонального сигнала с частотой 315 Гц, синхронно измеренные с помощью гидрофона Г.1 и Г.6 (см. рис. 8.1б) «Моллюска-07» во время работы автономного излучателя сигнала ЧМ_285-335Гц – (а.), вариации средней температуры вертикального слоя воды толщиной 21 м, измеренные с помощью 8 термодатчиков – (б.) и вариации уровня моря - $\eta(t)$, измеренные с помощью датчика глубины – (в.)

Для иллюстрации влияния прилива и апвеллинга на интерференционную структуру акустического поля формируемого тональным сигналом с частотой 315 Гц в точке установки «Моллюска-07» мы привели графики вариаций интенсивности акустических сигналов синхронно измеренных на горизонтах 25 м – Г.1 и 6 м – Г.6. На рис. 8.4а видно что, соответствующие им графики - $I(t)$ варьируют в противофазе и хорошо коррелируют с вариациями средней температуры воды и поверхностным приливом - $\eta(t)$. В графике $I(t)$ - Г.1 наблюдаются вариации, достигающие 14 дБ. Апвеллинг вызвал уменьшение средней температуры вертикального слоя воды на ≈ 3.5 °C, понижение уровня моря ≈ 0.15 м и существенную перестройку вертикальной интерференционной структуры акустического поля.

На рис. 8.5в показаны вариации температуры воды, измеренные с помощью 8 термодатчиков «Моллюска-07» на фиксированных горизонтах. Эти графики иллюстрируют перестройку вертикальной структуры поля температуры в б. Витязь, вызываемую приливом, апвеллингом и внутренними волнами.

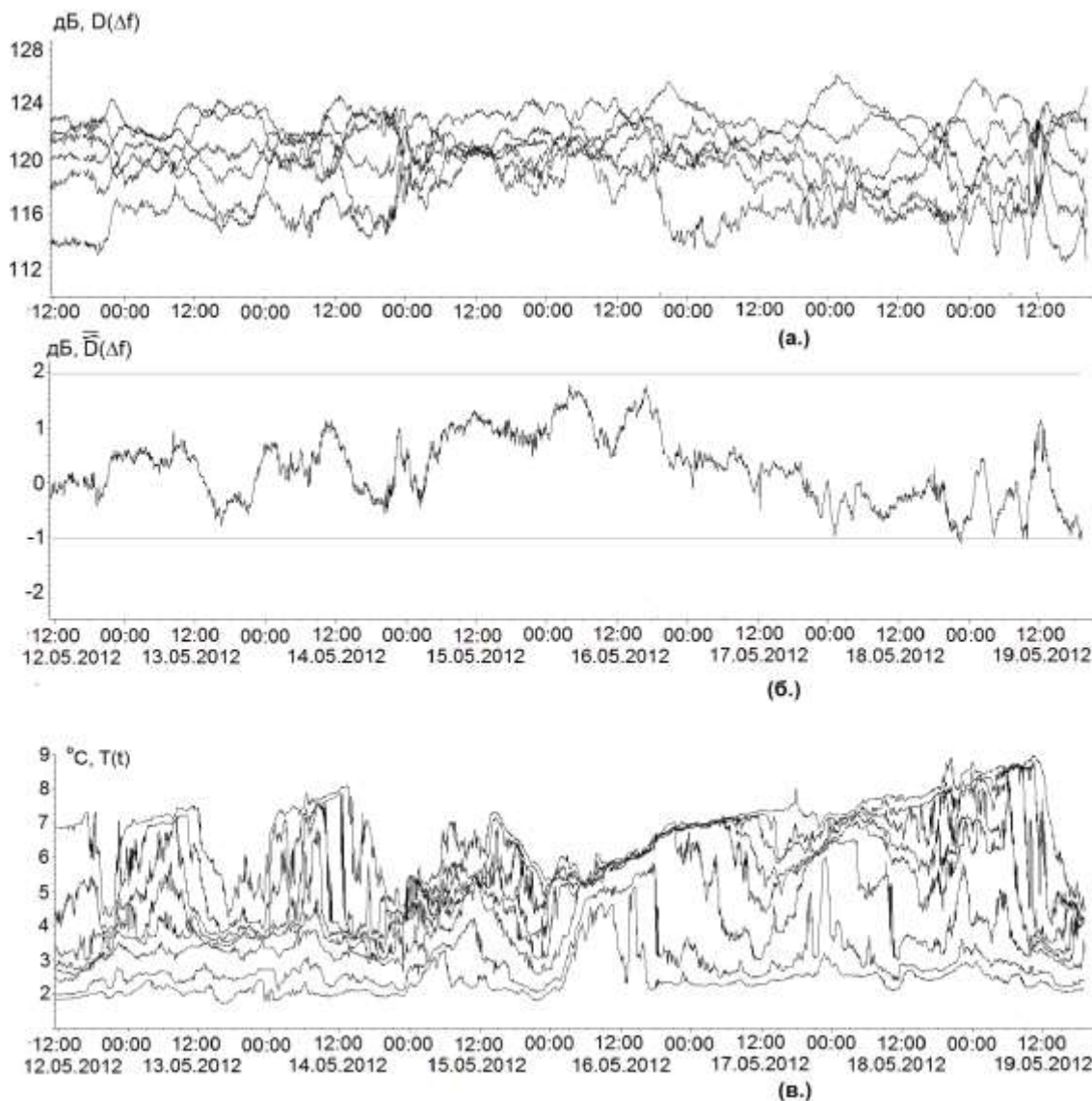


Рисунок 8.5 – Вариации значений $\tilde{D}(\Delta f)$ в частотном диапазоне 285-335 Гц, полученных с помощью спектрального анализа акустических сигналов синхронно измеренных 7 гидрофонами «Моллюска-07» во время работы автономного излучателя сигнала ЧМ_285-335 Гц – (а.), пульсации значений $\bar{D}(\Delta f)$, полученные после усреднения синхронных значений по 7 гидрофонам – (б.) и вариации температуры воды, измеренные с помощью 8 термодатчиков – (в.)

Анализ результатов акустических измерений, проведенный по методике представленной выше показал:

- вариации значений $D(\Delta f, t)$ при $\Delta f = 285-335$ Гц могут на разных горизонтах достигать 8 дБ (см. рис. 8.5а), а тонального сигнала с частотой 315 Гц достигают 14 дБ (см. рис. 8.4а, график Г.1);
- вариации $D(\Delta f, t)$ максимальны на горизонте соответствующем интерференционному минимуму в вертикальном распределении акустического поля формируемого в точке постановки «Моллюска-07», это согласуется с выводами, сделанными в работах [10, 13];
- вариации значений $\bar{D}(\Delta f, t)$, характеризующих потери при распространении, за 7 суток не превысили 3 дБ.

Результаты анализа показали высокую стабильность значения потерь для звука с частотой 285-335 Гц распространявшегося вдоль трассы S – «М-07» пересекающей бухту Витязь и имеющей длину 1.64 км (см. рис. 8.1). По-видимому, вызываемые изменениями поля температуры (см. рис. 5в), трансформации модовой структуры акустического поля практически не повлияли на потери, поскольку трасса распространения оказалась короткой для количественной иллюстрации этого эффекта.

Список использованных источников

1. Рутенко А.Н. Вертикальная акустико-гидрофизическая антенна «Моллюск-97» // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 5. С. 141-144.
2. Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Автономная вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система «Моллюск-07» // Приборы и техника эксперимента. 2008. №5. С. 138-142.
3. Рутенко А.Н. Влияние движущегося по шельфу внутреннего температурного фронта на распространение звука // Акуст. журн. 2006. Т. 52, № 5. С. 710-715.
4. Рутенко А.Н. Влияние внутренних волн на потери при распространении звука на шельфе // Акустический журнал. 2010. №5. С. 662-672
5. Zhou J.X., Zhang X.Z., Rogers P.H. Resonant interaction of sound wave with internal solitons in the coastal zone // J. Acoust. Soc. Amer. 1991. Vol. 90. № 4. P. 2042-2054.
6. Zhou J.X., Zhang X.Z., Rogers P.H., Wang D.Z., Luo E.S. Anomalous sound propagation in shallow water due to internal wave solitons // IEEE Proc. Oceans 93. 1993. Vol. 1. P. 87-92
7. Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А. Резонансные эффекты при рассеянии звука пакетами внутренних волн в мелком море // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 786-792.
8. Рутенко А.Н. Особенности океанологических характеристик в шельфовой зоне Японского моря и их влияние на распространение низкочастотного звука // Акустика океана. М.: ГЕОС. 1998. С.160-163.

9. Рутенко А.Н. Сезонная изменчивость флуктуаций интенсивности и фазы низкочастотных гидроакустических сигналов, распространяющихся в шельфовой зоне Японского моря // Акуст. журн. 1997. Т.43. №1. С.98-105.
10. Рутенко А.Н. Влияние внутренних волн на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря в разные сезоны года // Акуст. журн. 2005. Том 51. №4. С. 527-535.
11. Борисов С.В. Автономный излучатель ЧМ-сигналов для экспериментальных исследований на шельфе // Акустика океана / Доклады XIII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. Москва, ГЕОС 2011. С. 311-314.
12. Рутенко А.Н. Наблюдение воздействия внутренних волн на интенсивность и интерференционную структуру акустического поля на шельфе // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 4. С. 535-541.
13. Рутенко А.Н. Экспериментальное исследование влияния внутренних волн на частотную интерференционную структуру акустического поля в мелком море // Акуст. журн. 2000. Т.46. №2. С.259-263
14. Бородин В.В., Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Усредненные характеристики акустических полей в океанических волноводах // Акуст. журн. 1992. Т. 38. №4. С. 601-608.
15. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 189 с.

9 Выполнение численного 2-D и 3-D моделирования акустических полей в неоднородных геоакустических волноводах с внутренними волнами, характерными для шельфа

Результаты измерений потерь при распространении низкочастотного звука на мелководном со сложным пространственным рельефом дна шельфе Охотского моря, сравниваются с результатами численного 2-D моделирования, проведенного с помощью широкоугольного параболического уравнения учитывающего упругие свойств пород слагающих дно и 3-D моделирования основанного на модовом параболическом уравнении в приближении «жидкого» дна и не взаимодействующих мод.

На северо-восточном шельфе о. Сахалин были проведены исследования потерь при распространении низкочастотного звука на акустическом профиле, простирающемся вдоль береговой линии. В работе [1] показано как результаты таких экспериментально-теоретических исследований применяются на практике. На рис. 9.1 и рис. 9.2 видно, что данный участок относительно мелководного шельфа имеет сложный пространственный рельеф дна.

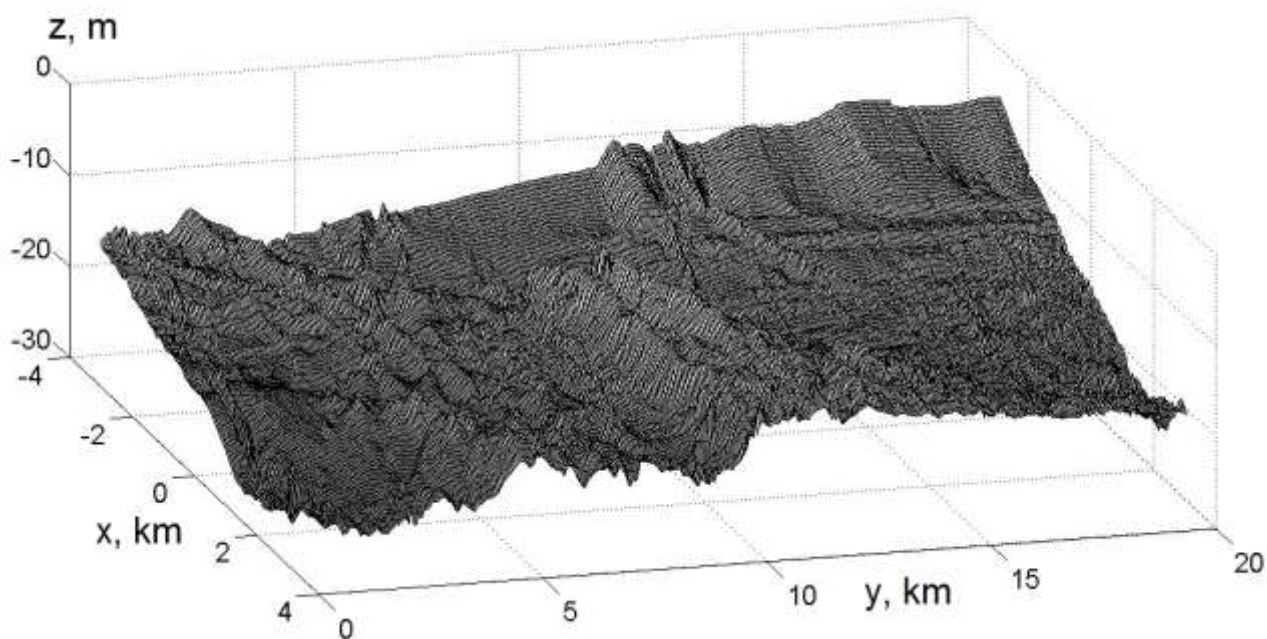
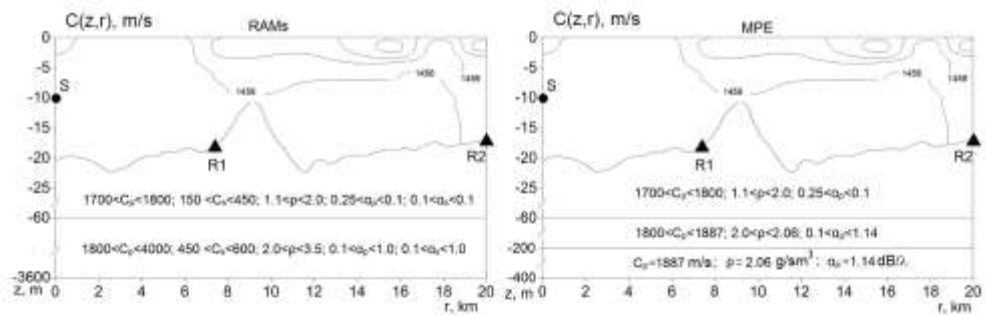
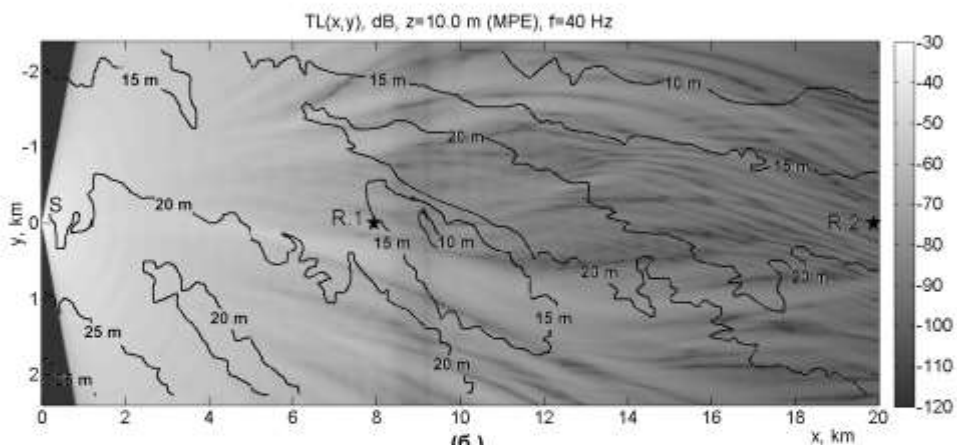


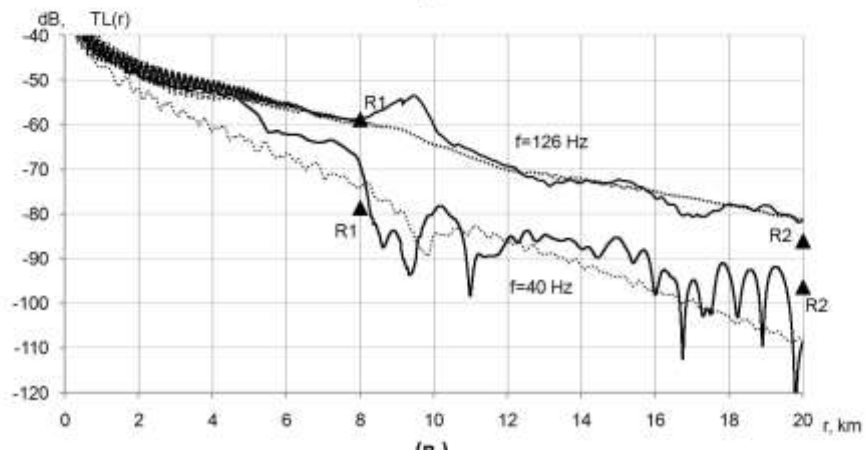
Рисунок 9.1 – Пространственный рельеф дна в районе исследований



(а.)



(б.)



(в.)

Рисунок 9.2 – Модельные геоакустические волноводы – (а.), пространственное распределение потерь для сигнала с частотой 40 Гц – (б.), экспериментальные значения потерь, рассчитанные с помощью MPE (непрерывная линия) и RAMS (штриховая линия) для сигналов с частотой 40 и 126 Гц – (в.)

За точкой приема R.1 расположена возвышенность, вытянутая на северо-восток. На пересечении этой возвышенности с трассой распространения звука S-R.2 толщина водного слоя уменьшается до 10 м (см. рис. 9.2а). Хребты возвышенностей и относительно глубокие долины ориентированы под углом $\approx 45^0$, а на западной границе области глубина моря уменьшается до 8-6

м. Очевидно, что такой неоднородный рельеф дна вызовет сложную интерференционную структуру, которая может быть получена только в трехмерных моделях распространения звука.

На рис. 9.2а показан профиль дна на трассе S-R.2 и акустические параметры пород слагающих дно в двух модельных геоакустических волноводах используемых при 2-D и 3-D моделировании. В первом случае расчеты, проведены с помощью программы RAMS [2], основанной на широкоугольном параболическом уравнении с учетом упругих свойств пород, слагающих дно, а 3-D моделировании, выполнено с помощью модового параболического уравнения - MPE [3] в приближении «жидкого» дна и не взаимодействующих мод. На рис. 9.2б показано распределение значений функции потерь $TL(f;x,y,z)$ рассчитанное с помощью MPE для акустического сигнала с частотой $f = 40$ Гц на горизонте $z=10$ м, генерируемого точечным источником – S расположенным в точке $\{z=-10$ м, $x=0,y=0\}$. На этом рисунке хорошо выражена интерференционная картина обусловленная отражениями и рефракцией на подводной возвышенности и наклонном дне. На рис. 9.2в показаны графики функции потерь $TL(r)$, рассчитанные с помощью программы RAMS и MPE для приемника, перемещаемого на расстоянии 1 м над дном вдоль трассы S-R.2. Модельные значения потерь получены в результате осреднения в RAMS: по оси $r \pm 100$ м, по оси z осреднение проводилось в слое толщиной 4 м расположенном на 1 м от дна. При моделировании с помощью MPE значения потерь усреднялись по оси $x \pm 100$ м, по оси $y \pm 50$ м, по оси z осреднение проводилось в слое толщиной 4 м расположенном на 1 м от дна. Расчеты проведены для акустических полей формируемых точечным источником – S с частотой 40 и 126 Гц. На этом рисунке приведены так же экспериментальные значения потерь, полученные в точках R.1 и R.2.

Для сигнала с частотой 40 Гц наблюдается одномодовое, а с частотой 126 Гц многомодовое распространение. Действительно, расчеты, проведенные для модельного геоакустического волновода (см. рис. 9.2а) с помощью MPE показали, что в точке источника на частоте 40 Гц формируется 1 распространяющаяся водно-донная мода ее волновая функция показана на рис. 9.3, а на частоте 126 Гц уже формируются 2 водные моды.

На рис. 9.2в видно, что над донной возвышенностью расположенной за точкой приема R.1, из-за уменьшения толщины водного слоя, потери для сигнала с частотой 126 Гц уменьшились, а для сигнала с частотой 40 Гц наоборот увеличились. Это можно объяснить тем, что энергия этих сигналов переносится водными (сигнал с частотой 126 Гц) и донно-водными модами волновые функции, которых показаны на рис. 9.3. При глубине моря равной 10 м максимум 1 водной моды для сигнала с частотой 126 Гц, как раз приближается к дну, а 2 водная мода, по-видимому, отсекается и поэтому далее не наблюдается межмодовая интерференция. Поскольку энергия акустического сигнала с частотой 40 Гц переносится водно-донными волнами и максимальное значение волновой функции 1 моды в источнике расположено у дна на глубине 20 м, то приемник,

расположенный в 1 м над возвышенностью (горизонт 9 м) показал соответствующее увеличение потерь.

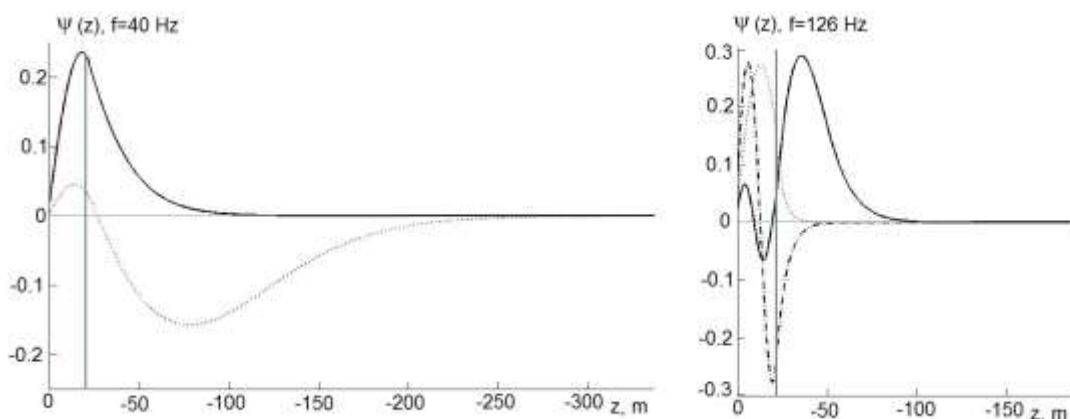


Рисунок 9.3 – Модовые функции, формируемые источником в точке – S

На рис. 9.2в видно, что при 3-D моделировании значения потерь испытывают значительные пространственные вариации, достигающие 15 дБ для сигнала с частотой 40 Гц, которых нет в графиках соответствующих 2-D моделям. Эти вариации вызваны пространственной интерференцией прямых и отраженных, преломленных и рассеянных на пространственных неоднородностях рельефа дна и слагающих его пород волн.

Список использованных источников

1. Рутенко А.Н., Соловьев А.А., Ущиповский В.Г., Jenkerson M.R. Построение оценок спектра антропогенных шумов на основе предварительных экспериментально-теоретических исследований / Акустика океана. Докл. XIV школы-семинара им. Акад. Л.М. Бреховских. Москва. ГЕОС. 2003. С. 223-226.
2. Collins M.D. A split-step pade solution for the parabolic equation method // J. Acoust. Soc. Am. 93(4) (1993), P.1736-1742
3. Trofimov M. Yu. Narrow-angle parabolic equations of adiabatic single-mode propagation in horizontally inhomogeneous shallow sea // Acoust. Phys. 1999. V. 45. P. 575-580.

10 Исследования рассеяния звука в шельфовой зоне Японского моря. Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия мощного звука с микронеодно-родной жидкостью, выявления закономерностей кавитационных процессов в морской воде

Выше частоты звука порядка 1 кГц основное рассеяние имеет биологическое происхождение и значительная часть этого рассеяния связана с зоопланктоном. Более подробно иерархия различных рассеивателей по частотам звука выглядит следующим образом: ниже 10 кГц основной вклад в рассеяние звука дают рыбы, причем ниже 3-5 кГц коэффициент объемного рассеяния резко уменьшается; на частотах от 10 кГц до сотен кГц рассеяние связано с зоопланктоном; а на частотах, приближающихся к 1 мГц и выше 1 мГц основную роль начинают играть фитопланктон и взвеси различного происхождения. Зоопланктон обычно располагается в областях с максимальными градиентами температуры (или плотности), т.е., как правило, в области сезонного термоклина. При этом он имеет толщину слоев от нескольких метров до нескольких десятков метров. Наиболее типичные работы в данном направлении представлены ниже в списке цитируемых публикаций [1-13].

Характерной чертой поведения зоопланктона является его способность к суточным миграциям по глубине - смена места расположения - ночью ближе к поверхности до 20-100 м, а днем - опускание до значительных глубин 300-500 м. Способность к суточным миграциям по глубине фитопланктона является дискуссионной и не существует достаточно достоверной информации о характерных глубинах суточной миграции фитопланктона. В первую очередь является неопределенным механизм транспортировки фитопланктона по вертикали. Существуют представления о возможной роли газовых пузырьков как своеобразных движителей фитопланктона под действием обычной архимедовой силы [14-19]. Однако единого мнения об универсальности такого сосуществования газовых пузырьков с фитопланктоном, а также о механизмах и деталях суточных вариаций до сих пор не существует.

Среди различных видов зоопланктона преобладают мелкие ракообразные с размерами от 0.01 см до 1 - 10 см. Наиболее популярной моделью таких организмов является модель короткого цилиндра длины l и радиуса R с упругой, жесткой оболочкой и жидким заполнением [1,4], а также модель слабоизогнутого цилиндра [10-12]. При этом считается, что толщина оболочки $h \ll R$. Характерные физические характеристики зоопланктона таковы: $l/2R \sim 5$, $h/R \sim 0,01-0,02$, отношение сжимаемостей оболочки и воды $\sim 0,05$, коэффициент Пуассона оболочки $\sim 0,3-0,35$, отношение плотностей $(\rho_1 - \rho)/\rho \sim 0,06$; $(\rho_2 - \rho)/\rho \sim 0,03-0,05$; $(c_2 - c)/c \sim 0,01-0,03$, где индекс 1 - относится к оболочке, а индекс 2 - к жидкому заполнению. Одним из важных аспектов акустического мониторинга биоресурсов является определение концентрации, размерного и видового состава

зоопланктона. Эти данные необходимы при изучении особенностей пространственного распределения, поведения рыб и других гидробионтов, при оценке промысловой значимости скоплений, состояния запасов популяции и др.

Использование гидроакустических излучателей, работающих в широком диапазоне частот, создает предпосылки к разработке эффективных практических методов спектроскопии, в том числе по резонансу плавательного пузыря рыбы или газосодержащего зоопланктона (типа сифонофор и др.). Основой этого может служить наличие частотной зависимости сечения рассеяния звука [1,4]. Практическое использование данного направления акустического мониторинга сдерживается прежде всего техническими трудностями создания широкополосной низкочастотной аппаратуры. Использование широкополосных акустических излучателей и методов нестационарной акустической спектроскопии позволяет развить исследования в области видовой и размерной идентификации морских объектов.

Особо следует подчеркнуть, что несмотря на почти полувековой период исследований, газовые включения в океане продолжают преподносить немало сюрпризов. Являясь, как правило, сопутствующим объектом разнообразных физических процессов, они выступают как природный трассер. Изучение распределения, пространственной и временной эволюции резонансных газовых включений позволяет получить важную информацию о характере порождающих их физических явлений, происходящих в приповерхностных слоях моря и активно взаимодействующих с ветровыми нагрузками в атмосфере. Ранее было показано, что присутствие газовых пузырьков влияет на кавитационные пороги в приповерхностном слое.

В связи с этим является важным проведение целенаправленных экспериментальных исследований кавитационных порогов и акустической нелинейности в приповерхностном слое моря в присутствии воздушных пузырьков, образованных ветровыми волнами. Предполагается выявить взаимосвязи и предложить простые аналитические зависимости, позволяющие определять пороги кавитации, величину параметра акустической нелинейности и параметры функции распределения пузырьков по размерам в морской воде.

Ниже в работе представлены результаты исследований рассеяния звука в шельфовой зоне Японского моря и изучения взаимодействия мощного звука с микронеоднородной жидкостью. Выявлены закономерности рассеяния звука во взаимосвязи с пространственной структурой и динамикой звукорассеивающих слоев в заливе Петра Великого. Сравнительный анализ результатов исследований в Японском море и восточной Арктике позволил выявить существенно большее рассеяние звука и связанные с ним концентрации планктона на шельфе восточной Арктики. Установлены зависимости порога и кинетики протекания акустической кавитации от зародышевого состава и параметра нелинейности жидкости. Показано сильное влияние

динамических эффектов и фазовых превращений на нелинейную динамику фазовых включений. Получены зависимости параметра нелинейности и коэффициента нелинейного рассеяния звука на включениях от резонансных свойств и эффективности фазовых превращений (парогазовые пузырьки и центры кристаллизации).

10.1 Изучение рассеяния звука в заливе Петра Великого Японского моря

10.1.1 Аппаратура и район исследований

Для проведения гидроакустических исследований в верхнем слое моря на ходу судна использовался акустический излучатель с резонансной частотой 200 кГц, а также акустический профилограф течений ADP фирмы SONTEC, который позволял изучать рассеяние звука на частоте 250 кГц. Запись сигналов осуществлялась в цифровом виде с помощью многоканального цифрового регистратора МА 16 фирмы "Руднев и Шиляев" и платы La2 USB фирмы L-card.

Обработка сигналов с целью визуализации пространственных структур проводилась с применением специально разработанных программ SCATTER и AViewer, которые ранее в различных версиях неоднократно использовались в морских экспедициях. Все работы по исследованию рассеяния звука проводились непрерывно на протяжении всего маршрута судна, как на полигонах, так и на переходах между полигонами.

Акустическая система измерения рассеяния звука включала в себя тракт излучения звука с различными частотами, пьезокерамические преобразователи, тракт приема и систему ввода и первичной обработки акустической информации. Система ввода и первичной обработки акустической информации включала в себя интерфейсную 14-ти разрядную плату ввода фирмы "Руднев и Шиляев" La2 USB с предельной частотой квантования 400 кГц, многоканальный цифровой регистратор фирмы "Руднев и Шиляев" МА-16 с предельной частотой записи 200 кГц, интерфейсную 12-ти разрядную плату ввода фирмы "Л-Кард" E20-10 с предельной частотой квантования 10 МГц, персональные компьютеры и специальные программы обработки и визуализации акустических сигналов.

Макет измерителя нелинейности и затухания звука выполнен в виде штанги, на одном конце которой закреплён излучатель, а на другом – отражатель. Излучатель работает в режиме излучения коротких импульсов и приема многократно отраженных сигналов. Оборудован трактами излучения, приема сигналов накачки и разностной частоты и системой обработки информации. Функциональная схема измерителя представлена на рисунке 10.1.

На рисунке 10.1 показана функциональная схема измерителя нелинейности и затухания звука с рабочей частотой 650 кГц.

Макет измерителя кавитационной прочности на частоте 10 кГц представляет собой пьезокерамический цилиндр наружным диаметром 12 см и высотой 13 см, к которому с торца прикреплен гидрофон. Цилиндрический излучатель возбуждается усилителем мощности PHONIC с максимальной выходной мощностью до 5 кВт. Порог кавитации измеряется гидрофоном.

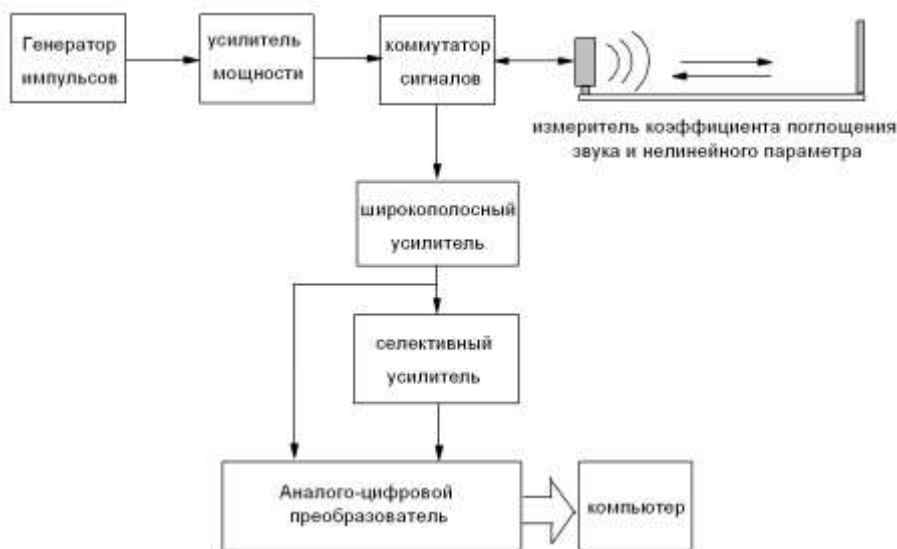


Рисунок 10.1 – Функциональные схемы измерителей нелинейности и затухания звука

Навигационная система на базе прибора GPSMAP-130 обеспечивала привязку временного распределения данных по рассеянию на измеряемых трассах к географическим координатам. При работе низкочастотной системы излучения навигационная система регистрировала положение и перемещение источников звука на шельфе.

На рисунке 10.2 представлена схема типичных трасс и расположение полигонов, на которых проводились акустические исследования в Заливе Петра Великого.

В результате проведения исследований по акустическому зондированию верхнего слоя морской воды развиты акустические методы на основе широкополосного обратного рассеяния звука и акустической нелинейности для мониторинга мелкомасштабных неоднородностей в деятельном слое моря.



Рисунок 10.2 – Схема типичных районов, в которых проводились акустические исследования в Заливе Петра Великого, линии – измерения по ходу движения судна

10.1.2 Исследования звукорассеивающих слоев

Исследования по рассеянию звука были выполнены на шельфе Японского моря на трассах протяженностью до 100 км и с применением донной акустической станции с инвертированными узколучевыми широкополосными излучателями, расположенными в б. Витязь залива Посет Японского моря.

Проведены исследования звукорассеивающих слоев на трассе м. Шульца-Владивосток на частоте 200 кГц. В качестве примера акустических данных на рисунке 10.3 представлен профиль дна и запись звукорассеивающих слоев на частоте 200 кГц, выполненных в летний период с помощью эхолота FURUNO FCV-1150.

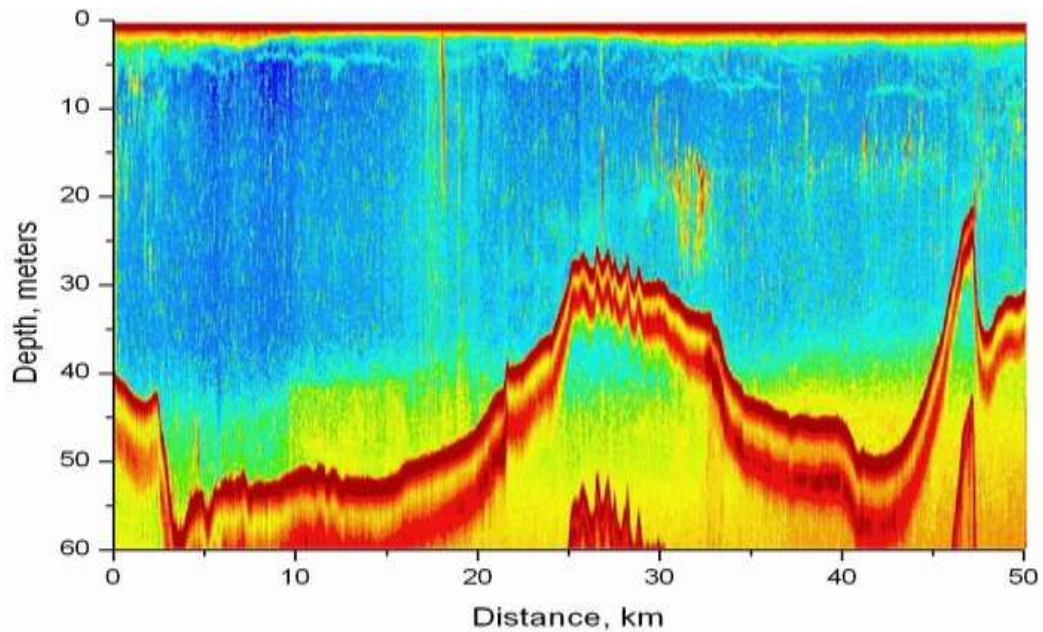


Рисунок 10.3 – Профиль дна и структура звукорассеивающих слоев на частоте 200 кГц

В экспериментах по изучению рассеяния звука в деятельном слое моря применялись различные акустические комплексы, один из которых представлен акустическим доплеровским профилографом ADP фирмы SonТес (США). В качестве примера на рисунке 10.4 представлены акустические данные, полученные с помощью ADP на частоте 250 кГц на трассе Владивосток- б.Витязь в августе 2012 г., а на рисунке 10.5 представлены результаты, аналогичные рисунку 10.4, но полученные на той же трассе в заливе Петра Великого в осенний период. На рисунке 10.4 и 10.5 представлены распределения коэффициентов рассеяния звука $m_v(r, z)$ (или $S_v(w) = 10 \lg m_v(w)$).

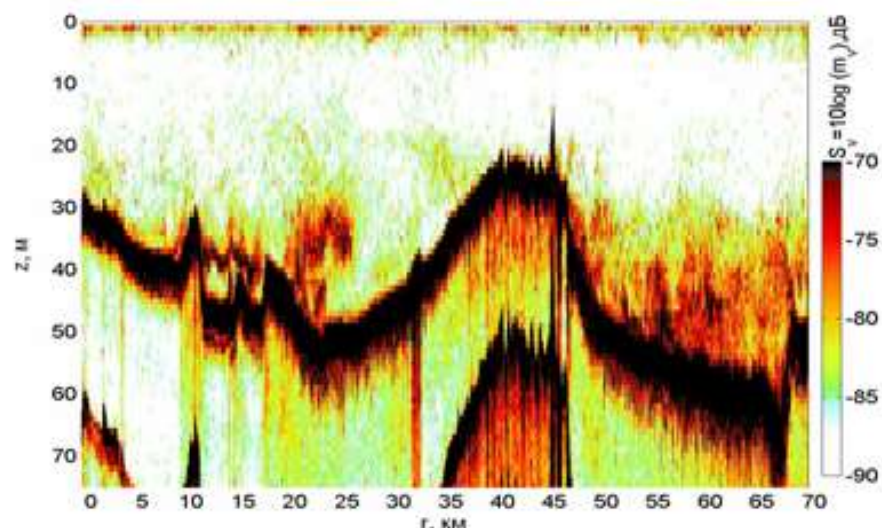


Рисунок 10.4 – Акустические данные, полученные в летний период (август) с помощью ADP на частоте 250 кГц на трассе Владивосток- б.Витязь (логарифмический коэффициент рассеяния звука $S_v(w) = 10 \lg m_v(w)$)

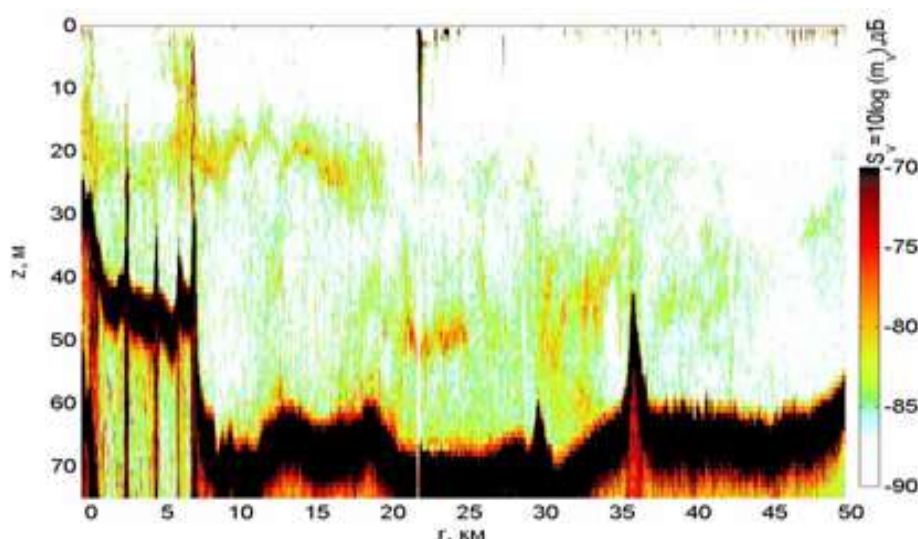


Рисунок 10.5 – Акустические данные, полученные с помощью ADP в осенний период (октябрь) на частоте 250 кГц на трассе Владивосток- б.Витязь (логарифмический коэффициент рассеяния звука $S_v(w) = 10 \lg m_v(w)$)

Из сравнения результатов, представленных на рисунке 10.4 и рисунке 10.5, видны сезонные отличия в характере рассеяния звука. Можно выделить следующие характерные сезонные особенности рассеяния. В августе приповерхностный слой слабо выражен, наблюдаются локальные максимумы рассеяния в глубинных местах залива 40 – 50 метров (рисунок 10.4). В октябре приповерхностный слой разрушается полностью, глубинные максимумы ослабевают (рисунок 10.5). Особо следует отметить наличие мощного рассеяния в глубоких местах залива Петра Великого во все сезоны.

Проведены исследования суточных вариаций рассеяния звука шельфовой зоне Японского моря. Распределение биомассы в море изменяется в широких пространственно временных масштабах под действием биологических и внешних факторов. Резкие временные изменения параметров морской среды, а также пространственные вариации могут быть зарегистрированы только современными акустическими методами зондирования на основе обратного рассеяния звука. Особенно сложная картина распределения биомассы наблюдается на шельфе Японского моря в условиях наличия течений и сложного рельефа. Воды шельфа отличаются значительным биологическим разнообразием и характеризуются сложной сезонной динамикой биомассы связанной с особенностями поведения местных биологических видов и нерестом океанических видов именно на шельфе.

В качестве характеристик рассеяния звука вдоль протяженных трасс были выбраны средние коэффициенты рассеяния звука в различных слоях моря: 1) в приповерхностном слое, лежащем

выше слоя скачка, 2) в промежуточном слое, внутри которого располагается термоклин, а также 3) глубоководный слой, лежащий заведомо ниже слоя скачка.

На рисунке 10.6 представлены зависимости коэффициента рассеяния звука от расстояния $m_V(r)$ для указанных выше слоев моря. Показано, что изменчивость $m_V(r)$ в выбранных типичных слоях резко отличаются друг от друга. В приповерхностном слое средняя изменчивость $m_V(r)$ не столь ярко выражена, как для слоя, содержащего термоклин. В верхнем слое моря существенная изменчивость $m_V(r)$ наблюдается только в условиях появления большого поверхностного скопления микронеоднородностей в виде взвесей и фитопланктона. В остальных районах величина $m_V(r)$ определялась в основном содержанием пузырьков и турбулизацией верхнего слоя моря и поэтому была примерно постоянной с небольшой тенденцией к уменьшению при удалении от антропогенных районов залива Петра Великого. Нижний слой в целом меньше всего рассеивает звук, что связано с существенно меньшим скоплением микронеоднородностей в этом слое, за небольшим исключением, которое связано с рыбными скоплениями. Именно ими обусловлены резкие вариации $m_V(r)$ в указанном слое.

Таким образом, были выявлены характерные масштабы звукорассеивающих структур в толще моря и показано, что расположение и масштабы связаны либо с вариациями термоклина (пикноклина) для промежуточных звукорассеивающих слоев, формируемых зоопланктоном, либо с наличием пузырьков и турбулизацией верхнего слоя моря, обусловленных ветровым волнением, а также с наличием большого поверхностного скопления взвесей и фитопланктона. Показан определяющий вклад в общее рассеяние звука на шельфе слоя в окрестности термоклина, связанного с зоо планктоном, по сравнению с другими источниками рассеяния звука в толще моря.

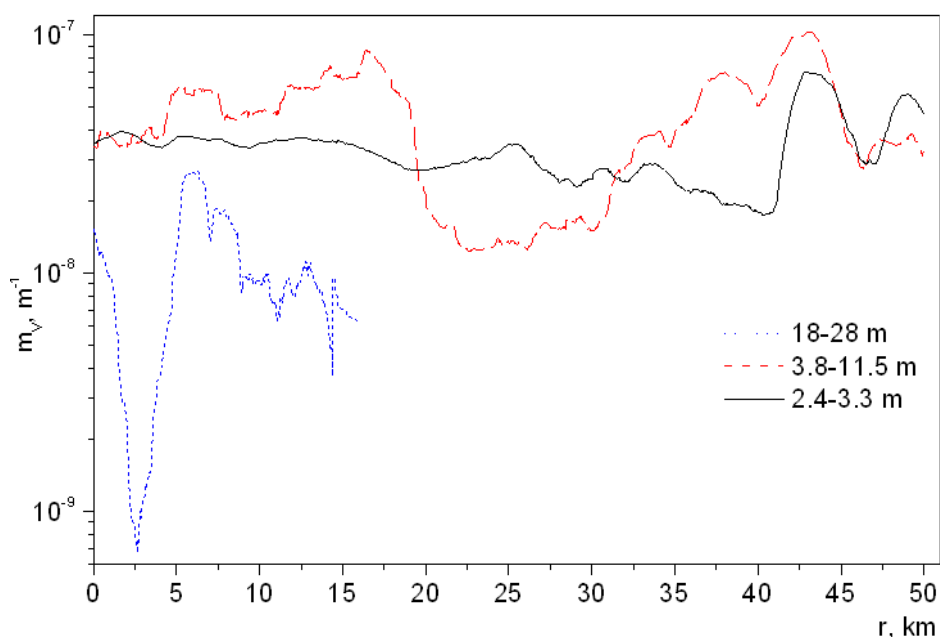


Рисунок 10.6 – Типичные зависимости коэффициента рассеяния звука от расстояния $m_V(r)$ для различных слоев моря

Впервые проведены сравнительные исследования рассеяния звука в различных дальневосточных морях: в Японском, Охотском море и восточной Арктике. Исследования выявили существенно большее рассеяние звука в восточной Арктике, что связано с большей концентрацией планктона (см. данные на рисунке 10.7).

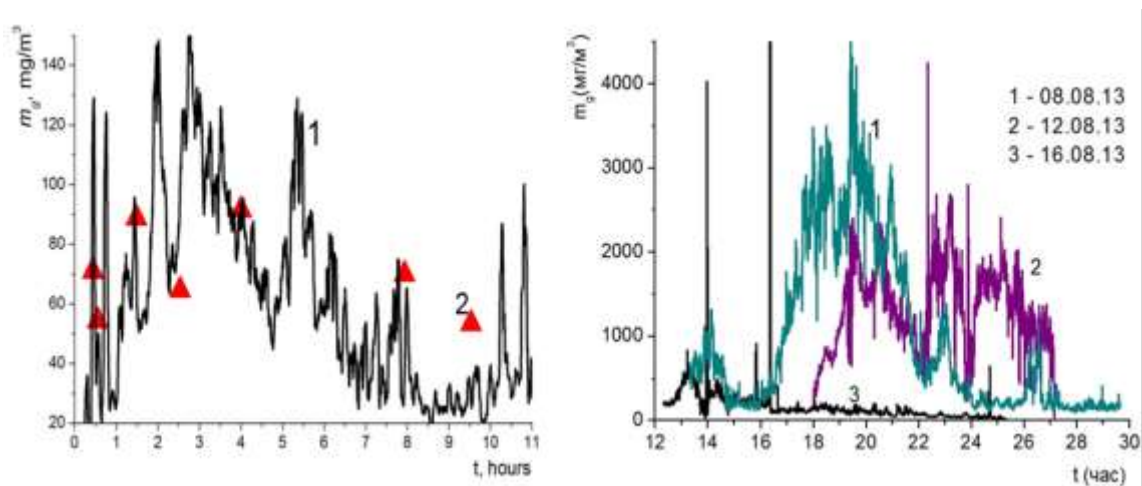


Рисунок 10.7 – Сравнение оценок концентрации биомассы в Японском море и в Арктике

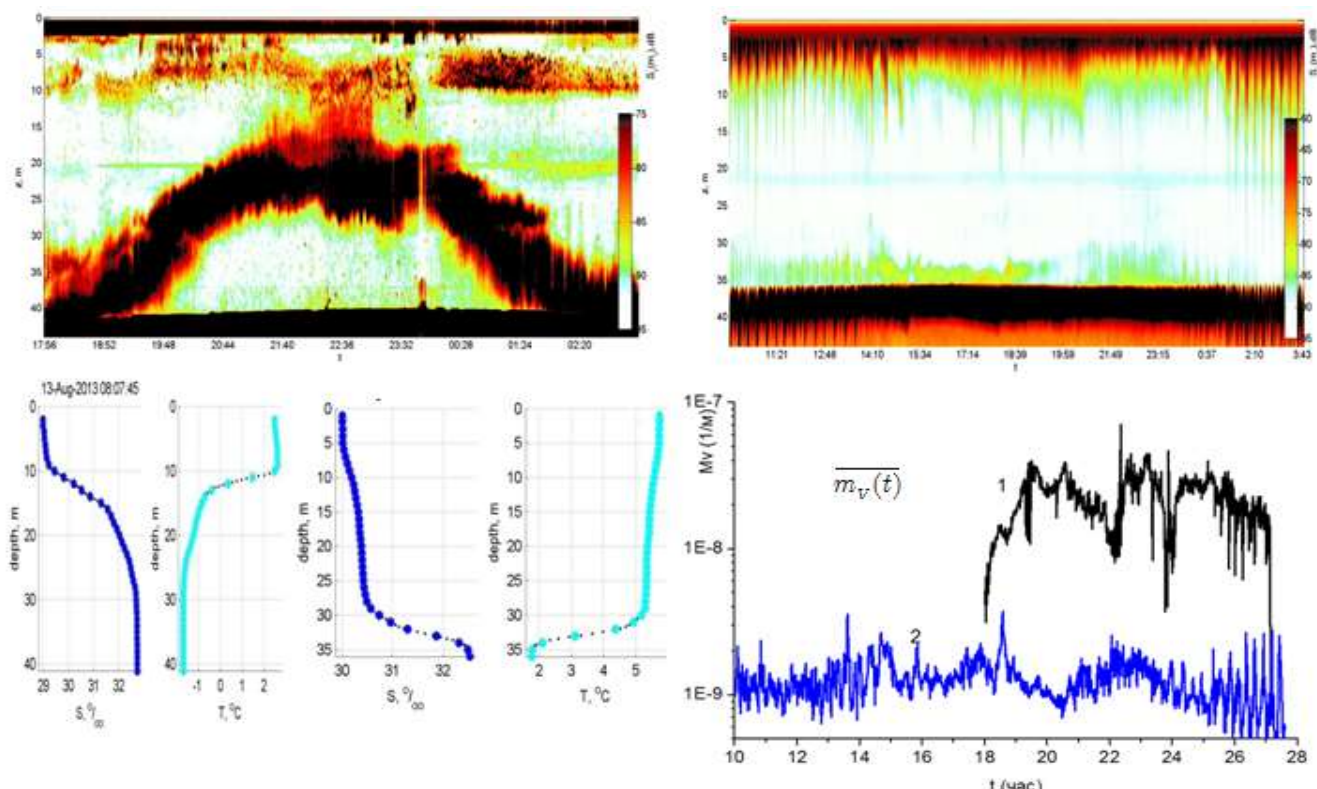


Рисунок 10.8 – Неклассические суточные вариации рассеяния звука в арктических морях: слева - Чукотское море (1) 12.08.2013, справа - Берингов пролив (2) 10.08.2013

Важной характеристикой рассеяния звука в море являются суточные вариации коэффициента рассеяния звука. В глубоководной части в умеренных и экваториальных частях океана обычно четко видны суточные вариации коэффициента рассеяния звука, обусловленные суточными перемещениями планктона по глубине. Контрастом такому поведению ЗРС выступают неклассические картины миграции звукорассеивающих слоев в Чукотском море, что иллюстрируется данными на рисунке 10.8, представленными для коэффициентов рассеяния звука $m_V(t, z)$, их средних значений по глубине $\overline{m_V(t)} = (1/h) \int_0^h m_V(z, t) dz$, а также гидрологических данных – зависимостей от глубины температуры T и солености S . Таким образом, проведенные исследования в Японском, Охотском море и восточной Арктике выявили существенно большее рассеяние звука и связанные с ним концентрации планктона в арктических морях.

Таким образом, показано, что методы рассеяния звука позволяют изучать мелкомасштабную структуру водной среды в шельфовой части моря и ее пространственно-временную изменчивость, связанную с проявлением внутренних волн, наличием пузырьков, планктона, турбулентных образований, твердых взвесей. Возможность производить акустические зондирования прямо по ходу движения судна позволяет получать непрерывные подробные картины распределения биомассы в обширных районах, что существенно дополняет традиционные методы облова биомассы, которые отличаются значительной трудоемкостью. Оценка биомассы, полученная на основе данных по рассеянию звука, совпадает с результатами биологических измерений *in situ*. Полученные зависимости, связывающие коэффициент рассеяния звука m_V и распределение биомассы в морской среде, представляют интерес для использования их для оперативного акустического мониторинга биоресурсов непосредственно на ходу судна.

10.2 Изучение нелинейного взаимодействия звука с морской водой и выявление взаимосвязи акустической кавитации с зародышевым составом и параметром нелинейности жидкости

Были проведены экспериментальные исследования кавитационных порогов и акустической нелинейности в приповерхностном слое моря в присутствии газовых пузырьков [20 - 27]. Было показано, что наличие пузырьков сильно снижает кавитационную прочность морской воды и приводит к усилению нелинейных характеристик морской воды с пузырьками. Натурные исследования кавитационной прочности морской воды с воздушными пузырьками проводились регулярно в летний и осенний сезоны в заливе Петра Великого Японского моря при различных гидрологических и метеорологических условиях. Одновременно проводились исследования

нелинейного акустического параметра морской воды при различных концентрациях пузырьков в приповерхностном слое моря [23-25, 27, 28].

В качестве примера типичной структуры приповерхностного пузырькового слоя на рисунке 10.8 представлена картина изменения во времени обратного рассеяния звука на пузырьках, наблюдающаяся при обрушении ветровых волн при сильном ветре над поверхностью моря. Из рисунка 10.8 видно, что распределение пузырьков имеет резкий спад в приповерхностном слое моря, но отдельные пузырьковые облака достигают дна. На врезке показана динамика вовлечения и всплывания пузырьков, образованных при обрушении ветровых волн на поверхности моря. Излучатель находится на дне и излучает акустические импульсы вертикально в сторону поверхности моря. Донная станция, на которой установлен излучатель, располагается на глубине около 12 метров и позволяет проводить долговременные исследования рассеяния звука при различных условиях морской среды [23-25].

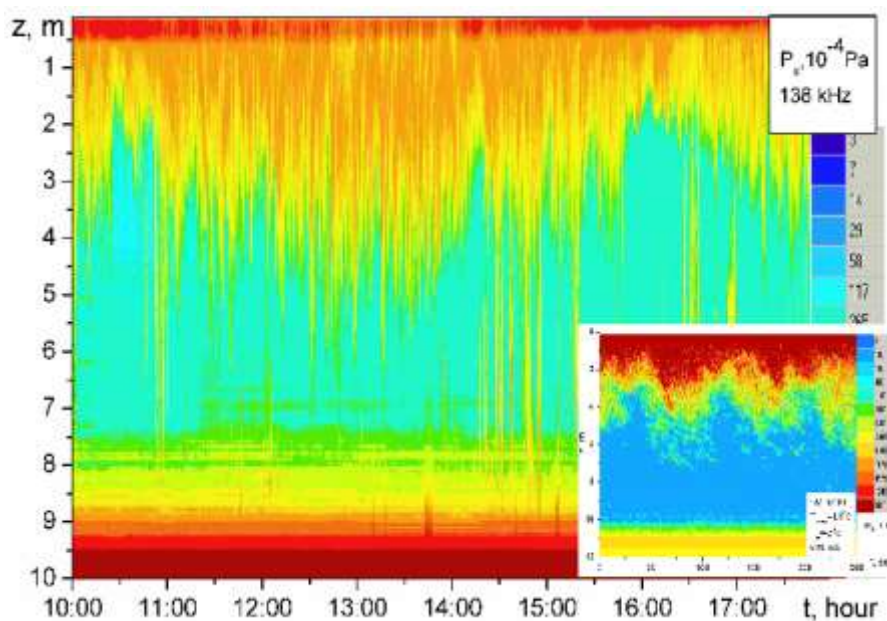


Рисунок 10.9 – Структура приповерхностного пузырькового слоя, регистрируемого на частоте 138 кГц

Решение обратной задачи рассеяния звука на резонансных пузырьках при различных частотах звука позволяет восстановить функцию распределения пузырьков по размерам $g(R)$ [23-25], которая является важной характеристикой, необходимой для вычисления эффективных параметров микронеоднородных сред. Практическую основу для моделирования $g(R)$ составили экспериментальные результаты, полученные авторами в различных условиях. Учет спада функции $g(R)$ при малых R , наличие максимума при $R=R_p$ и ограничение спектра сверху максимальным размером пузырьков R_m позволяет записать в аналитическом виде функцию $g(R)$ в виде [20-23]:

$$g(R) = A_g R^{-n} \exp \left[-n \left(\frac{R_p}{R} - 1 \right) - \frac{R}{R_m} \right], \quad (10.1)$$

где R_p - радиус, отвечающий пику функции $g(R)$, R_m - характерный максимальный радиус пузырьков в жидкости. Преимуществом такой записи $g(R)$ является практичность и быстрота вычислений эффективных параметров среды. Важным также является то, что показатель степени n и критические размеры R_p , R_m являются естественными параметрами, которые следуют из теории Гаррета – Ли – Фармера (ГЛФ), являющейся наследницей теории дробления А.Н. Колмогорова в инерционном интервале между размерами R_p , R_m [25, 30]. При этом оказывается, что измерения $g(R)$ на большом фактическом материале в сходных условиях умеренного состояния морской воды дают значения $n \sim 3.5-3.8$, что достаточно близко к оценке $n \sim 3.3$, следующей из теории ГЛФ.

В итоге была развита модель эффективных параметров жидкости с газовыми пузырьками в случае полидисперсной смеси пузырьков, описываемой функцией (1), которая выявляет аномалии акустических характеристик морской воды с пузырьками и показано, что распределение пузырьков имеет экспоненциальный спад в приповерхностном слое моря, зависит от скорости ветра и существенно влияет на акустические характеристики морской воды. Основные результаты по данному направлению опубликованы в работах [20-25].

Наличие пузырьков в воде влияет на кавитационную прочность ΔP_k и эффективный нелинейный акустический параметр ε_e , которые связаны следующей формулой

$$\Delta P_k = (1/2\sqrt{3})[1/(\varepsilon_e - 1)\beta_e], \quad (10.2)$$

где эффективная сжимаемость воды с пузырьками равна

$$b_e = b \frac{M}{H} + (4p/3) T_0 \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} R^3 \frac{b \ddot{y} - b}{b} + \frac{Dr}{r} \frac{b \ddot{y} - K}{b} \frac{g(R) dR}{H}, \quad (10.3)$$

Здесь и далее штрихи относятся к содержимому пузырька, полная сжимаемость пузырька в поле внешнего давления определяется в виде [25, 29, 31] $K \equiv - (1/V_1 \ddot{y} (V_1 \ddot{y} - P))$, при этом $V_1 \ddot{y} = 4pR^3/3$ - объем одиночного пузырька. В случае отсутствия фазовых превращений и без учета поверхностного натяжения и инерционных эффектов $K \gg b \ddot{y}$, откуда следует известное выражение для эффективной сжимаемости микронеоднородной жидкости без фазовых превращений [22, 25] $b_e = b + \frac{4}{3} p T_{R_{\min}}^{R_{\max}} (b \ddot{y} - b) R^3 g(R) dR$. Полученные выражения для эффективной сжимаемости, а также для эффективной плотности

$r_e = r + \frac{4}{3} p \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} (r - R) R^3 g(R) dR$, позволяют по обобщенным формулам Вуда получить выражения для вещественной части скорости звука $\text{Re } c_e(x)$ и коэффициента поглощения звука в воде a в виде:

$$\text{Re } c_e(x) = \text{Re } \frac{\rho_e}{\rho} b_e \frac{\beta_e}{\beta}^{1/2}, \quad a = \text{Im } \frac{\rho_e}{\rho} \nu / c_e(x) \frac{\rho_e}{\rho}. \quad (10.4)$$

Проведены теоретические исследования нелинейного распространения звука в жидкости с фазовыми превращениями; кавитирующей (кипящей) или кристаллизующейся жидкости, содержащей, соответственно, пузырьки или центры кристаллизации. Получено решение системы нелинейных уравнений гидродинамики совместно с уравнениями кинетики фазового превращения, неравновесность которого обычно задают в виде линейного уравнения типа уравнения Герца - Кнудсена. Уравнения решаются в квадратичном приближении теории возмущения, малым параметром которой является малость колебаний радиуса включения, происходящая под действием звука. Окончательно можно найти нелинейный параметр ε_e как функцию от концентрации включений x в виде

$$\varepsilon_e(x) = \varepsilon_{0e}(x) + \varepsilon_d(x), \quad (10.5)$$

где нелинейный параметр $\varepsilon_{0e}(x)$, характеризующий жидкость без фазовых превращений, и дополнительное изменение нелинейного параметра $\varepsilon_d(x)$, связанное с фазовыми превращениями, определяются выражениями (штрихи относятся к включению)

$$\varepsilon_{0e}(x) = \varepsilon \frac{\beta^2}{\beta_e(x)^2} \left[1 + x \left(\frac{\varepsilon' \beta'^2}{\varepsilon \beta^2} - 1 \right) \right] \quad (10.6)$$

$$\tilde{\varepsilon}(x) = \frac{x}{\beta_e(x)^2} \left[\frac{\Delta \rho}{\rho} (\beta'_p - K_p) + \frac{\rho'}{\rho} (\beta' - K)^2 + 2 \left(K - \frac{\rho'}{\rho} \beta \right) (\beta' - K) \right]. \quad (10.7)$$

При этом следует учесть, что производная по давлению от сжимаемости β'_p , относящаяся к материалу, составляющему центров кристаллизации и производная от сжимаемости центров кристаллизации, K_p , зависит как от нелинейного параметра ε' этого материала, так и от характера нелинейной динамики центров кристаллизации, т.е. от условий генерации волны комбинационной частоты. В частном случае генерации волны разностной частоты Ω при распространении бигармонической волны, т.е. волны накачки с двумя частотами ω_1 и ω_2 , получаем:

$$\beta'_p = \beta'^2 (1 - 2\varepsilon'), \quad K_p(\omega_1, \omega_2, \Omega) = K(\omega_1) K(\omega_2)^* [1 - B_\Omega(\omega_1, \omega_2, \Omega)] / 3. \quad (10.8)$$

Здесь величина $B_{\Omega}(\omega_1, \omega_2, \Omega)$ характеризует нелинейную восприимчивость включений, зависящую от кинетики фазового превращения и динамических характеристик. При отсутствии фазовых превращений, когда $\beta = K$, получаем соотношение $\varepsilon_e(x) = \varepsilon_{0e}(x)$.

Подробный анализ показал, что наблюдаются резонансные увеличения нелинейности при совпадении размера пузырьков с резонансными размерами, отвечающими применяемым разностным частотам. При этом в целом фазовые превращения увеличивают акустическую нелинейность микронеоднородных жидкостей [25, 28, 29], особенно сильно (достигающие двух порядков) усиливающих при размерах пузырьков, сравнимых с длиной тепловой волны на данной частоте звука. Объясняется это явление наличием фазового перехода [25], когда дополнительное резкое увеличение амплитуды пульсаций пузырьков приводит к сильному возрастанию нелинейности. В целом показано существенное влияние фазовых превращений на генерацию нелинейных сигналов в воде с фазовыми превращениями. Выявлено аномальное поведение частотных и концентрационных зависимостей нелинейного акустического параметра, существенно отличающихся по своему характеру от таковых в случае жидкости с частицами без фазовых превращений.

На рисунке 10.9. показано, что особенностью параметра акустической нелинейности в кристаллизующейся воде при монодисперсном распределении центров кристаллизации по размерам функции является резкое (до двух порядков) возрастание нелинейности при малых размерах. Отмечено, что важной чертой является провал при размерах, когда формально сжимаемость зародышей кристаллизации вследствие фазовых превращений становится отрицательной. Тем не менее, в целом фазовые превращения увеличивают акустическую нелинейность кристаллизующихся жидкостей. Обнаружено, что наиболее значительное влияние фазовых превращений наблюдается на относительно низких частотах и при малых размерах центров кристаллизации.

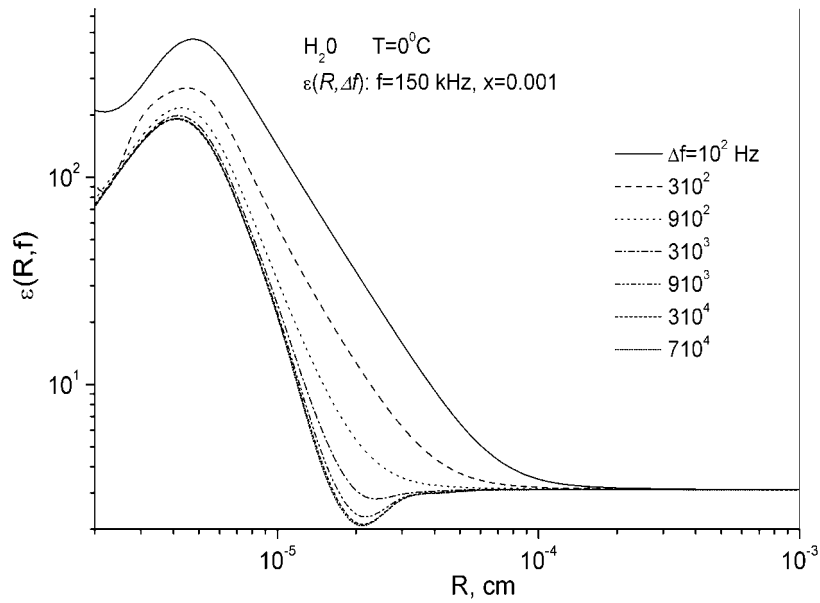


Рисунок 10.10 – Параметр акустической нелинейности $\varepsilon(R, \Delta f)$ при преобразовании в разностную частоту Δf (частота накачки 150 кГц) в воде с концентрацией центров кристаллизации $x = 0.1\%$

На рисунке 10.11 представлена типичная зависимость $DP_k(x)$ в широком интервале значений x для воды с пузырьками при $20^\circ C$ при различных частотах акустического поля, вызывающего кавитацию. Видно, что при превышении концентрации значения 10^{-4} происходит стабилизация $DP_k(x)$ - стремление к постоянной величине кавитационной прочности, независимо от концентрации пузырьков.

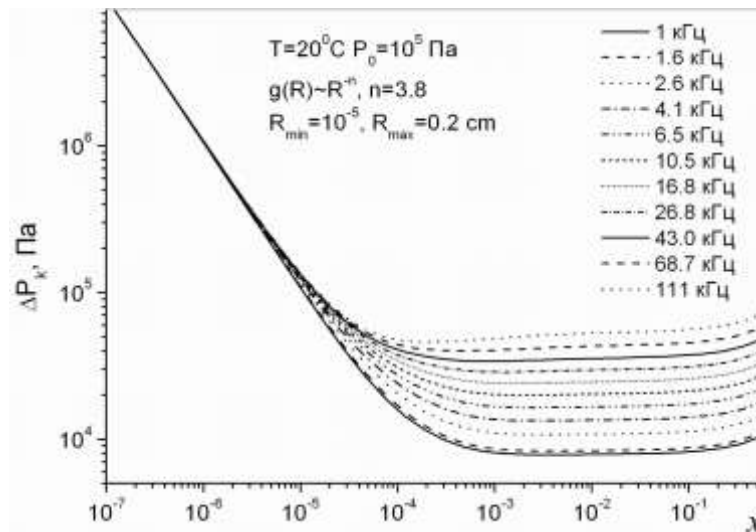


Рисунок 10.11 – Зависимость $DP_k(x)$ для воды с пузырьками при $20^\circ C$ при различных частотах акустического поля

Экспериментальные исследования кавитационной прочности и нелинейного акустического параметра морской воды проводились при различных концентрациях пузырьков в приповерхностном слое моря.

На рисунке 10.12 представлены данные об изменениях нелинейного параметра в приповерхностных слоях моря, происходящих при сильном изменении концентрации пузырьков в море (до шторма, при шторме и после шторма).

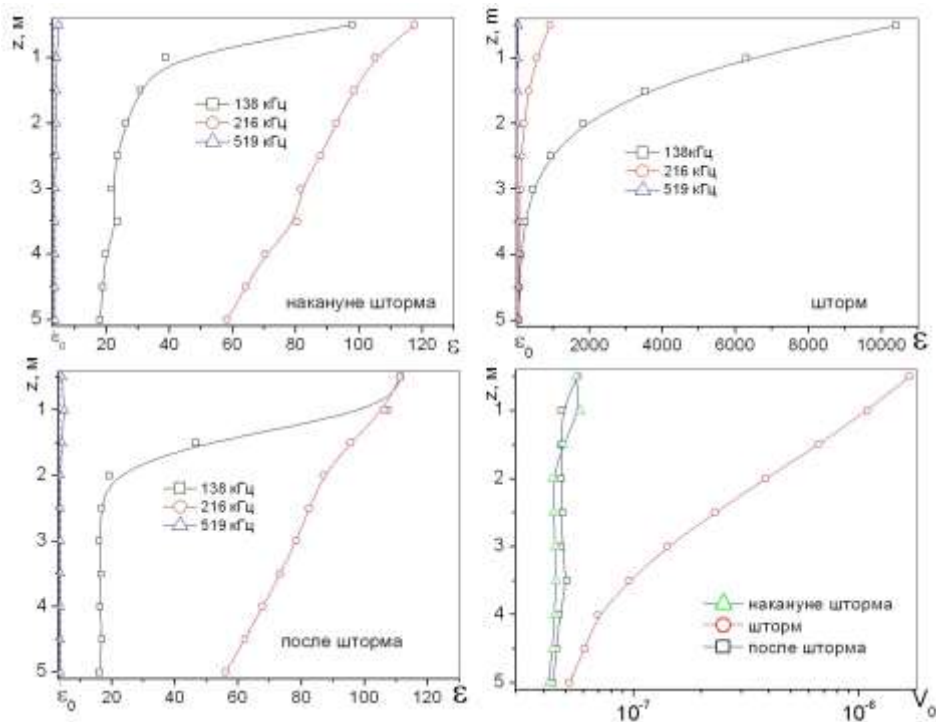


Рисунок 10.12 – Параметр акустической нелинейности ϵ на различных частотах и концентрация газовых пузырьков V_0 в морской воде в зависимости от глубины

Экспериментальные исследования кавитационной прочности морской воды на различных глубинах были проведены с применением акустического концентратора в форме цилиндра с резонансной частотой 10 кГц. Регистрация кавитации осуществлялась по акустическим шумам, присущим кавитационному режиму. Шумы регистрировались с помощью измерительных гидрофонов фирмы "Ахтуба" (рабочая полоса частот 0.01-300000 Гц) и фирмы Bruel&Kjaer, тип 8103 (рабочая полоса частот 0.01-200000 Гц). Запись сигналов осуществлялась в цифровом виде с помощью многоканальной 14 разрядной платы E20-10 фирмы Л-кард с максимальной частотой оцифровки 5 МГц. Высокое напряжение на излучатель подавалось на частоте резонанса 10.7 кГц с помощью усилителя мощности типа Phonic XP 5000 с максимальной мощностью 2 кВт и подстраиваемой индуктивностью, компенсирующей на частоте резонанса емкостную нагрузку. При зондировании в морских условиях гидрофон прикреплялся с внешней стороны концентратора

вблизи свободного торца. Предварительно устанавливалось соотношение между акустическими характеристиками, измеряемыми гидрофоном снаружи и внутри концентратора. Соответствующие поправки вносилась в дальнейшем в показания внешнего гидрофона при проведении экспериментов в морских условиях.

При проведении кавитационных исследований особое внимание было сосредоточено на изучении зависимости порога кавитации от различных критериев обнаружения разрыва сплошности морской воды: по нелинейности кривой излучаемой мощности на частоте излучаемого сигнала w_s , по второй гармонике P_{2w} , по суммарным высшим гармоникам $e P_w$, а также по субгармоникам $P_{w/2}$ и $P_{3w/2}$.

На рисунке 10.13 представлены зависимости от времени амплитуды напряжения на гидрофоне и на излучателе, нагружаемом на кавитирующую жидкость с переменным импедансом. Здесь же на врезке представлены зависимости от времени спектральных характеристик указанных выше сигналов с гидрофона и с излучателя. Видно, что при высоких напряжениях сигналов наблюдается резкий излом зависимостей $U(t)$, который в спектральной области отвечает резкому обогащению спектральных характеристик акустического шума предположительно кавитационного происхождения. Этот излом может быть положен в основу одного из критериев порога кавитации и измерения на его основе кавитационной прочности морской воды.

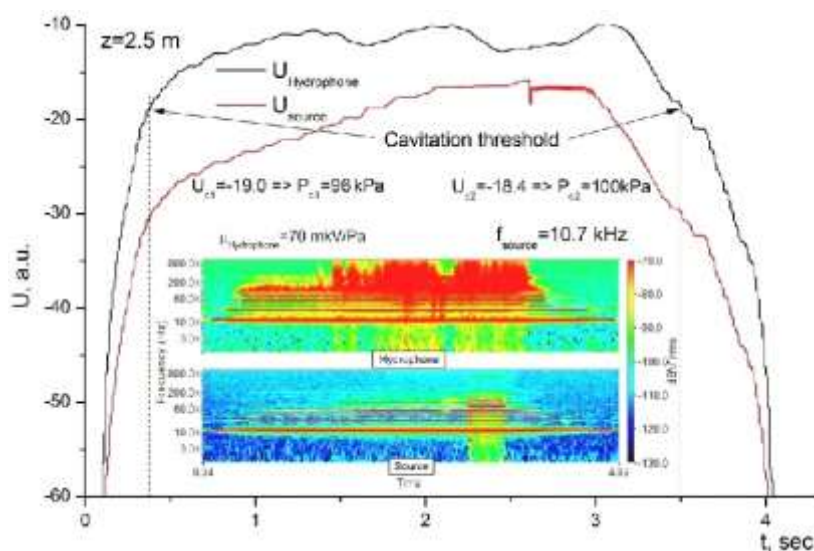


Рисунок 10.13 – Зависимости от времени амплитуды напряжения на гидрофоне и на излучателе, на врезке - зависимости от времени спектральных характеристик у сигналов с гидрофона и с излучателя. Глубина 2.5 м

На рисунке 10.14 представлены зависимости от напряжения на излучателе различных спектральных составляющих акустического шума: сигнала субгармоники $P_{3w/2}(U_{source}(t))$ на частоте $3/2\omega_s$, суммарных высших гармоник $\sum_{w>w_s} P_w(U_{source}(t))$, а также высших гармоник $\sum_{w>5w_s} P_w(U_{source}(t))$, начиная с 6 гармоники. Из рисунка 10.13 видно, что можно четко выделить 2 порога кавитации, отличающихся более чем в 2 раза: по изгибу кривой $\sum_{w>5w_s} P_w(U_{source}(t))$ и по началу асимптотики всех перечисленных кривых и, особенно, - кривой $\sum_{w>w_s} P_w(U_{source}(t))$. Первый порог отвечает началу кавитации, а второй порог – началу бурной кавитации, сопровождающейся резким уменьшением акустического импеданса. Таким образом, критерий порога кавитации является в определенной мере достаточно условным. Тем не менее, с позиций обнаружения именно начала кавитации, как начала разрыва сплошности жидкости и начала образования пузырьков в жидкости, можно считать кавитационной прочностью жидкости в данном примере первый порог, составляющий $P_{c1} = 105$ кПа.

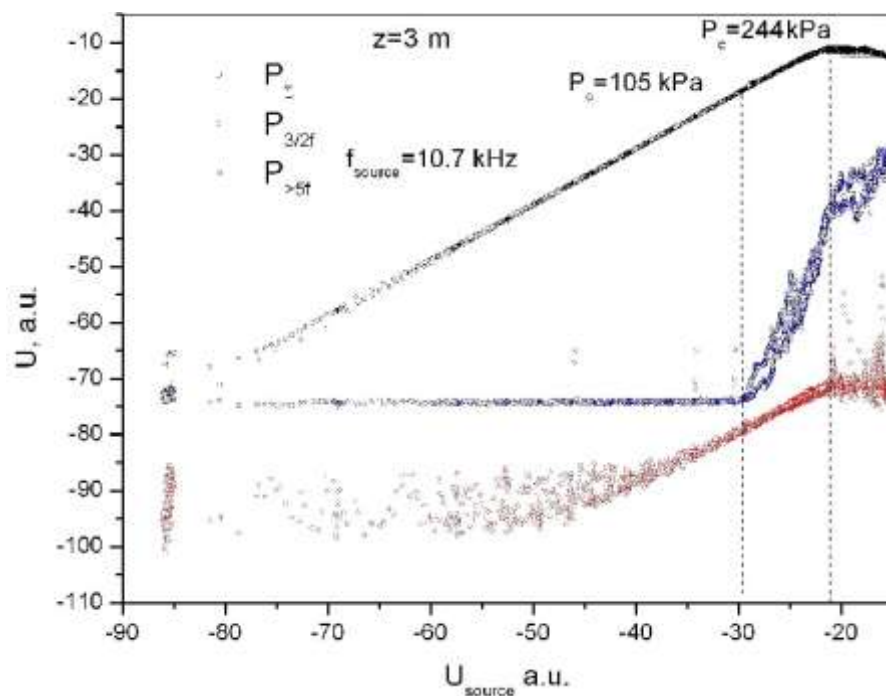


Рисунок 10.14 – Зависимости от от напряжения на излучателе спектральных составляющих акустического шума: сигнала субгармоники $P_{3w/2}(U_{source}(t))$, суммарных высших гармоник P_s и высших гармоник, начиная с 6 гармоники $P_{>5f}$. Глубина 3 м.

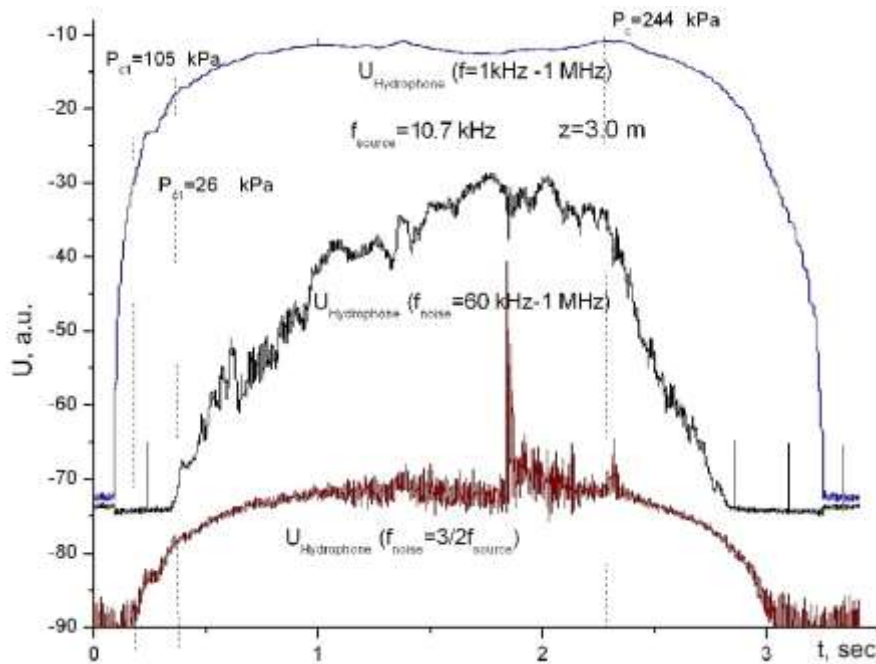


Рисунок 10.15 – Зависимости от времени сигнала субгармоники $P_{3w/2}(t)$, суммарных гармоник $P_{S_w}(t)$ в интервале частот $S_w=1$ кГц – 1 МГц и высших гармоник $P_{S_{6w}}(t)$, начиная с 6 гармоника. Глубина 3 м

На рисунке 10.15 представлены зависимости от времени различных спектральных составляющих акустического шума: сигнала субгармоники $P_{3w/2}(t)$ на частоте $3/2\omega_s$, суммарных гармоник $P_{S_w}(t) = \sum_w P_w(t)$ в интервале частот $S_w=1$ кГц – 1 МГц, высших гармоник $P_{S_{6w}}(t) = \sum_{w>5w_s} P_w(t)$, начиная с 6 гармоника. Результаты, представленные на рисунке 10.15, соответствуют результатам, представленным на рисунке 10.14, так как получены в одном и том же эксперименте, но обработаны в различном виде. Сопоставляя результаты на рисунке 10.14 и рисунке 10.15, можно видеть, что первый порог $P_{c1}=105$ кПа отвечает началу кавитации, а второй порог $P_{c2}=244$ кПа, находящемся на асимптотическом участке $P_{S_w}(t)$, соответствует началу бурной кавитации.

Экспериментальные исследования кавитационной прочности морской воды проводились в осенний период в б.Витязь залива Петра Великого Японского моря. На рисунке 10.16 представлена кавитационная прочность морской воды в зависимости от глубины, измеренная в серии экспериментов в одном и том же месте в б.Витязь.

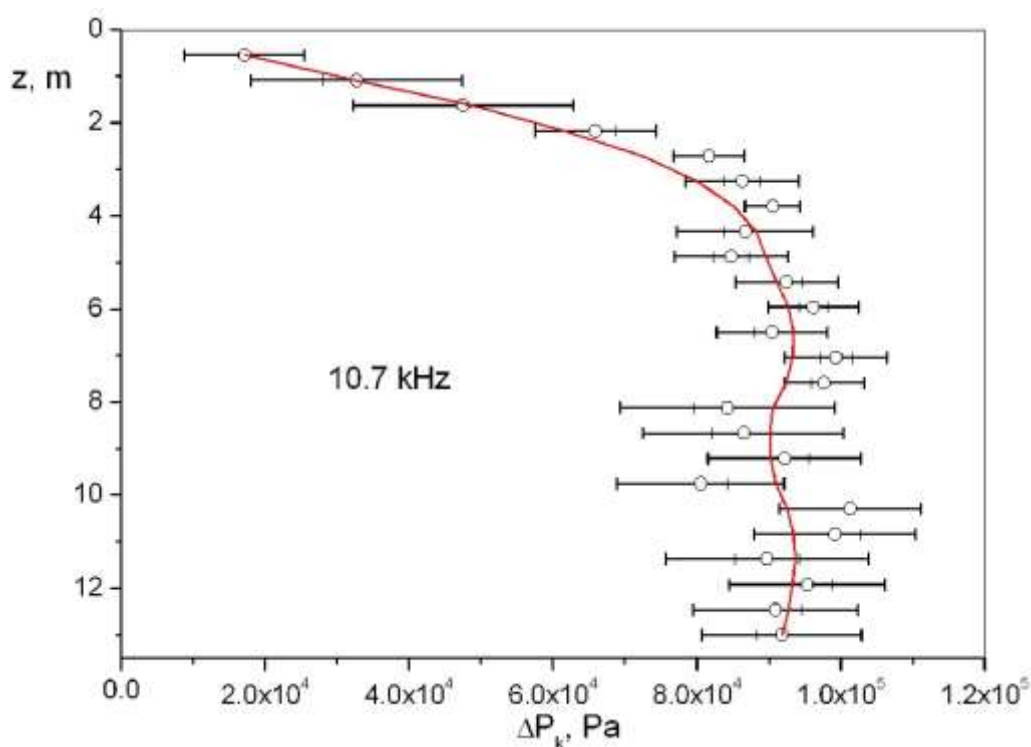


Рисунок 10.16 – Кавитационная прочность морской воды в зависимости от глубины

В качестве критерия кавитации были взяты данные по первому порогу кавитации P_{c1} . Ошибки измерений кавитационной прочности указаны на графике и отчасти отражают статистическую природу акустической кавитации. Из рисунка 10.16 видно, что кавитационная прочность морской воды существенно зависит от глубины в подповерхностном слое толщиной до 6 метров, а затем зависимость от глубины выражена слабо.

Полученные результаты по понижению кавитационной прочности морской воды в приповерхностном слое мы связываем с наличием газовых пузырьков, всегда присутствующих в этом слое. Обращаясь к теоретическим результатам для кавитационной прочности воды с пузырьками, представленным в статье [22], можно видеть, что экспериментально обнаруженное понижение до 20 кПа кавитационной прочности воды в непосредственной близости поверхности моря, которое представлено на рисунке 10.15, можно объяснить присутствием воздушных пузырьков с суммарной объемной концентрацией $1.2 \cdot 10^{-4}$.

Резюмируя проведенный цикл работ можно сказать, что была развита модель эффективных линейных и нелинейных параметров жидкости с пузырьками и установлена взаимосвязь нелинейного акустического параметра жидкости и порога кавитации с параметрами модели полидисперсной смеси пузырьков в жидкости. Апробирован новый аналитический вид функции распределения пузырьков по размерам в морской воде $g(R)$, который был предложен на первом

этапе проекта. Проведены экспериментальные исследования кавитационной прочности морской воды в заливе Петра Великого Японского моря. При проведении кавитационных исследований особое внимание было сосредоточено на изучении зависимости порога кавитации от различных критериев обнаружения разрыва сплошности морской воды: по нелинейности кривой излучаемой мощности на частоте излучаемого сигнала, по второй гармонике, по суммарным высшим гармоникам, а также по субгармоникам и т.д. Показано, что можно четко выделить 2 порога кавитации, отличающихся более чем в 2 раза: по изгибу кривой и по началу асимптотики всех перечисленных кривых. Первый порог отвечает началу кавитации, а второй порог – началу бурной кавитации, сопровождающейся резким уменьшением акустического импеданса. Таким образом, критерий порога кавитации является в определенной мере достаточно условным. Тем не менее, с позиций обнаружения именно начала кавитации, как начала разрыва сплошности жидкости и начала образования пузырьков в жидкости, можно считать кавитационной прочностью жидкости амплитуду звука, отвечающего первому порогу.

Работы по изучению особенностей поглощения, рассеяния звука и нелинейности гетерогенной жидкости составляют общую картину сложной нелинейной микронеоднородной морской среды, которая восприимчива к воздействию на нее ультразвука. Показано сильное влияние динамических эффектов и фазовых превращений на нелинейную динамику фазовых включений (обобщенная нелинейная сжимаемость). Получены зависимости параметра нелинейности и коэффициента нелинейного рассеяния звука на включениях от резонансных свойств и эффективности фазовых превращений (парогазовые пузырьки и центры кристаллизации).

Разработаны методики и проведены экспериментальные исследования кавитационной прочности и акустической нелинейности в воде при различной концентрации пузырьков. Показано, что параметр акустической нелинейности обычно резко возрастает, а кавитационная прочность резко падает при повышении температуры и усилении эффективности фазовых превращений в жидкости.

Основные результаты и их новизна заключаются в следующем:

- Реализована с высоким разрешением спектроскопия размерного состава и пространственного распределения воздушных пузырьков в верхнем слое морской воды при различных гидрометеорологических условиях.
- Показано, что методы рассеяния звука прямо по ходу движения судна позволяет получать непрерывные подробные картины распределения биомассы в обширных районах, что существенно дополняет традиционные методы облова биомассы, которые отличаются

значительной трудоемкостью. Акустическая оценка биомассы совпадает с результатами биологических измерений *in situ*.

- Впервые проведены сравнительные исследования рассеяния звука в различных дальневосточных морях: в Японском, Охотском море и восточной Арктике. Исследования выявили существенно большее рассеяние звука в восточной Арктике, что связано с большей концентрацией планктона, суточная миграция которого существенно отличается от миграции планктона в теплых морях.

Список использованных источников

1. Андреева И.Б. Рассеяние звука в океанических звукорассеивающих слоях.// В кн.: Акустика океана, под ред. Л.М.Бреховских, М.:Наука, 1974, с.491-558.
2. Chapman R., O. Bluy. R. Adlington, A. Robinson. Deep Scattering Layer Spectra in the Atlantic and Pacific Oceans and Adjaicent Seas.//J. Acoust. Soc. Am., 1974, vol. 56, No. 6, p. 1722-1734.
3. Цейтлин В.Б. Размерное распределение пелагических организмов в тропических районах океана // Океанология. 1981. Т.21. №1. с.125-131
4. 4 Андреева И.Б., Самоволькин В.Г. Рассеяние акустических волн на морских организмах. М.:Агропромиздат.1986. 104 с.
5. Андреева И.Б.. Звукорассеивающие слои - акустические неоднородности толщи вод океана. Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 437-444.
6. Андреева И.Б., Тарасов Л.Л.. Рассеяние акустических волн мелкими ракообразными. Акуст.журн. 2000. Т. 49, № 2, с. 156-160.
7. Андреева И.Б., Галыбин Н.Н., Тарасов Л.Л., Толкачев В.Я.. Акустическая интенсивность звукорассеивающих слоев центральной Атлантики. Акуст.журн. 2000. Т. 46, N 1, с. 21-27.
8. Orlowsky A. Hydroacoustic Characteristics of Scattering Layers in the Northeastern Atlantic Ocean.// J. Acoust. Soc Am., 1990, vol. 88, No. 1, p. 298-309
9. Юданов К.И. Гидроакустическая разведка рыбы. СПб.: Судостроение, 1992. 192с.
10. Stanton T. Simple approximate formulas for backscattering of sound by spherical and prolonged objects // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V.86. pp.1499-1510
11. Weibe P., Greene C., Stanton T. Sound scattering by live zooplankton and micronecton // J. Acoust. Soc. Am. 1990. Vol.88. No 5. pp.2346-2359
12. Gorska N. Chu D. Some aspects of sound extinction by zooplankton // J. Acoust. Soc Am., 2001, vol. 110, No. 5, p. 2315-2325

13. Ressler P. Acoustic backscatter measurements with a 153 kHz ADCP in the northeastern Gulf of Mexico: determination of dominant zooplankton and micronekton scatterers. // *Deep-Sea Research I*. 2002. v.49. p.2035–2051
14. Захарков С.П. и др. Газовые пузырьки в море и фитопланктон // *Океанология*. 1991. Т. 31. вып. 4. С. 606-608.
15. Сандлер Б.М. и др. Газовые пузырьки и морской фитопланктон. Реверберационные ультразвуковые измерения // *Океанология*. 1992. Т. 32. вып. 1. С. 92-100.
16. Бурлакова З.П. и др. Газовые пузырьки и морской фитопланктон. Волнометрические измерения // *Океанология*. 1992. Т. 32. вып. 3. С. 481-486.
17. Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Стунжас П.А. Акустические свойства сгущений фитопланктона // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39. вып. 3. С. 144-150.
18. Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Стунжас П.А. Скорость звука в средах с морским фитопланктоном // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39. вып. 4. С. 724-728.
19. Селивановский Д.А., Диденкулов И.Н., Муякшин С.И., Стунжас П.А. Акустические свойства планктона // *Динамика сплошной среды*, 2001. вып.117, с.35-42.
20. В.А. Акуличев, В.А. Буланов О спектре пузырьков газа и возможностях акустической спектроскопии в приповерхностном слое океана // *Доклады Академии наук*, 2012, том 446, № 2, с.212-215
21. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические характеристики и распределение пузырьков в приповерхностном слое моря / *Сборник трудов Научной конференции "Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества"*. Т.2. - М.: ГЕОС, 2012. с. 272-276
22. В.А. Акуличев, В.А. Буланов Об аномалиях акустических характеристик полидисперсных жидкостей с газовыми и паровыми пузырьками // *Доклады Академии наук*, 2013, том 448, № 2, с.213-217
23. Victor A. Akulichhev and Vladimir A. Bulanov, "Acoustics of subsurface bubble layer". In *Proceed. of European Conference on Underwater Acoustics (ECUA)*, 23-28 June, 2013, Corfu, Greece, p.8.1-8.7
24. В.А. Буланов, И.В. Корсков, А.В.Стороженко, П.Н. Попов "Акустическое зондирование морской среды с применением направленных вверх излучателей, расположенных на дне" / "Акустика океана". (Доклады XIV-ой школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских), М.: ГЕОС, 2013, с. 101-104
25. В.А.Акуличев, В.А. Буланов. Влияние микронеоднородностей на акустические характеристики морской среды. *Океанологические исследования Дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана*. В двух книгах. Книга 2. Гл. ред. Акад. В.А.Акуличев. Владивосток. Дальнаука. 2013. с. 305-327.

26. Параметрический многочастотный эхолотатор. Пат. 146020 U1 Российская федерация /В.А.Буланов, И.В.Корсков, П.Н. Попов/2014128174, заявл. 09.07.2014, опубл. 27.09.2014, Б.И. №27
27. Метод определения нелинейного акустического параметра жидкостей и устройство для его осуществления. Пат. 2532143 С1 Российская федерация/ В.А.Буланов, И.В.Корсков, П.Н. Попов/2013130643, заявл. 03.07.2013, опубл. 27.10.2014, бюл. №30
28. V.A. Bulanov, I.V. Korskov "Acoustic spectroscopy of bubbles in water at different temperature" Proceed. 21st Int. Congress on Sound and Vibration (ICSV21) Beijing, China, 13-17 July 2014. http://www.icsv21.org/content/papers/papers/full_paper_426_20140315141342723.pdf
29. В.А. Буланов "О нелинейных акустических характеристиках кристаллизующейся жидкости" // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2014. № 5. с.145310_1-145310_7
30. Акуличев В.А., Буланов В.А. "Исследования неоднородностей морской среды методами акустического зондирования" / В кн. Дальневосточные моря России: в 4 кн./ Гл.ред. акад. В.А. Акуличев. Кн.4. Физические методы исследования/ отв.ред. Г.И.Долгих. –М.: Наука 2007, с.129-231
31. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей. Владивосток: Дальнаука. 2001. 281 с.

11 Экспериментальная апробация методов диагностики и учета влияния среды на технические характеристики гидроакустических средств навигации и связи в условиях шельфа, глубокого моря и переходной зоны. Исследование эффекта «оползня»

11.1 Учет влияния среды на технические характеристики гидроакустических средств

Разработка методов и технических средств передачи информации по гидроакустическому каналу тесно связана с исследованием особенностей распространения акустической энергии в районах функционирования подводных объектов. В первую очередь представляет интерес исследование когерентности и стабильности амплитудно-фазовых характеристик акустических сигналов, влияющих на достоверность и скорость передачи информации, а так же на скрытность и имитостойкость систем связи. В отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН разработаны варианты систем звукоподводной связи с использованием псевдослучайных сигналов на основе М-последовательностей в виде подводного телекоммуникационного комплекса. Работа Технических средств, входящих в состав макета подводного телекоммуникационного комплекса для передачи команд управления на удаленные подводные объекты и навигационных параметров, осуществляется с учетом и данных о меняющихся параметрах морской среды в зоне размещения элементов комплекса.

Экспериментальная апробация комплекса проводилась в бухте Витязь (залив Посьета). Корреспондирующие точки размещались вблизи береговой черты на небольших глубинах на расстоянии около 2 км друг от друга. В условиях реального эксперимента отношение сигнал/шум было высоким и сбоев в передаче информационных и навигационных сигналов не было зарегистрировано. Кроме этого эксперимент по проверке приемоизлучающих трактов макета телекоммуникационного комплекса в режиме излучения связных и навигационных сигналов проходил в бухте Улисс (рис. 11.1). Основной целью эксперимента была проверка совместимости приемной приставки комплекса со штатной приемной системой подводного объекта. Излучение сигналов осуществлялось с ввешенного с борта яхты «Светлана» пьезокерамического излучателя, состоящего из трех колец диаметром 470 мм.

Параметры сигнала:

- М – последовательность;
- Число символов – 255;
- Модуляция – двухпозиционная фазовая (0 - 0°, 1 - 90°);
- Число периодов несущей частоты на символ – 4;

- Несущая частота – 1 кГц;
- Режим излучения – 1 раз в минуту.

Глубина места постановки составляла 22 м. Заглубление излучателя – 18 м. Прием и усиление акустических сигналов проводился с помощью штатного оборудования объекта ВМФ, пришвартованного к пирсу. Длительность записи принятых сигналов составило 2 часа 15 минут.



Рисунок 11.1 – Эксперимент в бухте Улисс

Яхта «Светлана» в течение эксперимента была заякорена на швартовой бочке одним швартовым концом длиной 10 – 20 метров.

Измерение гидрологических параметров в точке излучения проводились каждые полчаса. Рассчитанная скорость звука по формуле UNESCO от 1998 года приведена на рисунке 11.2.

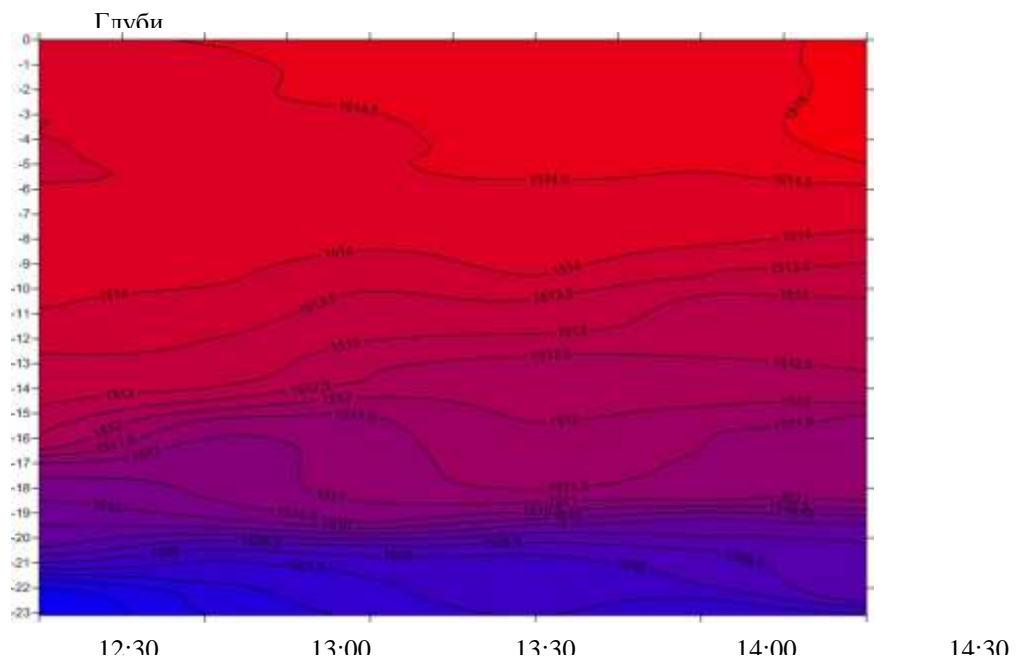


Рисунок 11.2 – Скорость звука

Типичная импульсная характеристика волновода приведена на рисунке 11.3.

Яхта «Светлана» в течение эксперимента была заякорена на швартовой бочке одним швартовым концом длиной 10 – 20 метров.

Измерение гидрологических параметров в точке излучения проводились каждые полчаса. Рассчитанная скорость звука по формуле UNESCO от 1998 года приведена на рисунке 11.2.

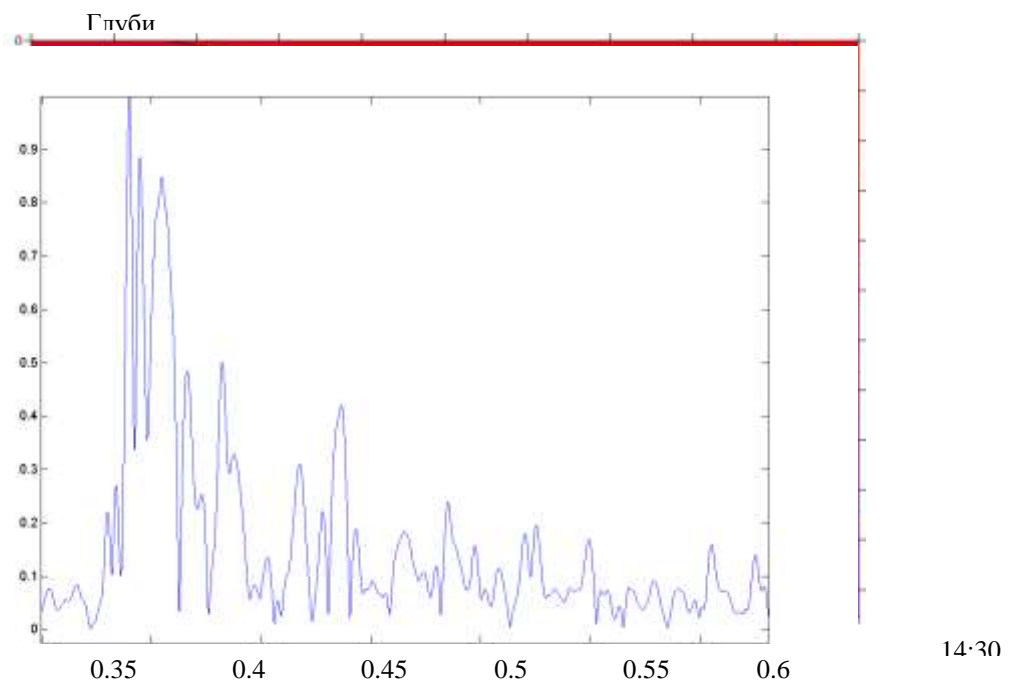


Рисунок 11.3 – Типичная импульсная характеристика

Данный эксперимент продемонстрировал принципиальную возможность приема и анализа связанной информации при использовании штатной системы подводного объекта, но выявил существенные технические проблемы, связанные с помехами приему, которые необходимо исследовать в дальнейшем для конкретных носителей. В декабре 2013 года в процессе проведения совместных широкомасштабных мероприятий ТОФ и ТОИ ДВО РАН на этом же объекте, но в движении были проведены исследования и проверка работоспособности элементов телекоммуникационного комплекса. Надежно отработали стационарный и мобильный излучающие комплексы. Постобработка записанных данных показала принципиальную возможность эффективного использования приставки, учитывающей меняющиеся гидрофизические параметры для решения задач связи и навигации.

Экспериментальные данные о поле температур и, следовательно, о поле скорости звука, получаемые в различных шельфовых зонах, а также данные о сезонной и суточной изменчивости этих полей, создают предпосылки для совмещения телекоммуникационного комплекса с высокоточным навигационным. Применение такого совмещения открывает перспективы существенного сокращения затрат при подготовке и проведении натурных испытаний подводных объектов различного назначения, осуществляющих свои миссии на шельфе и за шельфовым сбросом.

Результаты, полученные в процессе натурных экспериментов с использованием разработанного комплекса, продемонстрировали его надежность и функциональность. Элементы телекоммуникационного комплекса испытывались в достаточно сложных условиях распространения, определяемых гидрологией и геометрией трассы.

11.2 Рекомендации по практическому применению эффекта «оползня»

Ниже обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в апреле 2014, в сравнении с результатами, полученными в августе 2006 года, на одной и той же акустической трассе (рис. 11.4).

В апреле гидрологические условия на шельфовом участке трассы характеризовались наличием относительно слабого ($\sim 0.35 \text{ с}^{-1}$) отрицательного вертикального градиента скорости звука, в то время как в августе 2006 наблюдался придонный звуковой канал с отрицательным градиентом $\sim 1.5 \text{ с}^{-1}$ (рис. 11.4б). В глубоководной части трассы в апреле отмечается наличие ПЗК с не столь ярко выраженной верхней границей как в августе (рис. 11.4а). Волнение моря при проведении измерений составляло около 1 балла в первой точке до 5 баллов в третьей точке (144 км от излучателя). На мелководном участке трассы наблюдается небольшой уклон дна в сторону

увеличения глубин с плотностью песчаного грунта 1800-2000 г/см³, потом резкий континентальный склон и глубокое море.

Экспериментальные исследования проводились в течение пяти суток и заключались в приеме сложных фазоманипулированных сигналов, излучаемых источником расположенном на шельфе, в трех точках на удалении 27, 82 и 144 км. Использование сложных сигналов позволило произвести выделение на фоне окружающего шума приходов акустической энергии, распространяющихся по различным лучевым траекториям, т.е. получить импульсный отклик среды распространения. Методика проведения эксперимента была следующая. В 150 метрах от береговой черты на глубине 34 метра был установлен на грунт широкополосный пьезокерамический излучатель у мыса Шульца и соединен кабелем с береговым постом управления. Это был тот же излучатель, что и в 2006 году, но он был переустановлен при замене кабеля в 2013 году ближе к берегу. Один раз в минуту излучались сложные фазоманипулированные сигналы (М-последовательности, 255 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 500 Гц. Длительность сеансов излучения варьировалась от 20 до 120 минут. В качестве имитатора приемного тракта АНПА использовался радиогидроакустический буй, внутри которого размещаются радиопередатчик, модуль GPS, система единого времени (СЕВ) для синхронизации излучающей и приемной систем, усилитель акустических сигналов, источник питания. При помощи кабеля осуществляется соединение надводной части буя с гидрофоном, заглубленным ориентировочно до оси ПЗК, глубина которого определялась непосредственно перед постановкой с помощью гидрологического зонда. В центр анализа данных, расположенного на судне, по радиоканалу осуществляется передача поступающей с гидрофона акустической информации и данных с GPS о местоположении дрейфующего буя. Далее производилось вычисление функций взаимной корреляции принятых сигналов с репликами излученных для получения импульсного отклика канала распространения. На рис.1.6.5 приведены типичные импульсные характеристики, полученные в трех точках и, для сравнения, импульсные характеристики, полученные в 2006 году на приблизительно таких же расстояниях. Анализ этих характеристик показывает, что только на расстоянии 27 км они похожи на характеристики 2006 года и состоят из одного прихода, распространяющегося вблизи оси ПЗК. В остальных двух точках фиксируются ранние приходы “четверки” лучей, характерные для зонального распространения акустической энергии. За ними следуют приходы, распространяющиеся вблизи оси ПЗК (они четко фиксируются в точке №3) и под более крутыми углами. Эти отличия связаны с более слабой фокусировкой акустической энергии из-за меньшего, чем в августе, градиента скорости звука в верхней части ПЗК. В связи с этим поместить приемную систему вблизи оси сложнее, чем в августе и поэтому наблюдается зональная структура распространяющихся вблизи оси (десятки метров) лучей. Тем не менее, эксперимент показал, что

на данной акустической трассе формируется практически сплошная зона акустической освещенности с достаточным для измерения времен распространения превышением сигналов над помехой. Это наблюдалось во всех случайно выбранных для измерений точках в течение протяженных по времени (от 20 до 120 минут) сеансов излучения.

Полученные импульсные характеристики волновода использовались для последующего расчета дистанций между корреспондирующими точками по измеренным временам распространения максимального импульса и скоростям звука на оси ПЗК. Результаты расчетов расстояний приведены в таблице. Там же приведены скорректированные расчеты расстояний по средним скоростям звука на трассе, учитывающие тот факт, что вода на шельфовом участке более холодная, чем на оси ПЗК. Данные расчетов расстояний сравнивались с результатами обсервации по GPS и определялась ошибка позиционирования имитатора АНПА. В последнем столбце таблицы приведены значения разностей измерения расстояний акустическим методом и по данным GPS при использовании в расчетах скоростей звука на оси ПЗК (в скобках) и средних по трассе скоростей. Столь малые ошибки (сотые процента, как и в 2006 году) при более сложных условиях распространения обусловлены тем, что максимальные по амплитуде импульсы соответствовали практически прямолинейным лучевым приходам, распространяющимся вблизи оси ПЗК. Максимальный разброс во времени приходов импульсов, которые могут быть приняты за максимальный при расчете расстояний в точках №2 и №3, составляет 40 – 50 мс. Это может привести к ошибке определения расстояния в 70 – 80 метров. Но в нашем случае максимальные значения имели импульсы с разбросом во времени 20 - 30 мс, что и обусловило столь малые ошибки.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что эффект акустического “оползня” в условиях слабого отрицательного градиента скорости звука на шельфе также проявляется, но структура акустического поля захваченного ПЗК имеет более сложный характер с растянутой во времени импульсной характеристикой. Тем не менее, ее упорядоченная, стабильная и хорошо идентифицируемая структура позволяет рассчитывать на создание эффективных алгоритмов для перспективных систем позиционирования АНПА дальнего радиуса действия. Следует также отметить, что результаты данного исследования, полученные в контролируемых условиях, представляют несомненный интерес для развития теоретических и численных методов исследования закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических и гидрофизических полей на акваториях с переменным рельефом дна.

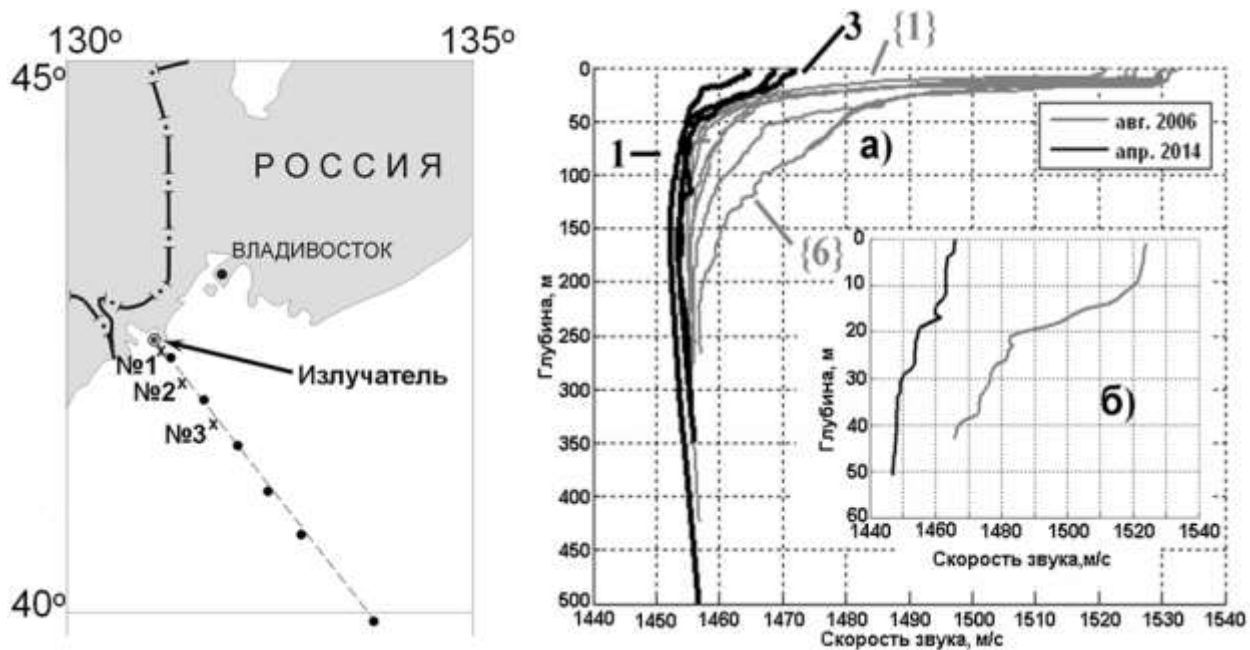


Рисунок 11.4 – (слева) Схема эксперимента (x – точки измерений 2014 г.; кружки – 2006 г.); (справа) Вертикальные разрезы скорости звука: а) в точках 1-3 (2014 г.), {1-6} (2006 г.); б) у излучателя (черным цветом отмечены профили, полученные в 2014г., серым – в 2006 г.)

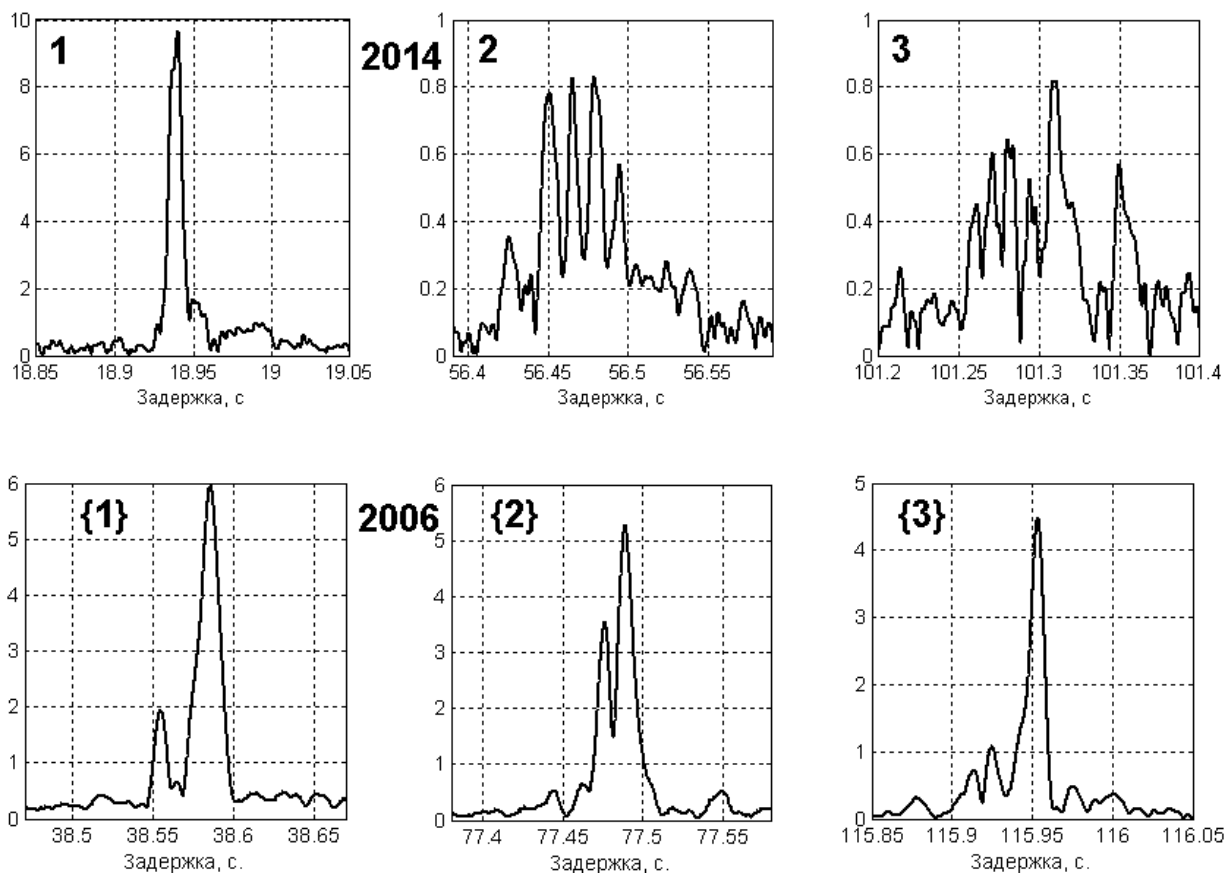
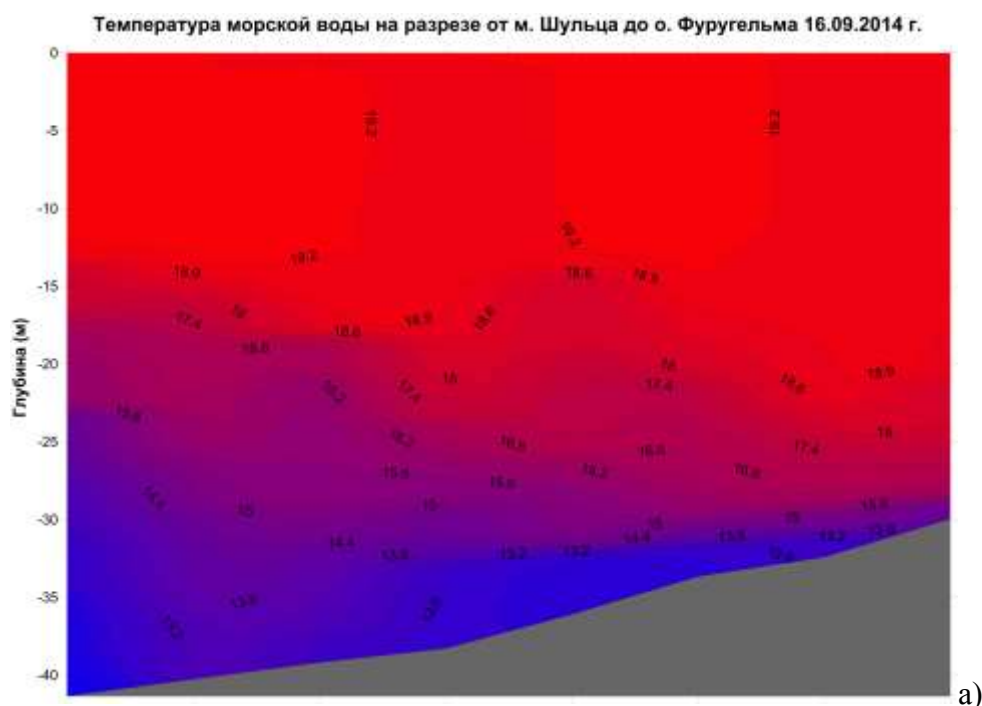


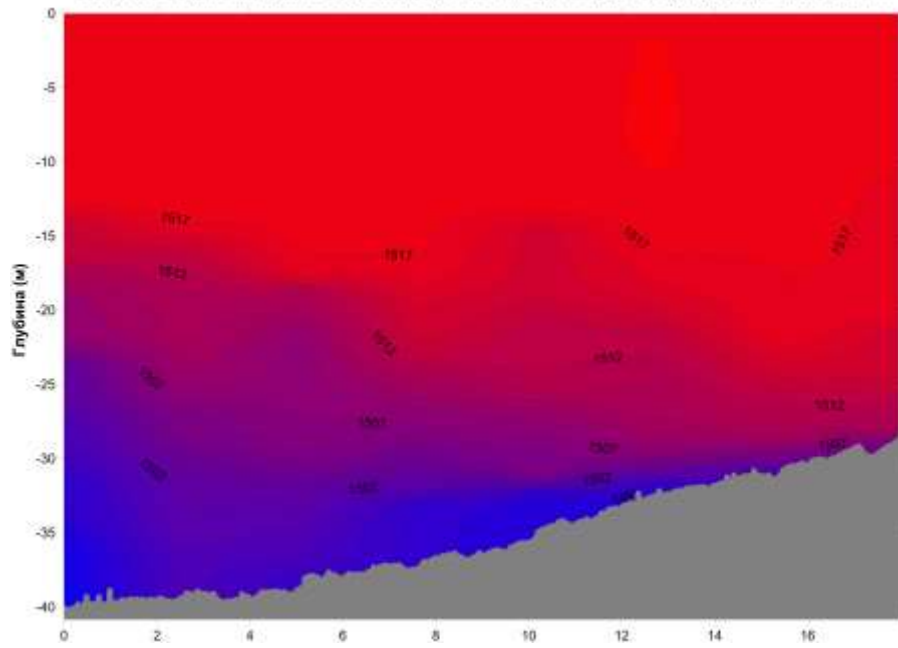
Рисунок 11.5 - Импульсные характеристики волновода (сверху) 2014 г. (1 – 27 км, 2 – 82 км, 3 – 144 км); (снизу) точки измерений 2006 г. ({1} – 56 км, {2} – 113 км, {3} – 169 км)

11.3 База данных гидрофизических параметров морской среды в районах предполагаемого функционирования гидроакустических средств навигации и связи

Для решения задач, обозначенных в предыдущих пунктах, отделом технических средств исследования океана проводятся круглогодичный мониторинг гидрофизических параметров морской среды в районах размещения технических средств навигации и связи. Примеры мониторинга приведены на рисунке 11.6. Результаты измерений гидрофизических параметров водной среды с помощью зонда CTD, полученные в период проведения акустических исследований, включали в себя значения температуры, электропроводности и гидростатического давления, а также рассчитанные по указанным параметрам соленость и скорость звука. Были выполнены полигонная съемка глубин и суточная станция по измерению указанных параметров, с целью определения их пространственной структуры и динамики во времени. Полученные значения используются для задания параметров численного моделирования, интерпретации экспериментальных результатов акустического зондирования и повышения эффективности систем связи и навигации за счет введения соответствующих поправок в алгоритмы функционирования этих систем.

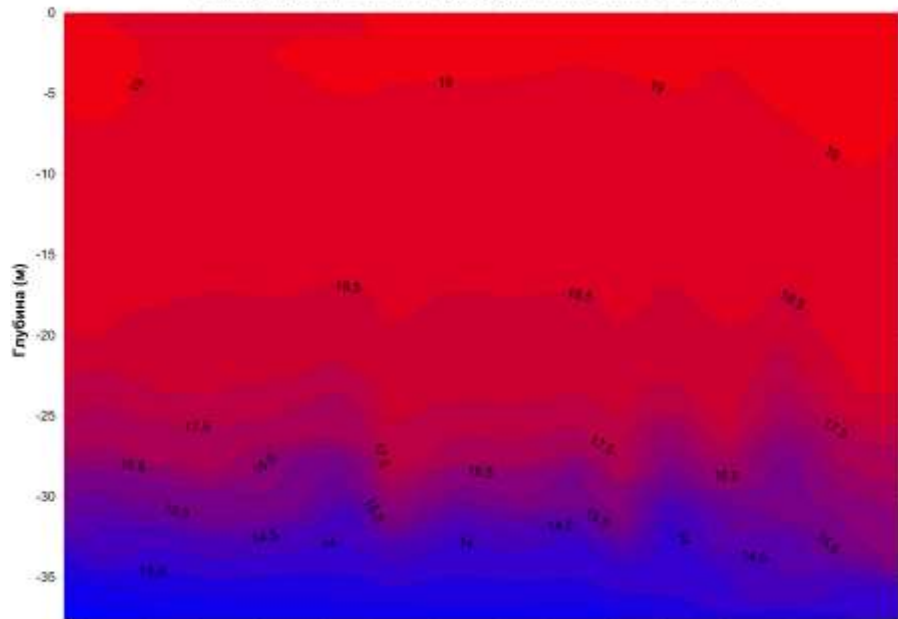


Скорость звука в морской воде на разрезе от м. Шульца до о. Фуругельма 16.09.2014 г.

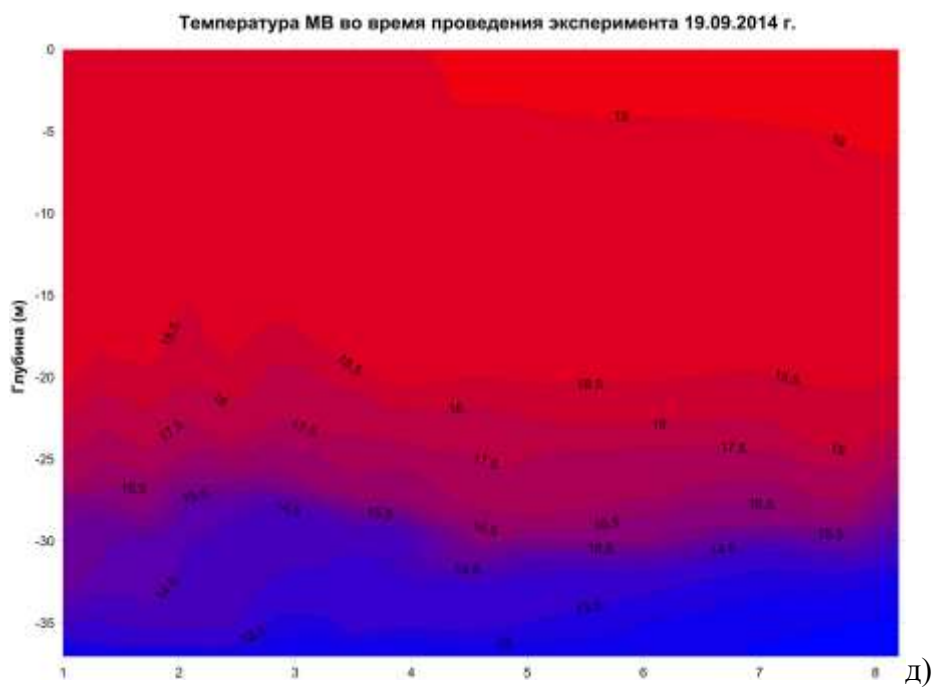
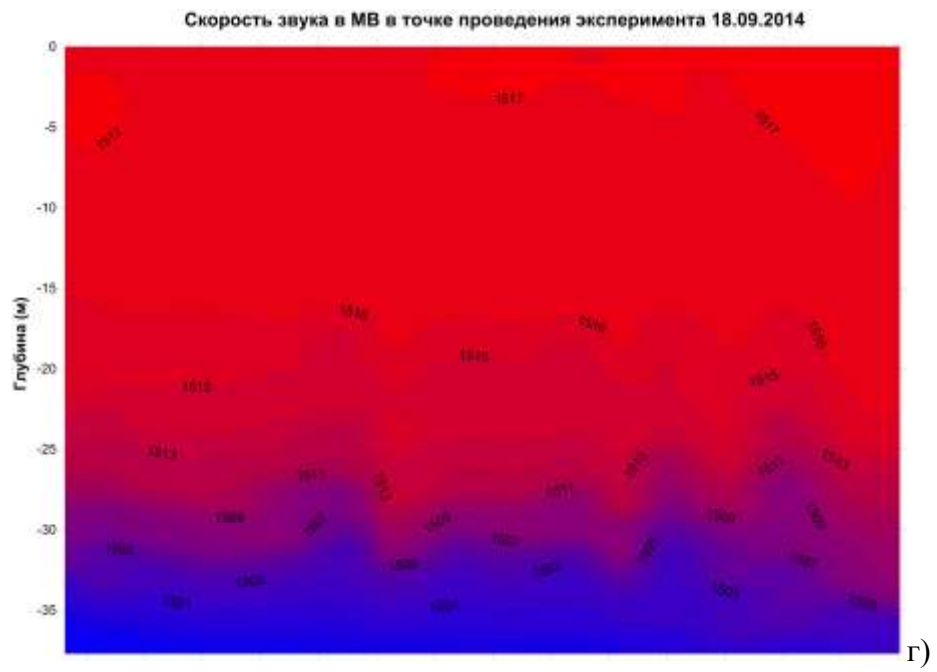


б)

Температура МВ в точке проведения эксперимента 18.09.2014



в)



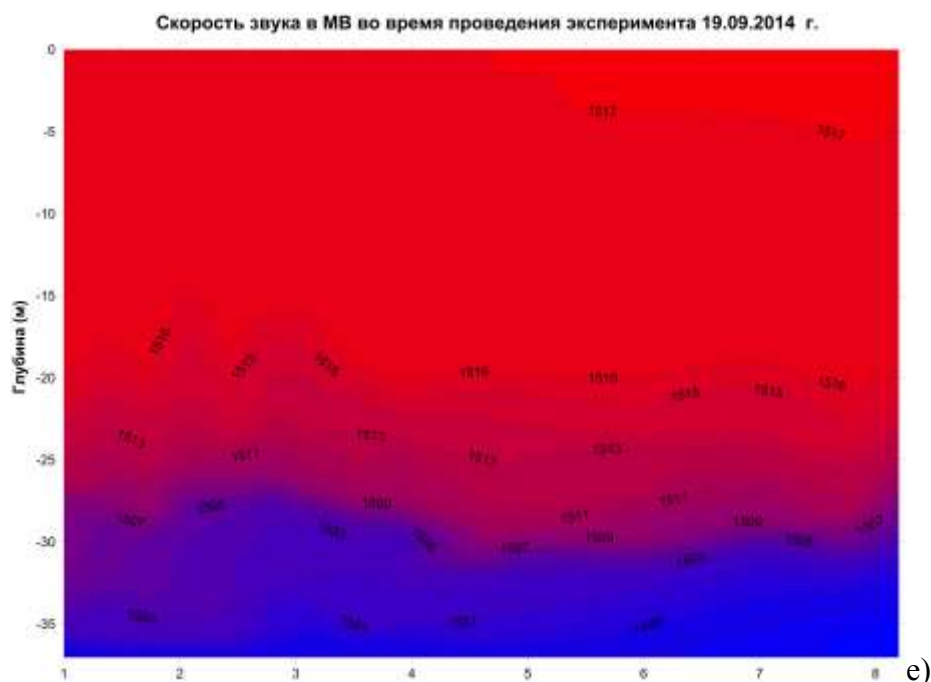


Рисунок 11.6 – Мониторинг гидрофизических параметров морской воды (МВ)

Список использованных источников

1. Ю.Н. Моргунов, А.А. Голов, М.С. Лебедев. Исследование влияния вариаций поля температур на точность измерения дистанций до подводных объектов // *Акустический журнал*, 2014. Т.60. № 1. С. 56–54.

2. Ю.Н. Моргунов, В.В. Безответных, Е.А. Войтенко, М.С. Лебедев. Измерительный комплекс для исследования и мониторинга изменчивости морской среды в заливах, бухтах и морских гаванях. // *Подводные исследования и робототехника*. 2014. №1/17. С. 68-73.

3. В.А. Акуличев, А. А. Голов, Ю. Н. Моргунов, В. В. Безответных, М. С. Лебедев, Кисеон Ким, Джу Сам Пак. Экспериментальные исследования возможности дистанционного измерения скорости и направления течения в мелководной акватории в Корейском проливе // *Доклады Академии наук*, 2014. Т.457. № 3. С. 343–346.

4. Е.А. Войтенко, Ю.Н. Моргунов. Исследование особенностей приёма гидроакустических сигналов вблизи дна и в грунте на шельфе Японского моря. // *Подводные исследования и робототехника*, 20014. №1/17. С. 73-78.

5. Ю.Н. Моргунов, В.В. Безответных, А.А. Голов, М. С. Лебедев, Kiseon Kim, Ju-Sam Park. Экспериментальная апробация аппаратно-программного комплекса для дистанционного

измерения скорости течений и температур в мелководных акваториях // Акустический журнал, 2014. Т.60, № 6. С. 623–632.

6. В.В. Безответных, А.В. Буренин, С.И. Каменев, Ю.Н. Моргунов, А.А. Тагильцев. Технические средства навигационного обеспечения миссий подводных объектов // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука, 2013. Кн. 2. С. 274-283.

7. С.И. Каменев, В.В. Безответных. Акустические системы передачи команд управления на подводные объекты.// Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука, 2013. Кн. 2. С. 284-295.

8. В.А. Акуличев, С.И. Каменев, Ю.Н. Моргунов, Е.А. Войтенко, Ю.А. Половинка, Д.С. Стробыкин. Томографический комплекс для исследования динамических процессов в шельфовой зоне моря // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука, 2013. Кн. 2. С. 296-304.

9. Акуличев В.А., Моргунов Ю.Н., Бородин А.Е. Региональная система подводного навигационного обеспечения и дистанционного управления // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7 №2 С. 36-40.

12 Разработка помехозащищенных акустических датчиков. Анализ шумов спокойного дыхания водолаза в интересах обнаружения и оценки состояния

Регистрируемые в диагностических целях на поверхности грудной клетки дыхательные звуки обычно лежат в диапазоне частот от 70-80 Гц до примерно 1000 Гц. Однако их качественная регистрация представляет известную проблему. В настоящее время для регистрации дыхательных звуков используются 3 типа контактно устанавливаемых на поверхность тела акустических датчиков:

- акселерометры [1,2];
- микрофоны со стетоскопической насадкой [3,4,5];
- и так называемые контактные датчики [6,7], в которых чувствительный пьезопреобразователь размещен между поверхностью грудной клетки и массой корпуса.

Каждый из этих типов датчиков обладает определенными достоинствами. Однако, все они подвержены воздействию помех, к числу основных из которых относятся внешние акустические шумы и контактные вибрационные воздействия, определяемые сокращением дыхательной мускулатуры, а при ручном удержании – и колебаниями руки оператора, удерживающего датчик.

Наиболее оптимальными для регистрации дыхательных шумов считаются датчики, содержащие жесткую стетоскопическую насадку, чаще всего конического профиля, в горловине которой установлен микрофон [5]. Тем не менее, данный прибор также подвержен воздействию обоих указанных видов помех, что ограничивает возможности его применения для регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки.

Известен помехозащищенный акустический датчик для стетоскопа, в котором для снижения уровня акустических и вибрационных помех датчик снабжают дополнительной воздушной камерой, образованной двумя коаксиальными цилиндрами разной высоты с общей плоскостью среза открытых торцов, а микрофон выполнен дифференциальным и установлен в закрытом торце меньшего цилиндра с возможностью контакта каждой стороны его мембраны соответственно с первой и второй воздушными камерами.

Однако контактные вибрационные воздействия приводят к появлению так называемой псевдозвуковой помехи (изменение давления в камере, образованной поверхностью тела и камерами устройства, с частотой вибрационного воздействия). Подавление псевдозвуковых помех в этом случае является неполным, поскольку их уровень прямо связан с уровнем полезного сигнала, а уменьшение площади поперечного сечения второй полости приводит к дисбалансу как

по полезному сигналу, так и по псевдозвуковой помехе. В результате при вычитании псевдозвуковая помеха полностью не подавляется.

Для защиты от внешних акустических помех предложено техническое решение, выбранное нами в качестве прототипа, в котором описаны способ и устройство регистрации дыхательных звуков при высоком уровне внешних акустических шумов [8]. С точки зрения устройства прототип содержит помимо жесткой стетоскопической насадки конического профиля, в горловине которой установлен основной микрофон, дополнительный микрофон, размещенный в корпусе датчика снаружи от стетоскопической насадки. Дополнительный микрофон не воспринимает дыхательные звуки с поверхности тела (полезный сигнал), а воспринимает только внешнюю акустическую помеху. В то же время основной микрофон, расположенный в горловине стетоскопической насадки, воспринимает и то и другое. Система обработки данного стетоскопа включает аддитивный фильтр и сумматор. В результате за счет компенсационной обработки вычитанием отклика дополнительного микрофона из отклика основного (с определенными весовыми коэффициентами) удастся ослабить воздействие внешней акустической помехи, не изменяя полезный сигнал. С точки зрения способа прототип предполагает регистрацию суммы колебательного смещения поверхности грудной клетки и звукового давления внешней акустической помехи основным микрофоном, регистрацию звукового давления внешней акустической помехи вторым микрофоном и определение разности откликов этих датчиков. В результате обеспечивается ослабление внешней акустической помехи. Однако, контактные вибрационные воздействия на основной микрофон, размещенный в горловине стетоскопической насадки, приводят к появлению так называемой псевдозвуковой помехи (изменение давления в камере, образованной поверхностью тела и стетоскопической насадкой, с частотой вибрационного воздействия), которая дополнительным микрофоном не фиксируется и, следовательно, прототип от этого вида помех не защищен.

Задача, на решение которой направлено предложенное техническое решение, состоит в повышении достоверности диагностической информации за счет увеличения помехозащищенности регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки человека путем одновременного ослабления как внешних акустических помех, так и помех, вызванных контактными вибрационными воздействиями (в том числе, псевдозвуковых помех).

Поставленная задача достигается способом регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки, включающим синхронную запись колебаний поверхности грудной клетки двумя датчиками, один из которых записывает колебательное смещение, и обработке откликов этих датчиков, при этом вторым датчиком производят запись динамической силы на поверхности грудной клетки, а обработку откликов датчиков осуществляют путем

дифференцирования отклика датчика колебательного смещения до отклика пропорционального колебательной скорости, нормирования откликов колебательной скорости и динамической силы к их максимумам амплитуды, вычисления комплексного взаимного спектра между нормированными откликами колебательной скорости и динамической силы, и определения вещественной части комплексного взаимного спектра этих откликов.

Поставленная задача достигается также устройством комбинированного приемника для записи дыхательных звуков на поверхности грудной клетки, содержащим корпус, жесткую стетоскопическую насадку конического профиля, два датчика, один из которых выполнен в виде микрофона и установлен в горловине насадки, и блок обработки, при этом с внешней стороны дна стетоскопическая насадка имеет плоскую кольцевую поверхность, на которой закреплен кольцевой продольно деформируемый пьезопреобразователь, тыльная сторона которого нагружена кольцевой массивной накладкой, установленной с обеспечением возможности тыльного доступа к микрофону и скрепленной с корпусом приемника, причем массивная накладка и корпус приемника отделены от механического контакта со стетоскопической насадкой, а блок обработки включает дифференцирующее устройство, подключенное к выходу микрофона, а выход дифференцирующего устройства подключен к первому входу вычислителя взаимного спектра, ко второму входу которого подключены электроды пьезопреобразователя.

Для пояснения сущности заявляемого решения на рис. 12.1 показано устройство комбинированного приемника, где 1 – жесткая стетоскопическая насадка, 2 – микрофон, 3 – кольцевой продольно деформируемый пьезопреобразователь, 4 – плоская кольцевая массивная накладка, 5 – корпус приемника, 6 – крышка корпуса, 7 – дифференцирующее устройство, 8 – вычислитель комплексного взаимного спектра, 9 – электрические кабели.

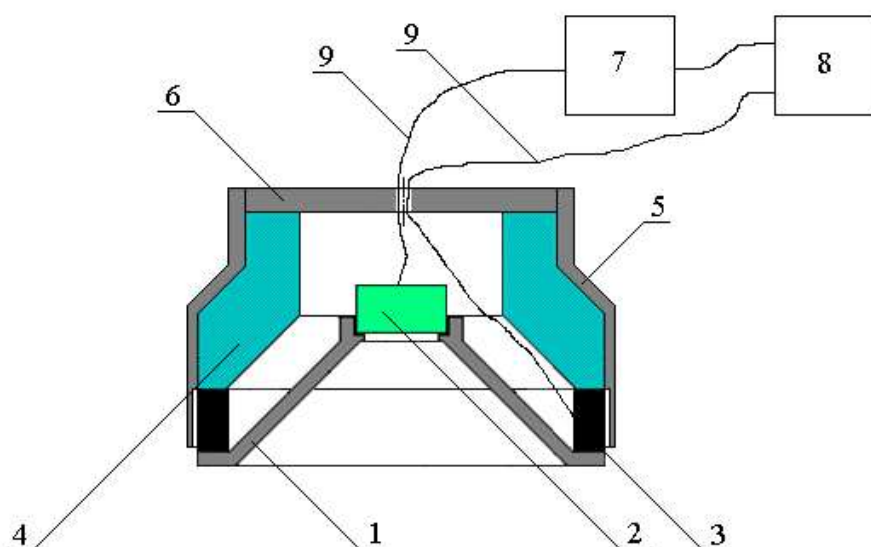


Рисунок 12.1 – Устройство помехозащищенного комбинированного приемника (обозначения в тексте)

На рис. 12.2 показана вещественная часть комплексного взаимного спектра шумов вдоха, полученная при использовании заявляемого решения (12.2) и – автоспектр сигнала, полученного в соответствии с прототипом (12.1).

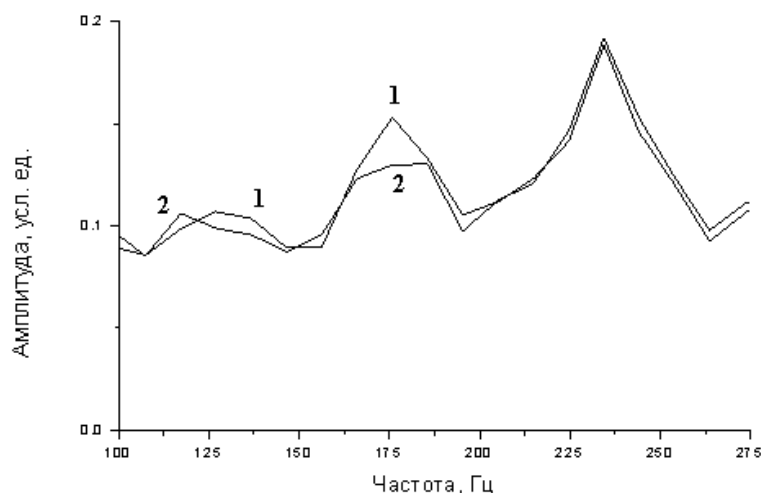


Рисунок 12.2 – Спектры шумов вдоха: 1) автоспектр сигнала, полученного в соответствии с прототипом, 2) вещественная часть комплексного взаимного спектра шумов вдоха, полученная при использовании заявляемого решения

Заявляемое техническое решение за счет используемых в приемнике датчиков двух разных типов, их специфической конфигурации размещения и предлагаемого способа обработки регистрируемых ими откликов позволяет одновременно подавить и акустические помехи и контактные вибрационные воздействия, тем самым повысить помехозащищенность регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки человека, что позволит увеличить достоверность диагностической информации.

В качестве примера осуществления заявляемого решения рассмотрим заявляемое устройство, показанное на рис. 12.1. Жесткая стетоскопическая насадка 1 выполнена из эбонита. Ее внешний диаметр $\varnothing 36$ мм, диаметр отверстия в основании $\varnothing 21$ мм. В горловине насадки, имеющей посадочный диаметр $\varnothing 10$ мм установлен электретный микрофон 2, в качестве которого использован прибор МКЭ-3 отечественного производства. Кольцевой продольно деформируемый пьезопреобразователь 3 склеен из 4 кольцевых пьезокерамических элементов ЦТС-19 с поляризацией по толщине, электрически соединенных последовательно. Фасонная кольцевая массивная накладка 4 выполнена из латуни. Корпус приемника 5 с крышкой 6 выполнены из

эбонита. Общая масса приемника 160 г. Выходы обоих датчиков с помощью экранированных кабелей 9 подключены к входам компьютерной лаборатории PowerLab (ADInstruments), где и записаны их отклики на искусственный зондирующий сигнал (Фиг.2а) и шумы глубокого вдоха (Фиг.2б). Операция дифференцирования отклика микрофона 2 выполняется программно в блоке 7. Затем сигналы сохранены в виде Wave файла. Операция вычисления комплексного взаимного спектра выполняется в пакете SpectraLab (SoundTechnology Inc.) в блоке 8. Получаемый спектр отображается в виде модуля и фазы и запоминается в виде текста. Вещественная часть комплексного взаимного спектра вычислена в программе MS Excel и отображена (рис. 12.2) в программе Microcal Origin (Microcal Software Inc.).

Для доказательства заявляемого технического результата рассмотрим особенности функционирования датчиков на поверхности грудной клетки человека.

Любой акустический датчик, обладающий массой M , устанавливается на слое мягких тканей (кожа и жировой слой), обладающих жесткостью K , и должен неизбежно иметь некоторую собственную частоту крепления (подвеса) в длинноволновом приближении колебаний резинового виброизолятора [10] и при малой вязкости биологических тканей, определяемую как

$$f_0 \approx (K/M)^{0.5}/2\pi. \quad (12.1)$$

При работе на частотах существенно ниже f_0 датчик будет совершать общие колебания с поверхностью грудной клетки. Напротив, при работе на частотах существенно выше f_0 датчик может считаться развязанным (виброизолированным) от колебаний среды, т.е. может рассматриваться заторможенным. Заметим, что линейный эффект виброизоляции по известному закону $20\lg(f/f_0)$ начинает проявляться с частот $(1,5-2)f_0$ и постепенно нарастает при повышении частоты.

Рассмотрим работу микрофона со стетоскопической насадкой на частотах $f \gg f_0$. Вследствие малости волновых размеров устанавливаемого на поверхность тела кольцевого края раструба стетоскопической насадки, образующей стетоскопическую камеру, и малой вязкости биологических тканей, продольные волны, бегущие изнутри грудной клетки, огибают его, в результате чего заторможенность самого датчика обеспечивает почти неискаженную передачу продольных колебательных смещений тканей внутрь жесткой стетоскопической камеры. В этом случае (камера существенно меньше длины продольной звуковой волны в воздухе) микрофоном воспринимается изменение давления p в неподвижной камере, вызванное изменением объема ΔV за счет колебательного смещения тканей поверхности грудной клетки внутрь камеры с амплитудой ξ . $\Delta V \approx D\xi$, где D – примерно соответствует площади основания стетоскопической камеры.

В соответствии с газовым законом Пуассона (адиабатическим процесс, как обычно, полагается при достаточно высоких частотах колебаний) запишем:

$$p_0 V_c^\gamma = (p_0 + p)(V_c - \Delta V)^\gamma, \quad (12.2)$$

где p_0 - атмосферное давление (стетоскопическая камера снабжена капиллярным компенсатором статического давления), V_c - начальное значение объема стетоскопической камеры, γ - показатель адиабаты, который для сухого воздуха составляет около 1,4 при температурах между 20°C и 100°C.

Вводя отношение $\Delta V/V_c \ll 1$, для второго сомножителя правой части (12.2) воспользуемся разложением в ряд $(1 - \Delta V/V_c)^\gamma = 1 - \gamma \Delta V/V_c$, пренебрегая вследствие малости отношения $\Delta V/V_c$ членами более высоких порядков (нелинейными). После очевидных преобразований (12.2) получим $p = (p_0 \gamma \Delta V/V_c)/(1 - \gamma \Delta V/V_c)$, где в знаменателе можно пренебречь малой добавкой $\gamma \Delta V/V_c$ по сравнению с единицей. Тогда окончательно имеем:

$$p = p_0 \gamma D \xi / V_c. \quad (12.3)$$

Таким образом, согласно (12.3), выходной сигнал рассматриваемого акустического датчика для частот, лежащих существенно выше частоты f_0 , оказывается пропорциональным смещению ненагруженных тканей грудной стенки ξ (границы). То есть, перед нами датчик колебательного смещения.

Теперь рассмотрим работу продольно деформируемого пьезопреобразователя. Датчик этого типа для диапазона частот $f \gg f_0$ развязан от колебаний тканей поверхности грудной клетки (т.е. может рассматриваться заторможенным). Следовательно, он представляет собой приемник динамической силы, регистрирующий величину $p D_1$, где D_1 - площадь контакта с телом кольцевого опорного элемента, p - звуковое давление в среде тканей грудной клетки. С учетом того что в локально плоской волне звуковое давление синфазно с колебательной скоростью $p = \xi \cdot \rho c$, отклик акустического датчика этого типа, в первом приближении, можно считать пропорциональным и колебательной скорости ненагруженных тканей грудной стенки.

Численные оценки [11] показывают, что собственная частота приемника (рис. 12.1) массой 160 г лежит в районе 20 – 33 Гц. Таким образом, начиная примерно со 100 Гц и выше акустические датчики комбинированного приемника (рис. 12.1) могут рассматриваться как датчики колебательного смещения и динамического давления (колебательной скорости) соответственно. Сдвиг фазы по полезному сигналу между этими датчиками очевидно равен -90° .

Вследствие операции дифференцирования, сдвигающей фазу датчика колебательного смещения на 90° в заявляемом решении, полезный сигнал, например, звук, проведенный при зондировании легких ЛЧМ сигналом имеет в диапазоне 100 – 700 Гц фазу взаимного спектра

около 0° . Напротив, и акустическая помеха, и контактная вибрационная (псевдозвуковая) помеха, вследствие операции дифференцирования отклика датчика колебательного смещения, получают фазу взаимного спектра, близкую к 90° . В результате при вычислении вещественной части взаимного спектра в нее попадает преимущественно полезный сигнал, тогда как помехи преимущественно остаются в мнимой части взаимного спектра. При выделении вещественной части взаимного спектра в заявляемом решении эти помехи естественно подавляются.

Результирующий эффект повышения помехозащищенности к псевдозвуковой помехе по сравнению с прототипом иллюстрируется также на рис. 12.2. Здесь сравниваются спектральные отклики микрофона со стетоскопической насадкой (тот отклик, который бы обеспечил в этом случае прототип) и заявляемого решения при регистрации шумов глубокого вдоха на поверхности грудной клетки. Полезный сигнал, основная частотная компонента которого лежит в районе 234 Гц одинаков по амплитуде в обоих решениях. Однако, псевдозвуковая помеха, основная частотная компонента которой лежит около 175 Гц, в заявляемом решении заметно ниже. Выигрыш заявляемого решения по сравнению с прототипом в этом случае составляет 1,2 раза.

Проблема контроля состояния и местоположения легководолаза при учебных и рабочих погружениях остается актуальной для многих практических приложений. В этом назначении применяются как методы передачи телеметрических данных по радио или гидроакустическому каналам связи [13], так и методы активной акустической локации [14] в водной среде. Пассивным акустическим методам также уделяется определенное внимание. Возможность пассивной локации водолазов-аквалангистов была показана ранее [15]. У дыхательных аппаратов замкнутого типа (ребризеров) шумность намного ниже, чем у аквалангов. Недавно появилась работа [16], в которой описываются экспериментальные результаты пассивной локации водолаза с таким дыхательным аппаратом по высокочастотным шумам на удалении до 120 м от антенной решетки с апертурой 1.5 м.

Цель данной работы – анализ применимости для контроля состояния и местоположения легководолаза его собственных низкочастотных шумов дыхания.

Показана возможность выделения низкочастотных квазипериодических компонент дыхательных шумов, обеспечивающих мониторинг легководолаза в натуральных условиях.

Выполнена запись шумов спокойного дыхания легководолазов, находящихся под водой в акваланге и в дыхательном снаряжении замкнутого типа [17]. Датчик в виде электретного микрофона со стетоскопической насадкой [18] крепился под сухим комбинезоном над трахеей водолаза в области яремной впадины. Акустический сигнал оцифровывался 16 разрядным АЦП с частотой дискретизации 8 кГц и передавался через эквивалент радиогидроакустического буя по сети Wi-Fi на компьютер станции слежения, где регистрировался в пакете программ SpectraLab

(SoundTech Inc.). Сигналограмма и спектрограммы (1024 отсчета, перекрытие 50%, окно Хэннинга, логарифмический масштаб по уровню) фрагментов исходных записей показаны на рис. 12.3 и рис. 12.4.

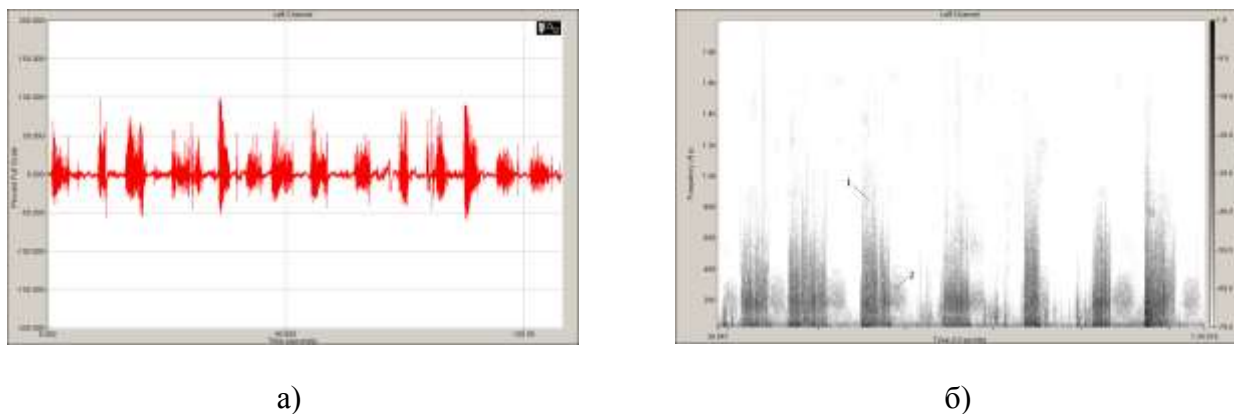


Рисунок 12.3 – Шумы водолаза-аквалангиста:

а) сигналограмма, б) спектрограмма, 1 – выдох, 2 – вдох

Кроме того, выполнена запись шумов водолаза-аквалангиста с помощью установленного вблизи дна одиночного ненаправленного гидрофона в условиях мелководной акватории. Водолаз постепенно удалялся от гидрофона на дистанцию до 100 м. При этом сигналы с гидрофона оцифровывались 24 разрядным АЦП с частотой дискретизации 44,1 кГц. Выполнены фильтрация в полосе частот 200-500 Гц и квадратичное детектирование с временем накопления 0,25 с (рис. 12.5).

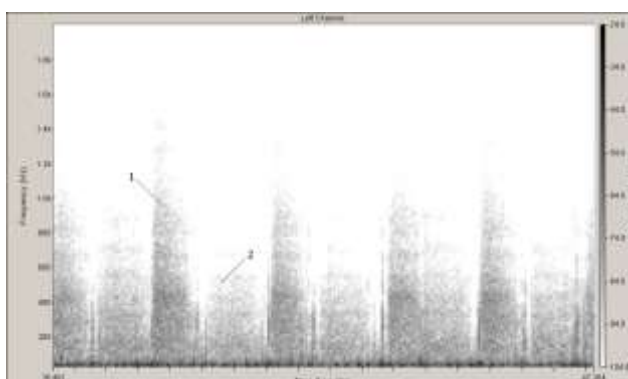


Рисунок 12.4 – Спектрограмма шумов водолаза в снаряжении замкнутого типа:

1 – выдох, 2 – вдох

В дыхательных шумах водолаза-аквалангиста на сигналограмме (рис. 12.3а) хорошо просматриваются мощные шумы выдоха в полосе частот до примерно 1 кГц, судя по их звучанию на слух, связанные с выбросом пузырьков воздуха в воду. Напротив, шумы вдоха существенно слабее и отчетливо видны только на спектрограмме (рис. 12.3б) в диапазоне частот ниже 400 Гц.

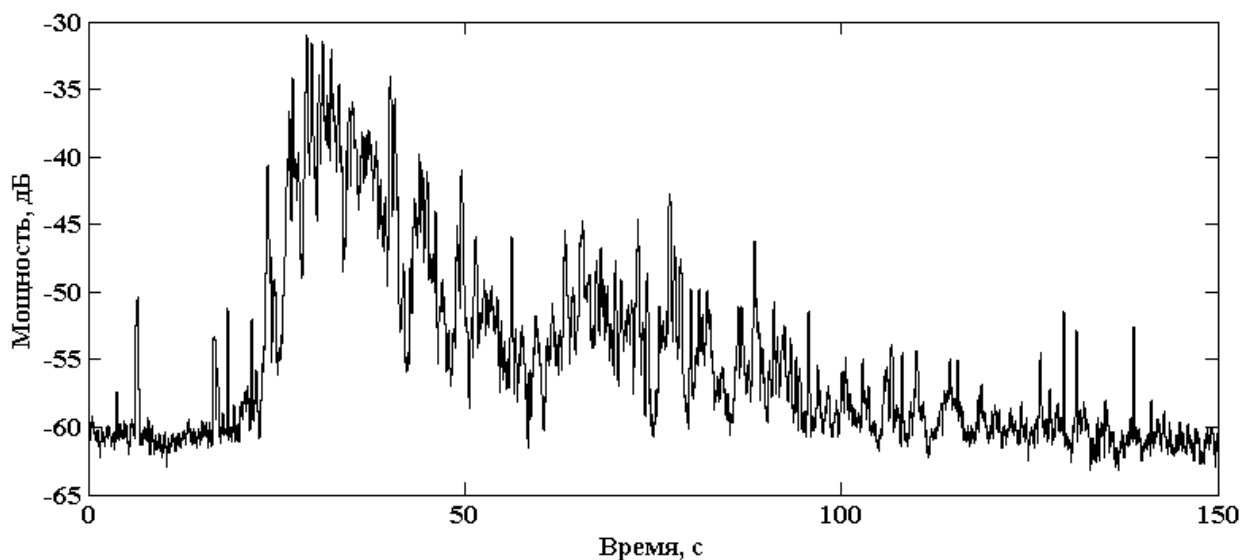


Рисунок 12.5 – Огибающая сигналограммы шумов водолаза-аквалангиста в процессе его удаления от гидрофона

Шумы водолаза в снаряжении замкнутого типа еще слабее по уровню и практически не просматриваются по сигналограмме на фоне помех. Основными помехами в этом случае являются пульсовая волна и псевдозвук, связанный с изменениями давления в стетоскопической камере акустического датчика из-за колебаний его корпуса, вызываемых работой дыхательной мускулатуры. Тем не менее, дыхательные шумы хорошо видны на спектрограмме (рис. 12.4). При этом основная часть энергии шумов выдоха сосредоточена в полосе частот ниже примерно 1,5 кГц, тогда как шумов вдоха – ниже 1,0 кГц.

Итак, судя по спектрограммам (рис. 12.3б, рис. 12.4), оба сигнала характеризуются наличием квазипериодических компонент, вызванных амплитудной модуляцией широкополосных дыхательных шумов ритмом дыхательных маневров водолаза. Очевидно, что эти сигналы в значительной мере определяют сигнатуры шумов, излучаемых водолазом в воду. Если в части спектральных характеристик дыхательных шумов водолазов при их регистрации непосредственно в воде и можно ожидать некоторых изменений, то периоды модуляции, очевидно, останутся теми же. Данные модуляции, частота которых лежит в диапазоне 0,1 – 1 Гц (физиологические пределы дыхательного ритма), не характерны для большинства технических или биологических объектов, и потому могут быть использованы в качестве классификационного признака при обнаружении

легководолаза на фоне подводных шумов акватории. Периодическая амплитудная модуляция шумов, как известно, может быть выделена различными методами. В частности, фильтрация в оптимизированной полосе частот и детектирование огибающей предлагаются в [19].

На рис. 12.5 приведен пример оценивания в относительных единицах средней мощности (пропорциональна огибающей сигналограммы) шумов движущегося аквалангиста в полосе частот 200—500 Гц. Оценивание выполнено путем квадратичного детектирования (с усреднением на интервале 0,25 с) сигнала с выхода одиночного ненаправленного гидрофона, когда водолаз-аквалангист удалялся от него со средней скоростью 0,5 м/с. На удалениях до 50 м хорошо заметны квазипериодические максимумы огибающей, которые, судя по звукам, воспринимаемым на слух, соответствуют выдохам водолаза-аквалангиста.

На рис. 12.6 приведен график оценки спектральной плотности мощности огибающей шумов для интервала 30 – 130 с (см. рис. 12.5). Частота дискретизации огибающей составляла 91,875 Гц, использовалось 4096-точечное БПФ, разрешение по частоте составляло 0,0224 Гц. Усреднено 17 спектров, сдвинутых последовательно на 512 выборок. На рис. 12.4 обнаруживаются два пика, соответствующие частотам 0,359 Гц и 0,539 Гц, которые можно рассматривать как раздвоение единого спектрального максимума, соответствующего частоте дыхания. Это раздвоение спектрального максимума (рис. 12.6), вероятно, связано с изменением частоты дыхания водолаза при физической нагрузке, вызываемой движением на ластах вдаль от гидрофона.

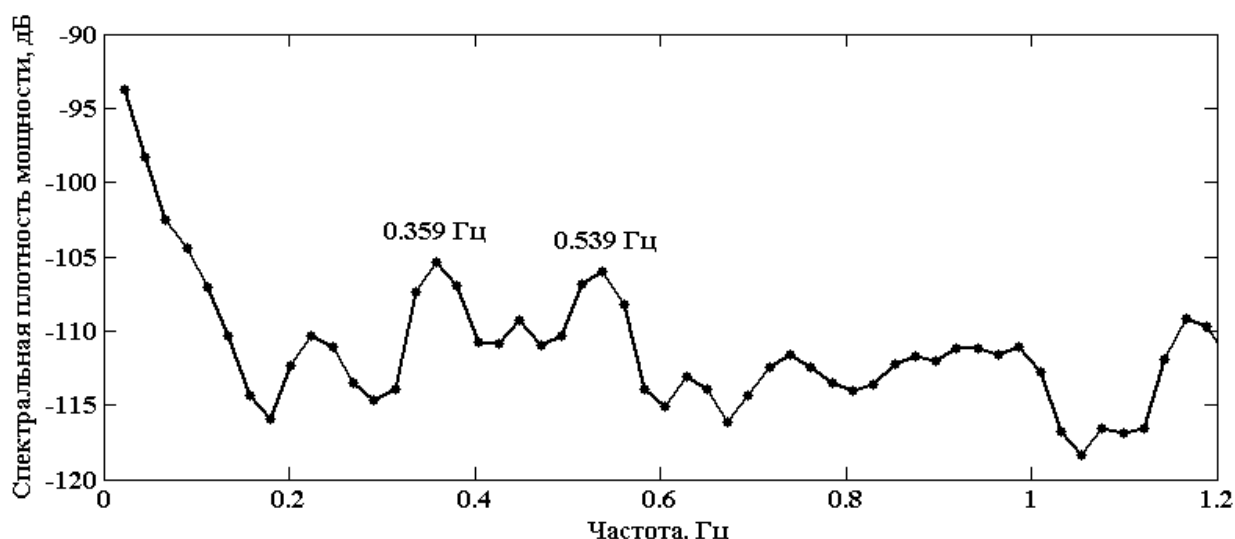


Рисунок 12.6 – Спектральная плотность мощности огибающей сигналограммы шумов водолаза-аквалангиста (рис. 12.5, на интервале 30 – 130 с)

Выделенные тем или иным способом квазипериодические составляющие дыхательных шумов легководолаза можно использовать для вычисления таких физиологических параметров как средняя частота дыхания, вариабельность частоты дыхания и, возможно, соотношение продолжительностей фаз вдоха и выдоха. Эти физиологические параметры в известной мере характеризуют не только вентиляционную функцию легких, но и общее состояние водолаза. Действительно, известно, что частота дыхания при отравлении кислородом (гипероксии) снижается, тогда как при отравлении углекислым газом и чрезмерных физических нагрузках – увеличивается [20]. Удлинение фазы выдоха по отношению к фазе вдоха является известным признаком бронхиальной обструкции, которая, в частности, может возникать и при гипербарической гипероксии у водолазов [6]. Изменение вариабельности частоты дыхания характеризует процессы регуляции дыхательной активности и может быть ранним признаком нарушений в этой части [10]. Таким образом, вычисление указанных параметров и их сравнение с нормами, в том числе и предварительно определяемыми индивидуально для каждого из легководолазов, может быть использовано для контроля их состояния и принятия решения о необходимости прекращения погружения.

С другой стороны, квазипериодические характеристики шумов, связанные с дыханием водолаза, целесообразно использовать для определения задержек времени прихода на несколько разнесенных гидрофонов с помощью корреляционного анализа, как исходных сигналов, так и их огибающих (рис. 12.5). В результате, с применением методов триангуляции становится возможной оценка местоположения водолаза под водой относительно гидрофонов с известными (например, показания ГЛОНАСС/GPS и глубины мест установки) координатами в пространстве. Для повышения помехоустойчивости вместо одиночных гидрофонов можно по аналогии с [16] использовать антенные решетки с целью дополнительной пространственной фильтрации. Знание с той или иной точностью местоположения водолаза в пределах акватории важно как для контроля выполнения планируемых работ, так и организации, при необходимости, успешной спасательной операции.

Поскольку низкочастотные дыхательные шумы являются неустранимой частью эмиссионного излучения легководолазов, выделение вышеописанных квазипериодических модуляций в общем фоне шумов моря может оказаться полезным и для наблюдения за акваториями в антитеррористических целях.

Список использованных источников

1. Бухман Е.В., Гершман С.Г., Свет В.Д., Яковенко Г.Н. Спектральный анализ поверхностных акустических колебаний на теле человека // Акустический журнал, 1995, т. 41, № 1, С.50-58.

2. Коренбаум В.И., Нужденко А.В., Тагильцев А.А., Костив А.Е. Исследование прохождения сложных звуковых сигналов в дыхательной системе человека // *Акустический журнал*. 2010, т. 56. № 4. С.537-544.
3. Kraman S.S., Wodicka G.R., Pressler G.A., Pasterkamp H. Comparison of lung sound transducers using a bioacoustic transducer testing system // *J Appl Physiol*. 2006. V. 101, № 2; P.469-476.
4. Murphy R.L., Vyshedskiy A., Power-Charnitsky V.A., Bana D.S., Marinelli P.M., Wong-Tse A., Paciej R. Automated lung sound analysis in patients with pneumonia // *Resp. Care*. 2004. V. 49. № 12. P.1490-1497.
5. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Костив А.Е., Горовой С.В., Почекутова И.А., Бондарь Г.Н. Акустическая аппаратура для исследования дыхательных звуков человека // *Приборы и техника эксперимента*, 2008. Т. 51, № 2, С.147-154.
6. Gavriely N., Nissan M., Rubin A.H., Cugell D.W. Spectral characteristics of chest wall breath sounds in normal subjects // *Thorax*. 1995. V. 50, P.1292-1300.
7. Артемьев А.М., Макаренков А.П., Макаренкова А.А. Исследование эффективности электроакустических преобразователей электронных стетофонендоскопов // *Акустичний висник*. 2009. т. 12, № 1, С.3-10.
8. Patel S.B., Callahan T.F. An adaptive noise reduction stethoscope for auscultation in high noise environments // *J. Acoust. Soc. Am*. 1998. V.103 (5), P.2483-2488.
9. Патент РФ 2496421 Способ регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки и комбинированный приемник для осуществления способа / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А. Патентообладатель Тихоокеанский океанологический институт, № 2012133360 заявл. 03.08.2012. опубл. 27.10.2013. Бюл. № 30. МПК А61В7/04, G10К11/16.
10. Ляпунов В.Т., Лавендел Э.Э., Шляпочников С.А. Резиновые виброизоляторы // *Справочник*. Л.: Судостроение. 1988. С.10-36.
11. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Дьяченко А.И., Костив А.Е. Сравнение характеристик акустических датчиков различных типов при регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки человека // *Акуст. Журн*. 2013, т. 59, №. 4. С. 530–538.
12. Патент 95490 Российская Федерация МПК А61В5/0205. Телеметрическая система контроля состояния водолаза / Костив А.Е., Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Градобоев В.Н. заявл. 30.03.2010; опубл. 10.07.2010, Бюл. №19.
13. Овчинников А.В., Берков Ю.А., Павлов Г.Г. Новая станция гидроакустической связи и пеленгования для водолазов «Пловец» // *Морская радиоэлектроника* 2012. №1. С.21-25.
14. Викторов Р.В., Колмогоров В.С., Кречетов Д.Г., Плюхин В.В., Черкашин Ю.В. Адаптивная фильтрация сигнала при регистрации прохода подводного пловца // *Датчики и системы*. 2011. № 11. С.44-49.

15. Stolkin R., Sutin A., Radhakrishnan S., Bruno M., Fullerton B., Ekimov A., Raftery M. Feature based passive detection of underwater threats // Proc. SPIE 6204, 40–49 (2006).
16. Fillinger L., Hunter A.J., Zampolli M., Clarijs M.C. Passive acoustic detection of closed-circuit underwater breathing apparatus in an operational port environment // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V.132. No.4. P.EL310-EL316.
17. Почекутова И.А., Коренбаум В.И. Акустическая оценка влияния одиночного погружения в водолазном снаряжении закрытого типа на вентиляционную функцию легких // Физиология человека. 2011. т.37. №3. С.76-82.
18. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Костив А.Е., Горовой С.В., Почекутова И.А., Бондарь Г.Н. Акустическая аппаратура для исследования дыхательных звуков человека // Приборы и техника эксперимента. 2008. Т.51. №2. С.147-154.
19. Машошин А.И. Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов // Акустический журнал. 2013. т.59. №3. С.347-353.
20. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. Водолазные спуски и их медицинское обеспечение. М.: «Слово». 2001. С.377-380.

13 Исследование влияния функциональных проб на полосовые характеристики форсированного выдоха

С целью дальнейшего развития метода акустической диагностики бронхиальной обструкции на основе регистрации и анализа продолжительности трахеальных шумов форсированного выдоха (ФВ) в полосе частот 200 – 2000 Гц (FETa), разработанного ранее [1,2] создан алгоритм вычисления 200-Гц полосовых продолжительностей шумов: $t_{200-400}$, $t_{400-600}$, $t_{600-800}$, $t_{800-1000}$, $t_{1000-1200}$, $t_{1200-1400}$, $t_{1400-1600}$, $t_{1600-1800}$, $t_{1800-2000}$. На материалах ранее набранной выборки, состоящей из 60 здоровых молодых мужчин (Healthy) и 58 больных бронхиальной астмой (БА) с подтвержденной спирографически бронхиальной обструкцией проанализировано влияния функциональной пробы с бронхорасширяющим препаратом (бронходилатационной пробы) на полосовые характеристики форсированного выдоха.



а)

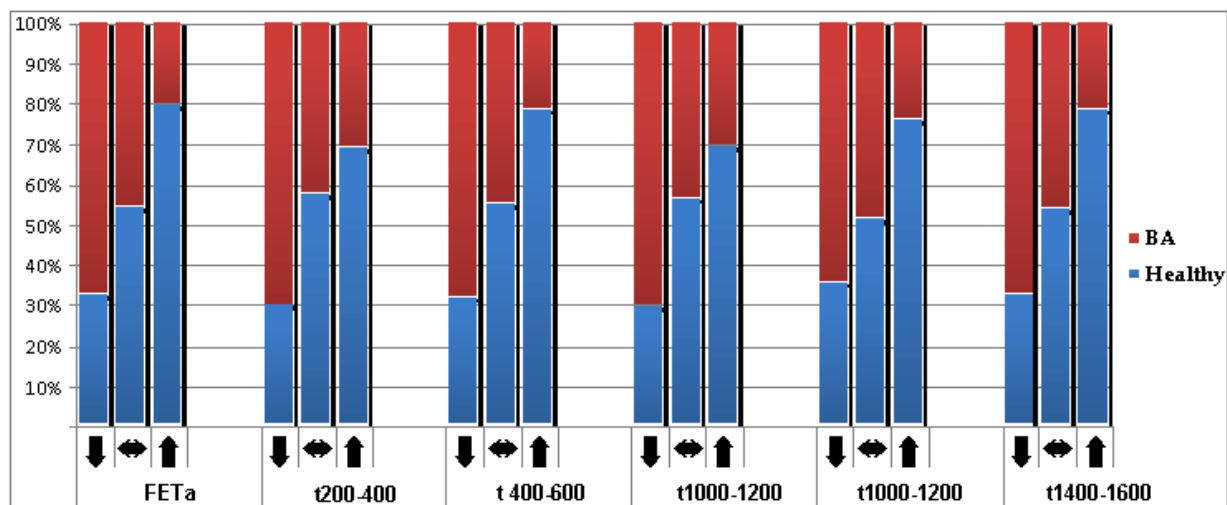


б)

Рисунок 13.1 – Прибор (а) и процедура записи дыхательных шумов ФВ (б)

Статистически значимые различия выявлены во встречаемости различных типов откликов на бронходилатационную пробу (уменьшение, отсутствие динамики, увеличение) для параметров FETa, $t_{200-400}$, $t_{400-600}$, $t_{600-800}$, $t_{1000-1200}$, $t_{1200-1400}$, $t_{1400-1600}$ в группах больных бронхиальной астмой и здоровых (рис. 13.2). Уменьшение этих параметров характерно для больных бронхиальной астмой ($p = 0,02-0,001$). Напротив, увеличение – превалирует у здоровых (p

= 0,03-0,0006). Таким образом, выявленные эффекты могут быть полезны для повышения эффективности медицинской диагностики.



Fig

Рисунок 13.2 – Встречаемость типов отклика акустических параметров на бронходилатационную пробу у больных (BA) и здоровых (Healthy)

Список использованных источников

- 1.Korenbaum V.I., Pohekutova I.A., Kostiv A.E., Tagiltsev A.A., Shubin S.B. Technology of Human Pulmonary Function Testing by Means of Tracheal Forced Expiratory Noises Analysis // IFMBE Proceedings. 2013. V.39, p. 2192-2195.
- 2.Pohekutova I.A., Korenbaum V.I. Diagnosis of hidden bronchial obstruction using computer-assessed tracheal forced expiratory noise time // Respirology 2013, V.18. No.3. P.501-506.

Заключение

При обработке экспериментальных данных по вариациям гидросферного давления, полученных с помощью лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, показано, что изменение периодов ветровых волн при выходе их из зоны действия циклонов может быть связано не только с дисперсией, но и с эффектом Доплера и вариациями скорости и направления ветра в зоне действия циклонов.

В результате проведённого цикла экспериментальных исследований с применением лазерно-интерференционных приёмных систем установлено, что при движении ветровых волн по шельфу убывающей глубины происходит их трансформация с уменьшением периода и энергии.

Исходя из анализа обработки записей лазерного деформографа и сопоставляя их с гидрологической обстановкой в районе экспериментального полигона, можно сделать следующий вывод, что величина трансформации энергии гидроакустических волн на границе геосфер в осенний период была больше, чем в начале лета. Данный факт напрямую зависит от сезонных температурных флуктуаций в акватории проведения исследовательских работ. В июне из-за интенсивного нагрева воды в приповерхностном слое образуется звуковой канал. С учётом этого условия и глубины погружения излучателя, большая часть акустической энергии будет концентрироваться в данном канале, верхняя и нижняя границы которого располагаются на глубинах 2, 5 и 16 м, соответственно. В то же время по результатам исследований, проведённых осенью, известно, что в отсутствие активных циклонов в Японском море верхний слой воды еще остаётся достаточно нагретым (характерный слой скачка начинается с глубины 20 м), тем самым при работе излучателя, большая часть акустической энергии захватывается придонным звуковым каналом и, соответственно, большая часть этой энергии уходит в дно.

Проведены испытания и отработка методики работы с низкочастотной гидроакустической излучающей системой при взаимодействии с гидрографическими судами военно-морского флота, в результате чего установлено, что работа с излучателем возможна только при небольшом волнении и в отсутствие сильного дрейфа. Так как при увеличении волнения заметно меняется мощность излучения. Поэтому необходимо использование системы пневматической компенсации, а также внесения некоторых конструктивных изменений системы для повышения ее гидродинамических характеристик.

Сделаны выводы о преимуществах использования наиболее низкочастотных гидроакустических излучающих систем в исследовательских работах.

Получены экспериментальные данные о распространении энергии низкочастотных гидроакустических колебаний и их трансформации в энергию сейсмоакустических колебаний в условиях глубокого и мелкого моря при различных удалениях станции излучения от приемника.

Получены данные о вертикальном градиенте температуры воды Японского моря при удалении от береговой приемной станции до 550 км в конце осени

Результатом выполнения эксперимента является пополнение знаний о волновых процессах, происходящих в геосферах и их взаимосвязях. Полученные знания возможно применять в решениях гидроакустических задач; исследованиях распространения волновых процессов в прибрежных зонах. Приборная база исследовательского полигона, используемая при проведении экспериментальных работ, позволяет проводить исследования широкого спектра океанологических процессов по распространению волн как природного, так и техногенного характера, а также волновых процессов планетарного масштаба.

Перспективой развития исследований, выполняемых в данном направлении, является решение обратной томографической задачи по реконструкции полей скоростей звука в геосферах шельфовой области моря. Исследования данной задачи является важной частью в перспективном освоении природных ресурсов и сохранения экологии в прибрежных областях моря. При использовании в качестве приёмников полезных сигналов приборов, принцип работы которых основан на лазерно-интерференционных методах, можно подробно исследовать структуру морского дна и проводить решение данных задач. Изучая закономерности и эффективность трансформации энергии на границе раздела геосфер с применением искусственно излучающих и приемных систем, можно применить полученные результаты при исследовании инфразвуковых природных процессов и низкочастотных техногенных звуковых источников.

Показано, что методы рассеяния звука позволяют изучать мелкомасштабную структуру водной среды в шельфовой части моря и ее пространственно-временную изменчивость, связанную с проявлением внутренних волн, наличием пузырьков, планктона, турбулентных образований, твердых взвесей.

Возможность производить акустические зондирования прямо по ходу движения судна позволяет получать непрерывные подробные картины распределения биомассы в обширных районах, что существенно дополняет традиционные методы облова биомассы, которые отличаются значительной трудоемкостью. Оценка биомассы, полученная на основе данных по рассеянию звука, совпадает с результатами биологических измерений *in situ*. Полученные зависимости, связывающее коэффициент рассеяния звука $m\nu$ и распределение биомассы в морской среде, представляют интерес для использования их для оперативного акустического мониторинга биоресурсов непосредственно на ходу судна.

Впервые проведены сравнительные исследования рассеяния звука в Японском море и в восточной Арктике. Исследования выявили существенно большее рассеяние звука в восточной Арктике, что связано с большей концентрацией планктона, суточная миграция которого существенно отличается от миграции планктона в теплых морях.