

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Дальневосточное отделение

Тихоокеанский океанологический институт

имени В. И. Ильичева

На правах рукописи

ЛЕБЕДЕВ Михаил Сергеевич

**АЛГОРИТМЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕЧЕНИЙ
В МЕЛКОМ МОРЕ**

Специальность 01.04.06 - Акустика

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н. Ю.Н. Моргунов

Владивосток – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	2
Введение.....	4
Глава 1. Тенденции развития дистанционных средств и методов акустической томографии океана (АТО)	19
1.1 Предпосылки возникновения акустических методов исследования.....	19
1.2 Теоретическое обоснование лучевой томографии.....	21
1.3 Аналитический обзор работ по АТО.....	27
1.4 Основные проблемы практической реализации АТО.....	32
Выводы по главе.....	40
Глава 2. Методика и техника эксперимента, программные средства сбора, обработки и визуализации данных.....	42
2.1 Томографический комплекс для решения задачи акустической термометрии.....	43
2.2 Алгоритм реконструкции вертикального профиля скорости звука (температуры) и вариаций уровня морской поверхности.....	49
2.3 Программа <i>МИК</i> (моделирование, идентификация, калибровка).....	60
2.4 Аппаратно-программный комплекс для мониторинга морских течений вдоль стационарной трассы.....	66
2.5 Программа <i>3PCurM</i> для определения параметров вектора течения (3-точечная схема измерений).....	75
Выводы по главе.....	80
Глава 3. Результаты натурных экспериментальных исследований.....	82
3.1 Акустический мониторинг гидрофизических процессов вблизи о. <i>Норёк</i> (<i>Корейский пролив</i>).....	82
3.2 Решение задачи акустической термометрии в б. <i>Витязь</i>	97

3.3 Оценка качества восстановления гидрофизических параметров.....	107
3.4 Исследование приливных явлений в <i>Корейском проливе</i>	113
Выводы по главе.....	122
Заключение.....	124
Список сокращений и условных обозначений.....	127
Список литературы.....	128
Приложение А.....	140
Приложение Б.....	142
Приложение В.....	146
Приложение Г.....	149
Приложение Д.....	153
Приложение Е.....	159

ВВЕДЕНИЕ

Изучение Мирового океана на протяжении долгого периода времени является в научно-техническом отношении актуальной задачей. Возникновение новых проблем ставит перед научным сообществом множество вопросов, все более сложных и далеких от своего решения. Становится понятным, что привлечение современных средств, развитие технологий и методов исследования обеспечит выход на новый качественный уровень.

Основной способ получения сведений о характеристиках океанской среды - использование приборов, располагаемых на океанологических судах. При экспериментальном измерении различных параметров морской среды с помощью традиционных методов необходимой процедурой является опускание на заданные глубины прибора, напрямую контактирующего со средой. Данный принцип работы остается неизменным, несмотря на то, что техника таких измерений постоянно совершенствуется. Такие исследования требуют организации дорогостоящих экспедиций с использованием специальных кораблей, способных работать в любой точке Мирового океана при любых гидрометеорологических условиях. При этом, такие исследования могут проводиться лишь в течение ограниченного времени.

В настоящее время тенденции развития микроэлектроники и вычислительной техники, стремление к миниатюризации приборов для измерения, накопления данных и цифровой обработки, уменьшение их энергопотребления все больше способствуют созданию полностью автономных и мобильных измерительных приборов, которые могут быть установлены в различных районах Мирового океана и способны проводить измерения в долгосрочной перспективе. Наряду с этим возрастает роль бесконтактных, дистанционных методов исследования в океанологии, которые являются значительно менее трудоемкими.

Как известно, единственными из волн известной физической природы, свободно распространяющимися в морской среде, являются звуковые волны. Влияние большого многообразия физических процессов и явлений, присущих различным районам Мирового океана, на распространение акустических волн не до конца изучено. Информация об особенностях распространения звука обуславливает возможности диагностики состояния океанической среды по данным акустического зондирования [1] и имеет большое практическое значение для решения широкого круга прикладных задач: осуществление звукоподводной связи и навигации, дистанционное управление подводными необитаемыми аппаратами, поиск рыбных скоплений и полезных ископаемых, профилирование дна и многие другие прикладные задачи.

На протяжении последних 4-х десятилетий внимание многих исследователей привлекает возможность использования акустического мониторинга для изучения океанических процессов, связанных с изменением климата Земли. Именно диагностика крупномасштабных неоднородностей температурных полей (определение их средне-климатических значений), имеющих размеры в десятки и сотни километров, изначально и являлась основной задачей акустической томографии океана (АТО), предложенной в 1979 году американскими учеными *Уолтером Манком* и *Карлом Вуншем* [2].

Практический интерес в XX веке представляли крупномасштабные гидродинамические возмущения в океане: циклонические вихри, течения, фронтальные зоны и пр. Натурные томографические эксперименты в рамках таких международных программ как *ATOC*, *ACOUS*, *THETIS*, *MREA* и др. [3-7] в конечном итоге позволили предугадать локальные и глобальные климатические изменения на нашей планете [8, 9]. Хотя такие дорогостоящие проекты требуют значительных материальных расходов, именно с этим направлением связывают прогресс в океанологии, опираясь на очевидную научную, прикладную и экономическую ценность АТО. На настоящий момент большинство разработанных методов являются развитием классической схемы *Манка-Вунша*.

В последние годы наблюдается тенденция увеличения площадей освоения прибрежных территорий, необходимых для жизнедеятельности человека, с все более разрастающейся и усложняющейся морской инфраструктурой. Континентальные шельфы являются первоочередными объектами для постановки геологоразведочных работ на нефть и газ. Несмотря на успехи применения методов акустической томографии в глубоководных частях морей и океанов, до сих пор достижения, полученные для мелководных акваторий, скромны. Далекое не всегда условия окружающей среды при проведении исследований в таких акваториях являются «благоприятными».

С точки зрения физической океанографии, обширные акватории прибрежного шельфа являются границей открытого моря и рассматриваются как часть океана, простирающаяся от береговой черты, до вершины континентального склона (бровка шельфа) на расстояния от десятков до сотен километров. При этом глубины составляют порядка от 200 до 500 м [10]. Мелководные районы представляет многослойную (стратифицированную) структуру, отличающуюся горизонтальной неоднородностью её физических свойств и большим разнообразием состава верхнего слоя грунта (песок, ил, алевриты, глина и др.). Данные особенности обусловлены большой подвижностью водной среды в районе шельфа, проникновением приповерхностных динамических процессов до дна, обильным поступлением осадочного материала с берегов, а также другими причинами.

С точки зрения акустики океана, шельф представляет собой волновод, ограниченный абсолютно мягкой (морская поверхность) и поглощающей (морское дно) границами. Особенности распространения звуковых волн связаны взаимодействием с этими границами и возмущениями пространственно-временного распределения поля скорости звука, вызванными специфическим характером и динамикой гидрофизических процессов. К выраженным факторам, изменяющим звуковое поле, относятся: структура и рельеф дна, поверхностное волнение, случайные неоднородности в толще, морские течения [10, 11] и др. Данные факторы имеют целый ряд отличительных особенностей, связанных со

спецификой различных шельфовых зон Мирового океана, так как испытывают вариации в зависимости от географической привязки к конкретному району, времени года (сезонная и межсезонная изменчивость) и метеорологической обстановки. Сильно выраженная пространственно-временная изменчивость является характерной чертой мелкого моря как среды распространения звуковых волн. Вследствие этого, акустическое зондирование в таких условиях представляет собой сложную задачу по причине уникальных особенностей формирования звукового канала, понимание которых важно при разработке систем мониторинга.

Фундаментальные экспериментальные исследования в условиях мелкого моря (проекты *SWARM*, *PRIMER*, *ASIAEX*, *SW*) были направлены на разработку физических основ акустического мониторинга гидрофизических процессов, происходящих на океанском шельфе [12-14]. Перспективы, связанные с использованием методов АТО, были обусловлены способностью измерения характеристик морской среды вдоль протяженных, прибрежных акваторий. Основными объектами исследований являлись рефракционные неоднородности (связанные с отклонениями вертикального профиля скорости звука от среднесуточного, средне-сезонного или средне-климатического). Результаты этих работ позволили сделать вывод о возможности практической реализации систем акустической термометрии. Исследования влияния динамических процессов сопровождались серией экспериментов по изучению эффектов, создаваемых нелинейными внутренними волнами, приводящих к возмущениям профиля скорости звука и, как следствие, к межмодовому взаимодействию (эффект «связанных» мод) [15], а также измерению характеристик рассеяния и отражения акустической энергии пакетом внутренних волн [16, 17]. В отечественной практике преследовались аналогичные цели по изучению полей внутренних волн [18] и распространения мод малого порядка на шельфе *Черного*, *Баренцева*, *Берингова*, *Охотского* и *Японского морей*. При этом использование развитых в вертикальной плоскости излучающих и приемных цепочек главным образом было

направлено на эффективное возбуждение в среде и выделение-регистрацию отдельных мод [19-22].

Многочисленные экспериментальные исследования фронтальных зон вследствие резкого изменения интенсивности акустического поля при прохождении через прибрежный фронт в условиях мелкого моря имели прикладное значение для океанологии [23, 24]. Также на шельфе образуется множество разномасштабных вихревых образований (например, возникающих из-за неоднородностей береговой черты) со временем жизни от нескольких суток до нескольких недель [25]. Исследования данных неоднородностей достаточно сложны, но при этом осуществимы акустическими методами. Для сравнения можно привести пример изучения локальных синоптических вихрей в океане, представляющих особый интерес, поскольку именно в них сосредоточено до 90% кинетической энергии [26, 27]. Традиционные локальные измерения с помощью зондов-датчиков не позволяют проследить возникновение и развитие такого рода образований. В связи с этим значимым становится получение «трехмерного изображения» их внутренней структуры с помощью акустического зондирования для установления пространственно-временных процессов вихреобразования и его эволюции.

Экспериментальные исследования играют решающую роль в гидроакустике. Это обусловлено дисперсионным характером распространения звуковых волн и самой среды, анизотропией, интерференцией (когерентное/некогерентное сложение акустической энергии) и случайными флуктуациями амплитуд и фаз (вариации интенсивности акустических сигналов) [28-30]. Осуществление эффективного и непрерывного мониторинга параметров морской среды в таких условиях методами и средствами АТО позволяет решать современные прикладные задачи, стоящие перед океанологами, экологами, транспортными и нефтяными компаниями, обороной и др.

Актуальность темы исследования

В последнее время задачи долгосрочного мониторинга параметров морской среды в прибрежной зоне наиболее остро стоят перед исследователями.

Расширение морской инфраструктуры и активное использование ресурсов шельфа в условиях многообразия гидрофизических процессов вызывают значительные экологические изменения, которые также требуют изучения, а, следовательно, и развития новых объективных методов и средств мониторинга морской среды. Одним из постоянно развивающихся направлений в данной области является дистанционное зондирование.

Современные тенденции в разработке аппаратуры для проведения исследований формируются маломощной микроэлектроникой с большими вычислительными возможностями, технологиями распознавания образов, искусственного интеллекта, сенсоров, энергосбережения и генерации, развитием механических устройств-манипуляторов и пр. Практически, данные возможности частично реализованы в автономных мультифункциональных измерительных системах: поверхностных и донных стационарных станциях, дрейфующих платформах, автономных необитаемых подводных аппаратах, снабженных различными датчиками (температуры, солёности, давления и др.), позволившими осуществить океанографические исследования и картирование многих частей Мирового океана. Но когда необходим динамический мониторинг в масштабе реального времени, данные средства не позволяют исследовать состояние прохождения гидрофизических процессов, охватывающих протяженные акватории. Тогда технически и экономически приемлемым средством исследования прибрежного шельфа становится акустическая томография. Практическое развитие данного направления в ближайшей перспективе будет способствовать разработке новых средств, позволяющих перевести исследования из стадии эксперимента в область прикладного применения. Методика измерений может иметь значительные отличия в зависимости от технических возможностей, характеристик районов проведения и схем экспериментов. Тенденции развития АТО с целью построения эффективных систем мониторинга параметров морской среды являются в настоящее время приоритетными научно-техническими задачами.

В диссертационной работе предлагаются экспериментально апробированные методические и программно-технические решения, направленные на развитие функциональных возможностей гидроакустических систем. Согласованное функционирование разработанных средств в рамках аппаратно-программных комплексов обеспечивает расчет и отображение в режиме реального времени вертикального распределения скорости звука (температуры), динамики приливного уровня морской поверхности, скорости и направления течения с помощью измерения амплитудно-временных параметров импульсной характеристики (т.е. функции отклика акустического канала на входное воздействие) на стационарных трассах. В качестве зондирующих сигналов применяются сложные сигналы. Обработка гидроакустической информации осуществляется с помощью специального программного обеспечения, реализованного в среде высокоуровневого программирования *Matlab*, снабженного графическим интерфейсом пользователя.

Степень разработанности темы исследования

Фундаментальные экспериментальные исследования на океанском шельфе - проекты *SWARM*, *PRIMER*, *ASIAEX*, *MREA*, *SW* (*Apel J. R. et. al., 1997; Newhall A. E., et. al., 1998; Dahl P. H., et. al., 2001; Jesus S. M., et. Al., 2004; Duda T. F., et. al., 2007*) были направлены на разработку физических основ дистанционного мониторинга гидрофизических процессов (под влиянием рефракционных и динамических неоднородностей) и практическую реализацию систем акустической термометрии.

Появление алгоритма восстановления вертикального профиля температуры, основывающегося на классической схеме *Манка-Вунша* (*Munk W., Winsh C., 1979*), модифицированного для случая мелкого моря (*Rodriguez O. C., Jesus S. M., 2000*) указало на физические ограничения применимости данного решения. При этом создать апробированные варианты акустических систем мониторинга для целей оперативного сбора гидрофизических данных пока не удается.

Практическая реализация схемы «динамической томографии», например, со свободно дрейфующими приемными гидрофонами (*Jesus S. M., et. al., 2006*) сталкивается с принципиальной проблемой точности позиционирования акустических излучателей/приемников, что приводит к погрешности в определении параметров морской среды, и невозможности мониторинга вдоль конкретного направления ввиду неуправляемого дрейфа.

Появление методик, аппаратуры и способов технической реализации восстановления вертикальных профилей скорости звука и течения в мелком море на основе измерений абсолютных времен приходов акустических импульсов между установленными на дне акустическими трансиверами (*Гончаров В.В. и др., 2010*) позволяет повысить точность реконструкции (с помощью сигнала точного времени *GPS*) в несколько раз. Но получившие в настоящее время развитие комбинированные алгоритмы расчета гидрофизических параметров для подобных схем (*Курьянов А.Н. и др., 2012*) с элементами решения обратной задачи **АТО Манка-Вунша** достаточно сложны при их практической реализации.

Диссертационная работа является продолжением экспериментальных исследований в области акустической томографии шельфовых зон с применением сложных фазоманипулированных сигналов, проводившихся в *ТОИ ДВО РАН* (*Моргунов Ю.Н. и др., 2006, 2008; Акуличев В.А. и др., 2010; Безответных В.В. и др., 2009, 2012*). Стоит отметить, что, во-первых, имеющиеся работы, характеризуют технические аспекты, не предназначенные для получения результатов и анализа в реальном масштабе времени. Вследствие чего необходимость оперативного контроля за возникающими изменениями в среде остается актуальной при длительных наблюдениях. Во-вторых, в них рассматриваются общие принципы решения задач **АТО** на основе влияния различных гидрометеорологических условий на формирование импульсной характеристики без представления конкретной, апробированной методики восстановления параметров среды.

Таким образом, на основе анализа работ, содержащих обширный материал по экспериментальным исследованиям, и тенденций развития в рассматриваемой области можно сформулировать цель и задачи исследования.

Цель работы состоит в разработке и экспериментальной апробации средств обработки гидроакустической информации и алгоритмов реконструкции гидрофизических параметров морской среды в интересах создания перспективных аппаратно-программных комплексов для мониторинга динамики и структуры вод в мелком море.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих **задач**:

1. Разработка алгоритмов для реконструкции вертикального профиля скорости звука (температуры) и измерения вариаций уровня моря на основе методов лучевой томографии;

2. Проведение численного моделирования характеристик акустического поля для реальных гидрологических и батиметрических условий в целях совершенствования процедуры идентификации приходов акустической энергии и повышения точности реконструкции гидрофизических параметров морской среды;

3. Разработка методик определения параметров течения (скорости и направления) при 2- и 3-точечных схемах мониторинга на основе встречного акустического зондирования;

4. Разработка пакета программ, осуществляющих сбор, обработку, анализ и визуализацию данных в масштабе реального времени для реализации методов лучевой томографии и встречного акустического зондирования в акустико-гидрофизических измерительных комплексах.

5. Экспериментальная апробация разработанных в рамках целевой установки диссертационной работы средств в мелководных акваториях шельфа *Японского моря*.

Научная новизна

1. Предложено решение задачи акустической термометрии в условиях мелководных акваторий путем измерения времен распространения всего ансамбля лучевых приходов акустической энергии (не только независимых).

2. Разработана методика определения изменений уровня морской поверхности по результатам измерений разности времен распространения акустической энергии по поверхностно-донным и водным лучевым траекториям.

3. Развиты методы для измерения скорости и направления компоненты течения вдоль стационарной трассы (2-точечная схема эксперимента) и вектора течения в горизонтальной плоскости (3-точечная схема эксперимента).

Практическая значимость работы

Прикладная направленность выполненных исследований и разработок на реализацию в океанологической практике позволила автору принять участие в успешном выполнении контрактных работ по заказам рыбохозяйственных ведомств республики Корея. Надежность разработанных в рамках диссертационной работы аппаратно-программных средств, прошедших апробацию в различных гидролого-акустических условиях, позволяют рассчитывать на их успешное применение при решении целого ряда прикладных задач подводной гидроакустики. К ним относятся разработки перспективных систем навигация, связи и дистанционного управления автономными аппаратами, разработка систем информационного обеспечения рыбного промысла и промышленного разведения марикультуры.

Методы исследования

При решении поставленных задач использованы методы лучевой акустики, встречного акустического зондирования, цифровой обработки сигналов и математической статистики. Для компьютерного моделирования, вычислений и создания графического интерфейса пользователя применялись средства из ряда прикладных пакетов интерактивной среды для программирования, численных расчетов и визуализации результатов *Matlab*. Экспериментальные результаты получены при проведении натурного эксперимента в мелком море.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные методики, технические и программные средства для реконструкции вертикального профиля температуры на акваториях с размерами до 1км, основанные на анализе амплитудно-временных параметров импульсных характеристик диагностируемых волноводов с временным разрешением 2мс (фазоманипулированный сигнал, несущая частота - 2кГц, длительность - 255 символов, количество периодов несущей частоты на символ – 4), позволяют решать задачи акустической термометрии с погрешностью до 0,85°C.

2. Внедрение расчетного алгоритма для измерения уровня морской поверхности по данным поздних лучевых приходов в вычислительную программу реконструкции вертикального профиля температуры, позволяет учесть влияние приливных явлений на точность решения задач акустической термометрии.

3. Разработанные методики, технические и программные средства для измерения параметров течения на акваториях с размерами до 1км, основанные на методе встречного акустического зондирования морской среды фазоманипулированными сигналами с несущей частотой 10кГц, и временным разделением лучевых приходов 25мкс, позволяют измерять направление потока и скорость течения с разрешающей способностью 2,5-3см/с.

Объект исследования – гидрофизические параметры мелководных акваторий прибрежного шельфа, восстанавливаемые по данным акустического зондирования.

Предмет исследования – методы реконструкции интегральных значений распределения температуры по глубине, уровня морской поверхности, параметров течения и алгоритмы обработки экспериментальных данных гидроакустических систем.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов основана на материале, полученном в натурных исследованиях на протяжении 5 лет и подтверждена использованием апробированных схем постановки акустического эксперимента в мелком море,

применением комбинированных методов решения обратных задач АТО, количественной оценкой точности измерений с помощью статистического анализа данных, повторяемостью и высокой сходимостью результатов экспериментов и численного моделирования. Сравнительный анализ и физическая интерпретация полученных экспериментальных результатов проводились на основе сопоставления с результатами контактных измерений, полученных независимыми методами.

Личный вклад автора

Автором лично в рамках разработанных методик было выполнено численное моделирование и предложены алгоритмы реконструкции гидрофизических параметров морской среды, реализованные в виде программного комплекса в среде программирования *Matlab*. Программный комплекс осуществляет прием и анализ гидроакустических данных, а визуализация этапов обработки обеспечивается графическим интерфейсом пользователя. Весь фактический материал, представленный в диссертационной работе, получен с участием автора в результате проведения натурных исследований *ТОИ ДВО РАН* и *Института науки и технологий*, г. Кванджу, Республика Корея (*Gwangju Institute of Science and Technology - GIST*) в прибрежных экспедициях. Наравне с научным руководителем автор обсуждал результаты измерений и обосновывал идеи для дальнейшего развития.

Апробация работы

Результаты выполненных исследований, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на акустическом семинаре *ТОИ ДВО РАН*, российских и международных конференциях: *VII и IX Всероссийском симпозиуме «Физика геосфер»* (Владивосток, 2011 г. и 2015 г.), *Международной конференции «Потоки и струи в жидкостях»* (Владивосток, 2011), *1-ой региональной научной конференции «Океанография залива Петра Великого»* (Владивосток, 2012), *XXVI сессии Российского акустического общества* (Москва, 2013), *5-ой международной конференции «Pacific Rim Underwater Acoustic Conference»* (Владивосток, 2015).

Результаты работы использовались в рамках выполнения проектов, поддержанных грантами ДВО РАН:

1. *«Метод встречного зондирования для осуществления длительного акустического измерения скорости и направления течений в мелководных морских гаванях»*, проект № 13-III-B-07-139, 2013 г.;

2. *«Исследование сезонной изменчивости направления и скорости течения в заливе Посьета методом встречного акустического зондирования»*, проект № 13-III-B-07-163, 2014 г.;

а также подтверждаются успешным решением задач в рамках российско-корейского сотрудничества между *Институтом наук и технологий (г. Кванджу, Республика Корея)* и *Тихоокеанским океанологическим институтом имени В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук*:

1. НИР *«Аппаратно-программный комплекс для акустической термометрии мелководных акваторий»*, контракт № 2012-062, 2012 г.;

2. НИР *«Система мониторинга изменчивости водной среды морской гавани»*, контракт № 2013-086, 2013 г.

3. НИР *«Усовершенствованная система мониторинга изменчивости водной среды морской гавани»*, контракт № 2014-080, 2014 г.

4. НИР *«Усовершенствованная система мониторинга изменчивости водной среды морской гавани для сверхмелководных акваторий»*, контракт № 2014-193, 2014 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 3 работы в рецензируемых журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных *Высшей Аттестационной Комиссией РФ* для публикации материалов диссертаций; получено два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и шести приложений.

Основной объем диссертации 127 страниц, включая 59 рисунков и 6 таблиц. Список библиографических источников содержит 109 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Основное содержание работы

Во **введении** сформулированы цель и задачи, обозначены объект, предмет и методы исследования, обоснована актуальность, научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов, характеристика личного вклада автора.

В **первой главе** обсуждаются предпосылки возникновения АТО, проведен анализ развития методов и средств АТО (классическая схема *Манка-Вуниа*) и встречного зондирования для исследования и мониторинга гидрофизических полей по материалам отечественных и зарубежных исследований за последнюю четверть века. Представлено понятие обратной задачи АТО и её теоретическое обоснование в рамках лучевой теории, основанной на измерении флуктуаций времени распространения отдельных приходов (описание принятого сигнала как суперпозиции импульсов акустической энергии по различным лучевым траекториям). Обозначены особенности процедуры идентификации и точности измерения временной структуры приходов в условиях мелкого моря, основные проблемы практической реализации АТО, связанные с выбором опорного вертикального профиля скорости звука и его малых возмущений (не влияющих на траектории собственных лучей) в предположении пространственно-независимых условий окружающей среды. Описаны типы зондирующих сигналов и особенности организации экспериментов, варианты решения прямой задачи распространения звука (в рамках лучевого приближения), их влияние на реконструкцию гидрофизических параметров и возможные способы решения данных проблем. На основе выполненного обзора материала по исследуемой теме конкретизированы задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию разработанных автором методов реконструкции вертикального профиля температуры и вариаций уровня морской

поверхности вдоль стационарной трассы в рамках лучевого приближения. Приведено описание методов определения параметров течения на основе встречного зондирования, схем реализации экспериментов в мелком море, алгоритмов сбора, обработки и анализа гидроакустических данных, средств визуализации с применением графического интерфейса пользователя для согласованной работы в режиме реального времени с существующими акустико-гидрофизическими измерительными системами.

В **третьей** главе представлены данные и графическое представление результатов, полученные автором при проведении теоретических и экспериментальных работ в прибрежных экспедициях *ТОИ ДВО РАН* и *GIST* с 2010 по 2015 год. Тестирование разработанных методик и вычислительных алгоритмов в составе аппаратно-программных комплексов для мониторинга параметров гидрофизических полей проводилось в различных гидрологических и батиметрических условиях шельфовой зоны *Японского моря*.

В **заключении** приводятся основные выводы по результатам работы.

Глава 1. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ ОКЕАНА (АТО)

1.1 Предпосылки возникновения акустических методов исследования

Инструментальные наблюдения в океанографии получили развитие в конце XIX века, с началом использования на судах батометров для забора проб воды и опрокидывающихся ртутных термометров для измерений температуры на различных глубинах. С середины XX века в исследованиях стали широко использоваться зондирующие системы, передающие на борт научно-экспедиционного судна измеряемые параметры водной среды [31].

Для изучения сезонной изменчивости физических полей в океане необходима продолжительность наблюдений не менее 5-6 лет, а для выявления междугодовой изменчивости - долговременные измерения в постоянных пунктах или районах океанов в течение 10-15 лет. Поэтому до сих пор применяются методы выборочных гидрологических измерений в характерные сезоны или в отдельные месяцы года. Дискретность подобных наблюдений для изучения сезонной изменчивости параметров среды обычно составляет не более месяца, а для междугодовой изменчивости – от 3-х до 6-ти месяцев [32]. В настоящее время измерения проводят с помощью различных автономных систем: подводных аппаратов, дрейфующих, буйковых и стационарных донных станций. Современные океанологические измерительные приборы снабжены датчиками скорости звука, температуры, электропроводности, гидростатического давления, прозрачности, содержания кислорода и пр. Измерения первичных параметров в водной среде являются локальными и контактными, а дискретность измерений определяется

характеристиками технических систем и инерционностью используемых датчиков [33]. Исследования с использованием научно-исследовательских судов и автономных систем не могут обеспечить длительных измерений параметров среды на акватории всего Мирового океана или даже малых его частей. Сложность процессов, протекающих в океане, существенные материальные затраты для их описания и прогноза требует привлечения к исследованиям принципиально новых средств и методов в широких диапазонах пространственного и временного разрешения [34].

Изначально идеи о возможности использования акустического зондирования для океанологических исследований, появившиеся в 70-х годах прошлого столетия, основывались на применении эхо-локации [35]. Что касается дальнего распространения звука в случайно-неоднородной среде, то проводимые работы были связаны с изучением свойств сигналов, прошедших сквозь толщу океана. Представления о распространении звука заключались в том, что акустические сигналы подвержены интегральному влиянию неоднородностей различного пространственно-временного масштаба, расположенных на пути распространения и приводящих к флуктуациям принятого сигнала [36]. При этом регистрация быстрых и медленных вариаций зондирующего сигнала позволяет разделить вклады, вносимые мелко- и крупномасштабными неоднородностями. Однако, это еще не решает задачу получения информации о пространственном распределении этих неоднородностей [37]. Значительные успехи, связанные с акустическим мониторингом, предопределившие развитие данного направления на последующее время, были достигнуты американскими исследователями *Уолтером Манком* и *Карлом Вунишем* в 1979 году [2]. В своих работах [38-41] они предложили использовать «томографический подход» для получения не только усредненных данных о гидрофизических полях, но и информации о пространственном распределении этих характеристик на исследуемой акватории. Классическая схема *Манка-Вуниша* для глубокого океана позволила реконструировать неоднородности поля скорости звука с масштабами от нескольких десятков до сотен километров в пространстве и от нескольких недель до нескольких месяцев (синоптическая изменчивость),

основываясь на измерениях вариаций времени распространения импульсного сигнала по различным лучевым траекториям благодаря сверхдальному распространению на низких частотах. Следует отметить, что измеренные флуктуации зондирующих сигналов могут быть использованы для восстановления не только поля скорости звука, но и других, связанных с ним характеристик морской среды, таких как температура, соленость, плотность, скорость течения, тепло- и массоперенос, теплосодержание, представляющих интерес при изучении климатических изменений [7, 37, 42]. Дальнейшее развитие АТО было направлено на исследование других типов гидрофизических процессов - более мелкомасштабных неоднородностей, например, внутренних волн, поверхностного волнения, неоднородностей дна и т. д. [37, 43].

Стандартные измерения, выполняющиеся в виде полигонных гидрологических съемок и суточных станций, не могут в полной мере обеспечить непрерывного мониторинга на больших акваториях ввиду низкой разрешающей способности по времени и пространству, что становится актуальным ввиду усиления влияния антропогенных факторов и техногенных угроз во внутренних водоемах, заливах, проливах, гаванях и пр. Поэтому активное использование ресурсов шельфа вызвало интерес к разработке новых методик и созданию аппаратуры [44], как для оперативных, так и для долгосрочных измерений параметров морской среды и характеристик процессов, характерных для условий мелкого моря.

1.2 Теоретическое обоснование лучевой томографии

Как было отмечено, АТО исследует связь между свойствами среды в океане и параметрами распространения звуковых волн. Для описания модели распространения

сигнала (прямая задача) может быть использовано как лучевое, так и модовое представление акустических полей. Выбор метода описания зависит от многих факторов: рабочего диапазона частот, параметров волновода, масштаба исследуемых неоднородностей [45], вычислительных затрат и т. д. При этом оценка характеристик среды на основе информации о задержках сигналов, распространяющихся по различным траекториям, осуществляется в рамках лучевой томографии, а использования фазы нормальных волн - модовой. В свою очередь, обратные задачи можно условно разделить на две основные категории. К первой относятся задачи по оценке распределения скорости звука (температуры) и структуры поля течений в водной толще, определение свойств дна и параметров взволнованной поверхности, ко второй – обнаружение и локализация (определение местоположения) источников акустических сигналов.

Главным параметром, несущим информацию об окружающей среде, в схемах лучевой томографии являются времена распространения приходов акустической энергии вдоль собственных лучевых траекторий. Процедура восстановления температурных полей заключается в связи экспериментально измеренных отклонений времен приходов от их невозмущенных значений с вариациями скорости звука, пропорциональным искомым температурным неоднородностям [46]. Так как времена прихода определяются «интегральным» воздействием неоднородностей, пересекающих пути распространения лучевых траекторий, то возможно восстановление вариаций температуры, усредненных по горизонтальным слоям волновода, содержащим эти лучи.

Эксперименты по АТО в простейшей ситуации выполняются с применением одиночных источника и приемника звуковых сигналов, формирующих «томографическую пару», с помощью которой в вертикальной плоскости получают распределение скорости звука по слоям с последующим перерасчетом данных значений в температуру по полуэмпирическим формулам [47]. Трехмерное изображение структуры морской среды получается в результате комбинирования

множества полученных вертикальных распределений по исследуемой области между несколькими корреспондирующими точками.

Обратная задача формулируется посредством соотношения, связывающего значения какого-то экспериментально измеренного m и восстанавливаемого дискретного d набора параметров [48]. Соотношение между двумя этими наборами является достаточно сложным и, в общем случае, имеет вид:

$$F(m, d) = 0, \quad (1.1)$$

где m - измеренные данные и d - неизвестные восстанавливаемые параметры. Данное выражение определяется с помощью моделирования прямой задачи распространения звука. Таким образом, ключевым фактором, отвечающим за решение обратной задачи, является определение вида функциональной зависимости F . Связь между акустическим полем и гидрофизическими характеристиками среды в общем случае носит достаточно сложный и нелинейный характер, вследствие чего, задача трудно решается. Однако при томографии малых возмущений эту связь можно линеаризовать. Если линейное представление допустимо, то решение задач акустической томографии существенно упрощается. Так, согласно [37, 46, 48], в тех случаях, когда задача может быть линеаризована, то её решение сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений.

В случае томографии водной толщи, восстанавливаемыми параметрами являются скорость звука c и скорость течения v . Оба параметра - функции пространственных и временной координат. Для упрощения задачи предполагается, что эти параметры зависят только от пространственных координат, а временная зависимость находится из серии последовательных измерений [48, 49]. В рамках лучевой теории, постановка обратной задачи осуществляется на основе понятия лучевых приходов. Время прихода акустической энергии по отдельному собственному лучу взаимосвязано с

профилями скорости звука и течения вдоль направления распространения через соотношение вида:

$$\tau_n = \int_{\Gamma_n} \frac{ds}{c(\vec{x}) \pm v(\vec{x}) \cos \theta}, \quad (1.2)$$

для распространения в положительном направлении \vec{x} , где $d\mathbf{s}$ - бесконечно малый участок лучевого пути и Γ_n - траектория собственного луча \mathbf{n} , соответствующая определенному углу прихода θ в точке приема. Хорошо известно, что профиль скорости звука определяет пространственный характер лучевых траекторий (рефракцию), вследствие чего, прямая задача определения времен приходов с помощью профилей скорости звука и течения однозначно решается.

Первоначально решение обратной задачи АТО основывалось на предположении, что опорное (фоновое) состояние среды всегда известно, а реальное (текущее) состояние мало отличается от него. Соответственно, поле скорости звука можно представить в виде суперпозиции двух полей [50]:

$$c(\vec{x}) = c_0(\vec{x}) + \delta c(\vec{x}), \quad (1.3)$$

где $c_0(\vec{x})$ - опорный (или средний) по исследуемой области среды вертикальный профиль скорости звука; $\delta c(\vec{x})$ - отклонения (пертурбации) поля $c(\vec{x})$ относительно профиля $c_0(\vec{x})$. Измерение среднего профиля $c_0(\vec{x})$ составляет предмет так называемой «непертурбативной» томографии [51]. Однако чаще к задачам акустической томографии относят именно измерение «пертурбативной» компоненты $\delta c(\vec{x})$. Обращение (инверсию) можно выполнить путем линеаризации интегральных соотношений между изменениями во времени распространения приходов акустической энергии и рассчитанными вариациями скорости звука и течения вдоль лучевых траекторий. Данный метод решения обратной задачи называют «линейной инверсией» [50].

Линеаризуя выражение для времени распространения (1.2) и, предполагая, что в области эксперимента не имеется течений, отклонения во времени распространения акустического импульса $\delta\tau_n$ вдоль определенной лучевой

траектории Γ_n , характерной для опорного состояния среды, связаны с вариациями профиля скорости звука через соотношение:

$$\delta\tau_n = - \int_{\Gamma_n} \frac{\delta c(\vec{x})}{c_0^2(\vec{x})} ds, n = 1, 2, \dots N. \quad (1.4)$$

Течения оказывают существенное влияние на звуковые поля в океане. Для того чтобы разделить эффекты, создаваемые полем течений и вариациями поля скорости звука, необходимо использовать метод встречного зондирования [52]. Его суть при решении обратной задачи восстановления поля скорости потока сводится к использованию в качестве информационных параметров разности времен распространения в противоположных направлениях (от источника к приемнику и наоборот):

$$d_n = \int_{\Gamma_n} \frac{v(\vec{x})}{c_0^2(\vec{x})} ds, n = 1, 2, \dots N, \quad (1.5)$$

где $d_n = 1/2 (\tau_n^+ - \tau_n^-)$, а τ_n^+ и τ_n^- являются временами распространения вдоль траекторий собственных лучей n во встречных направлениях.

Традиционная схема АТО осуществима в предположении пространственно-независимых условий окружающей среды. Поэтому восстанавливаемые параметры (в первую очередь, вариации скорости звука) можно интерпретировать только функциями глубины \mathbf{z} . Тогда, считается, что опорный профиль скорости звука $c_0(\mathbf{z})$ известен из предыстории процесса, а его небольшие возмущения $\delta c(\mathbf{z}) = c(\mathbf{z}) - c_0(\mathbf{z}) \ll c_0(\mathbf{z})$ приводят только к отклонению во времени распространения и не влияют на траекторию собственного луча. Таким образом, интеграл в выражениях (1.4) и (1.5) берется вдоль невозмущенных собственных лучей Γ_n [50].

Расчет вариаций времен приходов осуществляется вычитанием времен распространения, относящимся к опорному состоянию среды, из текущих, экспериментально измеряемых времен распространения собственных приходов, при соответствии их лучевых траекторий максимумам в структуре принятого

сигнала. Временная реализация принятого сигнала сопоставляется с результатами расчета с использованием лучевой программы. Эта процедура является одним из ключевых этапов в практической реализации классической схемы *Манка-Вунша* и называется идентификацией. При этом, идентификация возможна, когда восстанавливаемые неоднородности среды приводят лишь к сравнительно небольшим вариациям времен приходов [37, 50, 53, 54]. При условии, что лучевые приходы могут быть идентифицированы в точке приема с помощью N собственных приходов, можно получить интегральные значения скорости звука вдоль лучевых траекторий и, в итоге, в отдельных точках водной толщи в вертикальной плоскости.

В рамках лучевой теории принятый сигнал описывается как суперпозиция лучевых приходов (акустическая энергия распространяется вдоль отдельных лучей). Таким образом, акустическое поле во временной области с учётом многолучевого распространения представляется в виде [48]:

$$p_n(\vec{x}, t) = \sum_{n=1}^N a_n(\vec{x}) \delta(t - \tau_n(\vec{x})), \quad (1.6)$$

где p_n - акустическое давление, соответствующее n -ому собственному лучу и N - общее число собственных лучей, достигающих точки приема, τ_n - время прихода n -ого луча и a_n - его соответствующая амплитуда. Альтернативным способом является идентификация групп приходов вместо отдельных лучей [55]. Данный метод применяется для мелководных акваторий, где чаще наблюдается групповое разрешение в структуре приходов, чем в случае глубокого моря. Акустическое поле во временной области записывается в том же самом виде (1.6), но амплитуды и времена распространения некоторых «пиков» из структуры приходов акустического сигнала следует идентифицировать как групповые.

Несмотря на большое количество работ, связанных с «линейной инверсией», большинство исследований ограничивается ее применением в глубокой воде, где эффекты отражения звука на границах можно до некоторой степени игнорировать, а приходы акустических энергии легко выделять при распространении звука на

большие расстояния. В мелкой воде взаимодействие звука с границами волновода играет важную роль и основной практической проблемой является разрешение по времени близко расположенных приходов. С точки зрения томографии мелкого моря было бы целесообразно использовать разрешенные приходы для достижения высокой пространственной разрешающей способности (т.е. количество глубин, при котором можно достоверно оценить флуктуации скорости звука). Это бы происходило при условии, что все разрешенные приходы являются независимыми, т.е. приходы, которые можно идентифицировать от одного прохождения сигнала до другого, соответствуют «порциям» информации, независимо связанным с флуктуацией скорости звука [56]. Однако для мелкой воды количество независимых приходов на самом деле меньше, а в ряде случаев гораздо меньше, чем количество фактически измеренных - разрешенных приходов. Это означает то, что в мелкой воде часть приходов звуковой энергии несет избыточную информацию. Практически, пространственная разрешающая способность определяется и существенно ограничивается количеством разрешенных и независимых приходов, что является основным требованием для выполнения «линейной инверсии». Таким образом, в качестве вклада в общую задачу АТО, базирующуюся на измерении времен распространения, предлагается набор основных требований применительно к условиям мелкого моря для успешного «обращения» акустической информации.

1.3 Аналитический обзор работ по АТО

Методы АТО позволяют рассчитывать вертикальные профили скорости звука, температуры и течений, выполнять их мониторинг в течение периодов времени от нескольких минут до десятков лет. В рамках классической схемы *Манка–Вунша* [2],

использующей данные времен распространения импульсов по собственным лучам, за последнюю четверть века разработан и экспериментально апробирован ряд методик расчета и мониторинга во времени полей скорости звука (температуры) водной среды в условиях глубокого океана [57-59]. В то же время результаты экспериментальных исследований до настоящего времени широко не внедряются в практику, несмотря на ряд очевидных преимуществ этих методик по сравнению с локальными измерениями. Это обусловлено как комплексным характером процессов, определяющих параметры водной среды, особенностями районов наблюдений и схемами конкретных экспериментов.

В последние 30 лет эксперименты проводились на периодах времени от нескольких месяцев до четырех лет. Так измерения, выполненные с помощью акустических методов, на дистанциях до 20 000 км позволили достаточно точно оценить межгодовую, сезонную и внутри-сезонную изменчивость температуры (теплосодержание) в различных районах Мирового океана [60]. Для восстановления параметров водной среды использовались результаты измерений времен распространения импульсных сигналов вдоль акустических трасс в *Тихом, Северном Ледовитом, Атлантическом, Индийском океане* и в *Средиземном море*. Основным результатом экспериментальных исследований является вывод о том, что времена распространения акустических импульсов на длинных трассах, по существу, пространственно интегрируют и подавляют мезомасштабную изменчивость и позволяют производить точные измерения средних по траекториям лучей значений температуры. Так, усредненные за сутки времена распространения акустических импульсов на 4-дневных интервалах измерений, демонстрировали превосходную разрешающую способность вариаций параметров теплового поля на дистанциях более 1000 км. Рассчитанная по данным акустических измерений межгодовая, сезонная, и изменчивость температуры более коротких периодов, проявляется в виде существенных изменений только на интервалах в несколько недель. Линейные тренды температуры, полученные за десять лет, малы по сравнению с межгодовой изменчивостью и различаются для различных траекторий, часть из которых

демонстрирует нагревание, часть - охлаждение среды, в областях расположения конкретных акустических трасс.

Интерпретация и сравнение результатов измерений и расчетов вариаций температуры различными методами, также является отдельной, сложной и актуальной задачей в свете развития новых методик. В работе [3] акустические измерения проводились с помощью импульсных сигналов с несущей частотой 75 Гц. Численное моделирование выполнялось на основании данных из базы *World Ocean Atlas 2005* [61]. Измеренные времена распространения импульсных сигналов сравнивались с соответствующими временами, полученными по расчетам для четырех независимых оценок гидрофизических параметров среды для северной части Тихого океана: 1 - климатологической, в соответствии с *World Ocean Atlas 2005*; 2 - по данным измерений приповерхностного поля температуры, полученных на основании спутниковой альтиметрии и контактных измерений вертикального профиля; 3 - из анализа циркуляции в рамках проекта *JPL-ECCO* [62]; 4 - по моделированию структуры приходов с высоким разрешением на основании модели *Parallel Ocean Program* [63]. Результаты акустических измерений показали, что *World Ocean Atlas 2005* дает лучшую оценку гидрологии для средних значений времен прихода по сравнению с другими, которые не позволили установить соответствие с акустическими данными. Совпадение структур временных приходов (от 6 до 9 импульсов в эксперименте и такое же количество групп собственных лучей при моделировании) отражает соответствие проведенных измерений и крупномасштабной температурной изменчивости в используемых моделях. Имеющиеся отличия указывают на то, что данные акустической термометрии могут отражать наличие дополнительных связей, которые не учитываются в рамках численного моделирования. К тому же, как правило, синоптическая изменчивость сопровождается существенной перестройкой подводного звукового канала и приводит к значительным флуктуациям поля скорости звука. В данных условиях для характеристики гидрологической и акустической обстановки часто недостаточно

указать усредненные средне-климатические значения поля скорости звука вдоль трассы распространения.

В акустике океана широко используется метод зондирования среды широкополосными сложными сигналами [64] и процедура согласованной фильтрации [65] для определения характеристик среды [66] и ее изменчивости [67]. При правильном выборе частотного диапазона и параметров сигналов (ширины полосы и длительности) это позволяет в некоторых случаях разрешить во времени отдельные приходы акустической энергии. Для глубокого океана (глубина ~ 6км) и больших расстояний (до ~ 10 000км) была обнаружена высокая стабильность сигналов при распространении вдоль подводного звукового канала; стабильность фазы во времени достигала десятков минут и определялась в основном внутренними волнами [68].

Океанические течения оказывают значительное влияние на акустические поля; течения синоптических и глобальных масштабов приводят к существенным флуктуациям времен приходов звуковых сигналов [69]. В неподвижном океане звуковое поле удовлетворяет принципу акустической взаимности [70]. Нарушение этого принципа являются надежным индикатором движения среды. За счет дополнительного вклада во времена распространения, вызванного течением, возможно отделение вносимых поправок от эффектов, связанных с вариацией скорости звука, с помощью метода встречного зондирования при наличии достаточного количества разрешенных и идентифицированных пар собственных лучей [71]. В случае мелкого моря, согласно цитируемой работе на основании данных [54], когда за счет широкой полосы излучения удастся разрешить отдельные приходы, их идентификация оказывается практически невозможной вследствие неопределенностей, вызванных сложной топографией дна. В результате этого линейная зависимость вариаций времени распространения от изменений скорости звука и потока нарушается уже при очень слабых возмущениях.

Для эффективного мониторинга явлений, вызванных динамическими процессами (например, приливы, течения, нагонные явления и т.д.), применяются разнообразные контактные, измерительные приборы [72]. Измерения уровня морской поверхности осуществляется мареографами, но их применение на открытых акваториях имеет ограничения по волнению. Измерение направлений и скорости течений может проводиться акустическими доплеровскими профилографами [73]. Приборы данного типа позволяют измерять параметры течений в точке постановки, не давая пространственной картины в целом (хотя зачастую эта информация и представляет наибольший практический интерес), а при отсутствии неоднородностей морской среды (объемных рассеивателей) - не работают. Кроме того, данные приборы имеют на мировом рынке высокую стоимость. Существуют менее дорогостоящие варианты оборудования, такие как механические, вертушечные измерители [74]. При стационарном размещении они дают локальную информацию о скорости движения водных масс на горизонте их расположения. К основным недостаткам механических измерителей можно отнести неспособность и ненадежность измерений (за счет вращающихся элементов) при достаточно больших скоростях течений. Все вышеперечисленные приборы объединяет тот факт, что для получения объективной картины на больших, протяженных акваториях со сложной динамикой вод требуется их большое количество. В качестве решения данной проблемы могут быть предложены акустические трансиверы [75], которые представляют комбинированные источники и приемники звуковых сигналов. Применение таких систем в составе гидроакустических комплексов, организующих встречное излучение сигналов между парами трансиверов, позволит решить задачу измерения интегральных скоростей морских течений и температур на акустических трассах, пересекающих диагностируемую акваторию. Для акваторий с размерами несколько километров могут быть использованы сигналы в диапазоне частот 2 - 20 кГц. Анализ амплитудно-временных характеристик акустических полей в совокупности с численным моделированием позволит исследовать и

наблюдать параметры приливных колебаний поверхности моря, сейш и внутренних волн. Для дополнительного контроля изменений температур и уровня моря в точках размещения трансиверов необходимо оборудовать их датчиками давления и температур.

1.4 Основные проблемы практической реализации АТО

Одной из главных проблем при решении обратных задач является выбор определенного опорного (фоновое) состояния среды (вертикального профиля скорости звука). Более приемлемым вариантом с целью дальнейшей линеаризации обратной задачи является тот, когда отклонения текущего (реального) состояния среды от климатически- или средне-сезонного достаточно малы [2, 37, 50]. Для мелководных районов континентального шельфа, представляющих в настоящее время практический интерес, характерно разнообразие сложных гидрофизических процессов, обуславливающих динамическую активность водной толщи. В данных условиях линейное приближение нарушается; с самого начала проведения экспериментальных работ вариации опорного профиля скорости звука могут быть велики, в результате чего, становится невозможным решение в рамках линейной задачи. Проведение гидрологической и батиметрической съемки в больших пространственных масштабах занимают длительное время. В дополнение, данные измерения не могут одновременно и синхронно осуществляться на всех запланированных станциях, вследствие чего, общая картина будет отличаться от её реального состояния. Для решения данной проблемы целесообразно выбрать в качестве опорного состояния, то, которое наиболее близко к реальному (например, состояние среды на начало эксперимента).

Принципиальным моментом АТО является выбор частоты излучаемого акустического сигнала. В первую очередь, он определяется требуемой дальностью и механизмами затухания вдоль траекторий распространения [10]. С другой стороны, частота сигнала зависит от масштабов диагностируемых неоднородностей [23, 76, 77]. Следует также отметить, что переход к диапазону средних частот (от 1 до 10 кГц) в условиях мелкого моря обусловлен наличием эффектов, проявляющихся как при использовании низких, так и высоких частот в глубоком море [11].

При распространении в океане звуковые сигналы испытывают ряд искажений, основными из которых являются аддитивные и мультипликативные помехи [78]. Мультипликативная компонента (или реверберация) вызвана многолучевым характером распространения сигналов, прошедших по различным путям со случайными амплитудами, задержками и фазами, а также испытывавшими различные смещения частоты за счет доплеровского эффекта при возможных движениях излучателя, приемника, самой среды или объемных рассеивателей. Аддитивная компонента вызвана независимыми от сигнала шумами моря («подводный фон») и собственными шумами измерительных приборов. Для мелководных областей шельфа наличие характерного многолучевого распространения определяет временные вариации акустических сигналов за счет многократных поверхностных и донных отражений, их интерференции и наличия внутренних волн [79].

На протяженных акустических трассах в глубоком море или в условиях мелкого моря, где преобладает взаимодействие звука с границами волновода, уровень импульсного сигнала может быть в сотни и тысячи раз (десятки децибел) ниже уровня шумов. В данном случае, при решении задач АТО находят применение специальные зондирующие сигналы с целью получения данных о характеристиках канала распространения. К таким сигналам можно отнести псевдослучайные широкополосные сигналы [80], использование которых обусловлено высокой пространственной и временной разрешающей способностью. Применение различных видов модуляции излучаемых сигналов для конкретных задач и методов цифровой обработки сигналов позволяет при приеме

восстановить форму сигнала, даже при соотношении «сигнал/шум» ~ 1 . После регистрации серии импульсных сигналов в точке приема, процедура согласованной фильтрации между принятым и исходным сигналами дает представление о структуре приходов, по максимумам («пикам») [55] которых, идентифицируемым как времена распространения, возможно исследование динамики структуры вод во времени.

Как уже было отмечено, в качестве входных информационных параметров используются вариации времен распространения, которые могут рассчитываться из разности между измеренными текущими временами приходов сигнала и временами приходов, полученными из серии последовательных измерений, либо, рассчитанными на основе моделирования прямой задачи распространения для опорного профиля скорости звука [81]. При этом проведение процедуры идентификации собственных лучей, т.е. установление достаточной близости истинных траекторий собственных лучей к траекториям для опорного состояния среды, предполагается возможным. С практической точки зрения, соответствие фактической (текущей) амплитудно-временной структуры приходов акустического сигнала рассчитанной для опорного состояния среды или измеренной в начале эксперимента и подразумевает успешное выполнение процедуры идентификации [37-39, 50, 53, 54]. Но, данное условие нарушается, если сигналы приходят с разницей во времени, меньшей разрешающей способности приемной системы. В качестве одного из возможных решений проблемы необходимо и достаточно отслеживать приходы с очень малым шагом по времени. Кроме того, интервалы между отдельными приходами акустической энергии в многолучевом сигнале могут оказываться меньше временных вариаций самих приходов (чем эти интервалы больше, тем легче осуществить прием и идентификацию), что приводит к их «перекрытию» и, как следствие, невозможности разделения. Структура приходов принятого акустического сигнала во временной области при этом сильно изменится по сравнению с «репликой». При нарушении условий линейного приближения, идентификация становится

принципиально невозможной в связи с перестройкой пространственного характера лучевых траекторий, вследствие чего, появляются лучевые траектории, которых не наблюдалось при опорном профиле скорости звука, либо возможно исчезновение идентифицируемых ранее лучей, которые теперь не являются собственными. Это сопровождается появлением или исчезновением приходов, соответственно, на структуре приходов с течением времени и свидетельствует о необходимости введения нового базового состояния среды и опорных лучей. Лучший вариант определения нового базового профиля - это инструментальные измерения. Если инструментальные измерения выполнить по каким-либо условиям невозможно, то новый базовый профиль может быть рассчитан путем численного моделирования - методом перебора (итераций) для вновь измеренной структуры приходов [37]. Для районов, по которым имеются длительные периодические ряды наблюдений, поиск нового базового профиля может осуществляться по аналогичному сезонному периоду времени наблюдений в соответствующих базах данных. Следует добавить, что при распространении в случайно-неоднородной, вертикально-стратифицированной среде амплитуда (интенсивность) принимаемой серии сигналов, приходящей по траекториям собственных лучей, испытывает флуктуации, что в равной степени затрудняет процесс идентификации. Такие сигналы просто могут потеряться в шумах. Данная проблема не имеет простого решения в случае «мерцания» амплитуды принимаемых сигналов, обусловленного интерференцией собственных лучей.

При исследованиях морской среды одним из важных является вопрос о возможности точного измерения абсолютных значений временных задержек акустических сигналов [82], распространяющихся в сложных гидрологических условиях. Измеренная структура приходов определяет «качество» реконструкции параметров морской среды, в понятие которого входит несколько принципиальных свойств. Во-первых – её максимумы должны быть выше суммарного «по системе» уровня шума. Суммарный уровень шума определяется акустическими шумами при приеме сигнала, а также шумами дискретизации и

цифровой обработки сигналов. Увеличение мощности излучателя будет, приводить к нелинейному увеличению амплитуды основного максимума по сравнению с остальными, что возможно потребует увеличения динамического (по амплитуде) диапазона для сигналов в системе, чтобы избежать ограничений при работе аналогово-цифровых преобразователей и других технических компонентов системы. Также необходимо иметь запас по мощности тракта усиления в системе излучения акустических сигналов. Одним из решений проблемы может быть увеличение отношения сигнал-шум за счет временного накопления сигнала при приеме [83], увеличения длительности излучаемого сигнала (энергии) [84] и согласованное со средой размещение излучателя и приемника в конкретных условиях эксперимента [85]. Уточнение положений излучателя и приемника в пространстве (также как частоты и длительности сигналов) выполняется экспериментально. Такая методика может применяться при организации долговременных стационарных измерений, для повышения достоверности и точности измеряемых параметров. Другим направлением повышения качества первичных данных может быть использование схем с несколькими разнесенными акустическими преобразователями. В данном случае повышение качества измерений можно достичь как за счет эффектов дублирования результатов и исключения некоррелированного влияния гидродинамических процессов по разным трассам в среде, так и за счет более сложных взаимно-корреляционных схем измерений структуры приходов.

Наибольшей представительностью обладают методы компьютерного моделирования, основанные на лучевой теории. Лучевое приближение позволяет более наглядно интерпретировать экспериментальные данные и получить физически обоснованное решение прямой задачи распространения звука. Процедуру идентификации лучей можно осуществить с помощью различных пакетов программ (*AcToolBox* [86]), рассчитывающих наравне с амплитудно-временными характеристиками приходов, дополнительные параметры, такие как: значения углов выхода и прихода, количество отражений от поверхности и дна,

затухание и др. Таким образом, это упрощает и одновременно делает, с физической точки зрения, наиболее состоятельной процедуру идентификации собственных приходов.

В общем случае моделирование является решением многопараметрической задачи. Получение адекватного соответствия между модельными и экспериментальными результатами возможно при максимально точном и единовременном задании положения излучателя и приемника в пространстве (глубины и дистанции между ними), промера реальной батиметрии (профиль дна) и гидрологии (вертикального распределения скорости звука) вдоль акустической трассы, свойств морской поверхности (волнение), структуры дна и параметров донных слоев (плотность, затухание). Также необходимо проведение контрольных измерений уровня моря для определения точных фаз и амплитуд прилива и выделение возможных составляющих - ветровых нагонов, длинных волн различной природы и других процессов, влияющих на локальный уровень.

Расположение источников и приемников определяется с помощью стандартного навигационного оборудования. Современные *GPS*-приемники [87] в любое время позволяют определить истинное местоположение с точностью от 10м до 1мм. Анализ района работ (его гидрологическое и батиметрическое обеспечение) может осуществляться с помощью навигационной аппаратуры, эхолота и *CTD*-зонда [88], по данным которых определяется схема эксперимента (выбираются оптимальное для планируемых работ расположение акустической трассы и места постановки излучающей и приемной системы), способствующая решению поставленных задач. Сформулировать универсальное правило оптимальной расстановки для реальных морских условий достаточно сложно, но из анализа вышеприведенных соображений следует выполнение следующих условий:

1. Возможность приема и выделение сигнала на фоне шумов;
2. Временное разделение приходов;
3. Успешное проведение процедуры идентификации;

4. Достижение наилучшего пространственного разрешения в вертикальной плоскости.

Для обеспечения синхронной работы излучателя и приемника с целью получения достаточно точных абсолютных значений времен распространения необходимо их объединение в рамках системы единого времени. Снабжение излучающих и приемных систем высокоточными и -стабильными «часами» позволяет решить данную проблему [89]. Согласно первоначальным натурным и численным экспериментам в рамках классической схемы *Манка-Вунша* для условий глубокого моря точность измерения времени приходов составляла не более 25 мс [50], а для мелкого моря - порядка 100 мкс [10] в том случае если удастся точно выделить и разделить приходы линейно независимых «четверок» собственных лучей [56] в функции отклика акустического канала и идентифицировать по углам выхода и временам прихода. Для мелкого моря указанные требования реализуется для сравнительно больших дистанций (>5км) и глубин (>50м) при расположении излучателя и приемника по глубине вблизи середины волновода. Соответственно для более коротких трасс измерений с небольшими глубинами и расположением излучателей и приемников акустических сигналов вблизи дна по результатам обработки невозможно корректно сформировать вектор временных задержек $\Delta\tau = [\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_N]^T$, вследствие чего необходим поиск иных «алгоритмов восстановления» скорости звука (температуры).

Дистанция между акустическими преобразователями может задаваться на основе «внешних», по отношению к эксперименту, либо «внутренних» данных. При этом абсолютные и относительные ошибки при расчете дистанций между источником и приемником будут включать две составляющие, первая – за счет неточности определения проекции положения излучателей и приемников на дне и вторая – неточность определения дистанции между проекциями данных приборов на поверхности. Относительная ошибка измерений будет уменьшаться с

увеличением дистанции. Точность позиционирования на открытых акваториях морей и океанов вдали от береговой линии определяется точностью используемых *GPS*-приемников. Расстояния между объектами в пределах прямой видимости в море могут быть определены с помощью специализированных лазерных и световых дальномеров. На практике расчет дистанции между источником и приемником проводится на основе экспериментальных измерений времени распространения импульсного сигнала. Для уточнения дистанции используются результаты численного моделирования с целью идентификации и расчета времени распространения вдоль траекторий собственных лучей. Время распространения и дистанция являются взаимосвязанными параметрами (для заданных профиля скорости звука, батиметрии и положений излучателя и приемника).

Исследования, проводимые по схеме стационарно установленных (например, связанных подводными кабельными линиям с береговым постом) на дне излучающих и приемных систем, отличаются от схем, использующих свободно-дрейфующие или заякоренные системы, возможностью их более точного позиционирования и определения времен распространения вследствие отсутствия введения поправок, обусловленных эффектом Доплера [11]. Использование же дорогостоящего обеспечения в виде судов с излучателем и приемной системой [5], увеличивает материальные затраты на проведение измерений и усложняет схему обработки за счет необходимости учета изменения дистанции между источником и приемником сигналов (динамическая томография). Кабельные донные системы позволяют проводить непрерывные измерения в течение длительного времени и решать множество задач с передачей данных в береговую лабораторию [90], поскольку такие системы могут охватывать значительные участки шельфовой зоны, и не связаны с расходом больших материальных средств. Установка акустического излучателя стационарно на минимально возможном расстоянии (≤ 1 м) от морского дна способствует наиболее эффективному возбуждению акустических волн в мелком море [91], а возможность спутникового наблюдения за приповерхностными параметрами

морской среды и параметрами придонного слоя с помощью установленных датчиков на излучающих и приемных системах позволяет повысить точность измерений. Применение же традиционных контактных океанологических приборов малоэффективно, так как практическая реализация размещения измерительных средств на разных глубинах во всем водном слое в районах с интенсивным рыболовством и сильными течениями связана с большими материальными затратами и рисками.

Выводы по главе

В данной главе, на основании рассмотренных литературных источников, посвященных истории возникновения и современным проблемам практической реализации методов и средств акустической томографии при дистанционных исследованиях и мониторинге структуры и динамики вод, были конкретизированы задачи диссертационной работы, сформулированные во введении.

1. Разработка, создание и экспериментальная апробация программного блока многофункционального гидроакустического комплекса для исследования и мониторинга течений и температур в мелководных акваториях, включающие:

- унифицированные программные средства приема, обработки и визуализации данных измерений;

- методику эксперимента и алгоритмы реконструкции вертикального профиля скорости звука (температуры), вариаций уровня морской поверхности по данным анализа импульсных характеристик диагностируемых волноводов методами акустической томографии в рамках лучевой схемы;

- алгоритмы определения интегральных параметров потока на акустической трассе (компоненты течения) при 2- и 3-точечной стационарной схеме исследований методом встречного зондирования;
- выбор в качестве носителя информации о среде абсолютных значений времен распространения групповых приходов (групповых свойствах лучей), как наиболее легко измеримых параметров, идентифицируемых по флуктуациям максимумов корреляционной огибающей принимаемого многолучевого сигнала, и повышающих точность реконструкции в несколько раз;
- выбор и адаптацию существующего программного обеспечения расчета акустических полей (амплитудно-временные и угловые характеристики, лучевые диаграммы, длины траекторий и пр.) для упрощения процедуры идентификации при решении обратной задачи, реализации модифицированной схемы линейной томографии и выполнения целевой установки диссертационной работы;
- сопряжение графического интерфейса пользователя, содержащего вычислительные алгоритмы, с компонентами информационно-измерительной системы для расчета и отображения выходных данных в режиме реального времени.

2. Проведение экспериментальных работ в районе шельфовой зоны *Японского моря* при различных условиях гидрологической, -динамической и батиметрической обстановки для подтверждения эффективности предложенных разработок и возможности их практического внедрения:

- натурные исследования по изучению изменчивости глубинной зависимости температурных полей в мелководных акваториях *о. Норёк* и бухты *Витязь (залив Посьета)*;
- выбор методики и математического аппарата для оценки степени сходимости расчетных и экспериментальных данных;
- натурные исследования параметров морских течений в *Корейском проливе*.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СБОРА, ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ

Активное освоение и использование биологических (фермерских хозяйств марикультуры), минеральных и технологических ресурсов (нефтедобывающих и портовых сооружений) прибрежного шельфа, внутренних водоемов, бухт, заливов и проливов требует создания современных систем акустического мониторинга параметров среды методами и средствами АТО в условиях мелкого моря [92]. Работы в данном направлении сводятся к оснащению обширных акваторий автономными, стационарными приборами, функционирующими в долгосрочной перспективе при любых гидрометеорологических условиях, что способствует проведению натурных исследований и непрерывному мониторингу гидрофизических параметров.

В течение последних 20-ти лет наблюдается интенсивная разработка аппаратуры для оперативных измерений параметров водной толщи, свойств дна и характеристик динамических процессов с применением сложных сигналов [93-95]. К преимуществам можно отнести то, что принципы построения и свойства [96] данных сигналов позволяют осуществить прием при достаточно низких значениях отношения «сигнал/шум». С помощью цифровой обработки принятого сигнала получают импульсную характеристику волновода, для того чтобы по временам распространения отдельных приходов или их групп реконструировать поля скорости звука (температуры), параметры приливных и внутренних волн и пр.

В данной главе приведены результаты технических, программных и методических решений, направленных на создание аппаратно-программных комплексов, осуществляющих мониторинг распределения температуры, вариаций

уровня морской поверхности и параметров морских течений в мелком море. В качестве оптимальных технических средств для проведения томографических исследований предлагается использование стационарных (донная постанковка), ненаправленных, излучающих (импульсный режим работы) и приемных точечных систем, а также их комбинированных вариантов (трансиверов). В качестве зондирующих применяются шумоподобные сигналы на базе псевдослучайных *M*-кодов. Рабочие частоты лежат в среднечастотном звуковом диапазоне (2 - 10 КГц). Для сбора, обработки первичной гидроакустической информации и визуализации расчетных данных в режиме реального времени разработан графический интерфейс пользователя, организованный с помощью приложения *GUIDE* среды высокоуровневого языка программирования *Matlab*.

2.1 Томографический комплекс для решения задачи акустической термометрии

Коллективом *Отдела технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН* разработана акустико-гидрофизическая измерительная система для решения задач акустической термометрии [97]. В данном разделе приведено его описание и обозначен вклад автора в разработку алгоритмических и программных средств, позволяющих осуществлять обработку информации и визуализацию полученных результатов в реальном масштабе времени. Основной особенностью является возможность синхронизации работы составляющих частей на базе использования системы единого времени, а также передачи по радиоканалу в реальном масштабе времени в центр анализа гидроакустической информации, поступающей с погруженного на заданную глубину гидрофона, одновременно с данными о

координатах его надводной части. При наличии нескольких приемных систем может быть образована «томографическая сеть» любой конфигурации в шельфовой зоне с максимальным удалением от *УКВ*-антенны берегового поста до 15 км.

Разработанный аппаратный-программный комплекс (рисунок 2.1) состоит из двух составных частей: автономной излучающей системы (**АИС**), мобильной приемной системы на основе радиогидроакустического буя (**РГБ**) и блока программ регистрации, обработки и визуализации (**БРОВ**).

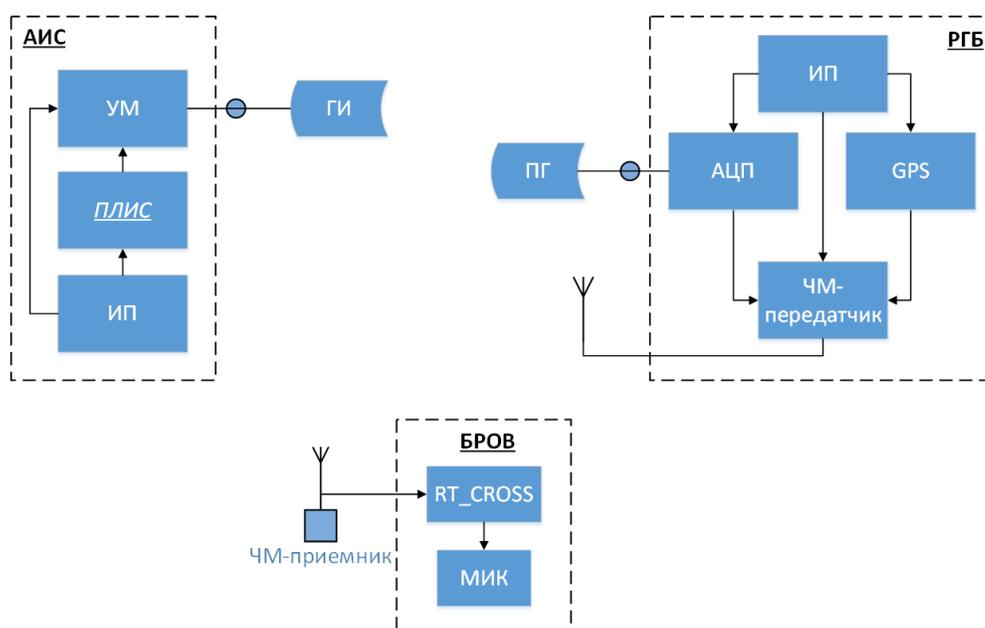


Рисунок 2.1. - Структурная блок-схема комплекса

В состав **АИС** входит: источник электропитания (**ИП**), элементы формирования и генерации фазоманипулированных сигналов на основе программируемой логической интегральной схемы (**ПЛИС**), усилитель мощности (**УМ**), широкополосный гидроакустический излучатель (**ГИ**), устанавливаемый стационарно на требуемую изобату и связанный соединительным кабелем, длина которого зависит от особенностей района работ. Функциональная блок-схема совместной работы компонентов **АИС** представлена на рисунке 2.2. В штатном

режиме в качестве зондирующих используются сигналы на основе псевдослучайных M -последовательностей с числом символов, равным 255, с характеристическим полиномом $X^9 + X^4 + 1$ и длиной символа, равной 4-м периодам несущей частоты. Сигналы формируются специальной программой, поэтому существует возможность управления длиной M -последовательности (63-255 символов) и уровнем излучения по ходу эксперимента. Типы, частотные и фазовые характеристики применяемых сигналов могут быть различны и ограничены только полосой рабочих частот усилителя мощности и акустического преобразователя.

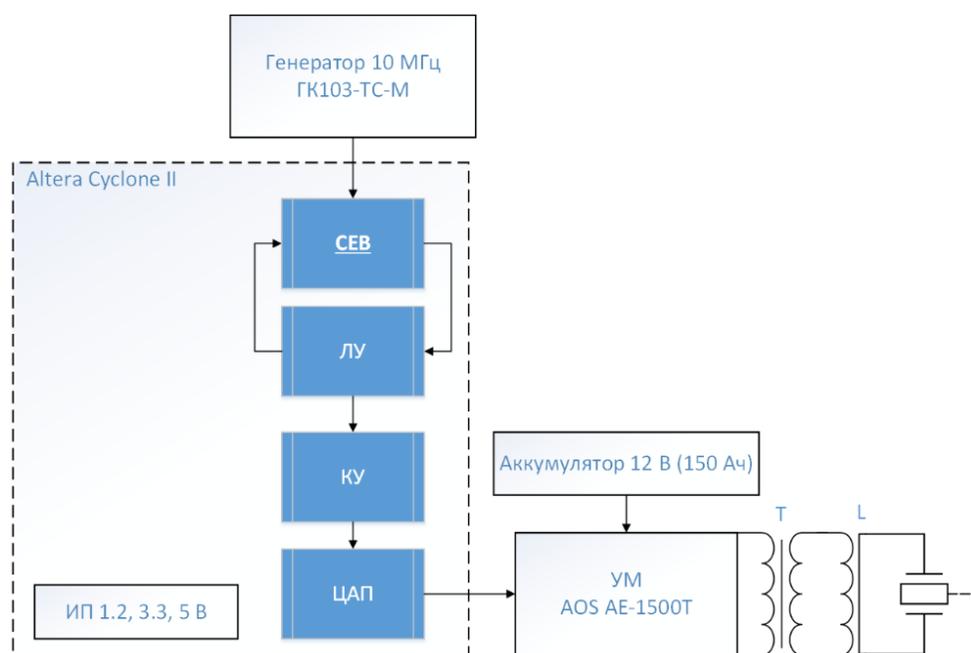


Рисунок 2.2. - Функциональная схема автономной излучающей системы

Основным модулем, определяющим логику работы, является плата на основе *Altera Cyclone II*. Электропитание осуществляется от герметичных гелевых аккумуляторных батарей напряжением 12 В. Посредством изменения начального состояния сдвигового регистра с определенными обратными связями кодировщик (КУ) генерирует сигнальный фрейм (циклически сдвинутая последовательность). Номер сдвига определяется алгоритмом работы логического устройства (ЛУ),

функции которого синхронизированы с другими компонентами импульсами системы единого времени (СЕВ). Источником эталонной частоты является прецизионный термостатированный генератор *ГК103-ТС-М* (относительная нестабильность 10^{-8}). Сигнальные фреймы с формирователя через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) поступают на усилитель мощности *AB EOS AT-1500T* с номинальным значением 1100 Вт на нагрузку 2 Ом. Согласование пьезокерамического преобразователя с выходными каскадами усилителя осуществляет цепь из повышающего трансформатора (Т) с коэффициентом трансформации 1:8 и согласующей индуктивности (L). Выходная мощность может регулироваться и, таким образом, обеспечивать уровень звукового давления излучателя, приведенного к расстоянию в 1 м, около 3000 Па.

Принятый акустический сигнал регистрируется приемной частью комплекса, состоящей из морского и берегового блоков. Морской блок конструктивно представляет собой ненаправленный гидрофон (ПГ) с предусилителем, размещаемый на необходимой глубине и соединенный сигнальным кабелем с РГБ, корпус которого представляет собой цилиндрический контейнер с положительной плавучестью, куда встроены герметичные отсеки для составных частей (рисунок 2.3) и, адаптированный к длительному функционированию на акватории.

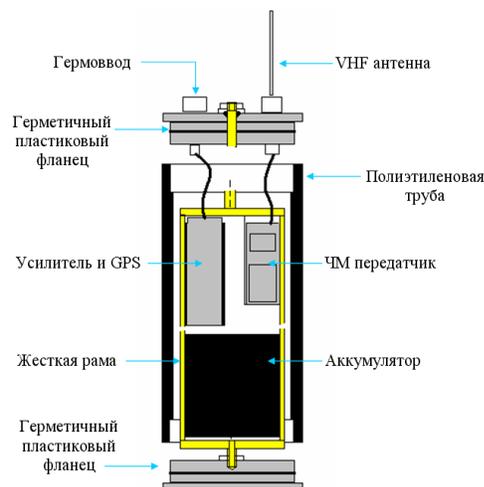


Рисунок 2.3. - Конструктивная схема радиогидроакустического буя

Внутри корпуса **РГБ** размещены: каркасная металлическая рама, *ЧМ*-радиопередатчик, *GPS*-приемник, усилитель акустических сигналов с полосой частот до 8 кГц, источник питания (**ИП**) на основе гелевых аккумуляторов с емкостью не менее 24 А*ч. Приемный гидрофон соединен с аппаратурой буя двухжильным кабелем, и может располагаться как на дне, так и на заданной глубине в пределах нескольких сотен метров (различные варианты для обеспечения приема сигналов в мелководных и глубоководных районах). В дополнение, помимо принятых сигналов, а также *GPS*-информации возможно подключение к аппаратуре дополнительных датчиков температуры и давления (глубины) посредством отдельных герметичных соединителей с помощью кабельных линий. Функциональная блок-схема работы приёмного тракта, содержащего морской и береговой блок, представлена на рисунке 2.4.

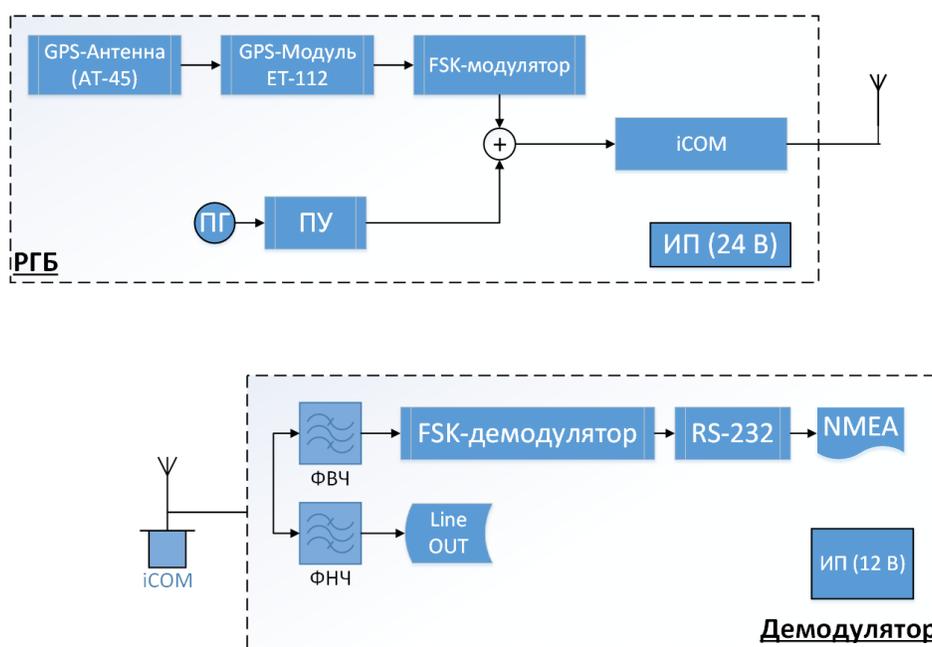


Рисунок 2.4. - Функциональная блок-схема приемного тракта

Для передачи гидроакустической информации используется модернизированный модуль, состоящий из *УКВ-ЧМ*-передатчика с несущими частотами 170-190 МГц (полосой до 80 кГц) и радиопередающая

четвертьволновая штыревая антенна с четырьмя противовесами. Дальность устойчивой радиопередачи (программно-регулируемая мощность - от 1 до 5 Вт) в идеальных условиях составляет 10-15км при приеме на берегу и около 2 миль - на судне. Радиостанция позволяет запрограммировать 16 каналов, выбираемых произвольно из общего частотного диапазона.

Для позиционирования системы разработан блок, включающий *GPS*-приёмник (*GPS*-модуль *ET-112* с антенной *AT-45*, размещенной на корпусе **РГБ**, точность ~ 3 м), координаты с которого передаются по радиоканалу с частотой 1 Гц (протокол передачи *NMEA 0183*) с помощью *FSK*-модулятора, в котором происходит кодирование данной информации на частотах 50 кГц и 55 кГц (соответствие логическим 0 и 1). После усиления и кодирования координатная и гидроакустическая информация суммируются и по радиоканалу передаются в береговой блок, предназначенный для их разделения. Прием осуществляется широкополосной программируемой радиостанцией *iCOM IC-R20*, с выхода которой сигнал поступает на блок фильтров для выделения гидроакустических (фильтр низких частот - **ФНЧ**) и координатных (фильтр высоких частот - **ФВЧ**) данных. После низкочастотной фильтрации гидроакустический сигнал сопрягается посредством линейного выхода с блоком программ регистрации, обработки и визуализации. Для корректного приема координатной информации (частота до 60 кГц) необходимо расширение полосы пропускания приемного тракта. Данная процедура реализована посредством снятия сигнала непосредственно с *ЧМ*-демодулятора радиоприемника, минуя все внутренние цепи низкочастотной коррекции. После фильтра высоких частот данные поступают на *FSK*-демодулятор (восстановления сигнала на основе петли фазовой автоподстройки частоты), к выходу которого через *COM*-порт (последовательный протокол *RS-232*) со скоростью передачи 4800 бит/с подключается персональный компьютер. Численные значения координат и времени измерения сохраняются построчно в текстовом файле (с расширением *.txt).

Зарегистрированные сигналы, синхронизированные с системой единого времени, поступают в качестве входных данных в программу *RT_CROSS* [98] для дальнейшей обработки («свертки» принятого гидрофоном с маской излученного сигналов) и исследования импульсного отклика на акустической трассе между источником и приемником. Практическая реализация данной процедуры возможна также с помощью аппаратно-разработанного временного коррелятора.

На основании оценки качества полученных результатов измерений имеется возможность корректировать уровни мощности и параметры излучаемого сигнала. Управление данными параметрами позволяет расширить технические возможности измерений для широкого диапазона соотношений «сигнал/шум» как за счет изменений мощности излучаемых сигналов, так и за счет изменений параметров сигналов (частоты, длительности, параметров фазовой модуляции).

2.2 Алгоритм реконструкции вертикального профиля скорости звука (температуры) и вариаций уровня морской поверхности

В данном разделе представлено описание методики проведения томографического эксперимента по акустической термометрии в реальном масштабе времени, на основании которой автором совместно с Половинка Ю. А. (лаборатория акустической томографии океана *ТОИ ДВО РАН*) развит метод реконструкции гидрофизических параметров.

В качестве результата представляется программное обеспечение и алгоритм восстановления вертикального профиля скорости звука (температуры) и расчета колебаний уровня морской поверхности (вследствие воздействия поверхностных приливов, ветровых нагонов и пр.) в мелководных акваториях.

В основе практической реализации лежит импульсное зондирование морской среды широкополосными псевдослучайными сигналами в условиях стационарных трасс с последующей оценкой измеренных амплитудно-временных параметров импульсной характеристики канала распространения. В основе методической реализации лежат результаты предварительного численного моделирования распространения звука (прямая задача), идентификации собственных лучей и калибровки системы по результатам контактных измерений параметров морской среды.

Схема эксперимента реализована путем размещения в заданных точках диагностируемой акватории на дне излучателя и приемного гидрофона, входящих в состав акустико-гидрофизической измерительной системы (раздел 2.1). Данное решение обусловлено, прежде всего, необходимостью минимизации помех, связанных с воздействием потока воды в точке постановки гидрофона. Размещение у дна более тралостойчиво и при обработке сигнальной информации на стационарных трассах не требуется учитывать изменения расстояния между корреспондирующими точками от колебаний системы под воздействием течений. Практический интерес при анализе информации обычно представляют несколько первых наиболее интенсивных приходов акустической энергии [99], измерение времен распространения которых позволяет рассчитывать скорости звука (температуры) на соответствующих лучевых траекториях. В отличие от контактных океанологических измерений в данном случае производится измерение интегральных (вдоль акустической трассы) значений поля скорости звука (температуры), т.е. средних по пространству, одновременно для всех горизонтов измерений.

Схема реализации методики заключается в размещении источника и приемника сигналов в заданных точках акустической трассы (рисунок 2.5). Излучатель, соединенный кабелем с генератором сложных сигналов $x[k]$, и приемный гидрофон в каркасной раме, соединенной через якорь с автономным РГБ, стационарно устанавливаются на дне.

Эксперимент заключается в излучении и регистрации псевдослучайных сигналов типа M -последовательностей, расчете импульсной характеристики диагностируемого волновода и измерении времен распространения импульсов акустической энергии. Синхронизация во времени процесса излучения/приема проводится с использованием высокоточной системы единого времени.

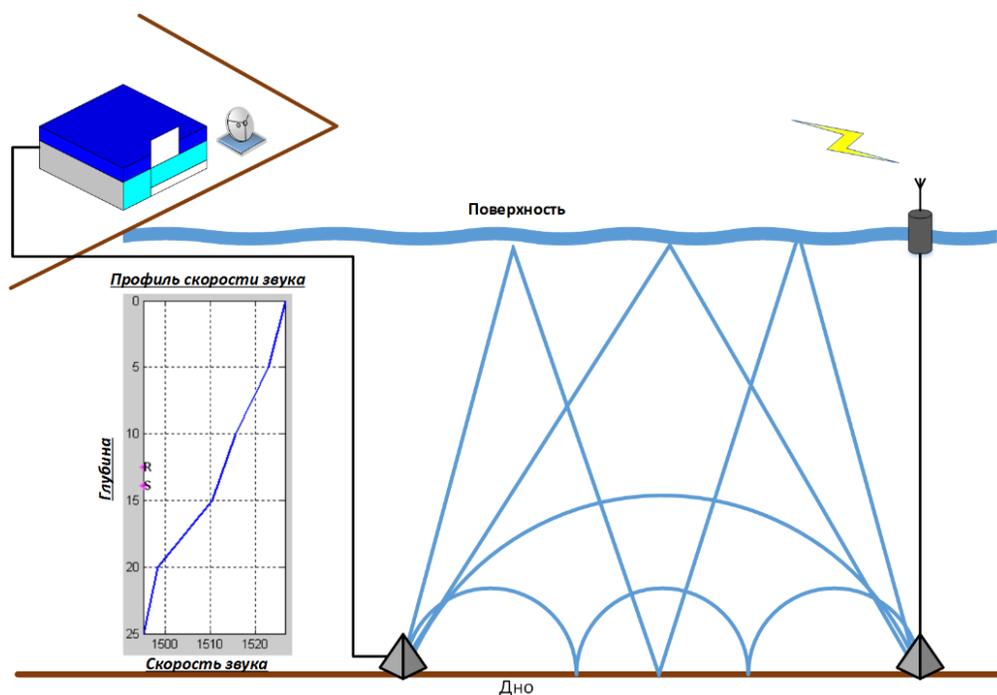


Рисунок 2.5. - Схема реализации методики эксперимента

Принятые гидрофоном сигналы $y[k]$, с помощью аппаратуры РГБ, по радиоканалу передаются на приемник берегового поста и вводятся в ПК (рисунок 2.6), где по результатам цифровой обработки определяется импульсная характеристика канала распространения - $h[k]$ во временной области. В основе вычисления $h[k]$ лежит расчет взаимной корреляционной функции (ВКФ) между дискретными сигналами $x[k]$ и $y[k]$ (рисунок 2.7) в частотной области [100]. Реализация обработки принятых сигналов с целью регистрации импульсного отклика и его записи в файл входных данных осуществляется специальной программой *RT_CROSS* с графическим интерфейсом пользователя [98], в которой

задействован пакет *Digital Signal Processing Toolbox* интерактивной среды для программирования, численных расчетов и визуализации результатов *Matlab*.

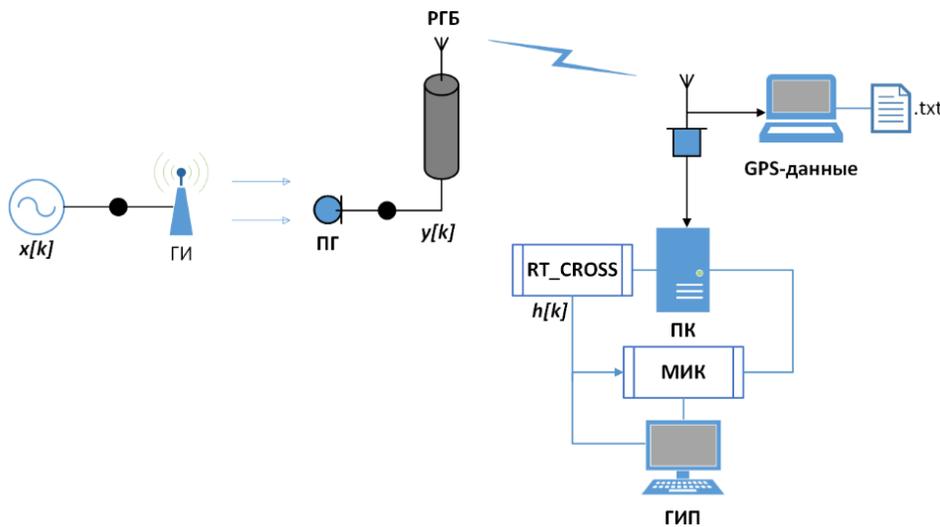


Рисунок 2.6. - Блок-схема последовательности поступления данных

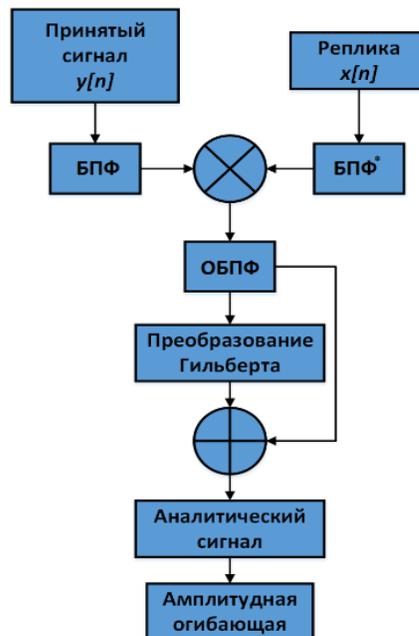


Рисунок 2.7. - Алгоритм вычисления импульсного отклика волновода

Известные методы акустической томографии для восстановления профиля скорости звука в глубоком океане становятся в ряде случаев неприменимыми для

условий мелкого моря вследствие отсутствия технической возможности разделить различные по пути распространения и близкие по времени прихода импульсы звуковой энергии вдоль траекторий собственных лучей. В основе предлагаемого инверсионного метода определения вертикального распределения скорости звука (температуры) лежит классическая схема лучевой томографии *Манка-Вунша* для глубокого моря [2], базирующаяся на предположении малых отклонений параметров среды от измеренного опорного профиля, обобщенная на случай мелкого моря *Серхио М. Иезусом* и *Орландо К. Родригесом* [56]. Для рассматриваемых условий было показано, что собственные лучи, образующие несколько первых приходов, имеют отражения от дна, рефрагируют в водном слое и не разрешаются во времени при приеме. А более поздние приходы с крутыми углами выхода лучей из источника (и, соответственно, углами прихода), многократно взаимодействующие с поверхностью и дном, могут разделяться с формированием достаточно большого количества характерных «четверок» приходов. Кроме того, число независимых приходов (т.е. «независимо» друг от друга несущих информацию о тех слоях, в которых они распространяются) значительно меньше, чем число фактически измеренных, разрешенных приходов. Физические ограничения, связанные с характеристиками канала распространения звука в «мелком море», указывают на количество независимых приходов и их разрешение во времени. При установлении линейной связи вариаций временных задержек разрешенных приходов по собственным лучам с флуктуациями скорости звука главной проблемой при решении обратной задачи является то, что не все разрешенные приходы независимо переносят информацию о скорости звука. В результате возникает необходимость идентификации и выделения во времени независимых приходов из общего количества экспериментально измеренных.

На основании вышеприведенных сведений получил развитие метод реконструкции профиля скорости звука [101], использующий времена всех, а не только независимых приходов (не требуется определения независимых собственных лучей и их полного разделения во времени, составляющих основные

проблемы при решении обратной задачи [49, 56]) и комбинированную схему решения прямой задачи распространения звука в акустическом волноводе. В рассматриваемом методе проведение процедуры структурной идентификации для анализа функции отклика акустического канала (**ФОАК**) на этапе численного моделирования подразумевает отбор каждого лучевого прихода в группы. В результате того, что при приеме импульсы акустической энергии поступают компактными группами, не разделяясь во времени, то уже нельзя говорить об амплитуде отдельных приходов. Вариации амплитуды выражаются статистически, так как амплитуда и задержка каждого импульса представляют собой случайную величину из-за влияния различных неоднородностей. Группа (или несколько групп) приходов при физической интерпретации обуславливаются «кластером» лучей – совокупностью множества лучей с похожими свойствами (значениями времен распространения и амплитуд, углов выхода и прихода, количеством отражений от поверхности и дна), которые могут рассматриваться в качестве «идентификаторов» лучей по аналогии с глубоким морем [102]. Объединяя лучи с близкой топологией возможно более точно определить параметры собственных приходов при их идентификации по максимумам корреляционной огибающей.

Перед началом проведения работ необходимо определить или измерить:

1. Глубины излучающей и приемной систем в точках постановки и горизонтальную дистанцию между ними (на основании известных координат по данным системы *GPS* или измерителя дальности в пределах «прямой» видимости);
2. Вертикальные распределения скорости звука $C_0(\mathbf{z})$, температуры $T_0(\mathbf{z})$ и солености $S_0(\mathbf{z})$ с помощью гидрологического оборудования;
3. Профиль дна вдоль акустической трассы по данным батиметрической съемки.

На основании полученных данных, в рамках лучевого приближения с использованием пакета прикладных программ *AcToolBox* [86] рассчитываются параметры собственных лучей для условий эксперимента. В качестве профиля

скорости звука на моделируемой трассе, кроме измеренных гидрологическим зондом, могут быть использованы архивные значения из баз данных для данного времени эксперимента, а профиля дна - картографические данные для указанного района. Результаты расчетов позволяют оценить времена приходов акустической энергии и их общее количество, время реверберации, т.е. определить импульсный отклик волновода и параметры собственных лучей, формирующих его максимумы (рисунок 2.8).

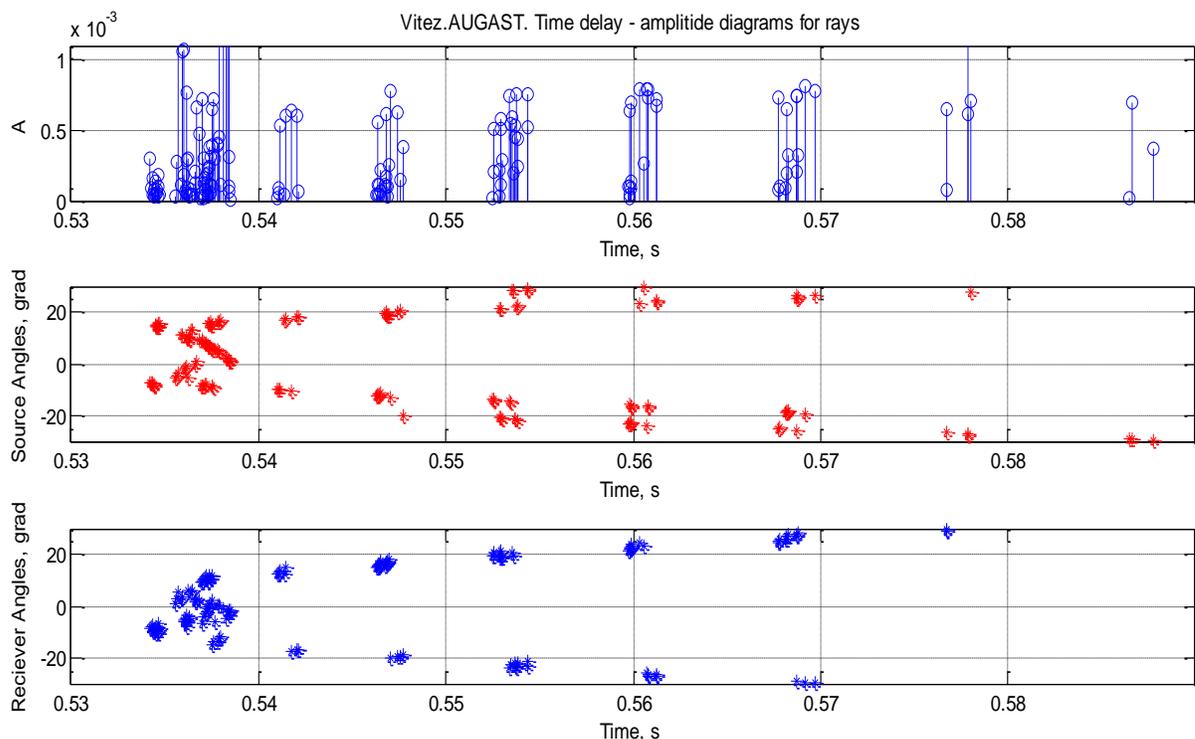


Рисунок 2.8. - Пример расчета импульсной характеристики с помощью лучевой программы *Bellhop*. Сверху вниз: собственные приходы, углы выхода из источника и углы прихода на приемник

Для условий эксперимента близких по геометрии к модельным в результате идентификации приходов, прошедших по различным лучевым траекториям, функция отклика акустического канала может иметь определенное количество максимумов на определенном временном интервале, углы выхода/прихода собственных лучей находятся в определенных диапазонах.

Количество приходов и времена распространения варьируются в зависимости от изменения длины акустической трассы и глубины источника/приемника и волновода (рисунок 2.9). С учетом слоистой структуры дна более важно затухание акустических сигналов, в результате чего вид рассчитанной функции отклика канала распространения может значительно измениться, что может, в том числе, привести к более реальным оценкам при определении (уточнении) глубин приема.

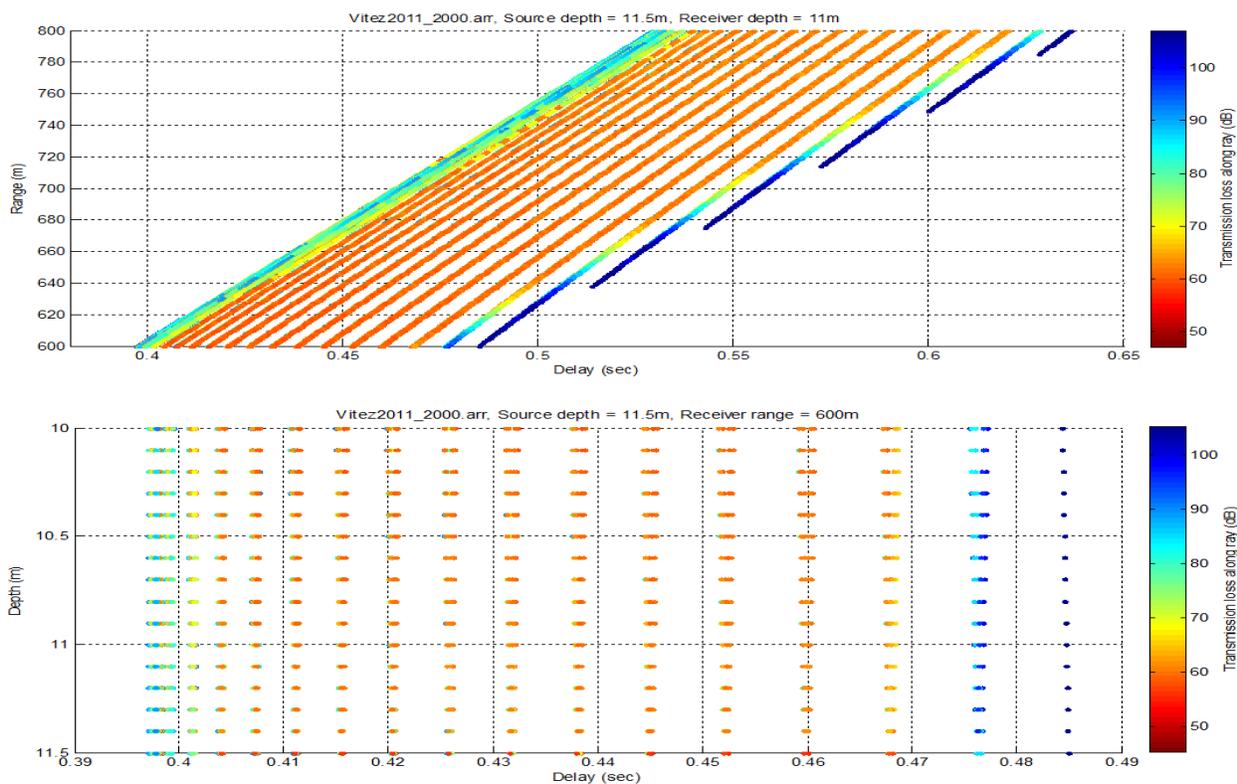


Рисунок 2.9. - Пример расчета импульсной характеристики с помощью лучевой программы *Bellhop*. Сверху вниз: параметры собственных лучей в зависимости длины акустической трассы и глубины источника/приемника

В случае совпадения приходов модельной и экспериментальной **ФОАК** на временной шкале для измеренных и рассчитанных абсолютных задержек каждого зарегистрированного импульса из структуры принятого сигнала, определяются: углы выхода лучей (из излучателя) \mathbf{a}_{out_i} и прихода (в приемник) \mathbf{a}_{in_i} , количество

отражений от дна N_{bot_i} и поверхности N_{sur_i} , длины траекторий D_{0r_i} , амплитуды A_{0r_i} , времена τ_{0r_i} и скорости V_{0r_i} распространения акустических сигналов между источником и приемником вдоль собственных лучей r_i . Эти данные являются исходными для вычисления вертикального профиля температуры в течение эксперимента. Значения восстанавливаемого профиля скорости звука, соответствующие траекториям r_i (т.е. принадлежащие характерным слоям с учетом лучевых диаграмм) и средним скоростям распространения $C(r_i)_n$ по временам приходов n , уточняются путем сравнения с результатами контактного измерения вертикального распределения скорости звука $C_0(z)$ на момент начала эксперимента из условия:

$$V_{0r_i} = \frac{\sum_{n=1}^N C(r_i)_n}{N} \equiv C_0(z).$$

Абсолютное время между моментами излучения акустического сигнала и регистрации каждого из серии импульсных приходов гидрофоном в эксперименте соответствует их временам распространения вдоль траекторий различных групп собственных лучей. Вычисление скорости распространения V_{0r_i} после сопоставления траекторий собственных лучей характерным слоям волновода выполняется для горизонтов z_{0i} по измеренным абсолютным значениям времен распространения τ_{0i} и рассчитанным длинам траекторий D_{0r_i} на стадии численного моделирования:

$$V_{0r_i} = \frac{D_{0r_i}}{\tau_{0i}}. \quad (2.1)$$

Глубины z_{0i} , соответствующие скоростям V_{0r_i} уточняются путем сравнения с результатами измерения вертикального распределения скорости звука $C_0(z)$ на момент начала измерений из условия $V_{0r_i} \equiv C_0(z_i)$. Дальнейший поиск и уточнение соответствия восстанавливаемого вертикального профиля скорости звука $C(z_i, \tau_i)$ вновь измеренным временам прихода τ_i серии импульсных сигналов сводится к оценке $C(z_i, \tau_i) \equiv V_{r_i}(z_{0i})$ для установленных ранее

«опорных» глубин z_{0i} . Значения вертикального профиля температуры пересчитываются по $C(z_i, \tau_i)$ с помощью полуэмпирической формулы *Макензи* [47], содержащей для расчета определенные значения скорости звука по горизонтам, максимальной глубины водного слоя в районе проведения эксперимента и солености (среднее значение по исследуемой области). Принципиальным моментом данного подхода является отклонение восстанавливаемого профиля от базового на величину большую, чем допускают условия линейного приближения [37, 50]. В данном случае для корректных расчетов необходимо задать новый опорный профиль.

Основными требованиями к разработанному алгоритму были: обеспечить достаточную точность определения восстанавливаемых величин, максимальное разрешение по глубине и заданную периодичность циклов измерений в предположении долгосрочного наблюдения в режиме реального времени. В общем случае, ограничения по дистанции и глубине не являются принципиальными, носят технический характер и обусловлены конкретной аппаратурной реализацией, требующей синхронизации по времени излучения, приема и обработки гидроакустических сигналов.

Результаты апробации данной методики и алгоритма подробно рассмотрены в главе 3.

Мониторинг вариаций поверхностного уровня моря

Для целого ряда прикладных задач в океанологии важным параметром, определяющим состояние морской среды, является изменение глубины моря из-за вариаций уровня поверхности, связанных с динамическими процессами типа приливных или нагонных явлений. Решение поставленных в диссертационной работе задач также требует учета вариаций уровня поверхности, т.к. расчеты протяженности лучевых траекторий, касающихся поверхности, напрямую зависят от этого параметра.

Изменения поверхностного уровня моря определяются по разнице времен распространения двух характерных групп собственных лучей (рисунок 2.10):

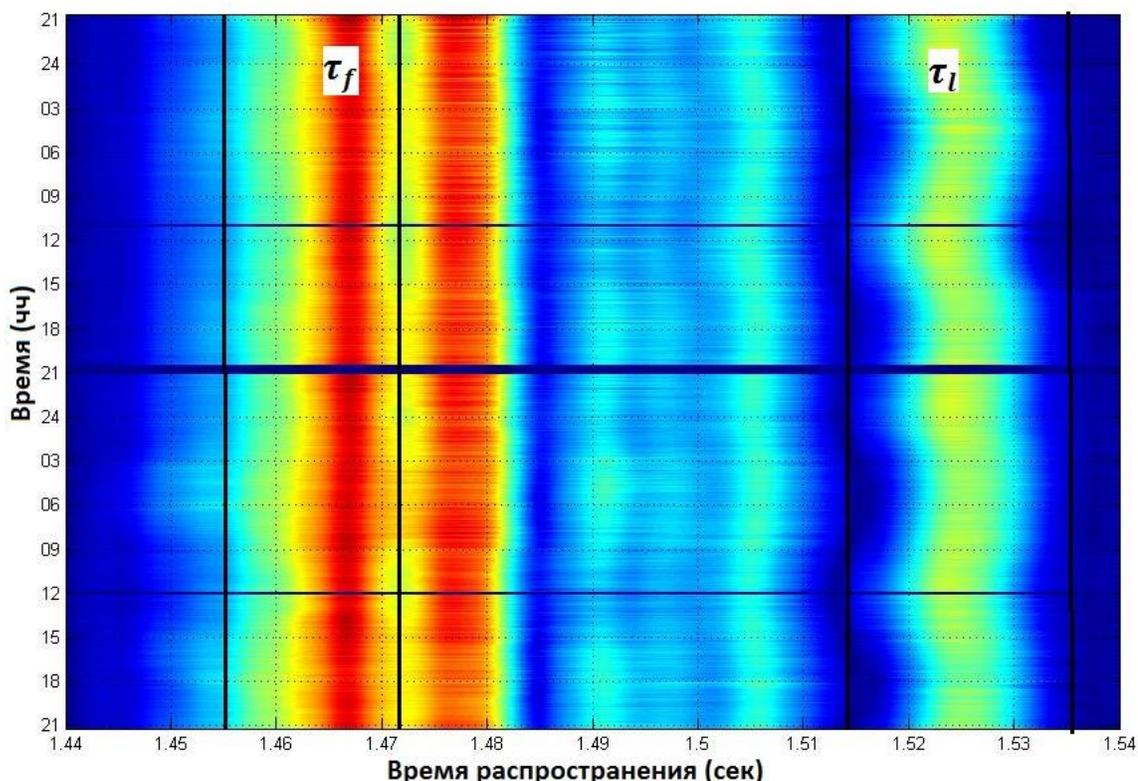


Рисунок 2.10. – Характерные приходы зондирующего сигнала (400 Гц) для вычисления уровня морской поверхности

1. к первой τ_l относятся последние приходы с достаточной интенсивностью и максимальным количеством отражений от дна и поверхности, имеющие крутые углы выхода из источника (т. е. содержат информацию о всем волноводе с учетом приливно-отливных, нагонных и других явлений, вызывающих вариации уровня моря);

2. ко второй τ_f – приходы, формируемые лучами, «чувствительными» только ко внутренним изменениям в самой среде (приходы, взаимодействующие только со дном и рефрагирующие в водном слое, имеющие пологие (малые) углы выхода).

Для пересчета разности временных задержек τ_l и τ_f в вариации уровня морской поверхности используется эмпирически установленный коэффициент пропорциональности, определяемый с учетом калибровки по натурным или табличным данным уровня прилива:

$$H = k \times (\tau_f - \tau_l), \quad (2.2)$$

где $k = \frac{H_{max} - H_{min}}{\tau_{l_{max}} - \tau_{l_{min}}}$ – коэффициент пропорциональности, $H_{max} - H_{min}$ – высота прилива, $\tau_{l_{max}} - \tau_{l_{min}}$ – разности времен распространения последнего прихода для моментов времени полной и малой воды.

2.3 Программа *МИК* (моделирование, идентификация, калибровка)

Измерения гидрофизических параметров морской среды с помощью измерительной системы (раздел 2.1) на основе разработанного алгоритма и методики проведения эксперимента (раздел 2.2) проводятся под управлением программы *МИК* [103], написанной автором в среде объектно-ориентированного программирования *Matlab*. Разработка алгоритма работы, отладка и оптимизация составных блоков (рисунок 2.11) проводились на основе данных измерений **ФОАК** на стационарных трассах в 2006 и 2009-2012 годах на шельфе *Японского моря*.

Использование программы осуществляется как в реальном масштабе времени (измерение и мониторинг) при записи первичной информации и результатов расчетов в лог-файлы, так и в режиме пост-обработки полученных ранее экспериментальных (архивных) данных. Предусмотрены два варианта работы: автономный - с входными параметрами, жестко заданными перед началом

эксперимента, управляемый – возможность изменения режимов излучения и/или приема акустических сигналов и тонкая настройка параметров обработки. После завершения работы программа *МИК* входит в режим ожидания дальнейших действий (перезапуск или продолжение работы, сохранение, анализ/обработка данных). В зависимости от длительности эксперимента формируется несколько выходных файлов (размер не фиксирован), содержащих в названии информацию о времени начала записи.



Рисунок 2.11. - Общая структура графического интерфейса программы *МИК*

На этапе практической апробации программного модуля *МИК* в реальных условиях предварительно выполняются следующие действия:

1. Измерение тестовой **ФОАК** для расчета входных данных программы *МИК*;
2. Решение прямой задачи с помощью лучевой программы *Bellhop*;
3. Совместный запуск программ *RT_CROSS* и *МИК*.

Перед началом работы программы *МИК* необходимо указать пути доступа к файлам, содержащим рассчитанные по экспериментальным данным амплитудно-временные значения импульсной характеристики. Считывание осуществляется поэлементно из каждой строки бинарного файла (длина строки зависит от частоты

дискретизации и длительности, а каждое числовое значение в памяти занимает 4 байта), период обращения для проверки наличия новой порции данных определяется периодом между излучениями сигнала (по умолчанию - один раз в минуту). Далее осуществляется установка входных параметров:

1. Ввод/контроль параметров записи импульсной характеристики из отдельного текстового файла (период времени измерений (мин.), время задержки (сек.), частота дискретизации (Hz), длительность (сек.));

2. Выбор количества диапазонов анализа структуры приходов и начальных условий (временные интервалы) для следящих фильтров;

3. Ввод опорного профиля скорости звука (на начало эксперимента), значений дистанций вдоль собственных лучей и «глубин» для максимумов корреляционной огибающей;

4. Фиксация момента получения метки времени от системы единого времени.

Для каждого отдельного района работ и конкретной схемы эксперимента временные интервалы определяются характером вариаций вертикального распределения скорости звука. Изменение интервалов анализа возможно вызовом специального меню, в котором для выбранного числа групп приходов задаются границы поиска локальных максимумов. Оценка значений данных интервалов t делается на стадии предварительного моделирования исходя из времени всех групп приходов T , их количества N и уточняется по виду первого, измеренного импульсного отклика:

$$t = \frac{T}{N}. \quad (2.3)$$

Калибровка опорного профиля скорости звука для корректных расчетов, в случае его значительного отклонения (нарушения условия линейного приближения) от измеренного реализуется в процессе работы программы вводом нового базового профиля (в том числе и среднестатистического).

Отображение первичной информации после измерения и результатов расчета осуществляется одновременно в отдельные окна графического интерфейса программы *МИК* по ходу эксперимента, позволяет оценить вариации гидрофизических процессов в среде, влияющих на динамику импульсного отклика, и уровень шумов корреляционной обработки, маскирующих полезную информацию. На графической панели первого (главного) окна (рисунок 2.12) отображаются: амплитудно-временная структура измеренной импульсной характеристики, её динамика в течение 30-минутного интервала, результаты работы следящих фильтров с расчетом времен прихода по локальным максимумам («пикам»), рассчитанный профиль скорости звука, соответствующий текущему отклику, и средний (калибровочный) профиль.

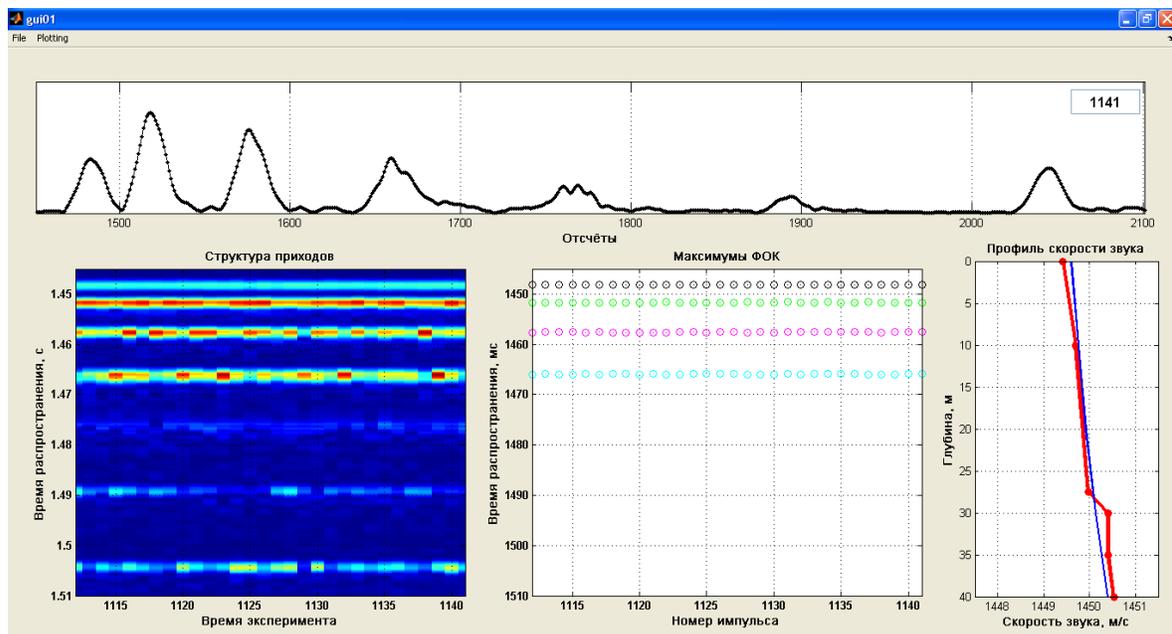


Рисунок 2.12. – Главное окно графического интерфейса программы *МИК*

С помощью контекстного меню осуществляется ввод входных параметров. На панели второго окна (рисунок 2.13) в зависимости от выбора скорости звука или температуры отображаются их вариации во времени для заданного количества горизонтов, а также значения рассчитанного уровня поверхности моря вдоль

трассы акустических измерений. Все результаты отображаются без прореживания или осреднения.

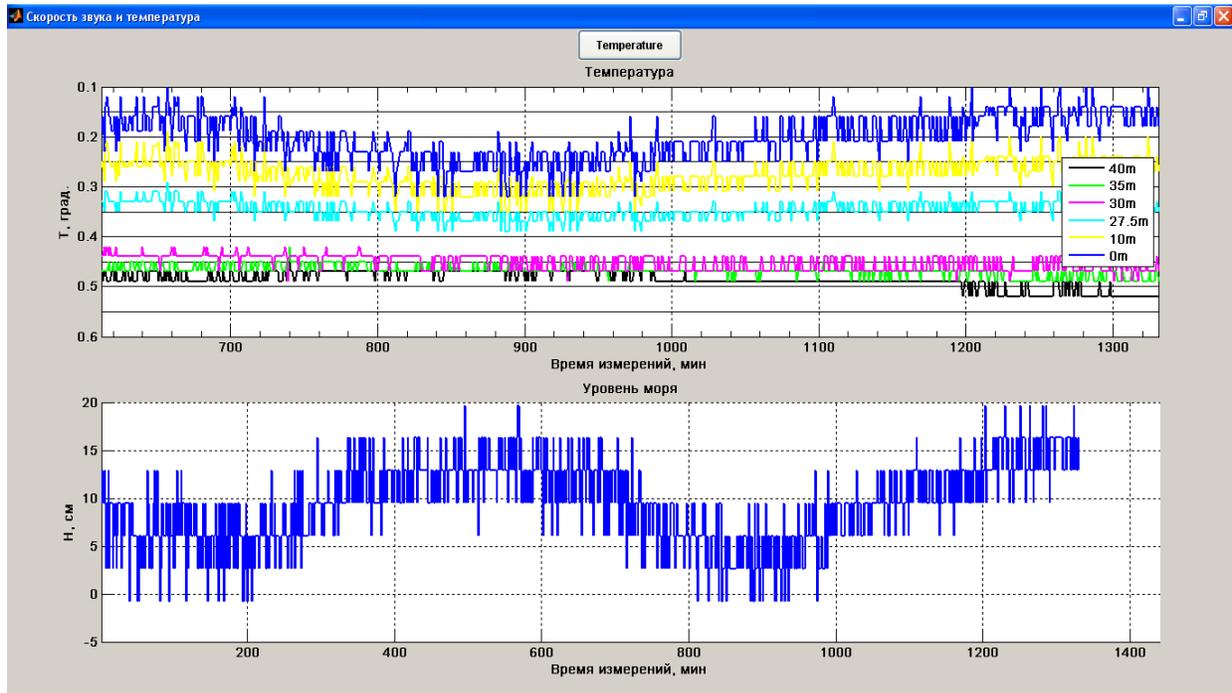


Рисунок 2.13. – Дополнительное окно №1 ГИП программы МИК

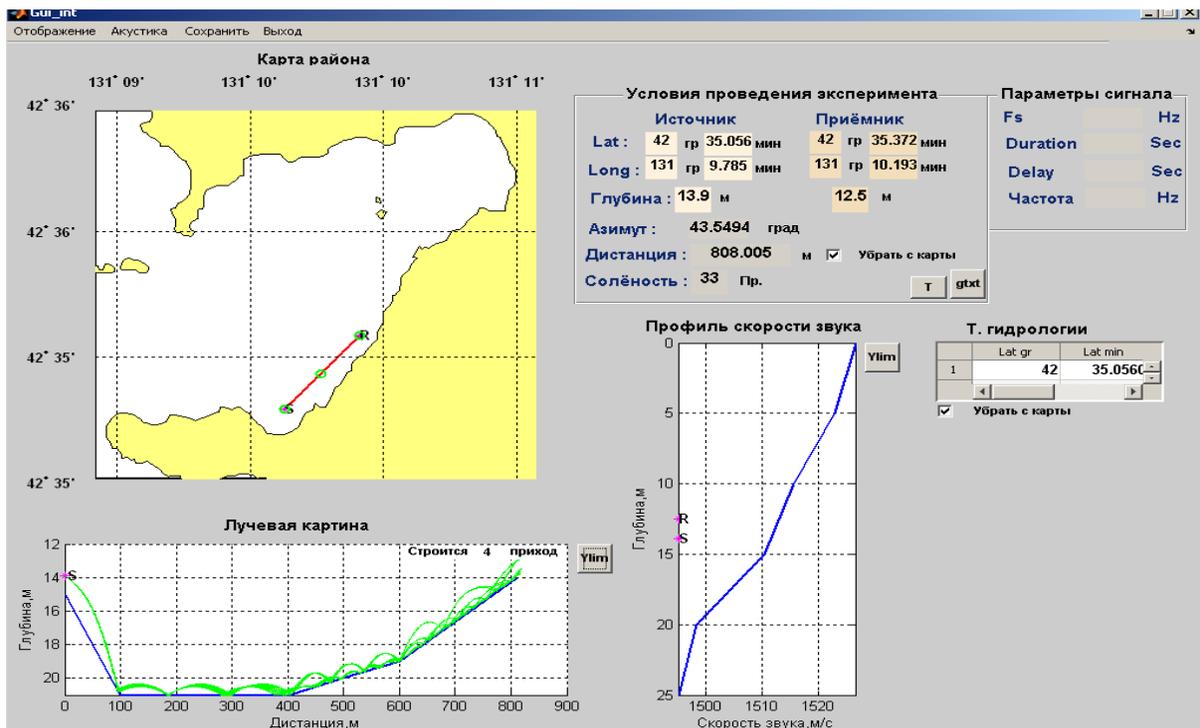


Рисунок 2.14. – Дополнительное окно №2 ГИП программы МИК

На панели третьего окна (рисунок 2.14) отображается информация о районе работ и параметры записи сигнала и акустической трассы (карта района работ, координаты, дистанция, глубины излучателя и приемника, гидрологические характеристики среды) и выводится лучевая диаграмма. Панель четвертого окна (рисунок 2.15) отображает графики изменений во времени вертикальной структуры скорости звука (температуры) и значения поверхностного уровня моря, для которых предусмотрен режим осреднения скользящим средним.

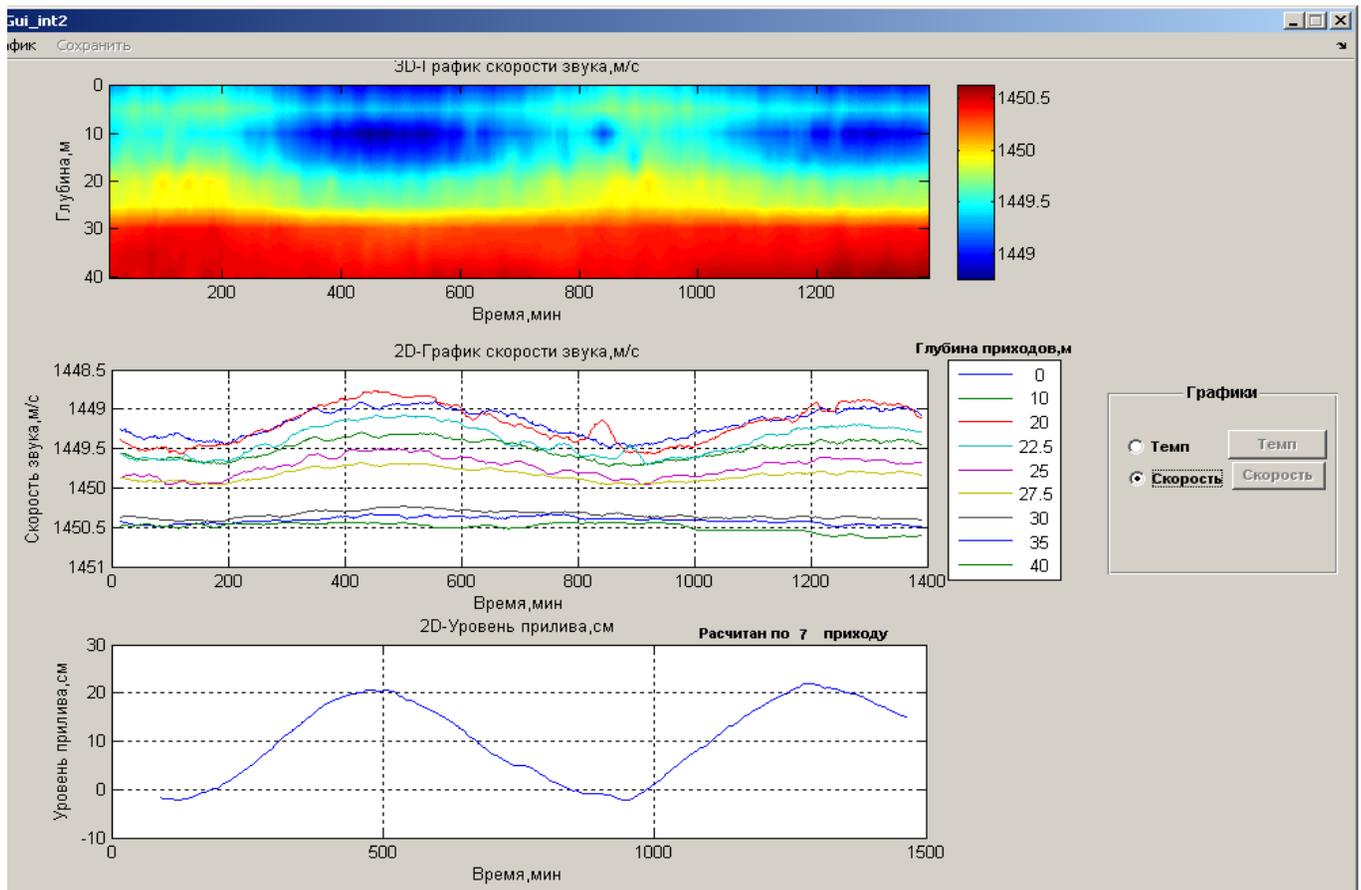


Рисунок 2.15. – Дополнительное окно №3 ГИП программы МИК

2.4 Аппаратно-программный комплекс для мониторинга морских течений вдоль стационарной трассы

Анализ разработок отечественных и зарубежных специалистов в области прикладной гидроакустики показывает, что в качестве технических средств при организации долгосрочного мониторинга динамических процессов и структуры прибрежных вод могут быть предложены гидроакустические трансиверы [52, 69, 93, 95], представляющие совмещенные источники и приемники гидроакустических сигналов. Для зондирования акваторий с размерами в единицы и десятки километров применяются различные типы сигналов в диапазоне частот 1-40 кГц. Измерительные системы на базе трансиверов позволяют измерять вариации скорости звука, вызванные температурными неоднородностями, пространственно-осредненные параметры течений (скорость и направление), приливно-отливных колебаний уровня моря, внутренних волн и других явлений [10]. В основу измерений положены метод встречного зондирования [104] и принцип акустической взаимности [70] - сигналы, распространяющиеся во встречных направлениях, имеют одинаковую лучевую картину (структуру приходов) в «идеальных» условиях, но сдвинуты по времени пропорционально компоненте скорости потока между парой трансиверов.

Разработанный совместно *ТОИ ДВО РАН* и *Институтом науки и технологий (Республика Корея)* гидроакустический трансивер (рисунок 2.16) представляет собой комбинированную систему на базе широкополосного преобразователя, функционирующего в обратимом режиме, и блока аппаратуры, на основе модифицированной автономной излучающей системы (раздел 2.1). Апробация предложенных технических средств проводилась с 2012 года на шельфе *Японского моря* для различных схем эксперимента (2- и 3-точечных постановок трансиверов на исследуемых акваториях). Обеспечение ежеминутного

периода измерений в течение нескольких суток работы систем потребовало внедрения усовершенствованной системы перезарядки и расхода потребления батарей. До полной разрядки аккумуляторной батареи обеспечивается продолжительность работы автономной излучающей системы от 20 до 60 часов в зависимости от длины зондирующего сигнала и выходной мощности.

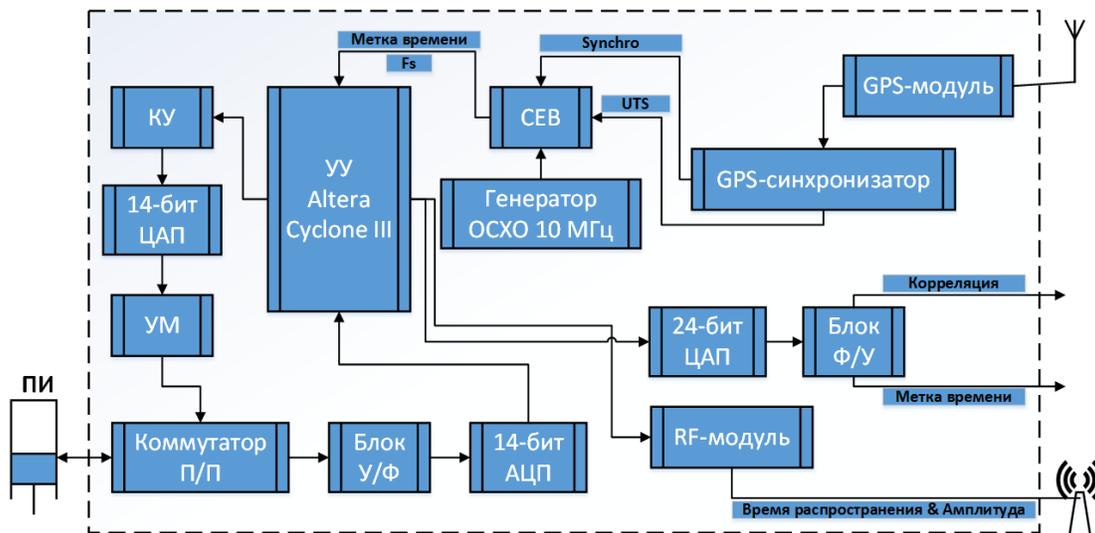


Рисунок 2.16. - Структурная блок-схема трансивера

Модификация автономной излучающей системы для расширения функциональных возможностей предусматривает добавление коммутатора приема-передачи (П/П) пьезоэлектрического преобразователя (ПИ), встроенного программного обеспечения для платы *GPS*-синхронизатора и аппаратного коррелятора (АК), разработанного на основе управляющего устройства *Altera Cyclone III* (УУ), передающего цифрового *RF*-модема (передача данных по радиоканалу), коммутацию приемного цифрового *RF*-модуля с персональным компьютером. Синхронизация всех трансиверов и блока корреляционной обработки осуществляется от блока *GPS* с точностью $\pm 10^{-6}$ с, при условии наличия видимых спутников не менее 4-х, а при отсутствии спутников - от внутреннего термостатированного генератора. Для обеспечения возможности работы пьезоэлектрического преобразователя в обратимом режиме, используются диодные

коммутаторы, реализованные по стандартной схеме, применяемой в судовых эхолотах. Блок обработки (операция свертки между излученным и принятым сигналом), пиковые детекторы и пороговое устройство в составе внутреннего аппаратного коррелятора предназначены для вычисления амплитуд, времен распространения приходов на основе поиска максимумов корреляционной огибающей. Технические характеристики аппаратного коррелятора:

1. Емкость входного регистра вычисления взаимно-корреляционной функции - 4080 отсчетов;
2. Длина M -последовательности - 255 символов;
3. Количество периодов несущей частоты на символ - 4;
4. Количество отсчетов на период несущей частоты - 4;
5. Манипуляция – фазовая на 180° (1 - 0° , 0 - 180°);
6. Максимальная несущая частота - 14 КГц;
7. Разрядность входного сигнала - 16 бит;
8. Формат входных данных - прямой целый знаковый двоичный код;
9. Разрядность выходного сигнала корреляции - 24 бит;
10. Формат выходных данных - целый беззнаковый двоичный код.

Метод сглаживания взаимно-корреляционной функции - осреднение:

1. Окно осреднения - среднеарифметическое;
2. Длина окна - 4 отсчета.

Техническое решение для удаленной передачи данных по радиоканалу базируется на встраиваемых (безкорпусных) или полноценных RF -модемах (рабочая частота - 433 МГц, тип модуляции - FSK/MSK) с дополнительными антеннами для улучшения качества устойчивого приема (дальность передачи 2-3 км). Береговой пост отдельно оснащен устройством сопряжения приемного RF -модуля со стандартным входом персонального компьютера через последовательный интерфейс $TTL/RS-232$ (скорость передачи данных ≥ 2400 бод).

Оценка стабильности и времени автономности работы системы при разных режимах (мощности и периоде излучения) и определение оптимальных

параметров зондирующих сигналов (частоты, порядка M -последовательности) основывается на серии тестовых экспериментов после установки и апробации на конкретной акватории.

Одновременное излучение акустических сигналов в противоположных направлениях между двумя точками может использоваться для отделения эффектов, вносимых течениями, от эффектов, связанных с перестройкой структуры вертикального профиля скорости звука при влиянии различных рефракционных неоднородностей. Метод встречного зондирования лежит в основе практической реализации исследования параметров приливных течений, внутренних волн, оценки массопереноса, циркуляции вод и т.д. [11].

В «неподвижном» океане нарушение принципа «взаимности» между акустическими сигналами, распространяющимися во встречных направлениях свидетельствует о движении среды, т.е. условия распространения вдоль и против потока существенно изменяют геометрию лучей [105]. Влияние течений на звуковое поле в условиях «многолучёвости» приводит к значительным вариациям, несмотря на то, что вертикальные градиенты скорости звука вносят большой вклад в рефракцию лучей по сравнению с вертикальными градиентами течений. В работе [69] с помощью анализа амплитуд и времен распространения, структуры приходов принятого сигнала было показано, что различия между встречными посылками имеют тот же порядок, как и флуктуации характеристик сигнала при одностороннем распространении.

Решение обратной задачи сводится к вычислению разницы абсолютных значений времен распространения приходов τ_{direct_n} и $\tau_{inverse_n}$ (рисунок 2.17), формируемых n -й группой лучей в противоположных направлениях. При этом разность может интерпретироваться как вносимая течениями положительная или отрицательная поправка ко времени распространения. Если информация о направлении и характере течения относительно расположения стационарной трассы, организованной двумя трансиверами, априори неизвестна, то только вклад

компоненты течения параллельной акустической трассе обуславливает вариации времен распространения.

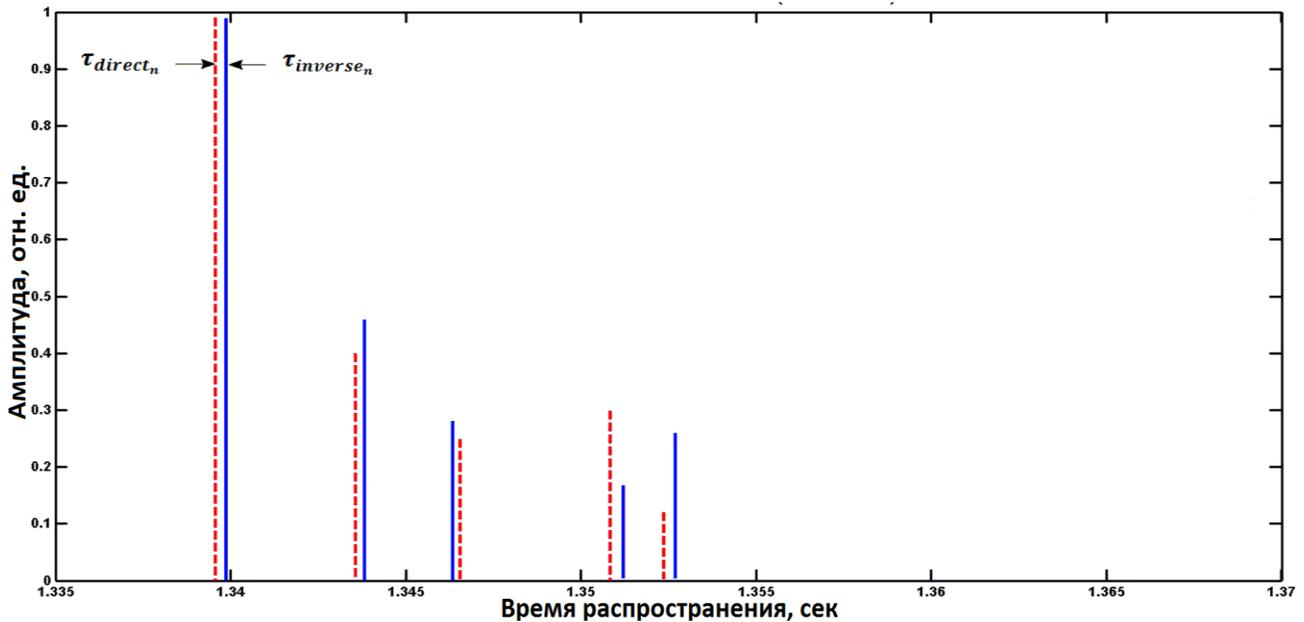


Рисунок 2.17 - Данные аппаратно-временного коррелятора. Максимумы импульсного отклика при встречном зондировании

Сумма времен приходов $S_n = \tau_{direct_n} + \tau_{inverse_n}$ связана с эффективной скоростью звука $c_n = 2R/S_n$, а разность $\Delta\tau_n = \tau_{direct_n} - \tau_{inverse_n}$ — со значением скорости потока (или проекции на акустическую трассу, рисунок 2.18):

$$V_n = \frac{\Delta\tau_n c_n^2}{2R}, \quad (2.4)$$

относительно длины дистанции R и скорости распространения c_n вдоль траекторий n -й группы собственных лучей [104].

Для реализации мониторинга динамики морской среды по данным информационно-измерительной системы на базе 2-х гидроакустических трансиверов в реальном масштабе времени автором разработано программное обеспечение *CurM* с графическим интерфейсом пользователя (рисунок 2.19) для расчетов и визуализации интегральных значений скорости звука (температуры),

пространственно-осредненных значений скорости течения и его направления по отношению к акустической трассе.

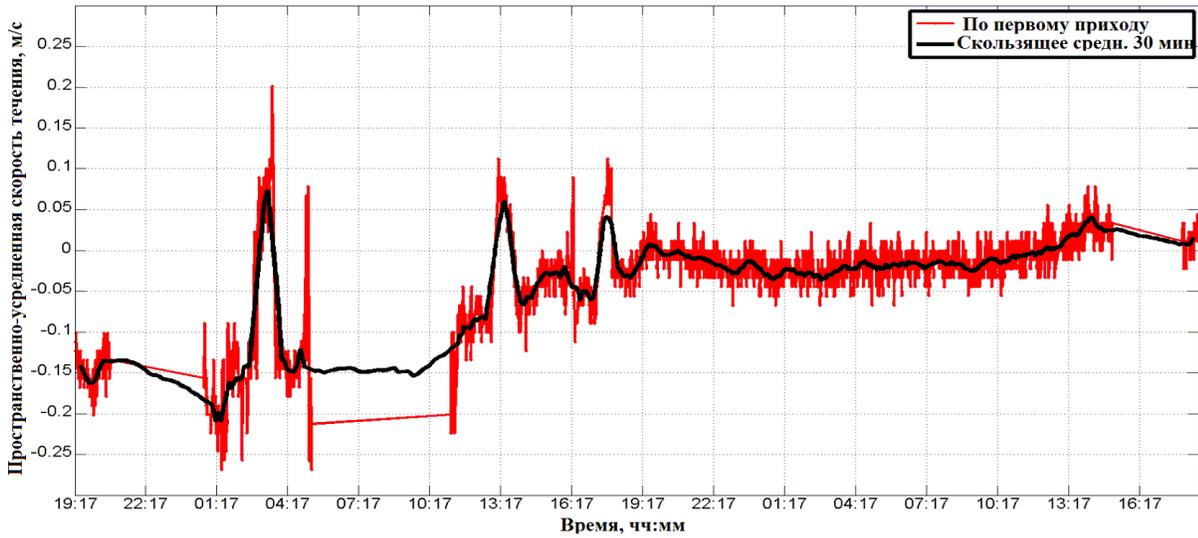


Рисунок 2.18 – Значения скорости течения вдоль акустической трассы, вычисленные по разнице времен первых приходов

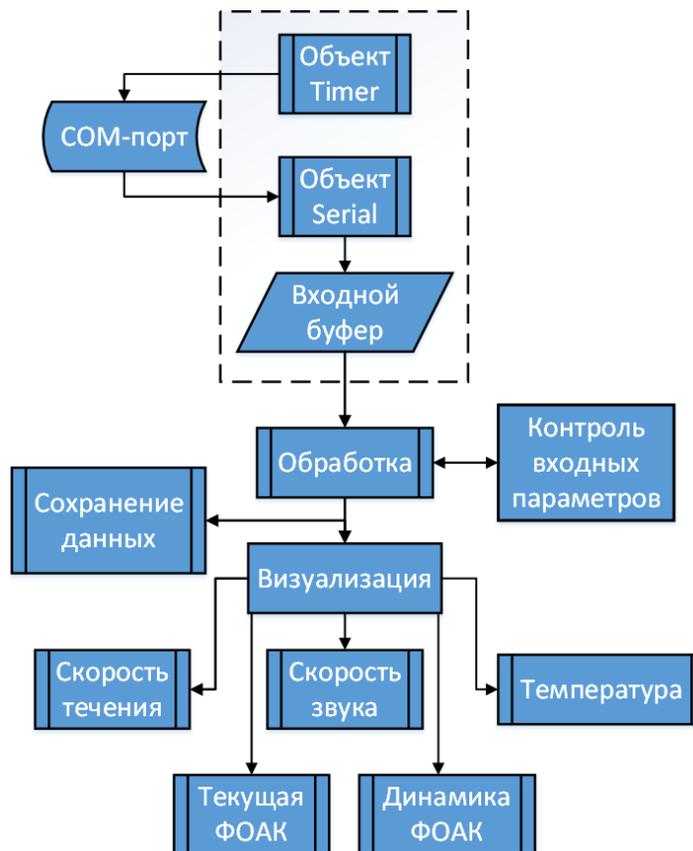


Рисунок 2.19. – Общая функциональная блок-схема алгоритма работы *CurM*

Установка входных параметров, управление и прием данных с блока корреляционной обработки производится с помощью интегрированных в интерактивную среду *Matlab* объектов *Timer* и *Serial*. Объект *Timer* осуществляет временной контроль работы *COM*-порта компьютера (инициализация, время открытия/закрытия, время записи во входной буфер и прием двух информационных посылок), *Serial* - форматированное чтение данных (3 текстовых строки: первая – амплитуды, вторая – времена распространения, третья – локальное время по *GPS*). Данные первых двух строк представлены в отсчётах, текущее время – чч:мм:сс. Период приема между посылками по умолчанию равен 1 секунде. Вся поступающая информация сначала накапливается во входном буфере объекта *Serial*, после того как поток данных прекращается, происходит закрытие *COM*-порта и данные передаются в рабочую область среды *MATLAB* для последующей обработки и вычисления выходных параметров. Графическая визуализация предусматривает отображение входных и выходных параметров эксперимента (рисунок 2.20).

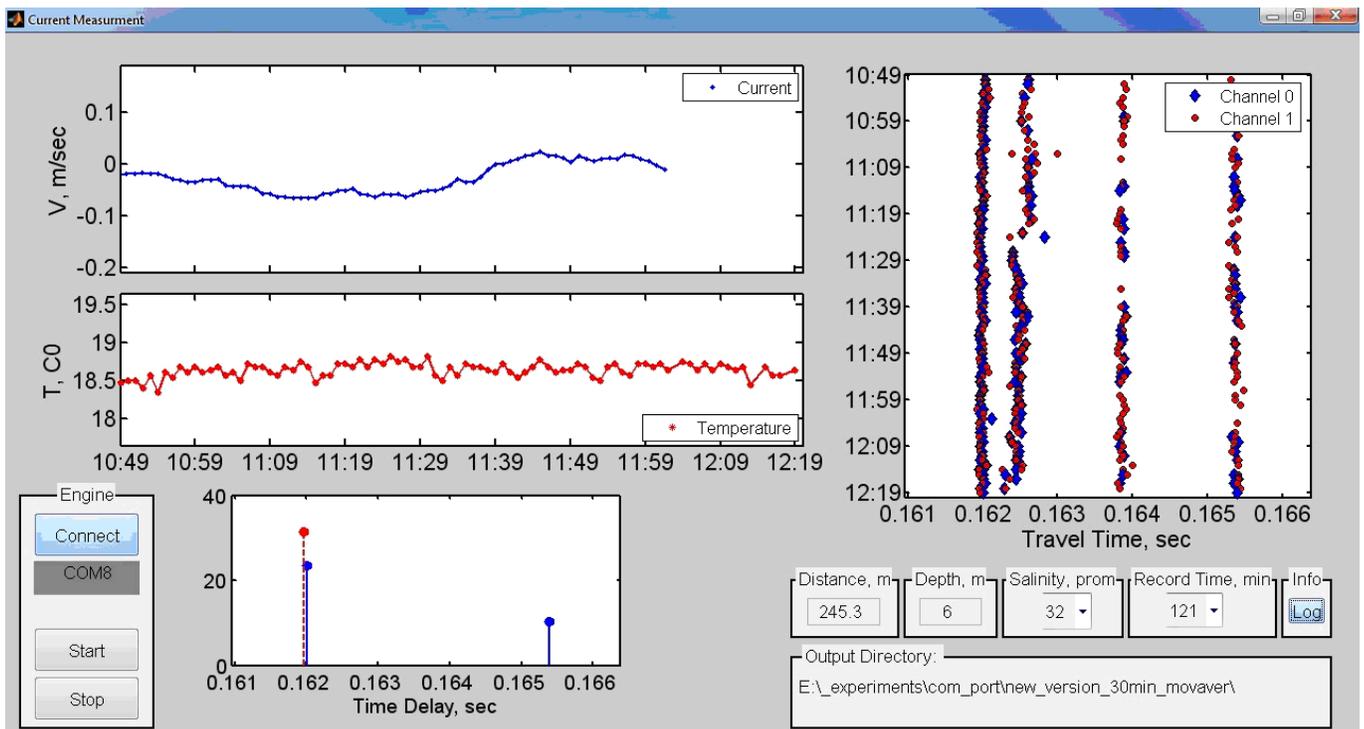


Рисунок 2.20. – Графический интерфейс пользователя *CurM*

По умолчанию измерения проводятся с периодом раз в минуту. При этом доступен контроль значений максимальной глубины и солености, необходимых для перерасчета скорости звука в температуру, горизонтальной дистанции между парой трансиверов и времени работы таймера (длительности эксперимента). В программе предусмотрено сохранение всех принимаемых и рассчитываемых значений в лог-файл на персональном компьютере для их постобработки и анализа. В качестве временных меток также сохраняются текущие значения времени и номер посылки (измерения).

Панель запуска программы *Engine* отвечает за подключение и отображение номера доступного *SOM*-порта, по которому будут передаваться данные и, непосредственно, запуск и остановку программы. Панель входных данных содержит функциональные поля для задания параметров эксперимента и расположение директории для сохранения. На крайнем, правом графике отображается динамика максимумов импульсного отклика акустического волновода во времени при зондировании в противоположных направлениях. В качестве гибкого управления возможности интерфейса позволяют пользователю вручную задавать диапазон поиска максимумов корреляционной огибающей (начальные условия), чтобы далее программа автоматически выделяла с помощью окна слежения необходимые приходы акустической энергии, по которым должны осуществляться расчеты выходных параметров.

Верхний, левый график отображает осредненные 30-минутным «скользящим» окном значения скорости течения, вычисляемого по выбранным приходам с учетом горизонтальной дистанции наиболее близкой к длине лучевых траекторий, формирующих данные приходы. Средний, левый график отображает текущие интегральные значения температуры на трассе, нижний – текущие амплитудно-временные значения «пиков» из структуры импульсной характеристики, вычисленных в заданных границах поиска. После приема информационных посылок со значениями времен распространения происходит их преобразование из отсчетов в секунды.

Далее следует проверка «корректности» используемых времен распространения для расчетов. Из теории фазоманипулированных сигналов известно, что при многолучевом распространении, в «идеальных» условиях, временное разрешение при приеме определяется шириной одного символа модулирующей последовательности [106]. Процедура проверки основывается на данном заключении и представляет собой оценку разности времен распространения между двумя «обоюдными» приходами τ_{direct} и $\tau_{inverse}$:

$$\Delta\tau \equiv \tau_{direct} - \tau_{inverse} \leq \frac{1}{F} \times m, \quad (2.5)$$

где m – количество периодов на символ, F – несущая частота. Если времена удовлетворяют этому условию, то приходы считаются «взаимными» и используются для дальнейших расчетов, если нет, то программа ожидает поступления нового информационного пакета для очередной проверки установленного критерия.

Для просмотра информации о текущей посылке и рассчитанных данных предназначен вызов кнопкой *Log* из панели *Info* дополнительного окна (рисунок 2.21), содержащего данные о структуре посылки, сформированной на основе результатов работы аппаратно-временного коррелятора и системы единого времени, вычисленных значений средней температуры, пространственно-осредненных скорости звука и течения, амплитуд и времен распространения.

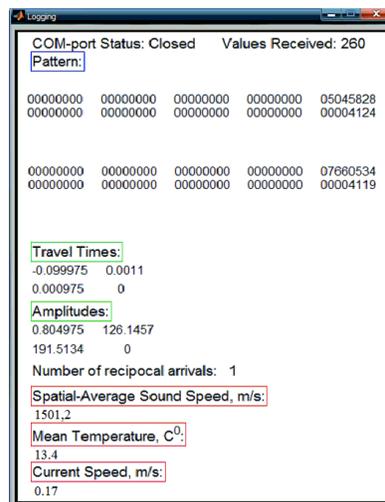


Рисунок 2.21. - Информационная панель программы *CurM*

2.5 Программа *ЗРСурМ* для определения параметров вектора течения (3-точечная схема измерений)

Для описания вектора течения достаточно знания его абсолютной величины - длины вектора (скорость течения) и направления. Для получения информации о направлении и характере течения необходимо использовать минимум три гидроакустических трансивера, которые формируют в горизонтальной плоскости на исследуемой акватории прямоугольный треугольник [104]. Основным недостатком такой схемы является расстановка приборов в вершинах треугольника с сохранением его конфигурации, что может оказаться физически необоснованно и практически затруднено. В работе [107] представлено описание алгоритма расчета значений скорости и направления течения при использовании 3-точечной постановки автономных гидроакустических станций, в основе которого лежит получение двух ортогональных компонент течения в центре произвольного треугольника. Измерения проводятся по разности времен на каждой паре сторон (акустических трасс), одновременно исходящих из общей вершины, что дает возможность оценивать пространственно-усредненные параметры течения вдоль них. На рисунке 2.22 показана схема, согласно которой происходит трансформация проекций течения на акустические трассы в две ортогональные компоненты (северную – V_N и восточную – V_E) для случая, когда рассматривается только одна пара сторон. Следует отметить, что использование информации о средней скорости течения для двух различных акустических трасс, связанных одной общей вершиной вполне достаточно для вычисления компонентов вектора течения.

Начало координатной системы (V_E, V_N) помещается в центр треугольника, формируемого двумя акустическими трассами, а сдвинутая с помощью

параллельного переноса координатная система (V_E', V_N') размещается в общей вершине для измерения направления на трассы.

Далее преобразование производится следующим образом:

$$V_E = \frac{V_1 \times \cos \theta_2 - V_2 \times \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \times \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \times \sin \theta_2}; V_N = \frac{-V_1 \times \sin \theta_2 + V_2 \times \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \times \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \times \sin \theta_2}, \quad (2.6, 2.7)$$

где θ_1 и θ_2 определяют углы, измеренные по часовой стрелке от направления на север из общей вершины на направления акустических трасс (азимутальные углы), а V_1 и V_2 - интегральные значения скорости течения вдоль этих трасс.

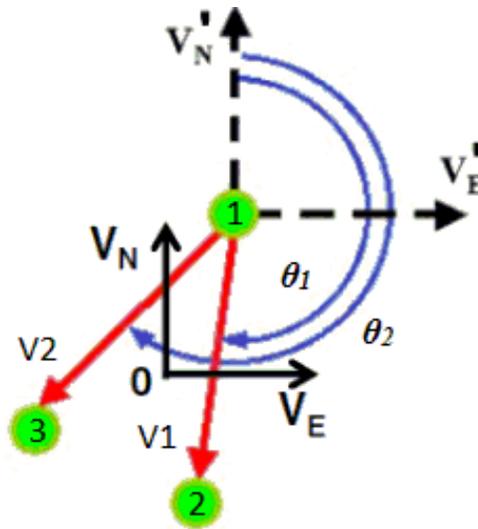


Рисунок 2.22. - Преобразование координатной системы для расчета ортогональных составляющих вектора течения

Выражения (2.6 и 2.7) применяются в предположении, что полученные компоненты рассматриваются как составляющие течения в центре треугольной области. Увеличив количество используемых пар трасс до 3-х, получается соответственно, три пары ортогональных составляющих, по которым в среднем находятся результирующие значения:

$$V_E = \frac{V_{E_1} + V_{E_2} + V_{E_3}}{3}; V_N = \frac{V_{N_1} + V_{N_2} + V_{N_3}}{3}. \quad (2.8, 2.9)$$

На основании полученных геометрических проекций на оси декартовой системы координат, можно сформировать вектор течения \vec{V} по значениям его модуля $|\vec{V}|$ и направления, определяемого углом φ относительно горизонтальной оси:

$$|\vec{V}| = \sqrt{(V_E)^2 + (V_N)^2}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{V_N}{V_E}\right). \quad (2.10, 2.11)$$

Программная реализация предложенной схемы в виде графического интерфейса пользователя представлена на рисунке 2.23. Основным звеном программы также, как и в программе *CurM* (раздел 2.5), являются два интегрированных в среду *MATLAB* объекта - *Serial* и *Timer*, управляющих её работой. Первый объект предназначен для приема данных по *COM*-порту во входной буфер с последующей их структуризацией. Второй – для инициализации процесса приема данных (период приема данных, время записи во входной буфер, время открытия и закрытия *COM*-порта).

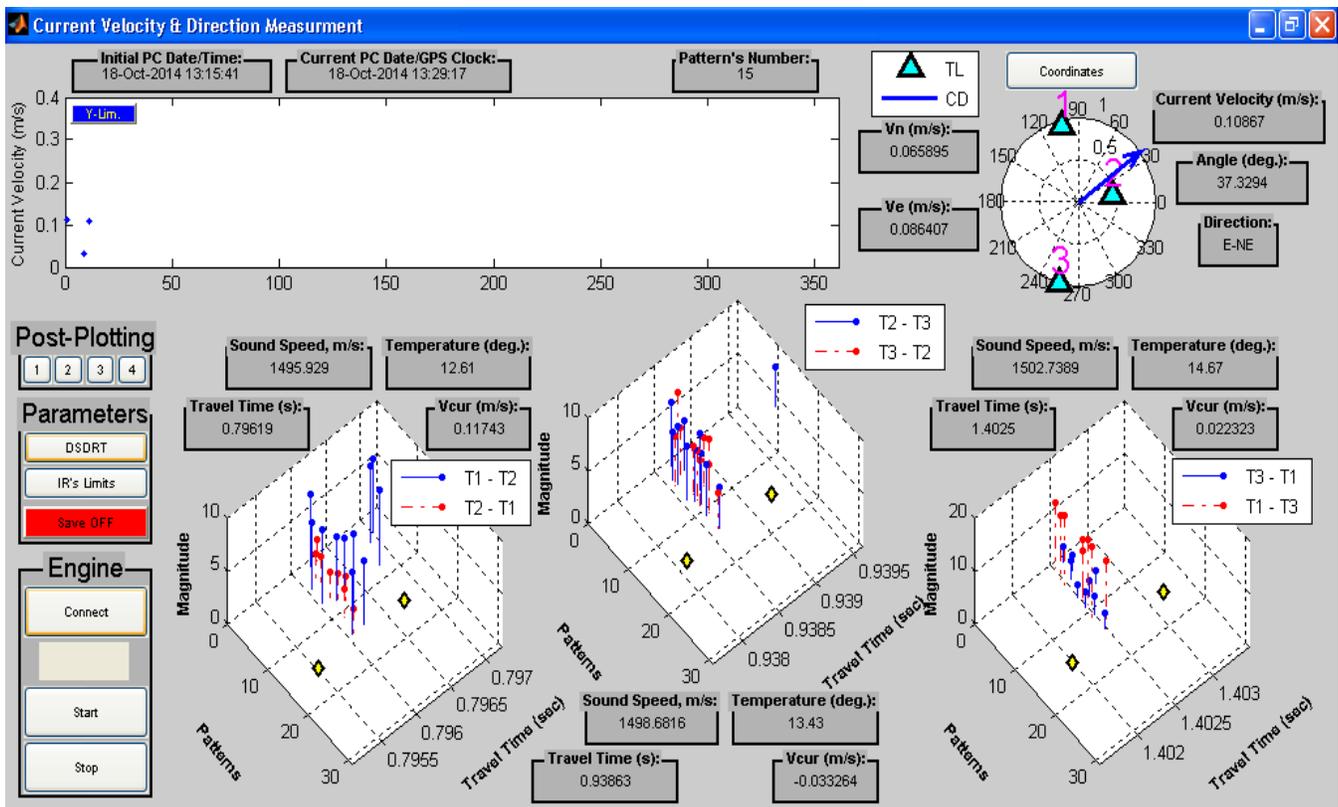


Рисунок 2.23. – Графический интерфейс программы *3RCurM*

Входные параметры (рисунок 2.24) представляют собой 6 информационных посылок (по 2 для каждой трассы) с одинаковой структурой (в виде 3-х строк): первая строка – амплитуды, вторая строка – времена распространения, третья – локальное время по данным системы *GPS*. Данные с первых двух строк представлены в виде отсчётов, время в формате – чч:мм:сс. Период передачи посылок по умолчанию равен 1 секунде.

```

00000000 0000000000 0000000000 0000000000 0002696756
000000000 0000000000 0000000000 0000000000 0000007911
013:58:17

00000000 0000000000 0000000000 0000000000 0003384767
000000000 0000000000 0000000000 0000000000 0000009646
013:58:18

00000000 0000000000 0000000000 0000000000 0002802242
000000000 0000000000 0000000000 0000000000 0000007916
013:58:19

00000000 0000000000 0000000000 0000000000 0001474213
000000000 0000000000 0000000000 0000000000 0000010977
013:58:20

00000000 0000000000 0000000000 0000000000 0000000000
000000000 0000000000 0000000000 0000000000 0000000000
013:58:21

00000000 0000000000 0000000000 0000000000 0003492303
000000000 0000000000 0000000000 0000000000 0000009642
013:58:22

```

Рисунок 2.24 – Информационные посылки с параметрами максимумов приходов

В качестве дополнительных параметров эксперимента перед началом измерений задаются максимальные глубины на акустических трассах после съемки дна (или с помощью батиметрической карты), длины горизонтальных дистанций между 3-мя трансиверами, вычисленные по данным *GPS*-приемника и среднее значение солёности.

Панель запуска программы *Engine* отвечает за подключение и отображение номера доступного *COM*-порта, по которому будут передаваться данные, непосредственно запуск и остановку программы. Панель *Parameters* содержит функциональные кнопки с вызовом окон задания параметров эксперимента, границ поиска максимума прихода и подтверждения/отмены сохранения (по выбору пользователя) принятых и рассчитанных данных в текстовый лог-файл. В

качестве гибкого управления, пользователь может вручную задавать временной диапазон следящего окна для выбора и дальнейшего использования необходимых рабочих приходов (времен распространения локальных максимумов). В панели *Post-Plotting* имеется ряд кнопок предназначенных для построения отдельных графиков в режиме пост-обработки. Для отображения географического расположения трансиверов относительно направления на север предназначены: кнопка *Coordinates* и окно (график в правом верхнем углу) с осями в полярной системе координат. Координаты задаются в формате «градусы с десятичной частью». Вышеописанная методика предполагает измерение вектора течений в центре треугольной области, образуемой тремя трансиверами, поэтому координаты центра рассчитываются с помощью среднего значения по трем координатам расстановки акустических систем. Начало системы координат на данном графике совпадает с центром треугольника. Направление горизонтального вектора течения обозначается синей стрелкой.

В программе предусмотрена «проверка на взаимность» полученных времен распространения в противоположных направлениях для каждой трассы, аналогичная той, как и для программы *CurM* (раздел 2.4). Сумма и разность времен распространения позволяют разделить вклады, вносимые изменением структуры профиля скорости звука, от динамических процессов. Полусумма времени прихода используется для расчета интегрального значения скорости звука на каждой трассе, с последующим переводом в температуру по полуэмпирической формуле *Макензи*. Разность дает значения скорости течения, «проецируемого» на акустические трассы. Преобразования рассчитанных значений компонентов течения, параллельных акустическим трассам, в ортогональные составляющие производятся для каждой пары трасс.

В левом верхнем графике отображаются абсолютные значения вектора скорости в окне с размером временной оси - 360 мин. Также имеется возможность масштабировать вертикальную ось для наилучшего отображения. Сверху над графиком имеется ряд текстовых панелей, предназначенных для вывода текущих

даты и времени по данным приемной системы *GPS*, начального времени работы программы и количества принятых посылок. На нижних трех *2-D/3-D* графиках отображается динамика полученных «пиков» приходов на каждой трассе. Все числовые параметры, полученные в результате расчета, дублируются в отдельные текстовые панели.

Для удобства вычисления направления вектора течения, формирующего угол с горизонтальной осью в программе используется встроенная функция $atan2(V_e, V_n)$ из библиотеки тригонометрических функций среды *Matlab*, позволяющая вычислять значение угла во всех 4-х квадрантах по двум компонентам, значения этой функции лежат в пределах от $-\pi$ до $+\pi$ (рисунок 2.25).

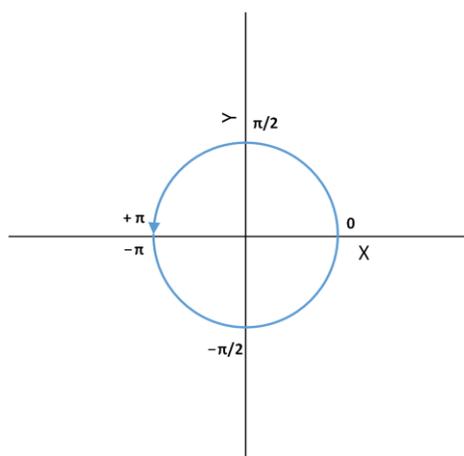


Рисунок 2.25. - Значения, вычисляемые с помощью функции $atan2$

Выводы по главе

В данном разделе представлены программно-технические средства, разработанные автором, в тесной связи с перспективными разработками последних лет *отдела технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН* в

области гидроакустических измерений в океанологии, прошедшими всестороннюю экспериментальную и публикационную апробацию. Следует выделить оригинальные алгоритмы и программы для обеспечения обработки гидроакустической и сопутствующей информации в реальном масштабе времени и визуализации полученных результатов. Это позволяет существенно расширить функциональные возможности перспективных акустических систем с одновременным повышением достоверности и точности измерений для широкого внедрения в исследовательскую и измерительную океанологическую практику. В следующей главе приведены результаты экспериментальной апробации разработанных методов и средств при решении некоторых конкретных задач прикладной гидроакустики.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе представлены результаты тестирования разработанных автором методов, алгоритмов вычислительных программ *МИК*, *CurM*, *3PCurM* в составе акустико-гидрофизических комплексов для исследования параметров гидрофизических полей на специализированной морской экспериментальной станции «*мыс Шульца*» (залив *Посьета*, б. *Витязь*, *Приморский край*) и акватории вблизи о. *Норёк* в *Корейском проливе* (морская база *Центра морских и информационных технологий*, *Институт науки и технологий*, г. *Кванджу*, *Республика Корея*).

3.1 Акустический мониторинг гидрофизических процессов вблизи о. *Норёк* (*Корейский пролив*)

В данном разделе представлены результаты пилотного тестирования аппаратно-программного томографического комплекса (разделы 2.1-2.3) на прилегающей акватории одного из экспериментальных «полигонов», созданного в рамках российско-корейского сотрудничества – в *Центре морских и информационных технологий*.

Комплексные акустико-гидрологические исследования в *Корейском проливе* вблизи о. *Норёк* были проведены в период с 15 по 16 сентября 2010 года. На

рисунке 3.1 приведена карта-схема размещения приемно-излучающей аппаратуры на мелководной акватории.

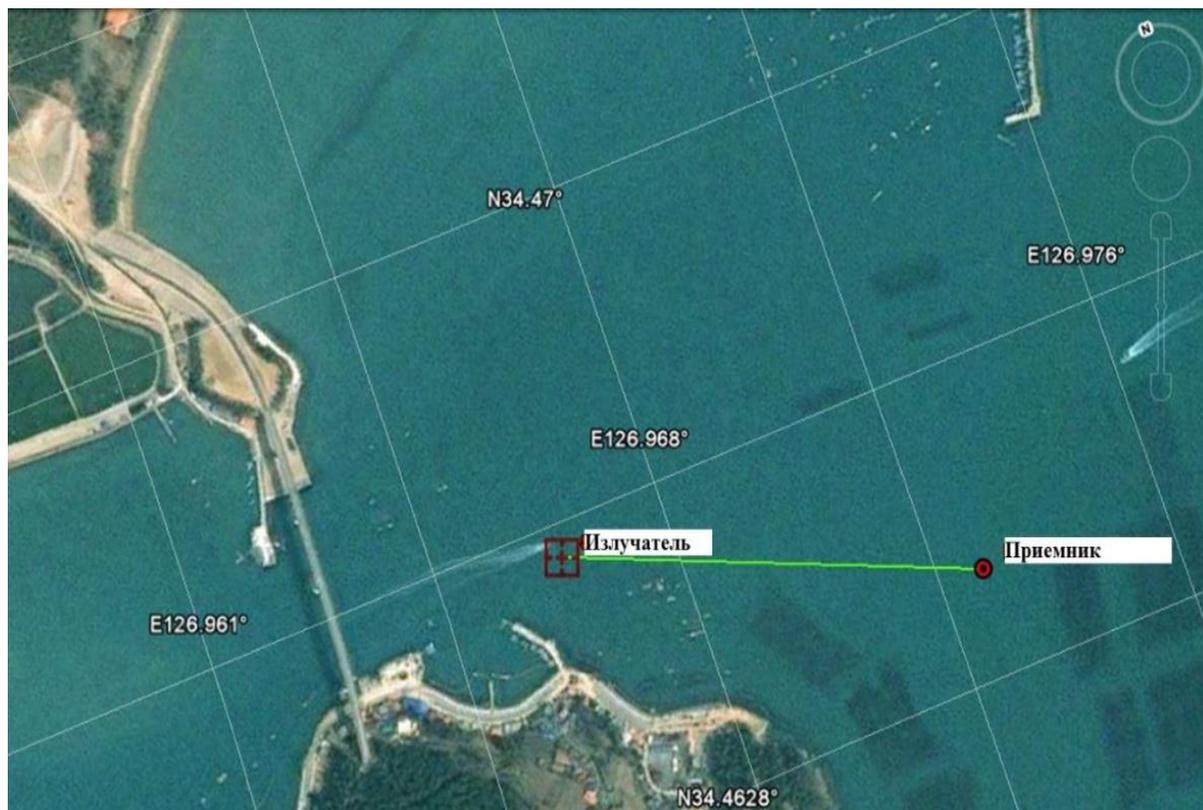


Рисунок 3.1. - Карта-схема района работ с расположением стационарной трассы, излучателя и приемника акустических сигналов

Источник и приемник стационарно устанавливались в специальных опорных рамах (фермах) у дна (высота крепления $\sim 0,7$ м) на расстоянии 614 ± 3 м друг от друга. Район проведения эксперимента характеризовался малыми глубинами 4 м и 9 м в точках постановки приемной и излучающей систем, соответственно, заметными изменениями уровня моря (до 1 м) и сильными течениями (до 1,5 узла), обусловленными приливом. Вблизи приемной системы выполнялись пространственно-временные измерения гидрологических параметров водной среды с помощью *CTD*-зонда *XR-620*. На рисунке 3.2 представлена изменчивость вертикального профиля скорости звука в течение эксперимента. По данным батиметрических карт с учетом приливных вариаций уровня моря были

восстановлены профили дна (рисунок 3.3) на моменты времени максимумов прилива (17 час., 04 час.) и минимума отлива (22 час., 08 час.).

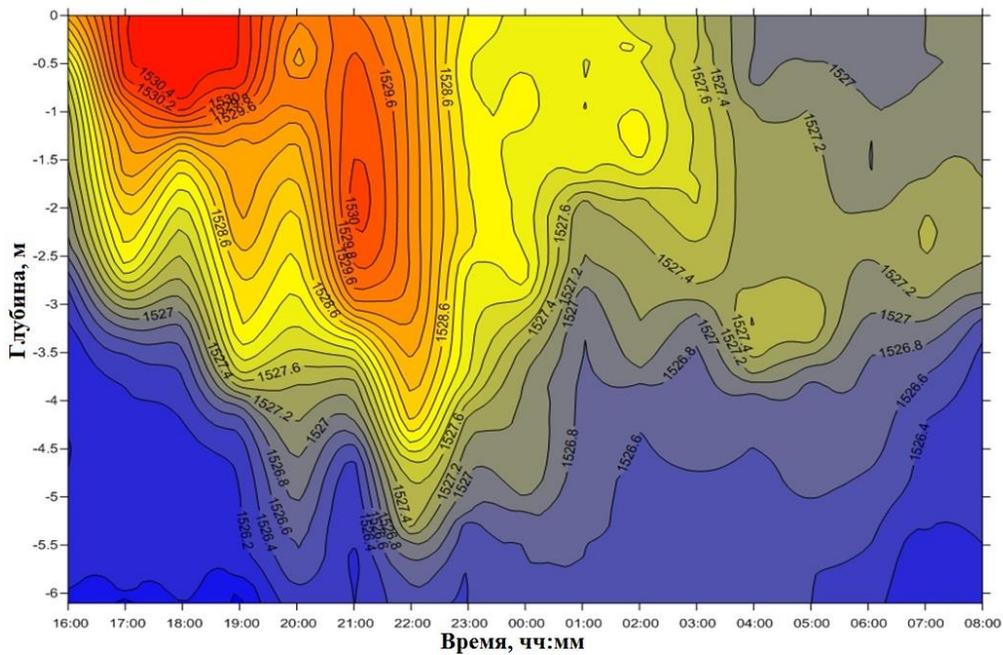


Рисунок 3.2. - Вариации вертикального профиля скорости звука в точке приема

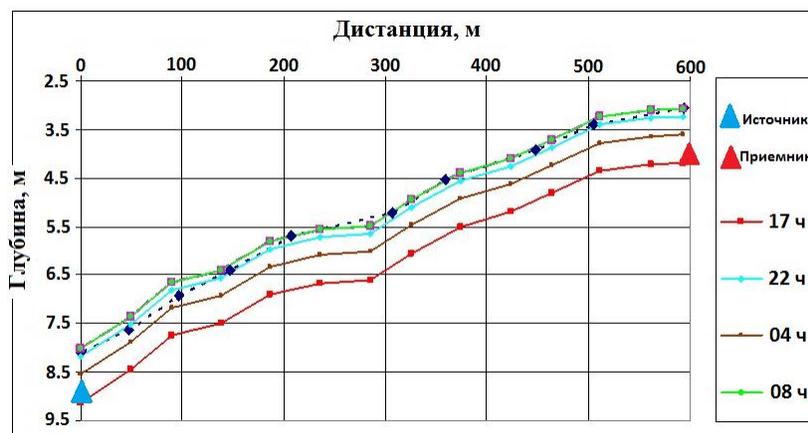


Рисунок 3.3. - Профили дна для максимумов – 17 и 04 час. и минимумов – 22 и 08 час. прилива

Профиль дна характеризовался свалом в сторону излучателя. Таким образом, измерения проводились в условиях малых глубин, больших вариаций

приливного течения и уровня моря. Максимальный перепад температуры от поверхности до дна 2°C).

С 16:00 часов ежеминутно излучался сигнал типа *M*-последовательности с центральной частотой 2,5 кГц, длиной 255 символов, с количеством периодов на символ равным 4. На рисунке 3.4 приведена импульсная характеристика акустического волновода, анализ которой показывает, что она имеет довольно сложную структуру. При приеме фиксируется около 20-ти приходов акустической энергии. Заметны вариации времен распространения поздних приходов, коррелирующие с фазой прилива.

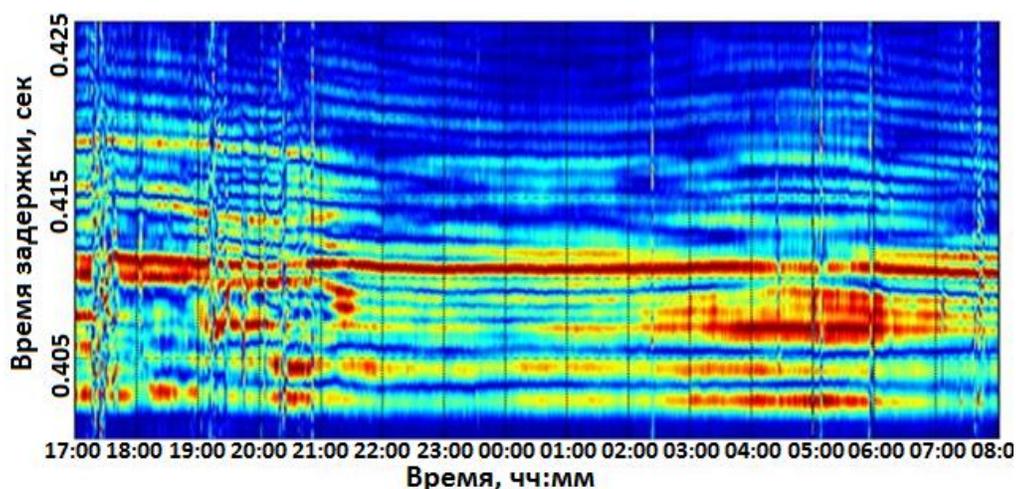


Рисунок 3.4. - Нормированная импульсная характеристика

Экспериментальные измерения в период с 17 часов 15.07.2010 до 08 часов 16.07.2010 демонстрируют значительную изменчивость амплитуд приходов (рисунок 3.5, амплитуды приведены в одном масштабе, нормированы на максимальное значение). Максимальная амплитуда на начало эксперимента в 17 часов меньше максимальной амплитуды в 8 часов в 7.5 раз. Стабильность первых 6-7 приходов за период наблюдений достаточно высокая, в тоже время, для приходов с 8-го по 20-й заметна значительная временная изменчивость, зависящая от фазы прилива. Эксперимент проводился в районе с высоким уровнем акустического шума техногенного происхождения; период с 22 до 04 часов

приходится на ночной минимум шумов. Только для времени наблюдений 17 часов с 18 по 40 минуту импульсный отклик «разрушается» настолько, что временная идентификация приходов невозможна ни для одиночных максимумов, ни для всей характеристики в целом.

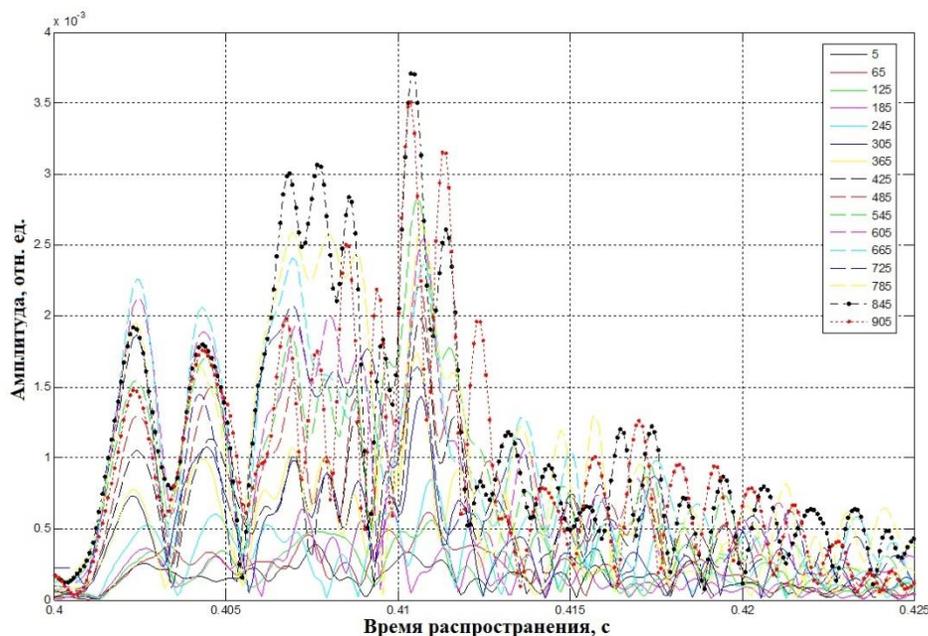


Рисунок 3.5. – Импульсные отклики с периодом измерений 1 раз/час

С целью получения общей картины распространения звука для условий эксперимента в рамках лучевого приближения (программа *Bellhop* пакета *AcToolBox*) были выполнены расчеты параметров (Приложение Б) всех собственных лучей, формирующих импульсный отклик, с учетом фазы прилива, вертикальных профилей скорости звука (рисунок 3.6), глубин расположения излучателя/приемника, горизонтальной дистанции между ними и профиля дна. Максимальный разброс значений скорости звука в приповерхностном слое (до 2м глубины) в период эксперимента составил 4,5 м/с, на глубине от 2м до 4 м – 2 м/с и на глубине от 4м до 10м около 1,5 м/с.

Численное моделирование в рамках лучевого подхода позволило идентифицировать основные группы собственных лучей для функций отклика

звукового канала. На рисунке 3.7 приведены рассчитанные лучевые траектории, не имеющие отражений от поверхности, для времен 17, 22, 08 и 04 час. Отмечается наличие значительно более широкой ($4,4^\circ$, с центром $-0,7^\circ$) по углам выхода группы приходов для времени максимума прилив в 17 часов. Затем происходит перестройка структуры акустического канала, и диапазон углов без отражений от поверхности значительно сужаются до $\sim 0,1^\circ$, с центральными углами выхода $-0,21^\circ$ в 22 часа, $-0,86^\circ$ в 04 часа и $-0,95^\circ$ в 08 часов. На рисунке 3.8 приведены рассчитанные лучевые траектории в диапазоне всех углов выхода от -25° до $+25^\circ$, формирующие импульсную характеристику в указанные времена, за исключением лучей, не взаимодействующих с поверхностью.

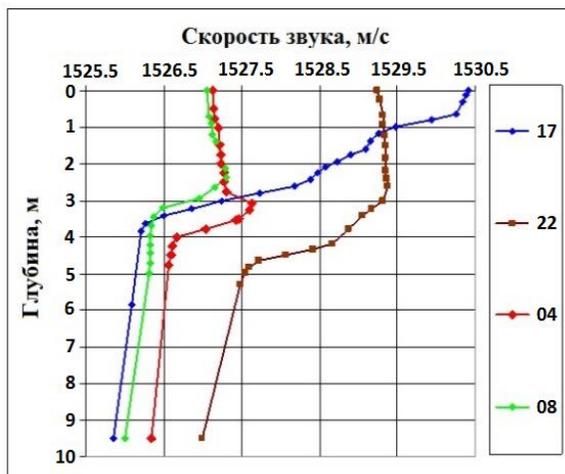


Рисунок 3.6. - Профили скорости звука для района эксперимента для максимумов (17 час. и 04 час.) и минимумов (22 час. и 08 час.) прилива

Далее, на рисунке 3.9 приведены результаты численного моделирования амплитудно-временных характеристик приходов (групп приходов) собственных лучей для момента времени второго минимума прилива (08 часов 16 сентября 2010 года). Оценка принадлежности собственных лучей к группе (Приложение Б) проводилась объединением лучей, смещенных по времени прихода не больше чем на 0,25 периода несущей (400 мкс), что при частоте сигнала 2,5 кГц соответствовало диапазону 100 мкс.

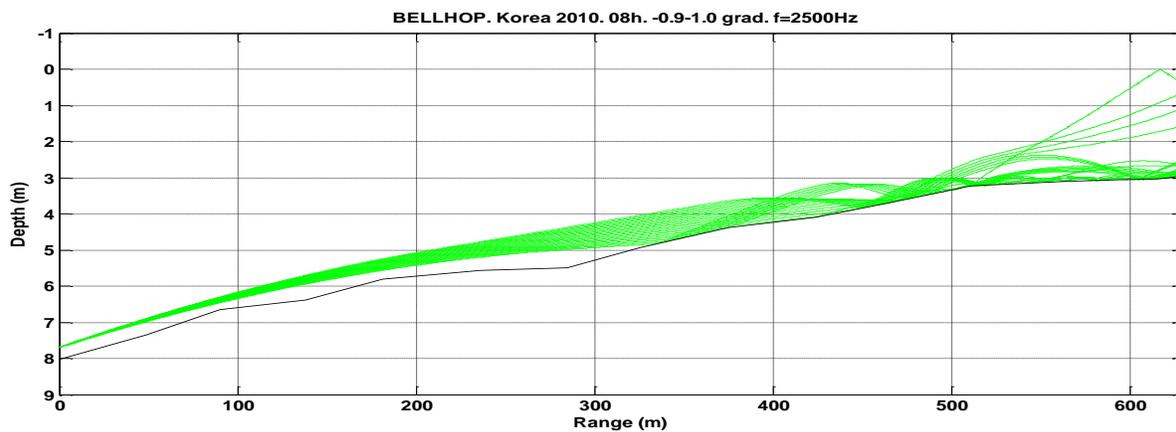
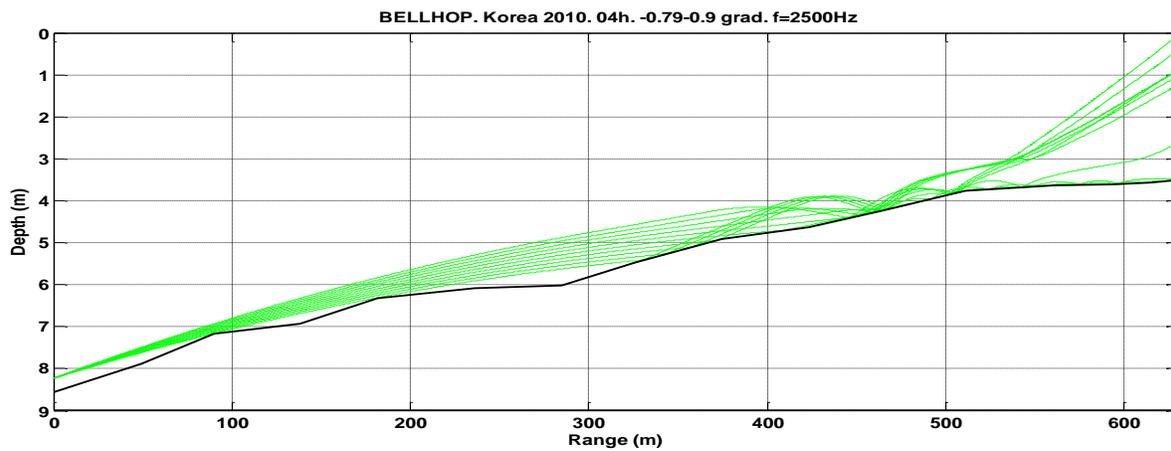
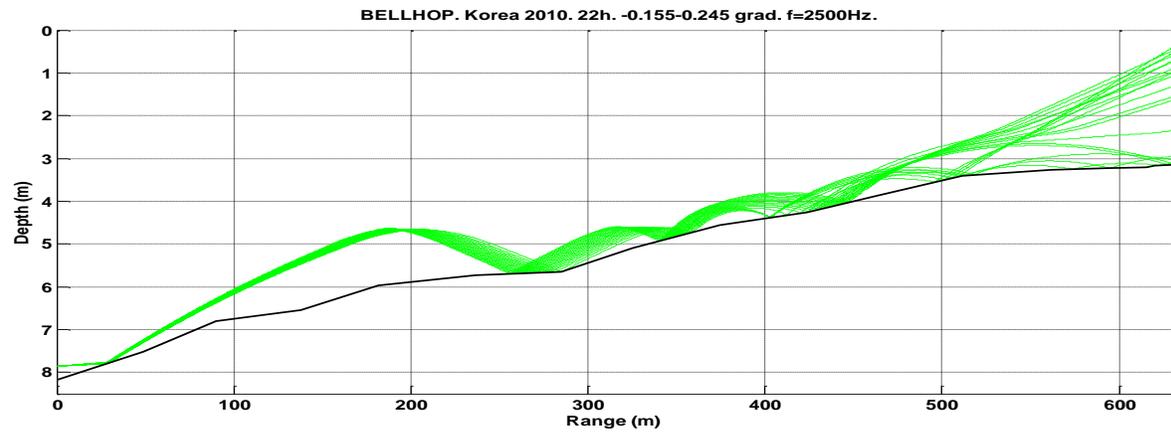
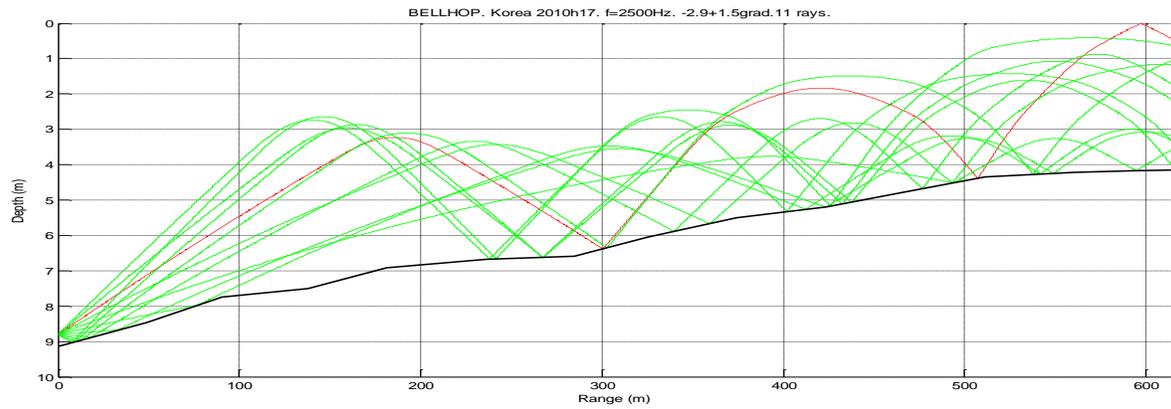


Рисунок 3.7. - Лучевые картины (без взаимодействий с поверхностью)

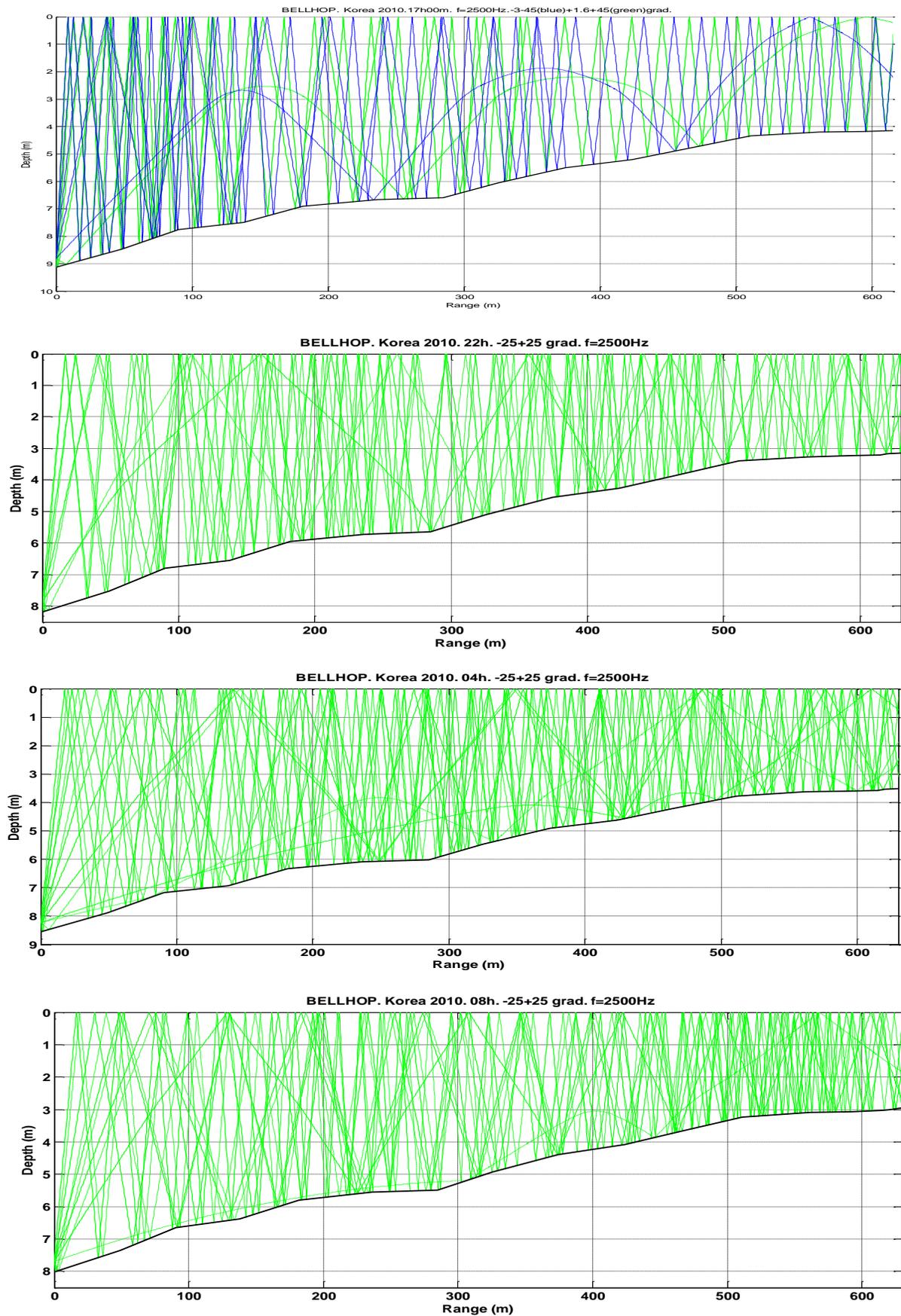


Рисунок 3.8. - Лучевые картины (углы выхода -25° до $+25^\circ$)

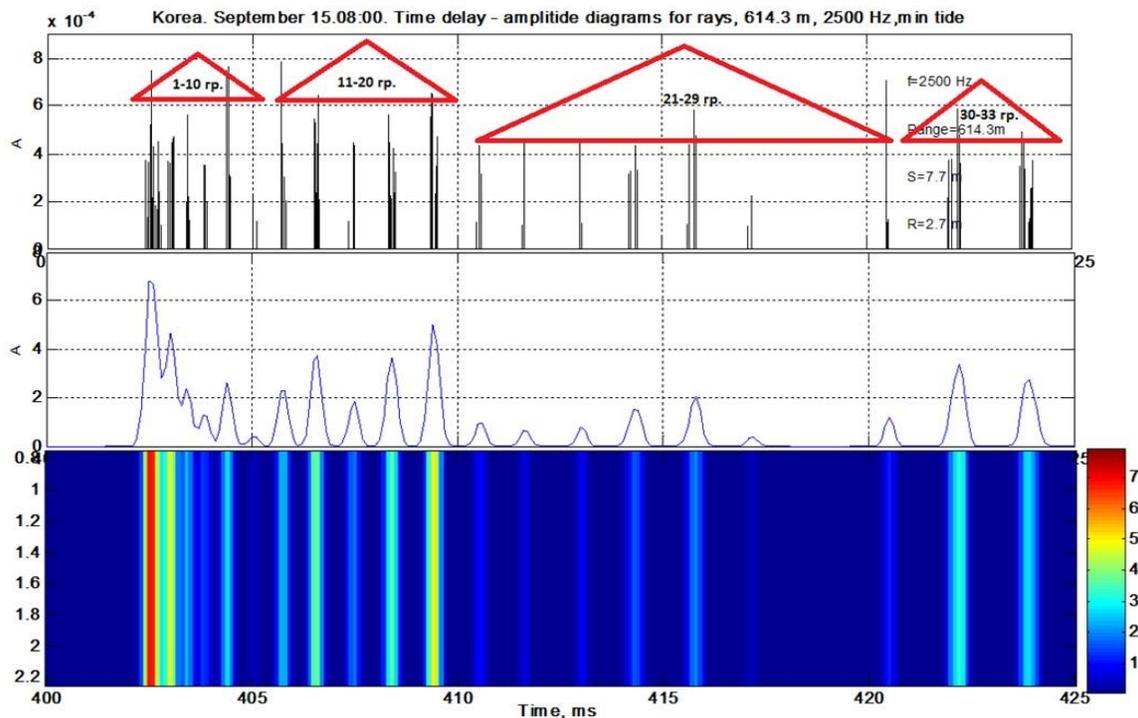


Рисунок 3.9. – Параметры приходов собственных лучей

Анализ данных численного моделирования показывает:

1. Для рассматриваемой дистанции импульсный отклик формируются лучами, с углами выхода от -12° до $+10^\circ$;
2. Углы прихода собственных лучей в приемник находятся в диапазоне углов от -30° до $+30^\circ$;
3. Выделяется 2 временных интервала $0,4 - 0,4125$ мс и $0,4125 - 0,425$ мс (на первом интервале не происходит полного разделения максимумов, на втором - ширина отдельного пика импульсного отклика составляет ~ 1 мс и наблюдается уменьшение амплитуд приходящих импульсов в $\sim 1,5-2$ раза);
4. Количество сформированных групп – 43;
5. Количество лучей, формирующих первый интервал (с 1-ой по 23-ю группы), больше чем второй (с 24-ой по 43-ю) в $\sim 1,5$ раза;
6. Время реверберации ~ 25 мс.

Времена самой ранней 1-ой группы приходов из первого интервала в расчетах (рисунок 3.9) и эксперименте (рисунок 3.4) практически совпадают,

изменяются во времени незначительно и имеют одинаковую длительность, а относительные амплитуды больше по отношению ко второму интервалу, коррелирующему с фазами прилива. Прежде всего, это обусловлено положением излучателя и приемника, траекториями распространения лучей первой группы вблизи дна и почти без отражений от поверхности. Более поздние 11-ый и 18-ый приходы в эксперименте и соответствующие им 20-ая и 30-ая группы при моделировании испытывают от 13 до 22 отражений от поверхности. Длина их траектории зависит от уровня моря, отсюда и повышенная по сравнению с первой группой временная изменчивость и вариации длины траекторий.

Длительность принятого сигнала в эксперименте (~ 25 мс) соответствуют приходам первых 33 групп, вне указанного диапазона (группы 34-43) рассчитанные амплитуды в 2-5 раз меньше. Группы с 1-ой по 8-ю в основном формируются лучами (58 лучей) с равным количеством отражений от поверхности, но количество отражений от дна отличается в каждой группе. Начиная с 9-ой и далее до 23-ей группы (с максимальными амплитудами) содержится примерно такое же количество собственных лучей ~ 52 и количество поверхностно-донных отражений изменяется с номером группы от 7 до 16, соответственно. Для остальных групп (с 24-ой по 33-ю, количество лучей - 73) наблюдается значительно большее число взаимодействий с границами волновода (от 17 до 24), вследствие чего их амплитуды испытывают сильное затухание. В таблице 1 приведены данные идентификации, расчета средней скорости звука и длины траекторий вдоль собственных лучей из 1-ого, 20-ого и 30-ого «кластеров» с близкими значениями времен распространения, амплитуд и угловых характеристик, формирующих на корреляционной огибающей локальные максимумы 3-х приходов. Время прихода первого кластера в расчетах (0,40255мс) и эксперименте (0,40225мс) практически совпадают для выбранной дистанции 614,3 м. В Приложении В приведены рассчитанные траектории выделенных в кластеры групп собственных лучей с диапазонами углов выхода $-0,92^\circ - -0,99^\circ$,

+6,2° – +6,3°, -10,19° – -10,27°, соответственно, и их длины, для которых минимальная и максимальная разность с горизонтальной дистанцией между источником и приемником равна 0,1-0,4м, 10,8-11,4м, 30,2-30,9м.

Таблица 1.

Группа	Угол выхода, °	Угол входа, °	Время прихода, с	Амплитуда отн. ед.	Длина траектории, м	Скорость звука, м/сек	Время, час.
1	-4,377 -4,379	-5,47-5,29	0,40220	3,66E-05	615,75	1530,96	17
1	1,579 +1,571	-1,3916	0,40190	2,43E-05	614,80	1529,73	22
1	-0,795 -0,745	-1,3565	0,40240	2,73E-04	614,65	1527,46	4
1	-0,92 -0,99	-1,17-0,23	0,40245	3,60E-04	614,54	1527,00	8
20	-7,50 -7,90	-13,19	0,40760	4,17E-04	622,40	1526,99	17
20	-6,6916	+13,4428	0,40720	5,16E-05	622,50	1528,73	22
20	-6,735-6,775	-13,03+12,87	0,40770	5,72E-05	622,75	1527,47	4
20	+6,2+ 6,3	15,13	0,40939	6,50E-04	625,40	1527,64	8
30	8,51+8,56	20,26+20,11	0,4154	8,68E-05	634,7	1527,93	17
30	-8,50-8,54	17,29+17,15	0,4106	4,53E-05	627,95	1529,35	22
30	-8,92-8,96	20,11+19,18	0,4143	6,39E-05	632,75	1527,28	4
30	10,19-10,27	-25,89	0,42223	1,30E-04	644,80	1527,13	8

В рассматриваемой схеме эксперимента с диапазоном глубин от 3м до 9м и при их отношении к горизонтальной дистанции $\frac{h}{D}$ от 0.005 до 0.013, где h – значения глубин, а D – длина акустической трассы, можно выделить три характерных значения локальной скорости звука: на поверхности $h_0 = 0$ м - C_0 , на глубине приемника $h_r \sim 3$ м - C_r и на глубине излучателя $h_s \sim 8$ м - C_s . Скорость звука по измеренным временам первых приходов и соответствующая ей «средняя глубина» для слоев распространения (геометрия лучей - рисунок 3.7) могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$C_{h1} \equiv V_{\tau1} = \frac{(C_s + C_r)}{2}; h_1 = \frac{(h_s + h_r)}{2}. \quad (3.1, 3.2)$$

Уточнение и поиск соответствия средних скоростей распространения по всем временам приходов значениям профиля скорости звука можно проводить на

этапе моделирования с учетом лучевых диаграмм (рисунки 3.17, 3.18, Приложение В) из оценки:

$$V_{r_i} = \frac{\sum_{n=1}^N C(r_i)_n}{N} \equiv C_0(h_k), \quad (3.3)$$

где $C_0(h_k)$ – измеренные значения вертикального распределения скорости звука по глубине на начало эксперимента. Адекватность восстановления профиля скорости звука по данным измерения времен приходов будет сохраняться на временах высокой когерентности функции отклика акустического канала и малых отклонений профиля скорости звука от опорного (в данном случае начального) значения. Подробный анализ характера распространения звука в рамках численного моделирования обусловлен тем, что в эксперименте сложно разделить различные процессы, влияющие на параметры импульсной характеристики. При моделировании учитывались только изменения профиля скорости звука, приливные вариации уровня и профиль дна вдоль стационарной трассы. Результаты моделирования и эксперимента указывают, что изменения времени распространения первого прихода минимальны для всего периода измерений и обусловлены положением акустических преобразователей, траекториями распространения лучей вблизи дна и без отражений от поверхности. Соответственно, флуктуации максимума данного прихода должны больше коррелировать с распределением скорости звука в придонном слое, чем с вариациями уровня, хотя те и другие вызваны приливом. Более поздние приходы в эксперименте согласно данным моделирования (20-й и 30-й кластеры) испытывают в среднем от 10 до 20 взаимодействий с поверхностью. Длина их траектории зависит от уровня моря, отсюда и повышенная, временная изменчивость и вариации длины траекторий. Таким образом, выбранные времена распространения 1-го и 3-го приходов (от момента регистрации) согласно лучевым картинам (Приложение В), расчетам и уточнению по 3.1-3.3 соответствуют горизонтам 4м и 2м, их временные вариации используются для установления линейной связи с изменениями скорости звука в водной среде, а 12-

го прихода - с уровнем моря. Результат восстановления параметров водной среды зависит от моделирования реальной ситуации и ошибок идентификации собственных лучей. На рисунке 3.10 представлены результаты обработки акустических данных программой *МИК*, а также измеренные, вертикальные распределения температуры в локальной точке вблизи приемной системы с помощью гидрологического *CTD*-зонда *XR-620*.

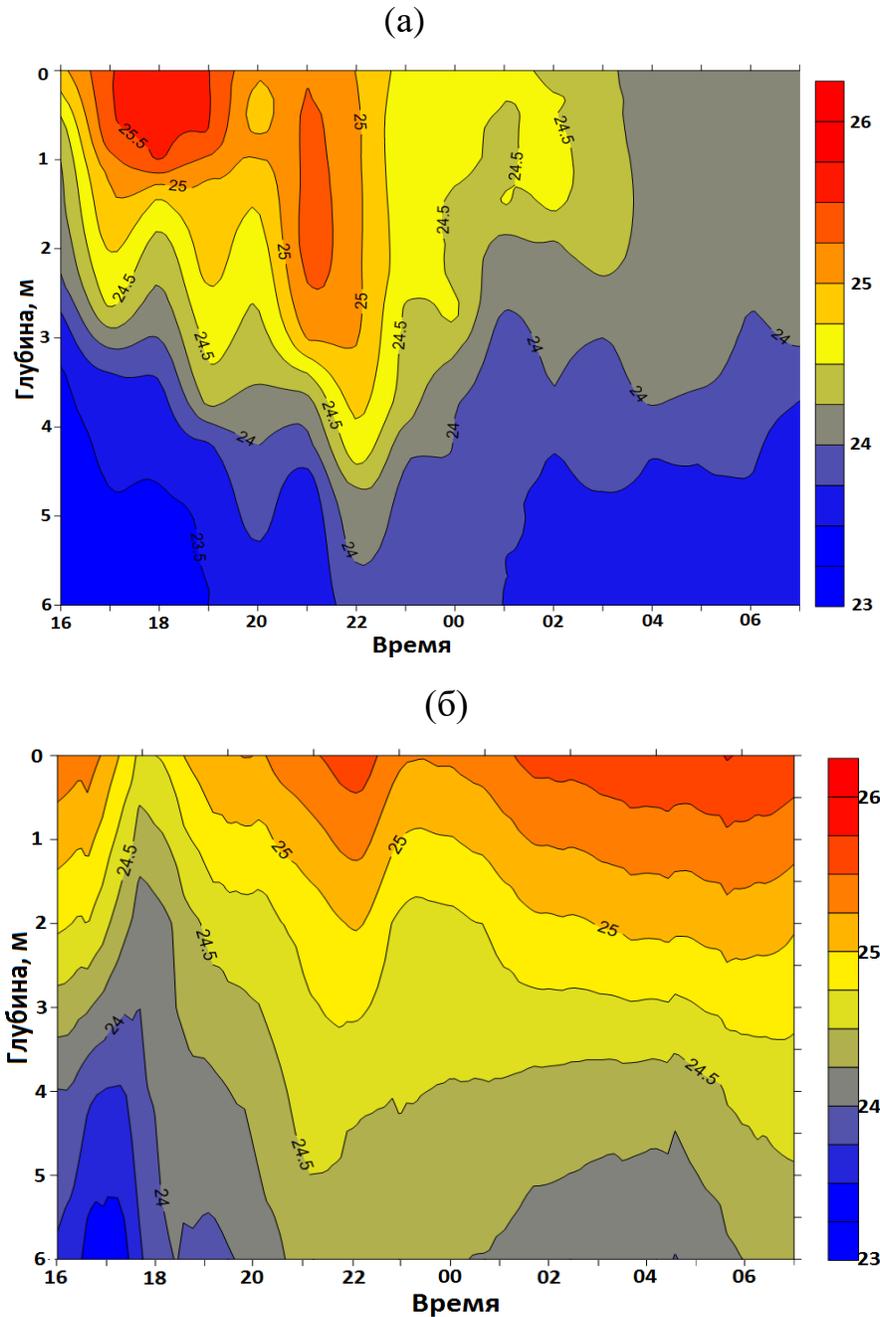


Рисунок 3.10. - Суточные, вертикальные распределения температуры – (а), интегральные значения температуры (программа *МИК*) – (б)

Сравнивая графики (а) и (б) рисунка 3.10, можно отметить общую тенденцию изменения температуры, следовательно, и способность программы *МИК* отслеживать динамику гидрологических процессов, таких как приливно-отливные явления, заход и уход холодной воды в придонном слое. В качестве опорного профиля скорости звука был выбран профиль на момент времени 17 часов 15 сентября 2010, который характеризовался фазой максимума прилива. Количество интервалов поиска максимумов огибающей взаимно-корреляционной функции, как уже было отмечено, составляло 2, для 1-ого и 20-ого кластера. Температура, «определяемая» по первому «пику» огибающей (первый приход), соответствует измеренной на глубине ~ 5 м, что практически согласуется с расчетом по (3.1), а третьему 3-3,5 м, что меньше значения на поверхности и больше, чем на глубине 4 м. Значения температуры на горизонтах 0 м и 9,5 м вычислялись с помощью добавок к скорости звука на «идентифицированных» глубинах - 2 м и 4 м, соответственно, для равенства значений в поверхностном и придонном слое соответствующим значениям опорного профиля. Временной промежуток с 17:00 до 22:00 часов 15 сентября 2010 года характеризуется заходом холодных вод в придонный слой и, как следствие, их поднятием к поверхности. Анализ этих зависимостей показывает, что в начале эксперимента, в интервале с 17:00 часов 15 сентября до 02:00 часов 16 сентября наблюдается схожесть измеренной и рассчитанной структуры температурного поля, характеризующей фазы прилива (заход холодной воды у дна) и отлива (опускание более теплой воды ко дну). После 02:00 часов структуры полей существенно отличаются, но расхождения значений температур не превышают 1°C (для скорости звука $\sim 3-5$ м/с). Эти различия могут быть объяснены тем, что сложная топография дна с большой разностью глубин источника и приёмника затрудняет определение слоев распространения идентифицируемых групп собственных приходов, времена распространения вдоль лучевых траекторий которых одинаковы, а пути – различны (разная длина траекторий); контактные измерения проводились в точке

размещения приемной системы, а на столь сложной по динамике процессов трассе интегральные значения температур могут существенно отличаться.

Расчетный уровень прилива по данным программы *TideComp* (максимальное изменение уровня до $\sim 1,1$ м) для о. *Гемундан*, расположенного на расстоянии ~ 11 км от района работ и полученный программой *МИК* вариации уровня морской поверхности, как видно (рисунки 3.11 и 3.12), согласуются как по уровню, так и по времени изменения фаз прилива.

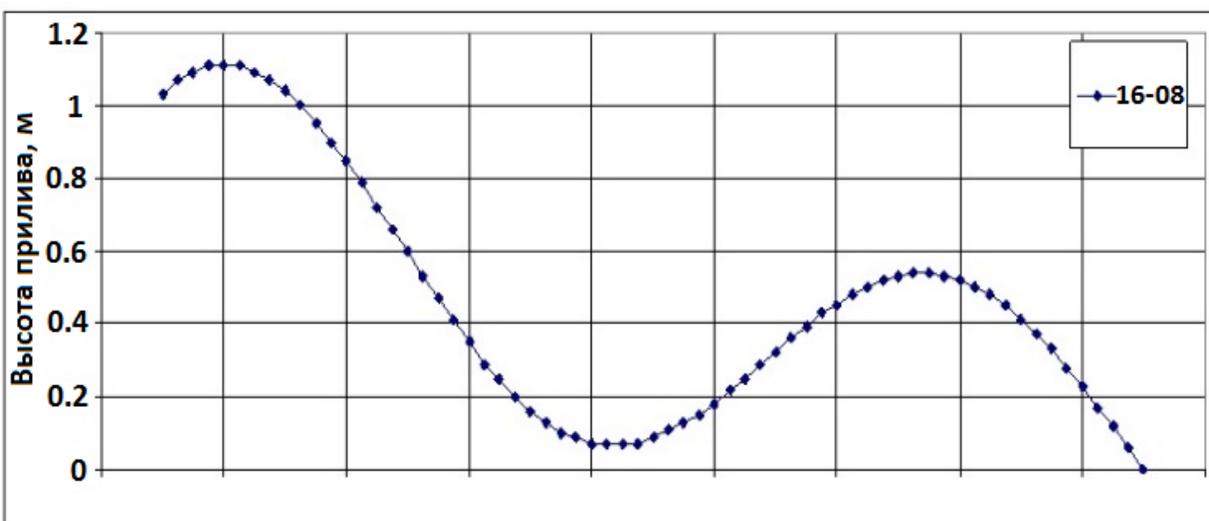


Рисунок 3.11. - Приливные изменения уровня моря

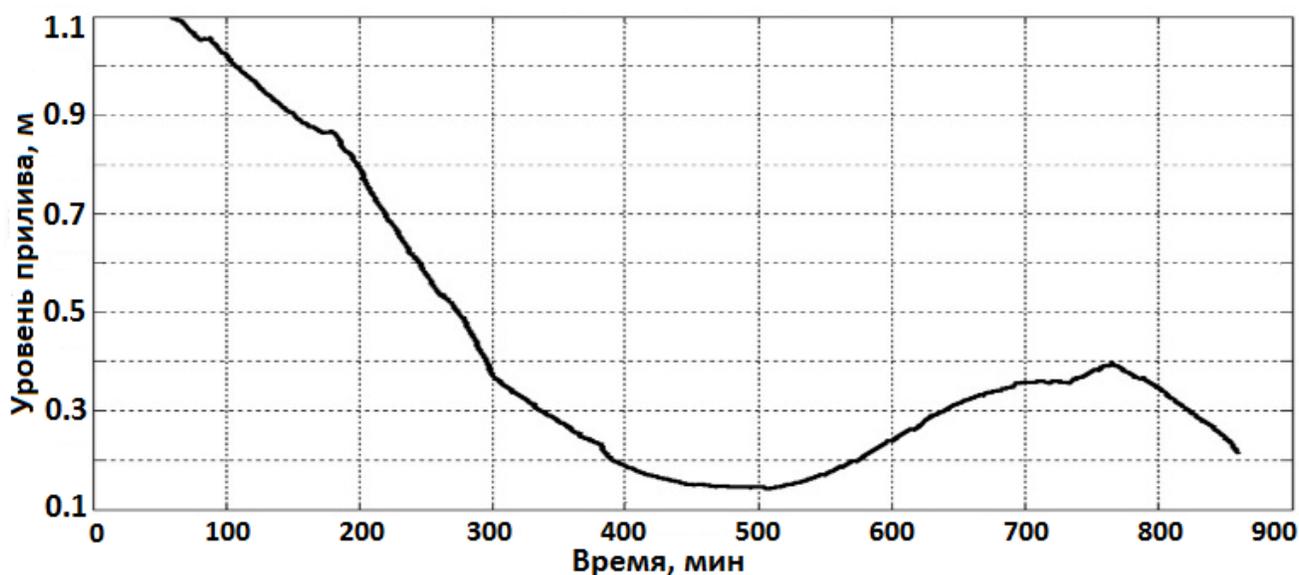


Рисунок 3.12. - Изменение уровня, рассчитанный программой *МИК*

3.2 Решение задачи акустической термометрии в б. *Витязь*

Одной из задач при экспериментальной апробации разработанного аппаратно-программного томографического комплекса являлось определение его работоспособности в различных гидрологических условиях. Также работы проводились в натуральных условиях с 23 по 29 августа 2011 года на МЭС «мыс Шульца» в б. *Витязь* на стационарной трассе. Для обеспечения научных исследований, проводимых в лаборатории акустической томографии ТОИ ДВО РАН, был проведен предварительный подробный промер глубин (с использованием навигационной аппаратуры и эхолота) и создана батиметрическая карта б. *Витязь* (рисунок 3.13). По данным промера были выбраны оптимальное для планируемых работ расположение акустической трассы и места постановки излучающей и приемной систем.

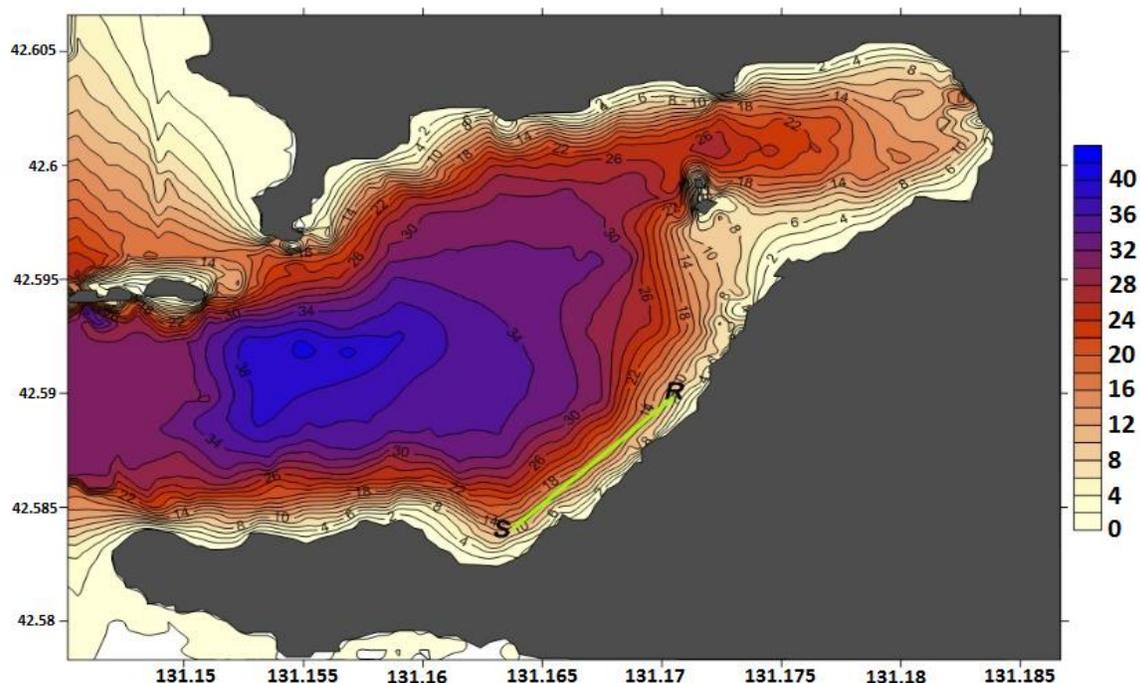


Рисунок 3.13. - 3-D карта глубин б. *Витязь* с расположением излучателя и приемника

Рассчитанная по данным системы *GPS* горизонтальная дистанция составила 808 ± 3 м, азимут по направлению от излучателя на приемник – 43° . Измеренный профиль дна, положение источника и приемника вдоль трассы акустических измерений приведены на рисунке 3.14.

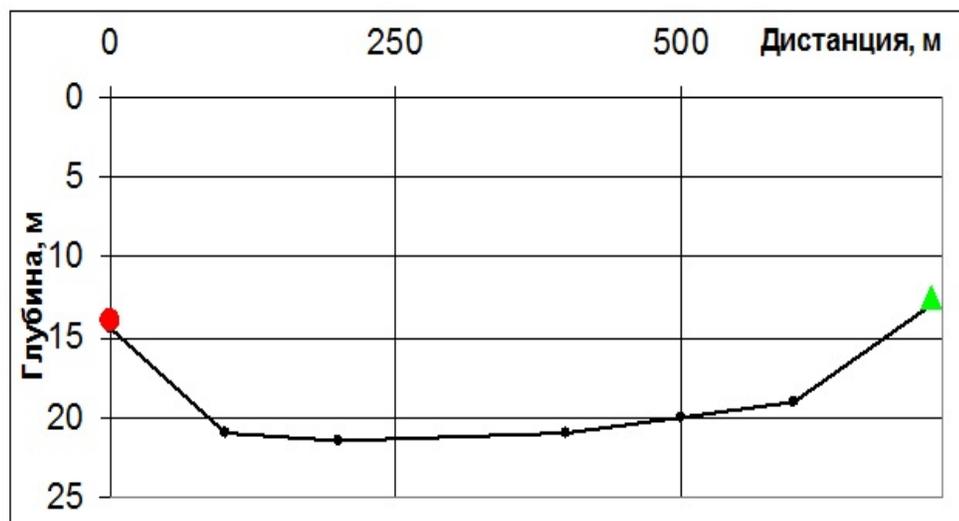


Рисунок 3.14. - Данные батиметрической съемки

Гидрологическое и навигационное обеспечение работ проводилось с помощью стандартного оборудования (*GPS*-приемник, эхолот, *CTD*-зонд XR-620), размещенных на яхте и моторной лодке. Пьезокерамический излучатель выносился на кабеле (длиной 200 м) в прибрежную зону и устанавливался стационарно на дне бухты (координаты - $42^{\circ}35,056'N$ и $131^{\circ}09,785'E$), на глубине 14 м. Установка **РГБ** с приемным гидрофоном также вблизи дна, через якорь была выполнена в точке с координатами $42^{\circ}35,372'N$ и $131^{\circ}10,190'E$ на глубине 12,5 м. В качестве зондирующего - фазоманипулированный сигнал на основе *M*-кода с несущей частотой 2 кГц, длительностью 255 символов, с количеством периодов на символ равным 4 (общая длительность сигнала во времени - 0,51 сек.). Принятые сигналы подвергались обработке на береговом посту (программа *RT_CROSS*), по результатам которой рассчитывалась импульсная характеристика (выделение амплитудной огибающей взаимно-корреляционной функции) во временной

области. Метеорологические условия в период с 25 по 29 августа 2011 года были достаточно устойчивы: скорость ветра в бухте не превышала 5м/с, волнение не более 0,1-0,3м, часто во время измерений в районе акустической трассы наблюдался штиль. Промер гидрологии (рисунок 3.15) выполнялся: в точках установки излучателя, приемника и между ними на равном расстоянии - по центру расположения акустической трассы.

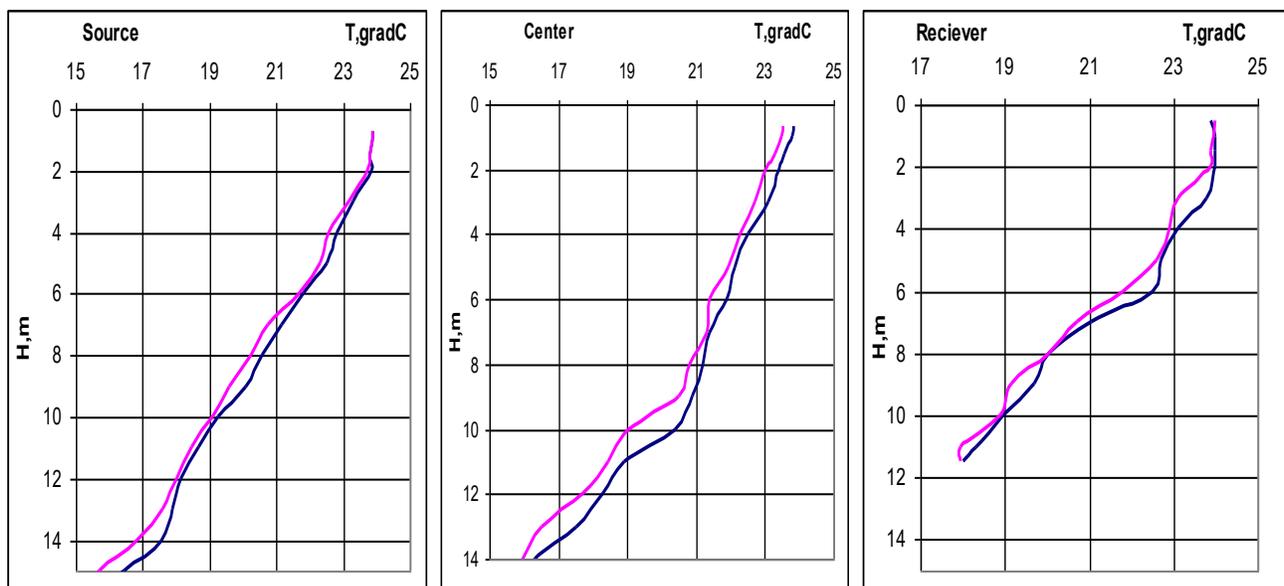


Рисунок 3.15. - Данные гидрологической съемки (18:00, 27 августа 2011 г.)

В центральной точке на время проведения исследований устанавливалась на якорь яхта, с которой осуществлялись каждые два часа гидрологические измерения с помощью *CTD*-зонда *XR-620* (частота регистрации – 6кГц). В точках приема и излучения соответствующие измерения проводились с борта моторной лодки. Гидрологические разрезы, выполненные синхронно в реперных точках, показали высокую горизонтальную однородность вертикальных распределений скорости звука (температуры) за все время проведения эксперимента. Отличия в измерениях при погружении и подъеме зонда связаны с инерционностью датчиков и дрейфом. Рассчитанные (с помощью программы *TideComp*) уровни приливных колебаний на период с 25 августа по 29 августа 2011 года приведены в таблице 2.

Следует отметить экстремальную ~ 40 см изменчивость уровня морской поверхности в сутки, предшествующие началу работ и сутки отладки комплекса.

Таблица 2.

Т, чч:мм	Т, мин.	Н, см.	Время, сут.
00ч50м	50	70	25.08.2011
05ч30м	330	60	
12ч00м	720	90	
19ч10м	1150	50	
01ч40м	1540	80	26.08.2011
06ч30м	1830	70	
12ч40м	2200	90	
19ч50м	2630	50	
02ч40м	3040	80	27.08.2011
07ч40м	3340	70	
13ч30м	3690	80	
20ч40м	4120	50	
03ч30м	4530	80	28.08.2011
08ч50м	4850	70	
14ч20м	5180	80	
21ч20м	5600	50	
04ч20м	6020	80	29.08.2011

Во время проведения акустических измерений в течение суток (с 27 августа 2011 г. $\sim 16:00$) экстремальные вариации уровня составляли от 10см до 30см и начало измерений совпадает с фазой отлива (рисунок 3.16).

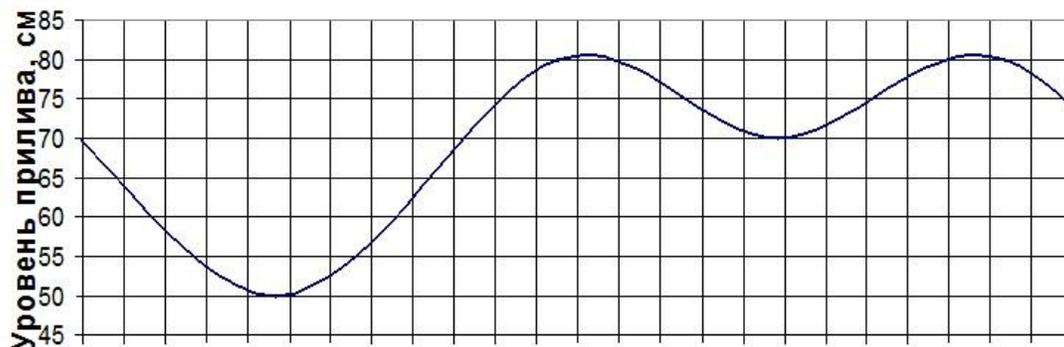


Рисунок 3.16. - Уровень прилива во время эксперимента

На рисунке 3.17 приведены результаты измерений вертикального распределения температуры и скорости звука во времени для центральной точки в период совместных акустико-гидрологических исследований на акватории. Вариации гидрофизических полей имеют высокую корреляцию с фазами суточного прилива, что четко прослеживается на графиках. Анализ представленных данных указывает на процесс «вентилиации» бухты, когда в период максимумов прилива происходит заход холодной воды из глубоководной части через придонный слой за счет приливно-отливного течения. В данной ситуации зафиксирован процесс сезонной (лето-осень) перестройки структуры вод в б. *Витязь*. Результатом такой перестройки является – в начале цикла, формирование придонного холодного слоя и более теплого поверхностного слоя, и на поздних временах, постепенного выравнивания температуры с ее охлаждением, до изотермии, в зимний период. Во время проведения эксперимента проникновение холодных вод происходило на горизонты установки излучателя и приемника до глубины порядка 10-15м.

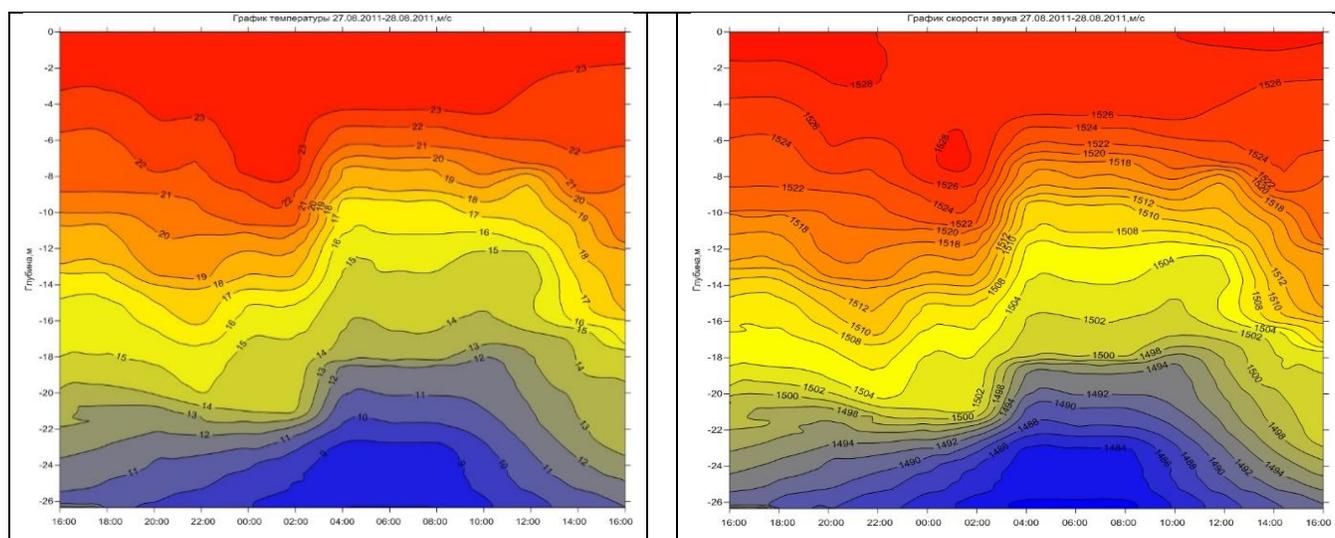


Рисунок 3.17. - Суточные вариации вертикальных распределений температуры (левый) и скорости звука (правый)

Проверка совместимости и функционирование всех элементов комплекса проводилась с 26 по 28 августа 2011 года. В течение первых суток проводилась

отладка режима взаимодействия аппаратуры АИС, РГБ и программного обеспечения МИК, определялись и уточнялись по данным гидрологических, батиметрических и навигационных измерений входные параметры. В течение вторых суток непосредственно были проведены непрерывные акустические измерения (рисунок 3.18) с интервалом измерений 1 раз/мин.

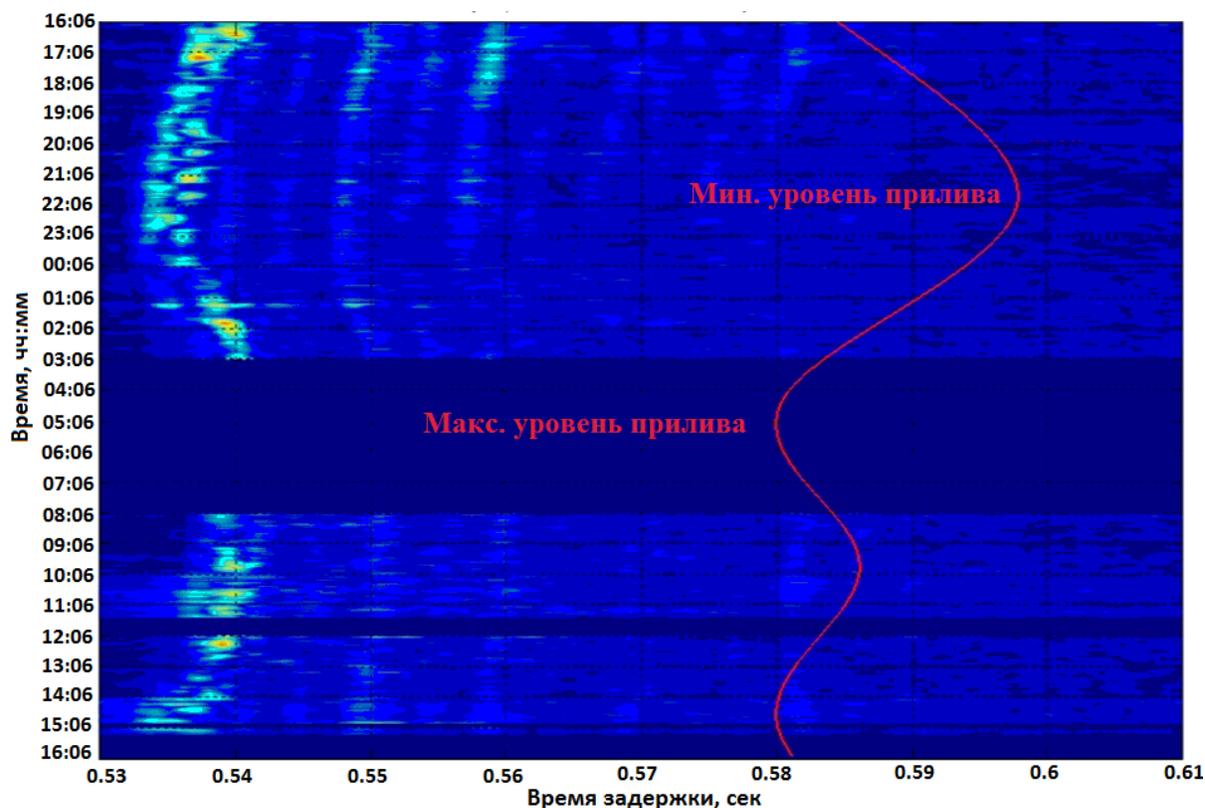


Рисунок 3.18. - Коррелограмма (красная кривая - уровень прилива)

В ходе эксперимента наблюдались вариации времен приходов, которые коррелировали по времени с фазами прилива. Также на протяжении времени измерений происходило уменьшение, в среднем, амплитуды полезного акустического сигнала наряду с уменьшением (вплоть до уровня шумов) амплитуд отдельных групп приходов. Ввиду того, что результаты всех сопутствующих измерений (включая навигационное и гидрологическое обеспечение), являются первичными для расчетов средних гидрофизических параметров, то их «качество» определяет, как работоспособность всего измерительного комплекса, так и

точность рассчитываемых значений. Превышение средней амплитуды полезного сигнала над шумом в данном случае для фиксируемых максимумов в 1,5-3 раза (~ 3 дБ) превышает уровень шума. Для дистанции 800м и частоты сигнала 2кГц это достаточно низкие уровни. В динамике максимумы для таких уровней сигнала могут уменьшаться до уровня шумов, в результате чего расчет параметров среды по вариациям «пиков» приходов невозможен. На рисунке 3.19 приведен график опорного профиля скорости звука, измеренного после установки приемной системы и используемый для моделирования (идентификации максимумов) и расчета входных параметров программы *МИК*.



Рисунок 3.19. - Опорный профиль скорости звука

На данном этапе, по измеренным характеристикам среды и геометрии эксперимента, были рассчитаны параметры собственных приходов (Приложение Г) с помощью программного пакета *Bellhop* и построен модельный импульсный отклик (рисунок 3.20). По результатам моделирования, при анализе амплитуд были получены достаточно близкие значения, совпадающие с экспериментом по величине и динамическому диапазону, для каждой группы приходов построены траектории собственных лучей (Приложение Д) и рассчитаны соответствующие им длины траекторий (Приложение Е). Далее на основании вычислений задаются входные параметры - значения дистанций (длин траекторий) соответствующих

собственных лучей и их средних глубин по слоям распространения для расчетов в программе *МИК* (таблица 3 - задаваемые параметры выделены зеленым цветом).

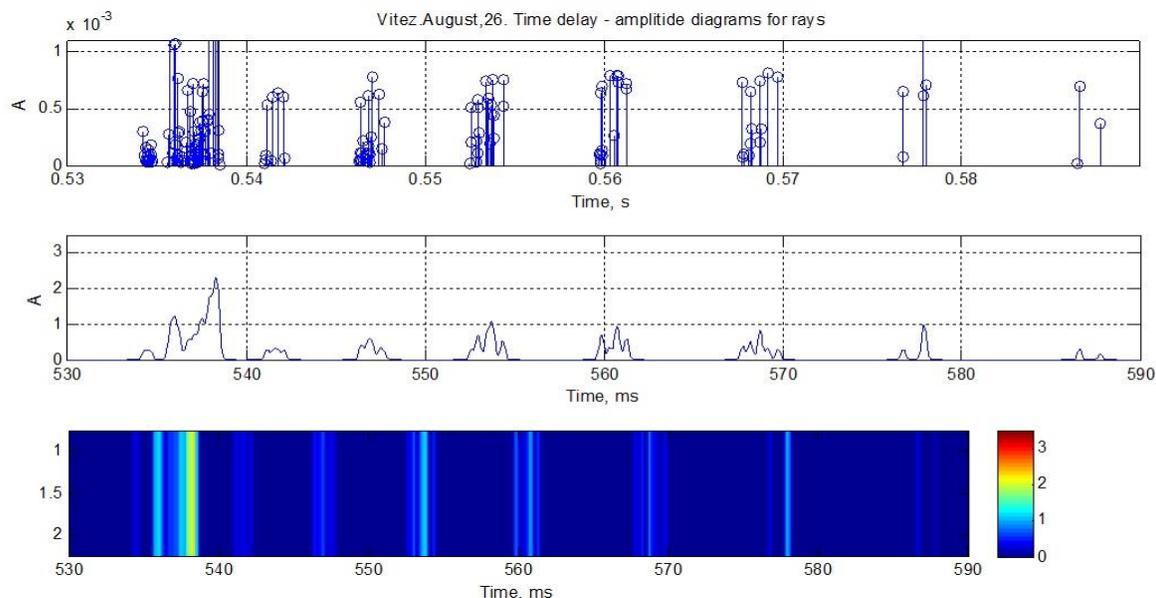


Рисунок 3.20. - Амплитудно-временные параметры собственных лучей

Таблица 3.

Номер группы	Угол выхода, град.	Время прихода, с	Амплитуда, отн. ед.	Длина траектории, м	Скорость звука, м	Оценка глубины, м
1	14,1 14,3	0,53460	2,43E-05	808,5	1512,3	13,0
2	11,3 11,5	0,53590	3,60E-04	809,5	1510,5	15,0
3	8,9 9,1	0,53700	5,16E-05	810,0	1508,4	16,5
4	1,1 1,2	0,53850	5,72E-05	810,0	1504,2	17,5
5	17,8 18	0,54210	6,50E-04	820,0	1512,6	10,5
6	22,1 22,2	0,5538	8,68E-05	838,0	1513,2	10,5
7	24,1 24,3	0,5612	4,53E-05	849,0	1512,8	10,5
8	-25,1-25,2	0,5678	6,39E-05	859,5	1513,7	10,5
9	-25,5-25,7	0,56870	1,30E-04	860,5	1513,1	10,5

Для измерений вертикальных распределений параметров среды использовалась информация о временах прихода первых девяти групп. Ухудшение соотношения «сигнал/шум» периодически приводило к «выпадению» части

характерных горизонтов восстанавливаемого профиля температуры, которое компенсировались за счет других приходов. Далее приведены результаты (рисунок 3.21) рассчитанных с помощью программы *МИК* (по данным акустического зондирования) совместно с контактными инструментальными измерениями *CTD*-зондом *XR-620* вариаций вертикальных профилей температуры и скорости звука на стационарной трассе в б. *Витязь*. Рассмотрен интервал времени измерений с 18:00 27 августа до 03:00 часов 28 августа 2011 г. Для указанного периода максимумы импульсной характеристики волновода имели величину полезного сигнала 3-5дБ от уровня шума.

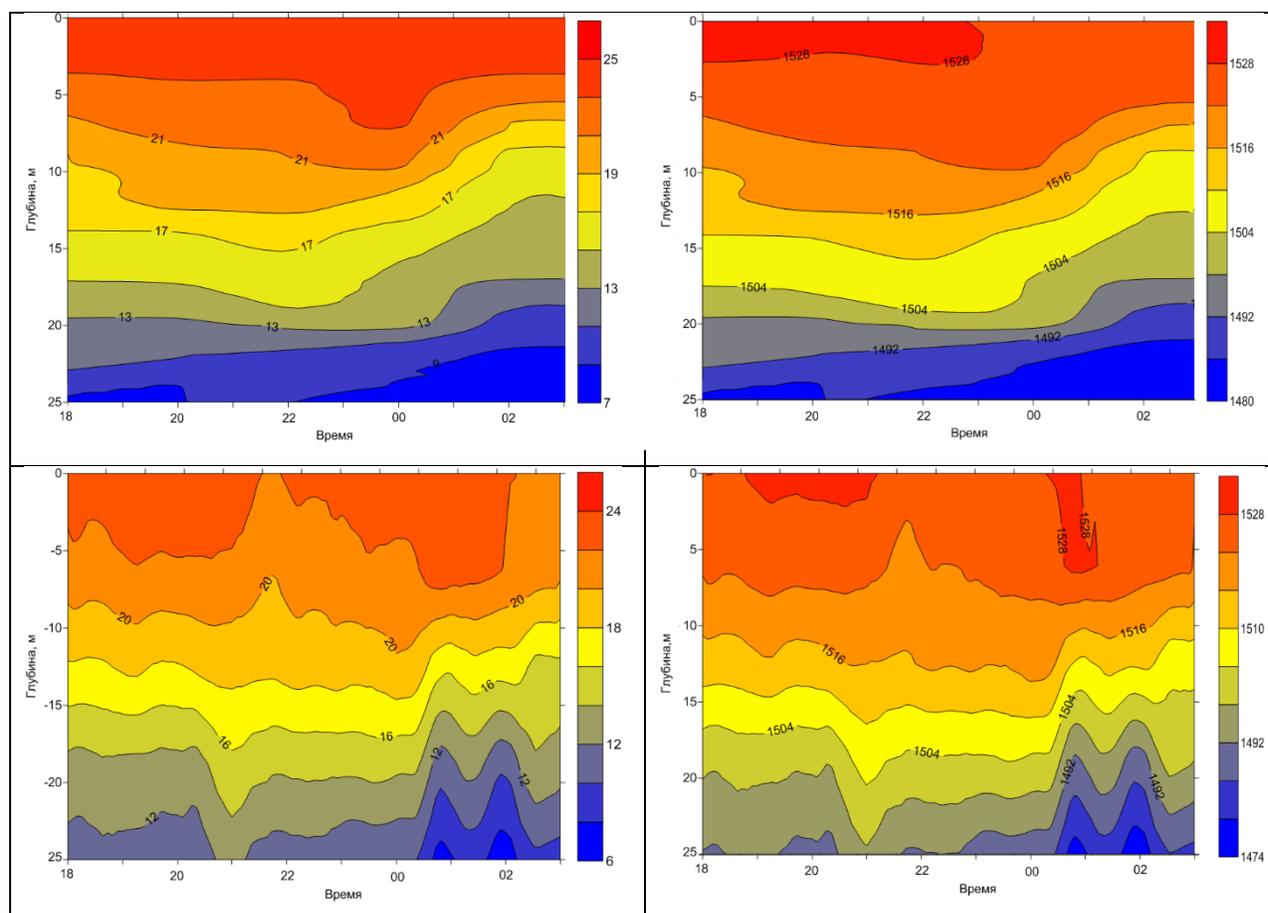


Рисунок 3.21. - Гидрологические данные (верхние панели) и программно-рассчитанные (нижние панели) вертикальные распределения температуры (левые панели) и скорости звука (правые панели)

Вследствие установления слабой связи приходов собственных лучей, имеющих крутые углы выхода (8 отражений от поверхности и дна, перекрывающими весь волновод – 9-группа), с изменениями в приповерхностном слое (до 10м глубины) определение значения температуры в данном слое обеспечивалось линейной интерполяцией по точкам, соответствующим скорости звука: на средней глубине слоя для 9-ой группы лучей 10,5м; на горизонте 0м опорного профиля скорости звука для всего времени эксперимента. Реконструкция в придонном слое (от 17,5м до 25м) осуществлялась аналогичным образом по точкам, соответствующим скорости звука: на средней глубине слоя для 4-ой группы лучей («стелющиеся» по дну) 17,5м; на горизонте 25м опорного профиля.

Из сравнения зависимостей, представленных на верхних графиках - данные измерений *CTD*-зондом, и измеренных акустическим способом - на нижних, следует отметить, что средние абсолютные значения параметров в вертикальных профилях температуры и скорости звука и их низкочастотные тренды, в основном, совпадают. Различия между измеренными параметрами среды проявляются в виде высокочастотных вариаций, что обусловлено принципиальными отличиями в способах гидрологических и акустических измерений. Так, графики на верхних панелях строились по натурным данным стандартной гидрологической суточной съемки в локальной точке посередине трассы, которая выполнялась с периодичностью один раз в два часа. Полученные данные представляют собой вертикальные профили интегральных параметров среды, т.е. осредненных по длине стационарной трассы. Таким образом, представленные на верхних графиках результаты получены с дискретностью по времени в 120 раз меньшей чем на нижних. В результате высокой периодичности акустических измерений на графиках наблюдается тонкая структура вариаций во времени, позволяющая регистрировать динамические процессы с периодами от 20 минут и выше. Структура вертикального профиля скорости звука (температуры), коррелирует по времени с фазами внутреннего бароклинного прилива. Характерный временной

масштаб данной структуры в данном случае ~ 1 час, не наблюдаемой при гидрологических измерениях, за счет низкой периодичности измерений *CTD*-зондом.

3.3 Оценка качества восстановления гидрофизических параметров

Различия физических принципов и методик измерений между акустическим зондированием и стандартными гидрологическими наблюдениями приводят к сложностям сопоставления получаемых результатов. Эта задача имеет системный характер и сводится к оценке пространственных и временных масштабов, а также синхронизации во времени акустических и гидрологических измерений, «привязке» результатов к общей системе пространственных координат в среде. В тоже время, переход от стадии экспериментальных исследований к широкому практическому использованию разрабатываемых акустических методов и средств, требует обоснования методик тестирования и калибровки конкретных гидроакустических систем.

В данном параграфе предложена методика тестирования акустического метода по данным эксперимента в б. *Витязь* (раздел 3.2) в соответствии с рекомендациями *ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002* [108] для оценки точности измерений в терминах «правильность» и «прецизионность».

Средние вдоль трассы измерений (опорные) вертикальные профили температуры и скорости звука рассчитывались по измеренным *CTD*-зондом *XR-620* вертикальным распределениям данных параметров $X_{T_i C_i}(z_k)$ в 3-х точках трассы, где z_k – значения глубин:

$$\overline{X_{TC}}(z_k) = \frac{\sum_{i=1}^3 X_{T_i C_i}(z_k)}{3} \quad (3.1)$$

и сравнивались с вертикальными профилями скорости звука и температуры, измеренными акустическим способом. На рисунке 3.22 приведены профили температуры в точках установки излучателя, приемника и посередине трассы - $T_{и}$, $T_{п}$, $T_{с}$, средний гидрологический профиль - $T_{ср}$ и рассчитанный по данным акустических измерений - $T_{ак}$ на 18 часов 27 августа 2011 г. Горизонтальные планки представляют собой стандартные отклонения $\sigma_T(z_k)$, вычисленные для измеренных по акустической методике и опорных значений. Базовый и «акустический» профили с высокой точностью совпадают на глубинах более 6м, а разница между ними в приповерхностном слое (от 0м до 6м) имеет максимальное значение, составляющее $0,8^{\circ}\text{C}$. В данном случае это является суммарной ошибкой акустического метода и вероятно связано, во-первых, с горизонтальной неоднородностью поля температуры и, во-вторых, с влиянием приповерхностного пузырькового слоя, который изменяет условия распространения звука. Учет влияния пузырькового слоя необходимо проводить, используя в акустических расчетах эффективные параметры плотности среды в приповерхностном слое.

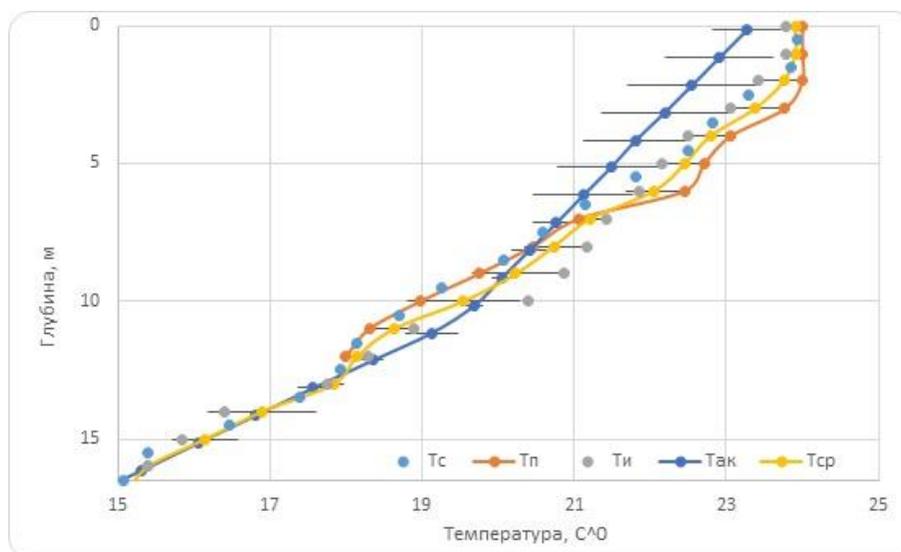


Рисунок 3.22. - Профили температуры, измеренные CTD-зондом - $T_{и}$, $T_{п}$, $T_{с}$, опорный профиль - $T_{ср}$ и рассчитанный по акустическим данным - $T_{ак}$

Для оценки влияния пространственной неоднородности полей скорости звука и температуры вдоль трассы можно использовать значения дисперсии:

$$D_{TC}(z_k) = \frac{\sum_{i=1}^3 (X_{T_i C_i}(z_k) - \overline{X_{TC}(z_k)})^2}{(i-1)} \quad (3.2)$$

стандартного отклонения:

$$\sigma_{TC}(z_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (X_{T_i C_i}(z_k) - \overline{X_{TC}(z_k)})^2}{(i-1)}} \quad (3.3)$$

и коэффициента вариации:

$$V_{TC} = \frac{\sigma_{TC}}{(T,C)}. \quad (3.4)$$

Для анализа лучше использовать зависимости стандартных отклонений σ_{TC} и коэффициентов вариаций V_{TC} , так как они позволяют оценить параметры разброса в абсолютных и относительных значениях измеряемых параметров, соответственно. На рисунке 3.23 приведены зависимости σ_T от глубины z_k для вертикальных профилей температуры, приведенных на рисунке 3.22, из которых следует, что значения стандартных отклонений на различных глубинах не превышали $0,74^\circ\text{C}$ при расчете среднего (опорного) профиля температуры вдоль трассы и $0,85^\circ\text{C}$ - для измеренного акустическим способом.

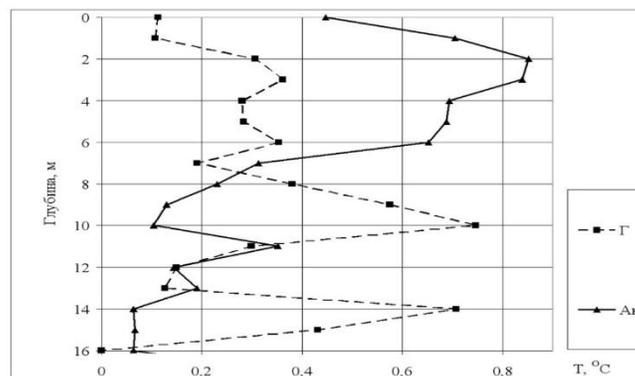


Рисунок 3.23. - Зависимость стандартных отклонений $\sigma_T(z_k)$ для профилей температуры: Г – гидрологический (между измеренным CTD-зондом в одной точке трассы и опорным), Ак – «акустический» (между рассчитанными по акустическим данным и опорным)

В таблице 4 представлены сводные данные расчета максимальных значений $D_{TC}(z_k)$, $\sigma_{TC}(z_k)$ и V_{TC} для вертикальных профилей температуры T и скорости звука C в моменты времени синхронных гидрологических и акустических измерений за весь период эксперимента. Основной эффект в отличии значений T и C двумя способами измерений обусловлен горизонтальной неоднородностью и процессами усреднения в каждой из методик.

Таблица 4

Время наб., час	18		20		22		24		02	
Переменные	T	C								
(гидрологические измерения)										
$\max(D_{TC}), (C^0)^2$	0,37	1,76	0,133	0,795	0,158	0,9	0,136	0,816	0,51	2,95
$\max(\sigma_{TC}), C^0$	0,74	1,62	0,446	1,092	0,486	1,162	0,451	1,106	0,39	2,105
$\max(V_{TC}), \%$	3,82	0,13	2,1	0,072	2,14	0,076	2,01	0,076	4,4	0,14
(акустические измерения)										
$\max(D_{TC}), (C^0)^2$	0,237	1,06	0,7	3,51	0,789	4,205	0,61	3,109	1,21	5,499
$\max(\sigma_{TC}), C^0$	0,85	1,71	1,22	2,65	1,256	2,899	1,112	2,175	1,497	3,316
$\max(V_{TC}), \%$	3,2	0,112	5,66	0,174	5,895	0,19	5,175	0,164	6,934	0,218

Результаты статистических оценок для гидрологических и «акустических» профилей характеризуют погрешность, с которой измерялись параметры распределения скорости звука и температуры по глубине в натуральных условиях горизонтально неоднородной среды. Расчеты максимальных значений дисперсии, стандартных отклонений и коэффициентов вариаций дают количественную «оценку сверху» «степени прецизионности» для измеряемых акустическим способом профилей скорости звука (температуры) по отношению к гидрологическому профилю (вычисленному на основании данных в 3-х точках трассы). Для стандартных отклонений соответствующие значения в 1,5 раза и в 2 раза больше для профилей скорости звука и температуры, соответственно, а полученные значения коэффициентов вариации в 1,57 раза больше для обоих параметров среды. Оценка измерений с позиции «правильности» результатов

проводится с помощью анализа коэффициентов корреляции $r_{X_{cp}X_{ак}}$ между параметрами водной среды для 2-х методик:

$$r_{X_{cp}X_{ак}} = \frac{\sum_{k=1}^n [(X_{cp}(z_k) - \bar{X}_{cp}) \times (X_{ак}(z_k) - \bar{X}_{ак})]}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{cp}(z_k) - \bar{X}_{cp})^2 \times \sum_{k=1}^n (X_{ак}(z_k) - \bar{X}_{ак})^2}}, \quad (3.5)$$

измеренными CTD-зондом вертикальными профилями скорости звука и температуры (осредненными по 3-м точкам трассы - $X_{cp} \equiv \bar{X}_{TC}(z_k)$) и профилями, рассчитанными по акустическим данным - $X_{ак}(z_k) \equiv X_{T_{ак}C_{ак}}(z_k)$, для пяти моментов времени синхронных измерений в эксперименте. Коэффициенты корреляции (таблица 5) находятся в диапазоне от 0,992 до 0,947, что является подтверждением возможности использования акустического метода.

Таблица 5

Время, час	18	20	22	24	02
$r_{T_{cp}T_{ак}}$	0,992	0,994	0,988	0,984	0,948
$r_{C_{cp}C_{ак}}$	0,992	0,994	0,989	0,985	0,947

Анализ уровней корреляции данных температуры $T_{cp}(z_i, t_k)$, $T_{ак}(z_i, t_k)$ и скорости звука $C_{cp}(z_i, t_k)$, $C_{ак}(z_i, t_k)$ (рисунок 3.24) также отдельно проводился на фиксированных глубинах z_i равных 10,5 м и 16,0 м для 5 синхронных моментов времени t_k .

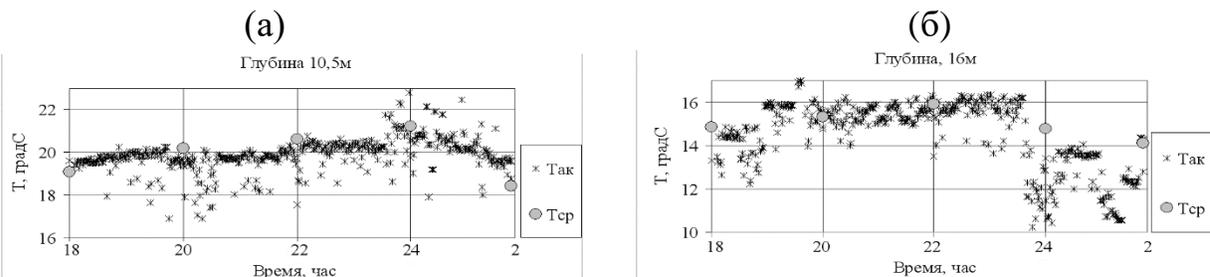


Рисунок 3.24. - Зависимость температуры от времени на горизонте 10,5м – (а) и 16м – (б): T_{cp} – осредненные данные гидрологических измерений, $T_{ак}$ – «акустические» данные

Для обеспечения равенства дискретного представления данных, результаты гидрологических измерений линейно интерполировались по времени (вследствие

низкой по сравнению с акустическими измерениями частотой выборки). Оценка влияния высокочастотных флуктуаций параметров среды на корреляционные характеристики выполнялась путем усреднения данных акустических измерений по периодам времени 15, 60 и 120 мин. В таблице 6 представлены результаты расчетов коэффициентов корреляции $r_{X_{cp}(z_k)X_{ak}(z_k)}$ для горизонтов 0м, 10,5м и 16,0м, с различной частотой выборки, как без усреднения, так и с предварительным усреднением данных за период 120 мин. На периодах усреднения менее 120 мин. и выборки 120 отсчетов корреляция между акустическими и интерполированными гидрологическими значениями отсутствует. Это, вероятно, связано с наличием высокочастотной изменчивости параметров среды на периодах от 1 до 120 мин. в результате акустических измерений и её отсутствием в гидрологических данных. В тоже время, максимальная корреляция ($r_{X_{cp}(z_k)X_{ak}(z_k)} > 0,9$) наблюдается при окне усреднения 120 мин. и частоте выборки один раз за 120 мин.

Таблица 6

Скорость звука					
Выборка, мин.	1	15	30	60	120
Глубина, м	Первичные данные				
0	0,198	0,126	0,232	0,377	0,426
10,5	0,306	0,351	0,133	0,224	0,14
16	0,719	0,669	0,64	0,534	0,388
	Осреднение по 120 мин.				
0	0,349	0,331	0,267	0,274	0,205
10,5	0,564	0,571	0,581	0,591	0,715
16	0,895	0,898	0,905	0,92	0,912
Температура					
0	0,184	0,113	0,235	0,391	0,426
10,5	0,312	0,362	0,149	0,244	0,163
16	0,726	0,68	0,646	0,549	0,413
	Осреднение по 120 мин.				
0	0,345	0,335	0,284	0,292	0,218
10,5	0,566	0,573	0,581	0,59	0,711
16	0,907	0,909	0,916	0,929	0,922

Указанные параметры обработки и представления $T_{ак}(z_i, t_k)$ и $C_{ак}(z_i, t_k)$ наиболее близки к параметрам гидрологической съемки, при этом следует отметить, что гидрологические и акустические данные можно корректно сравнивать только в моменты времени синхронных измерений.

3.4 Исследования приливных явлений в *Корейском проливе*

Проведение исследований на основе метода встречного зондирования с целью мониторинга параметров гидродинамических процессов на прибрежном шельфе с помощью разработанной информационно-измерительной системы (раздел 2.4) и вычислительной программы *CurM* (раздел 2.5) является одной из главных практических задач. Предварительно была произведена съемка рельефа дна прилегающей к о. *Норёк* акватории (рисунок 3.25).

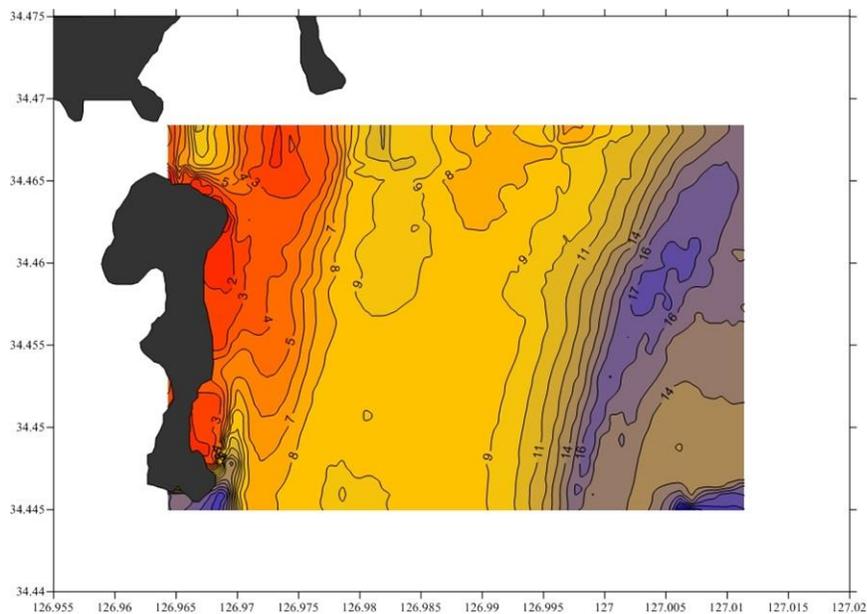


Рисунок 3.25. - Результат батиметрической съемки

Оперативные экспериментальные измерения проводились с 17:06 часов 12 апреля по 10:15 часов 16 апреля 2014 г. В районе работ наблюдались заметные изменения уровня моря и течения, обусловленные приливом. Расчетные значения уровня прилива по данным *TideComp* (рисунок 3.26) для недельного периода времени (с 9 по 16 апреля 2014) показывают, что максимальные значения прилива могут достигать 3,5 м. Район проведения работ характеризуется малыми глубинами (от 3м до 11м) и большими, правильными приливами. После выбора оптимального места установки приемно-излучающих систем было отмечено, что изменение глубины во время проведения эксперимента за счет приливных явлений будет практически сопоставимо с глубиной в этих местах (во время отлива). Таким образом, измерения проводились в условиях сверхмалых глубин, больших вариаций приливного течения возвратно-поступательного характера и высоты прилива.

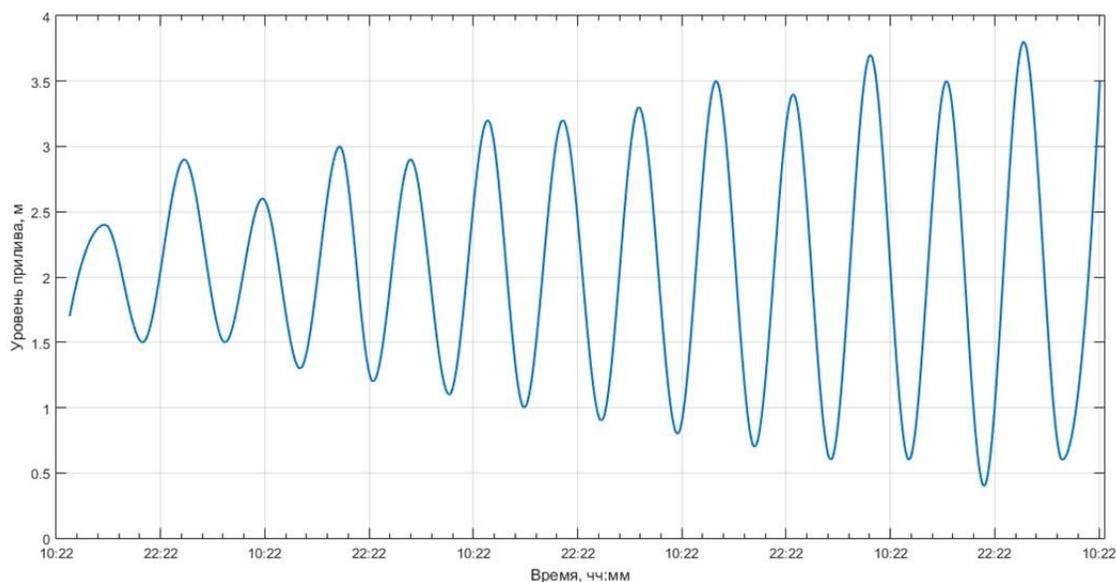


Рисунок 3.26. - Зависимости уровней прилива, предшествующие акустическому эксперименту

На рисунке 3.27 приведена карта района работ и точки размещения гидроакустических трансиверов на исследуемой акватории. Два преобразователя

вытягивались на кабеле с двух противоположных пирсов и опускались в опорных рамах (высота крепления акустических преобразователей в ферме 0,7м.) на дно.



Рисунок 3.27. - Схема эксперимента

Протяженность акустической трассы составила 996 ± 3 м, глубины установленных приборов – 11 м и 3,5 м для автономной излучающих систем №1 (АИС №1) и №2 (АИС №2), соответственно, в момент малой воды. По данным батиметрической карты для района работ был восстановлен профиль дна, характеризующийся небольшим уклоном в направлении к АИС №2 с максимальной глубиной в точке постановки АИС №1. Вариации значений минимального и максимального уровня поверхности воды на трассе в зависимости от отлива и прилива происходили в пределах от 3,5-7 м и 11–14,5 м, соответственно.

Начало эксперимента соответствовало моменту времени строго между моментами полной и малой воды. С 12 апреля 2014 года (с 17 часов 06 минут по местному времени) ежеминутно излучались в противоположных направлениях

сигналы типа *M*-кода с центральной частотой 10кГц, длиной 255 символов, с количеством периодов на символ равным 4. Результаты работы пикового детектора аппаратного коррелятора приведены на рисунке 3.28, времена распространения и амплитуды, соответствующие более стабильному первому приходу, достаточно хорошо коррелирующие со временной зависимостью суточного прилива.

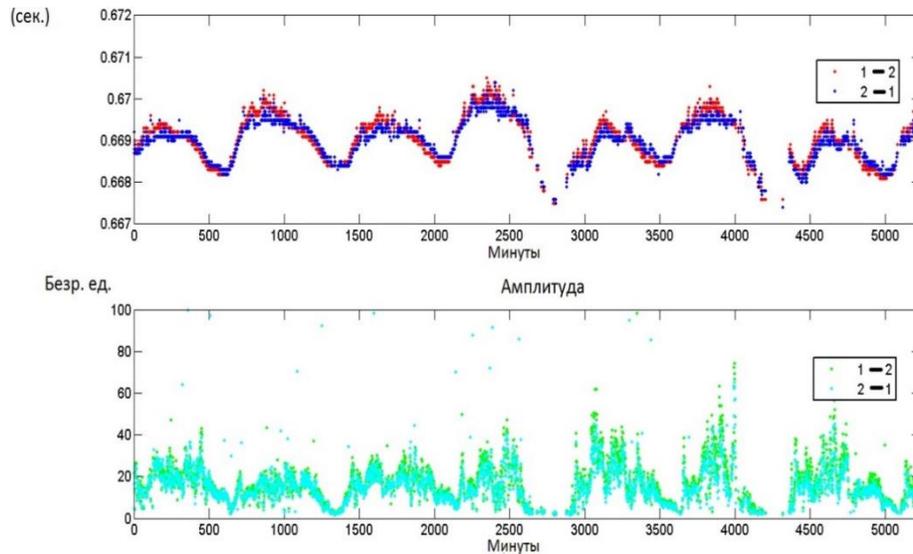


Рисунок 3.28. - Данные порогового устройства аппаратного коррелятора (верхний график – времена распространения первой группы приходов, нижний - их амплитуды)

На рисунке 3.29 представлены вычисленные по временам распространения в противоположных направлениях разность и полусумма «взаимных» приходов, показывающие временные поправки, вносимые течением, и характер смены его направления (компоненты течения) вдоль акустической трассы, использующиеся для вычисления скорости течения и эффективной скорости звука, соответственно.

В течение непрерывного мониторинга комплекс функционировал стабильно в течение 3,5 суток и регистрировал данные о вариации средней скорости и компоненты течения по отношению к акустической трассе; можно отметить хорошее соответствие полученных данных (рисунок 3.30), которые коррелировали

практически «в противофазе» с процессами, вызванными суточным приливом с заходом холодных вод из глубоководной части. Рассчитанная по акустическим данным (эффективной скорости звука) температура в течение эксперимента меняется от 13°C до 14,5°C.

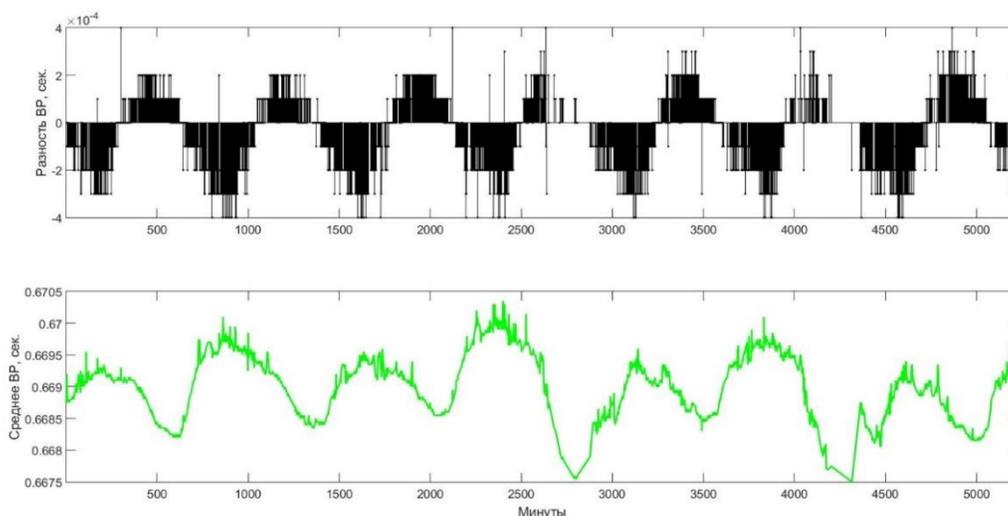


Рисунок 3.29 - Разница во времени распространения в противоположных направлениях – верхний рисунок и их полу-сумма – нижний график

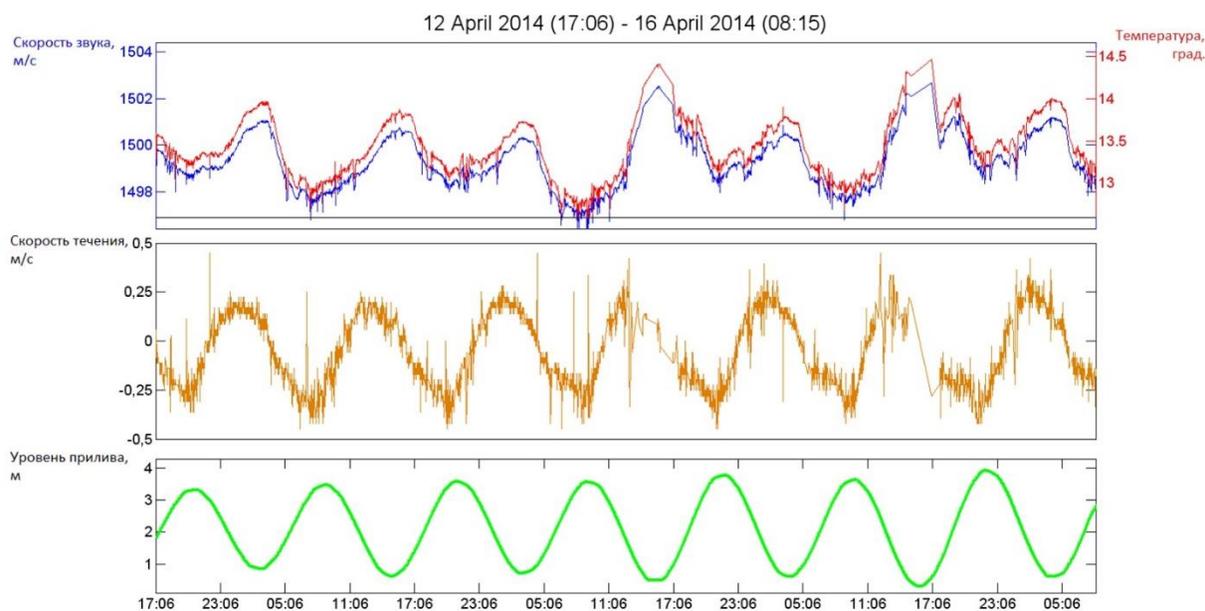


Рисунок 3.30. - Эффективная скорость звука и средняя температура – верхний график; скорость течения – средний график; расчетный уровень прилива – нижний график

Небольшой сдвиг по фазе между графиками расчетного уровня прилива и акустически измеренной скорости компоненты течения вдоль трассы обусловлен разницей во времени прихода приливной волны из глубоководной части до района работ и точки, в которой ведется расчет значения уровня прилива, находящейся в ~ 11 км от трассы измерений.

Вторая стадия экспериментальных измерений параметров приливного течения в режиме реального времени с помощью 3-точечной схемы предполагало использование программного обеспечения *3PCurM* (раздел 2.6), которое было успешно апробировано совместно с модифицированной акустической системой (раздел 2.4) в мелководной акватории также вблизи о. *Норёк* в мае 2015 г. Дополнительным условием являлось функционирование на очень малых дистанциях между 3-мя парами акустических трансиверов. Минимальная длина одной из акустических трасс составила по *GPS*-данным 144 ± 3 м, а максимальная $\sim 278\pm 3$ м (рисунок 3.31).



Рисунок 3.31 – Схема эксперимента (3-точечная постановка)

Глубины постановки приборов были практически одинаковы 8-9м. Звуковая энергия в данных условиях распространяется по всему водному слою, что делает возможным оценку параметров генерального течения (значений скорости течения и его направления в горизонтальной плоскости). Измерения приходится на момент, когда скорость течения близка к максимуму (рисунок 3.32) и основной водоперенос осуществляется в направлении «из бухты» вплоть до уменьшения скорости течения практически до нуля в момент малой воды.

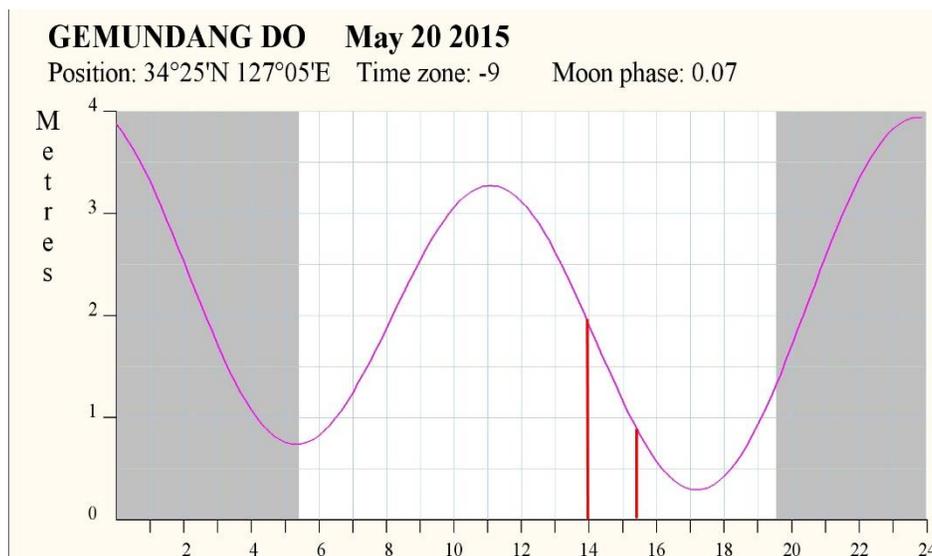


Рисунок 3.32 - Расчетный уровень прилива (по данным программы *TideComp*, красные линии – период проведения эксперимента)

На рисунке 3.33 представлен 90-минутный сегмент данных аппаратно-временного коррелятора - амплитуд и времен распространения первых приходов в противоположных направлениях на трассах *T.1-T.2* и *T.3-T.1*, полученных с помощью порогового устройства, по которым далее выполнялись вычисления пространственно-осредненных значений скорости течения и их преобразование в ортогональные составляющие в центре треугольника с последующим формированием результирующего вектора на горизонтальной плоскости и вычислением его параметров (абсолютное значение и направление).

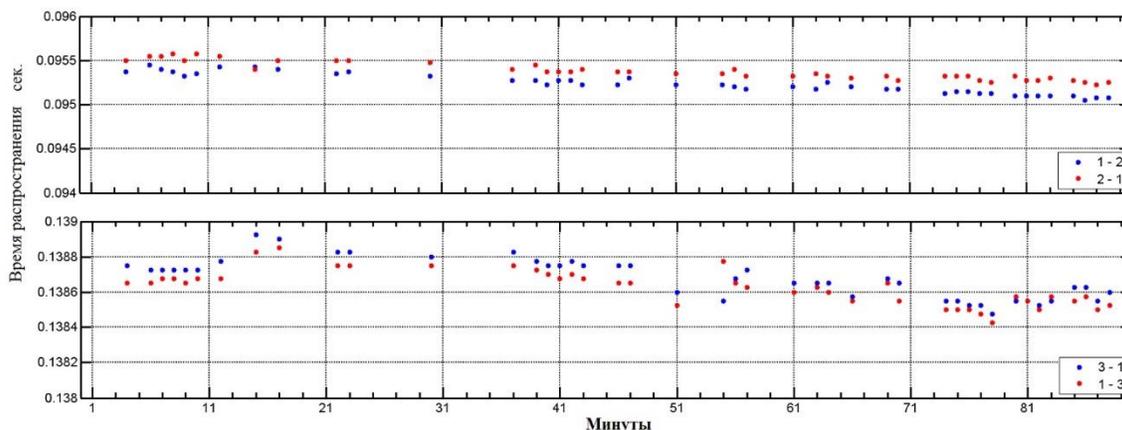


Рисунок 3.33 - Вариации первых приходов с максимальной амплитудой для акустических трасс $T.1-T.2$ и $T.3-T.1$

Визуальное наблюдение показало, что за время эксперимента течение направлено на северо-восток, т.е. «на выход» из бухты, что согласуется как с результатами предыдущих экспериментов, так и рядами прогнозных данных для района работ. Скорость течения колебалась от 30см/с до 80см/с (рисунок 3.34). Подобные значения скоростей вполне характерны для данного района, а визуальное наблюдение за движением водных масс подтвердило их перемещение в северо-восточном направлении.

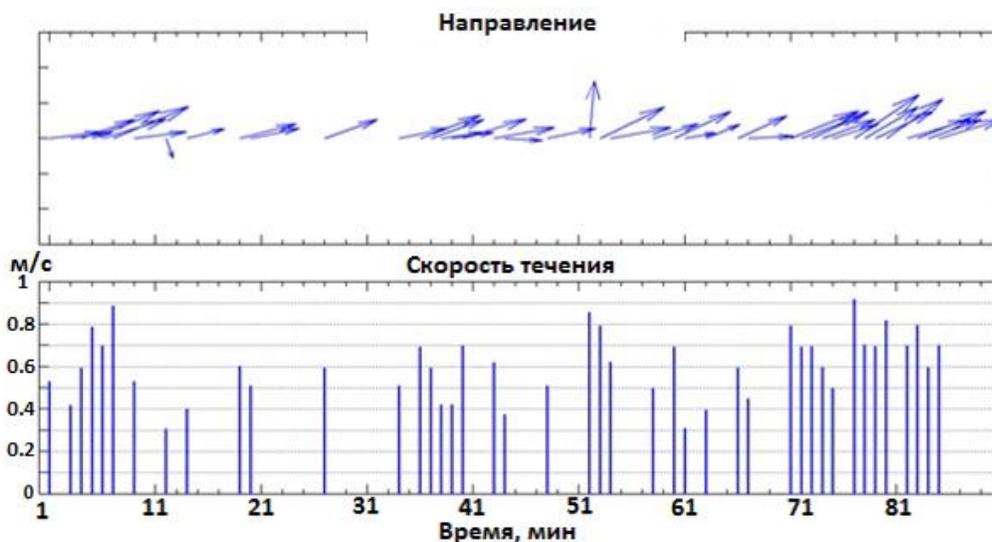


Рисунок 3.34 – Направление течения в горизонтальной плоскости по отношению к центру треугольника (верхний график) и скорость течений (нижний график)

Большой разброс значений скорости течения может быть объяснен достаточно низким порогом чувствительности комплекса при измерении на каждой акустической трассе из-за малых дистанций, частоты зондирующего сигнала 10кГц (как в предыдущем эксперименте) и частотой дискретизации коррелятора (40кГц).

Вычисление разрешающей способности основывается на оценке вариации времени распространения, способной вызвать достоверно различимое изменение показаний аппаратного коррелятора, равное 1-му отсчету:

$$\delta V = \frac{c^2}{2 \times R} \times \frac{1}{Fs}, \quad (3.6)$$

где δV – разрешающая способность, c – эффективная скорость звука вдоль акустической трассы, R – горизонтальная дистанция между акустическими преобразователями, Fs – частота дискретизации аппаратного коррелятора. Таким образом, полученные значения для 3-х трасс составили: $T.1-T.2$ – 0,2м/с, $T.2-T.3$ – 0,1м/с, $T.3 - T.1$ – 0,13м/с. Дополнительная погрешность вносится ошибками определения координат постановки трансиверов по данным *GPS*-приемника (± 3 м), приводящими к ошибке определения горизонтальной дистанции между акустическими преобразователями.

По данным из открытого источника - программы *OpenCPN* [109] можно заключить что значения скоростей течения 1-2 узла вполне характерны для данной акватории. Таким образом, пилотное тестирование комплекса для оценки скорости и направления течения в реальном времени с помощью метода встречного зондирования позволяет рассчитывать на успешное применение полученных результатов и технических средств при решении практических задач в подобных акваториях.

Результаты измерений параметров течения показывают хорошее соответствие с периодами приливных колебаний в исследуемой акватории. Увеличение частоты дискретизации и улучшение точности позиционирования акустических трансиверов приведет к более точным результатам, а увеличение

числа трансиверов сделает возможным оценку пространственного распределения течения на акваториях с большими масштабами.

Выводы по главе

Основные выводы по результатам натурных исследований:

1. Разработанные методики, программные средства и алгоритмы для измерения средней скорости звука (температуры), изменений уровня моря, скорости и направления морского течения успешно применены при проведении томографических экспериментов в мелководных частях шельфа *Японского моря*;
2. С помощью вычислительной программы *МИК* с графическим интерфейсом пользователя осуществлена реконструкция зависимости средней температуры волновода от глубины по слоям и с помощью статистического анализа получены количественные показатели качества ее восстановления;
3. С использованием вычислительной программы *МИК* с графическим интерфейсом пользователя осуществлен мониторинг вариаций уровня морской поверхности в мелком море;
4. При томографической реконструкции поля температур использование абсолютных значений времен задержек приходов акустической энергии в качестве информационных параметров позволяет измерять интегральные значения вертикального профиля температуры с погрешностью до $0,85^{\circ}\text{C}$;
5. Результаты «инверсии» контролировались и были подтверждены прямыми инструментальными измерениями определяемых гидрофизических параметров. Корректность расчетов зависела от синхронности по времени акустических и гидрологических измерений и частоты выборок;

6. Разработанные методики, программные средства и алгоритмы определения интегральных параметров течения на основе метода встречного зондирования позволили исследовать динамику компоненты скорости (по модулю) и направления потока, проецируемых на акустическую трассу, в диапазоне от 0м/с до 0,4м/с, и реализовать 3-точечную схему эксперимента для исследования вектора течения в горизонтальной плоскости. Применение пользовательских интерфейсов программ *CurM* и *3PCurM*, содержащих алгоритмы расчета, совместно с информационно-измерительной системой на базе гидроакустических трансиверов при их стационарном размещении позволяет эффективно осуществлять исследование и мониторинг морских течений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, позволяют сформулировать основные выводы.

1. На основе инверсионного алгоритма расчета вертикального профиля скорости звука (температуры) в рамках модифицированной схемы лучевой томографии предложен метод решения задачи акустической термометрии в мелком море с использованием импульсного зондирования широкополосными фазоманипулированными сигналами типа *M*-последовательностей для получения функции отклика диагностируемого волновода. В качестве источника информации о зависимости температуры от глубины (по слоям волновода) использованы абсолютные значения времен задержек групповых приходов (максимумов корреляционной огибающей) акустической энергии, распространяющихся по различным лучевым траекториям.

2. Успешное применение программы *Bellhop* (пакет *AcToolBox*) для численного моделирования процесса распространения акустической энергии (амплитудно-временные и угловые характеристики импульсных приходов, лучевые диаграммы, длины траекторий) по данным реальной батиметрии и гидрологии позволили разработать эффективную процедуру идентификации приходов акустической энергии и повысить точность реконструкции распределения температуры по глубине вдоль стационарных трасс.

3. Предложена и реализована на практике методика определения вариаций уровня морской поверхности путем измерения разности времен распространения акустической энергии по поверхностно-донным (крутым) и водным (рефрагирующим) лучевым траекториям. Введение расчетного алгоритма для измерения уровня морской поверхности по акустическим данным в программу реконструкции интегральных значений вертикального профиля температуры,

позволяет учесть влияние приливных явлений на точность решения задач акустической термометрии.

4. Разработаны методики и программные средства для измерения интегральных параметров течения на акваториях с размерами до 1км, на основе метода встречного зондирования морской среды фазоманипулированными сигналами позволяют измерять направление потока и скорость течения. Данные решения позволили организовать и провести исследование динамики и структуры вод в *Корейском проливе* вблизи о. *Норёк*. При стационарном размещении акустических трансиверов по 2-точечной схеме были проведены многосуточные исследования динамики приливо-отливных течений в диапазоне скоростей от 0м/с до 0,4м/с. Эксперимент с 3-точечной схемой размещения трансиверов продемонстрировал возможности комплекса по измерению вектора скорости течения в горизонтальной плоскости.

5. Пакет программ, выполненный с помощью приложений интерактивной среды *Matlab* для программирования, численных расчетов и визуализации результатов прошел апробацию в условиях натуральных экспериментов и защищен 2-мя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Алгоритмы приема, обработки и анализа гидроакустических данных обеспечили функционирование программных средств в масштабе реального времени в составе аппаратно-программного комплекса.

6. Сравнительный анализ, проведенный с помощью статистической обработки, для количественной оценки степени сходимости результатов акустических и независимых контактных измерений показал:

– мониторинг вертикального профиля температуры осуществим с погрешностью до $0,85^{\circ}\text{C}$ в условиях многолучевого распространения (несущая частота 2кГц) с временным разрешением 2мс;

- определение скорости течения (или его компоненты) возможно с разрешающей способностью до 2,5-3см/с (в зависимости от эффективной скорости звука в диапазоне 1460-1540м/с) для рабочей частоты 10кГц;
- погрешность измерений уменьшается при увеличении масштабов усреднения (исследуемой области).

7. Предложенные методы, алгоритмы и программы подтвердили свою эффективность в натуральных условиях мелководных (менее 10м, *о. Норёк, Корейский пролив* и от 10 до 40м, *б. Витязь, залив Посьета*) акваторий шельфовой зоны *Японского моря*. Результаты разработок могут быть внедрены в океанологическую практику морских исследований и для решения широкого спектра прикладных задач гидроакустики (подводная навигация и связь, дистанционное управление автономными аппаратами, системы информационного обеспечения рыбного промысла и промышленного разведения марикультуры).

8. Перспективы дальнейшего развития темы диссертационной работы могут быть связаны с продолжением исследований и разработок, для их внедрения в системы глобального мониторинга динамики и структуры вод различных областей Мирового океана.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АТО	Акустическая томография океана
АИС	Автономная излучающая система
РГБ	Радиогидроакустический буй
БРОВ	Блок регистрации, обработки и визуализации
ИП	Источник питания
ПЛИС	Программируемая логическая интегральная схема
УМ	Усилитель мощности
ГИ	Гидроакустический излучатель
КУ	Кодирующее устройство
ЛУ	Логическое устройство
СЕВ	Система единого времени
ЦАП	Цифро-аналоговый преобразователь
Т	Трансформатор
L	Согласующая индуктивность
ПГ	Приемный гидрофон
ФНЧ	Фильтр низких частот
ФВЧ	Фильтр высоких частот
ПК	Персональный компьютер
ВКФ	Взаимно-корреляционная функция
ФОАК	Функция отклика акустического канала
П/П	Прием/Передача
ПИ	Пьезоэлектрический излучатель
АК	Аппаратный коррелятор
УУ	Управляющее устройство

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева, И. Б. Физические основы распространения звука в океане / И. Б. Андреева. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 192 с.
2. Munk, W. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring / W. Munk, C. Wunsch // Deep-Sea Research. – 1979. – V. 26A. – P. 123-161.
3. Dushaw, B. D. A decade of acoustic thermometry in the North Pacific Ocean / P. F. Worcester, W. H. Munk, R. C. Spindel, J. A. Mercer, B. M. Howe, K. Jr. Metzger, T. G. Birdsall, R. K. Andrew, M. A. Dzieciuch, B. D. Cornuelle, D. Menemenlis // J. Geophys. Res. – 2009. – V. 114. – P. 1-24.
4. Mikhalevsky, P. N. The Transartic acoustic propagation experiment and climate monitoring in the Artic / P. N. Mikhalevsky, A. N. Gavrilov, A. B. Baggeroer // IEEE J. Oceanic Eng. – 1999. – V. 24. – № 2. – P. 183-201.
5. Send, U. Observation of a deep convection regime with acoustic tomography / U. Send, F. Schott, F. Gaillard, Y. Desaubies // J. Geophys. Res. - Oceans. – 1995. – V. 100. – P. 6927-6941.
6. Send, U. Acoustic observations of heat content across the Mediterranean Sea / U. Send, G. Krahnemann, D. Mauuary, Y. Desaubies, F. Gaillard, T. Terre, J. Papadakis, M. Taroudakis, E. Skarsoulis, C. Millot // Nature. – 1997. – V. 385. – P. 615-617.
7. Jesus, S. M. Acoustic Oceanographic Buoy testing during the MREA' 2003 sea trial / S. M. Jesus, C. Soares, A. Silva, E. Coelho. Proceedings of the Seventh European Conference on UNDERWATER ACOUSTICS ECUA 2004. – The Netherlands: Delft University of Technology, 2004. – P. 271-279.
8. Munk, W. H. Global ocean warming: an acoustic measure? / W. H. Munk, A. M. G. Forbes // J. Phys. Oceanogr. – 1989. – V.19. – P. 1765-1778.

9. Spiesberger, J. L. Basin-scale tomography: a new tool for studying weather and climate / J. L. Spiesberger, K. Metzger // *J. Geophys. Res.* – 1991. – V. 96. – P. 4869-4889.
10. Кацнельсон, Б. Г. Акустика мелкого моря / Б. Г. Кацнельсон, В. Г. Петников. – Москва: Наука, 1997. – 191 с.
11. Katsnelson, B. Fundamentals of shallow water acoustics / B. Katsnelson, V. Petnikov, J. Lynch. – New-York: Springer, 2012. – 540 p.
12. Newhall, A. E. Preliminary acoustic and oceanographic observations from the winter PRIMER experiment: technical report / A. E. Newhall, K. V. Heydt, B. J. Sperry, G. G. Gawarkiewicz, J. F. Lynch – Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution, 1998. – 130 p.
13. Dahl, P. H. ASIAEX, East China Sea Cruise Report of the Activities of the R/V Melville 29 May to 9 June 2001: Technical Memorandum / P. H. Dahl – Seattle: University of Washington, 2001. – 32 p.
14. Duda, T. F. Acoustic and oceanographic observations and configuration information for the WHOI moorings for the SW06 experiment: WHOI technical report / T. F. Duda, A. E. Newhall, J. D. I. K. von der Heydt, J. N. Kemp, S. A. Lerner, S. P. Liberatore, Y.-T. Lin, J. F. Lynch, A. R. Maffei, A. K. Morozov, A. Shmelev, C. J. Sellers, W. E. Witzell – Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution, 2007. – 118 p.
15. Preisig, J. C. Coupled acoustic mode propagation through continental-shelf internal solitary waves / J. C. Preisig, T. F. Duda // *IEEE J. Oceanic Eng.* – 1997. – V. 22. – P. 256-269.
16. Apel, J. R. An overview of the 1995 SWARM shallow water internal wave acoustic scattering experiment / J. R. Apel // *IEEE J. Oceanic Eng.* – 1997. – V. 22. – P. 465-500.
17. Zhou, J. Resonant interaction of sound wave with internal solitons in the coastal zone / J. Zhou, X. Zhang, P. H. Rogers, // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1991. – V. 90. – P. 2042-2054.

18. Курьянов, Б. Ф. Акустическая томография внутренних волн в океане / Б. Ф. Курьянов, А. К. Морозов, Г. К. Тимашкевич // Акустический журнал. – 1995. – Т. 41. – № 1. – С. 112-116.
19. Елисеевнин, В. А. Выделение нормальных волн в мелком море вертикальной линейной антенной / В. А. Елисеевнин // Акустический журнал. – 1986. – Т. 32. – № 1. – С. 54-60.
20. Галкин, О. П. Вертикальная изменчивость звуковых полей в прибрежном клине / О. П. Галкин, А. В. Кулаков, Р. Ю. Попов // Акустический журнал. – 2002. – Т. 48. – № 5. – С. 614-620.
21. Spindel, R. C. Acoustic tomography for monitoring the Sea of Japan: a pilot experiment / R. C. Spindel, J. Na, P. H. Dahl, S. Oh, C. Eggen, Y. G. Kim, V. A. Akulichev, Y. N. Morgunov // IEEE J. Ocean. Eng. – 2003. – V. 28. – P. 297-302.
22. Кацнельсон Б. Г., О возможности селекции нормальных волн в мелководном волноводе / Б. Г. Кацнельсон, С. А. Переселков, В. Г. Петников // Акустический журнал. – 2004. – Т. 50. – № 5. – С. 646-656.
23. Medwin, H. Fundamentals of acoustic oceanography / H. Medwin, C. S. Clay. – San Diego: Academic Press, 1997. – 712 p.
24. Александров, И. А. Распространение звука через гидрологические фронты в Баренцевом море / И. А. Александров // Акустический журнал. – 1995. – Т. 46. – № 6. – С. 867-875.
25. Балдина, Е. А. Исследования Мирового океана средствами дистанционного зондирования [Электронный ресурс] / Е. А. Балдина, Е. Р. Чалова. // Седьмой Интернет-семинар Космические исследования океана. – Режим доступа: http://www.geogr.msu.ru/science/aero/center/int_sem7/current.htm.
26. Каменкович, В. М. Синоптические вихри в океане / В. М. Каменкович, М. Н. Кошляков, А. С. Монин. – Ленинград: Гидрометеоиздательство, 1982. – 264 с.
27. Акуличев, В. А. Влияние синоптического вихря на распространение акустических сигналов в северо-западной части Тихого океана / В. А. Акуличев,

- Л. К. Бугаева, Ю. Н. Моргунов, Ю. А. Половинка, А. А. Соловьев // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – № 1(7). – С. 40-56.
28. Кравцов, Ю. А. Исследование флуктуаций амплитуды звукового поля на стационарной акустической трассе / Ю. А. Кравцов, В. Г. Петников, А. Ю. Шмелев // Акустический журнал. – 1986. – Т. 32. – № 3. – С. 407-409.
29. Бондарь, Л. Ф. Исследование короткопериодных флуктуаций интенсивности и фазы гидроакустических сигналов на мелководных стационарных трассах / Л. Ф. Бондарь, С. В. Борисов, В. Н. Жирко, Н. Ф. Кабанов, С. В. Калинин, Ю. Н. Моргунов, А. Н. Рутенко, А. И. Чудаков, А. Н. Швырев // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42. – № 1. – С. 25-31.
30. Андреев, М. Ю. Влияние гидродинамической изменчивости в мелком море на фазу звукового поля / М. Ю. Андреев, Б. Г. Кацнельсон, Л. Г. Кулапин, В. Г. Петников // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42. – № 4. – С. 459-464.
31. Безруков, Ю. Ф. Океанология. Часть I. Физические явления и процессы в океане / Ю. Ф. Безруков. – Симферополь: Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, 2006. – 159 с.
32. Stewart, R. H. Introduction to Physical Oceanography / R. H. Stewart. – Texas A & M University: Department of Oceanography, 2008. – 353 p.
33. Архипкин, В. С. Океанология. Физические свойства морской среды / В. С. Архипкин, С. А. Добролюбов. – Москва: МАКС Пресс, 2005. – 215 с.
34. Царев, В. А. Неконтактные методы измерений в океанологии. Учебное пособие / В. А. Царев, В. П. Коровин. – Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2005. – 184 с.
35. Коровин, В. П. Методы и средства гидрометеорологических измерений (Океанографические работы): учебное издание / В. П. Коровин, В. М. Тимец. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2000. – 312 с.
36. Munk, W. Sound propagation through a fluctuating stratified ocean / W. Munk, F. Zachariassen // J. Acoust. Soc. Am. – 1976. – V. 59. – P. 818-838.

37. Гончаров, В. В. Акустическая томография океана / В. В. Гончаров, В. Ю. Зайцев, В. М. Куртепов, А. Г. Нечаев, А. И. Хилько. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1997. – 256 с.
38. Ocean tomography group: A demonstration of ocean acoustic tomography / Ocean tomography group // *Nature*. – 1982. – V. 299. – P. 121-125.
39. Munk, W. Ocean Acoustic Tomography: A large-scale climate measurements and modelling / W. Munk, C. Wunsch // *Ocean modelling*. – 1982. – № 43. – P. 1-4.
40. Munk, W. Up-Down resolution in the ocean acoustic tomography/ W. Munk, C. Wunsch // *Deep-Sea Research*. – 1982. – V. 29. – № 12A. – P. 1415-1436.
41. Munk, W. Ocean Acoustic Tomography: Rays and Modes / W. Munk, C. Wunsch // *Rev. Geophys. and Space phys.* – 1983. – V. 21. – № 4. – P. 777-793.
42. Ko, D. S. Acoustic tomography in the Florida Strait: Temperature, Current and Vorticity Measurements / D. S. Ko, H. A. De Ferrari, P. Malanette-Rizzoli // *J. Geoph. Res.* – 1989. – V. 94. – № C5. – P. 6197-6211.
43. Акустика океана. Современное состояние : сборник трудов / под. ред. Л. Н. Бреховских, И. Б. Андреевой. – Москва: Наука, 1982. – 244 с.
44. Caiti, A. Acoustic Sensing Techniques for the Shallow Water Environment. Inversion Methods and Experiments / A. Caiti, N. R. Chapman, J.-P. Hermand, S. M. Jesus. – Netherlands: Springer, 2006. – 328 p.
45. Jensen F.B, Computational Ocean Acoustics / F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. Schmidt. – New-York: Springer. – 2011. – 794 p.
46. Вировлянский, А. Л. Об использовании акустической томографии океана для измерения средней температуры / А. Л. Вировлянский // *Акустический журнал*. – 1994. – Т. 40. – № 5. – С. 756-761.
47. Mackenzie, K.V. Nine-term Equation for Sound Speed in the Oceans / K.V. Mackenzie // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1981. – V. 70. – P. 807-812.
48. Taroudakis, M. I. Ocean Acoustic Tomography / M. I. Taroudakis. Lecture Notes of the Tutorial Course for Young Acousticians from Europe Countries. – Poland: Gdansk, 2002. – P. 77-95.

49. Collins, M. D. Inverse problems in ocean acoustics / M. D. Collins, W. A. Kuperman // Inverse problems. – 1994. – V. 10. – P. 1023-1040.
50. Munk, W. Ocean Acoustic Tomography / W. Munk, P. Worcester, C. Wunsch. – Cambridge Monographs on Mechanics: Cambridge University Press, 1995. – 456 p.
51. Jones, R. M. Nonperturbative ocean acoustic tomography inversion of 1000-km pulse propagation in the Pacific ocean / R. M. Jones, B. M. Howe, J. A. Mercer, R. C. Spindel, T. M. Georges // J. Acoust. Soc. Am. – 1994. – V. 96. – № 5. – P. 3054-3063.
52. Worcester, P. F. Reciprocal acoustic transmission in a midocean environment / P. F. Worcester // J. Acoust. Soc. Am. – 1977. – V. 62. – P. 895-905.
53. Spiesberger, J. L. Stability and indefication of ocean acoustic multipaths / J. L. Spiesberger, R. C. Spindel, K. Netzger // J. Acoust. Soc. Am. – 1980. – V. 67. – № 1. – P. 2011-2017.
54. Palmer, D. R. Ray path identification and acoustic tomography in the straits of Florida / D. R. Palmer, L. M. Lawson, D. A. Seem, Y. -H. Daneshzadeh // J. Geoph. Res. – 1985. – V. 90. – № C3. – P. 4977-4989.
55. Skarsoulis, E. Ocean acoustic tomography based on peak arrivals / E. Skarsoulis, G. Athanassoulis, U. Send // J. Acoust. Soc. Am. – 1996. – V. 100. – P. 797-813.
56. Rodriguez, O. C. Physical limitations of travel-time-based shallow water tomography / O. C. Rodriguez, S. M. Jesus // J. Acoust. Soc. Am. – 2000. – V. 6. – № 108. – P. 2816-2822.
57. Гончаров, В. В. Метод согласованных временных откликов в акустической томографии океана / В. В. Гончаров // Акустический журнал. – 1997. – Т. 43. – № 5. – С. 622-629.
58. Akulichev, V. A. Remote Acoustic Sensing Methods for Studies in Oceanology / V. A. Akulichev, V.V. Bezotvetnykh, A.V. Burenin, E. A. Voytenko, S. I. Kamenev, Yu. N. Morgunov, Yu. A. Polovinka, D. S. Strobikin // Ocean Science Journal. – 2006. – V. 41. – № 2. – P. 105-111.

59. Jesus, S. M. An experimental demonstration of blind ocean acoustic tomography / S. M. Jesus, C. Soares, J. Onofre, P. Picco. // J. Acoust. Soc. Am. – 2006. – V. 119. – № 3. – P. 1420-1431.
60. Koblinsky, C. J. Observing the Oceans in the 21st Century: a Strategy for Global Ocean Observations / C. J. Koblinsky, N. R. Smith. – Melbourne: GODAE Project Office and Bureau of Meteorology, 2001. – P. 391-418.
61. Antonov, J. I. World Ocean Atlas 2005, V. 2, Salinity, NOAA Atlas NESDIS 62 / J. I. Antonov, R. A. Locarnini, T. P. Boyer, A. V. Mishonov, H. E. Garcia. – Washington D.C.: Natl. Oceanic and Atmos. Admin., 2006. – 182 p.
62. JPL-ECCO Ocean Data Assimilation [Электронный ресурс]. – Jet Propulsion Laboratory: California Institute of Technology. – Режим доступа: <http://ecco.jpl.nasa.gov/>
63. Parallel Ocean Program (POP) [Электронный ресурс]. – Los Alamos National Laboratory, 2004. – Режим доступа: <http://climate.lanl.gov/Models/POP/>
64. Безответных, В.В. Особенности применения акустических псевдослучайных сигналов для измерения импульсных откликов на шельфе Японского моря / В. В. Безответных, А. В. Буренин, Ю. Н. Моргунов, Д. С. Стробыкин // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 1. – С. 141-144.
65. Айфичер, Э. А. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. А. Айфичер, Б. У. Джервис. – 2-е изд., перевод с англ. – Москва: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 992 с.
66. Акуличев, В. А. Экспериментальные исследования сезонной изменчивости температурных полей на шельфе Японского моря акустическими методами / В. А. Акуличев, Ю. Н. Моргунов, Д. С. Стробыкин // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56. – № 2. – С. 218-220.
67. Кулаков, А. В. Определение интервалов временной стабильности параметров гидроакустического канала / А. В. Кулаков, Р. Ю. Попов // Акустический журнал. – 2000. – Т. 46. – № 5. – С. 671-679.

68. Munk W. H. The Heard Island Feasiability Test / W. H. Munk, R. C. Spindel, A. B. Baggeroer, T. G. Birdsall // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1994. – V. 96. – № 4. – P. 2330-2342.
69. Worcester, P. F. Reciprocal Acoustic Transmissions: Instrumentation for Mesoscale Monitoring of Ocean Currents / P. F. Worcester, R. C. Spindel, B. M. Howe // *IEEE J. Ocean. Eng.* – 1985. – V. OE-10. – № 2. – P. 123-137.
70. Pierce, A. D. *Acoustics - An introduction to its physical principles and applications* / A. D. Pierce. – Woodbury, N.Y.: Acoustical Society of America, 1989. – 678 p.
71. Годин О. А., Акустическая томография океанских течений по методу согласованной невзаимности / О. А. Годин, Д. Ю. Михин, А. В. Мохов // *Акустический журнал.* – 1996. – Т. 42. – № 4. – С. 501-509.
72. Истошин, Ю. В. *Морская гидрометрия* / Ю. В. Истошин. – Ленинград: Гидрометеорологическое издание, 1967. – 404 с.
73. Сабинин, К. Д. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды / К. Д. Сабинин, А. Н. Серебрянный // *Акустический журнал.* – 2012. – Т. 58. – № 5. – С. 639-648.
74. Бондаренко, А. Л. Крупномасштабные течения и долгопериодные волны Мирового океана / А. Л. Бондаренко. – Москва: Институт водных проблем РАН, 2011. – 163 с.
75. Нужденко, А. В. Разработка технических средств акустической диагностики гидрофизических процессов в морской среде : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.06 / Нужденко Анатолий Владиленович. – Владивосток, 2002. – 134 с.
76. Spiesberger, J. L. Listening for climatic temperature change in the northeast Pacific: 1983-1989 / J. L. Spiesberger, K. Metzger, J. A. Furgerson // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1992. – V.92. – P. 384-396.
77. Cornuelle, B. C. High spatial resolution in vertical slice ocean tomography / B. C. Cornuelle, B. Howe // *J. Geoph. Res.* – 1987. – V. 92. – P. 11680-11692.

78. Моргунов, Ю. Н. Разработка технических средств и методов акустического мониторинга морской среды : дис. ... д-ра. техн. наук : 01.04.06 / Моргунов Юрий Николаевич. – Владивосток, 2001. – 229 с.
79. Бреховских, Л. М. Акустика океана / Л. М. Бреховских, Н. С. Агеева, И. Б. Андреева, В. И. Воловов, Ю. Ю. Житковский, Ю. П. Лысанов, А. В. Фурдуев, С. Д. Чупров, Р. Ф. Швачко; под ред. Л. М. Бреховских. – Москва: Наука, 1974. – 693 с.
80. Варакин, Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – Москва: Радио и связь, 1985. – 384 с.
81. Вировлянский, А. Л. Оценки точности восстановления средней температуры водного слоя по измерениям времен приходов четверок лучей / А. Л. Вировлянский, А. Ю. Казарова, Л. Я. Любавин // Акустический журнал. – 1998. – Т. 44. – № 1. – С. 39-45.
82. Гончаров, В. В. Успехи и проблемы акустической томографии океана. Акустические волны в океане / В. В. Гончаров, В. М. Куртепов; под ред. Л. М. Бреховских, И. Б. Андреевой. – Москва: Наука, 1987. – С. 15-24.
83. Вировлянский, А. Л. Измерения разностей времен распространения сигналов вдоль лучей с борта дрейфующего судна / А. Л. Вировлянский, А. Ю. Казарова, Л. Я. Любавин, А. А. Стромков // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45. – № 4. – С. 473-478.
84. Попов, Ю. Р. Временная изменчивость функции акустического отклика океанического волновода, включающего шельфовую зону / Ю. Р. Попов, Ю. В. Семенов // Акустический журнал. – 1995. – Т. 41. – № 4. – С. 644-646.
85. Бухштабер, В. М. О методе реконструкции пространственной структуры неоднородных сред / В. М. Бухштабер, В. К. Маслов, А. М. Трохан // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 72. – № 2. – С. 331-334.
86. Porter, M. Acoustic Toolbox. Underwater Acoustic Propagation Modeling Software – AcTUP V.2.2L [Электронный ресурс] / M. Porter, A. Duncan // Center for

marine science and technology. – 2005. – Режим доступа: <http://cmst.curtin.edu.au/products/actoolbox.cfm>.

87. Яценков, В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В. С. Яценков. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2005. – 272 с.

88. Архипкин, В. С. Океанология: Инструментальные методы измерений основных параметров морской воды / В. С. Архипкин, А. Ю. Лазарюк, Д. Е. Левашов, А. Н. Рамазин. – Москва: МАКС Пресс, 2009. – 336 с.

89. Безответных, В. В. Разработка акустического аппаратно-программного комплекса для гидрофизических исследований и звукоподводной связи : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.06 / Безответных Владимир Викторович. – Владивосток, 2007. – 106 с.

90. Real-time tomography mooring: technical report / Lynch J. F., Frye D., Peal K., – Woods Hole Oceanographic Institution, 1992. – 144 p.

91. Журавлев, В. А. О мощности, излучаемой акустическим источником в океаническом волноводе / В. А. Журавлев, И. К. Кобозев, Ю. А. Кравцов // Акустический журнал. – 1987. – Т. 33. – № 6. – С. 1051-1056.

92. Yamaoka, H. Coastal acoustic tomography system and its field application / H. Yamaoka, A. Kaneko, J.-H. Park, H. Zheng, N. Gohda, T. Takano, X.-H. Zhu, Y. Takasugi, // IEEE J. Oceanic Eng. – 2002. – V. 27. – P. 283–295.

93. Hong, Z. Reciprocal Sound Transmission Experiment for Current Measurement in the Seto Inland Sea, Japan / Z. Hong, N. Gohda, H. Noguchi, T. Ito, H. Yamaoka, T. Tamura, Y. Takasugi, A. Kaneko // Journal of Oceanography. – 1997. – V. 53. – P. 117-127.

94. Акуличев, В. А. Акустико-гидрофизический комплекс для томографических исследований морской среды / В. А. Акуличев, В. В. Безответных, С. И. Каменев // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 6. – С. 112-115.

95. Гончаров, В. В. Акустическая томография на шельфе Черного моря / В. В. Гончаров, В. Н. Иванов, О. Ю. Кочетов, Б. Ф. Курьянов, А. Н. Серебряный // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 5. – 614-622.

96. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – Москва: Советское радио, 1966. – 680 с.
97. Гидроакустический комплекс для дистанционного мониторинга во времени гидрофизических параметров и процессов в мелководных акваториях: Пат. 115929 U1 Российская Федерация / В. В. Безответных, Е. А. Войтенко, Ю. Н. Моргунов, Ю. А. Половинка, А. А. Тагильцев / заявитель и патентообладатель: ТОИ ДВО РАН – № 2012100170, заявл. 10.01.2012; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13. : ил.
98. Программа ЭВМ «Программа расчета функции отклика гидроакустического канала в режиме реального времени (RTCROSS)»: Свидетельство о рег. 2012615489 Российская Федерация / А. М. Буренин – з. № 2012613606; заявл. 04.05.11; опубл. 20.09.2012, ОБПБТ № 3. : ил.
99. Галкин, О. П. Особенности формирования звукового поля вблизи дна мелкого моря / О. П. Галкин, С. Д. Панкова // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52. – № 2. – С. 187-194.
100. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
101. Метод мониторинга вертикального распределения скорости звука в условиях мелководных акваторий: Пат. 2477498 С1 Российская Федерация / Ю. А. Половинка / заявитель и патентообладатель: ТОИ ДВО РАН – № 2011148208/28, заявл. 25.11.2011; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 19. : ил.
102. Вировлянский, А. Л. Времена пробега сигналов вдоль хаотичных лучей при дальнем распространении звука в океане / А. Л. Вировлянский // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – № 3. – С. 330-341.
103. Программа ЭВМ «Программа для измерения и мониторинга профиля скорости звука, температуры и уровня поверхности по данным импульсного акустического зондирования в условиях мелководных акваторий»: Свидетельство о рег. 2011616960 Российская Федерация / Ю.А. Половинка, А.А. Азаров, М.С. Лебедев – з. № 2012610166; заявл. 10.01.12; опубл. 20.06.2012, ОБПБТ № 2. : ил.

104. Stallworth, L. A. A new method for measuring ocean and tidal currents / L. A. Stallworth // J. Acoust. Soc. Am. – 1973. – P. 55-58.
105. Годин, О. А. Акустическая томография океанских течений по методу согласованной невзаимности / О. А. Годин, Д. Ю. Михин, А. В. Мохов // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42. – № 4. – С. 501-509.
106. Zheng, H. Reciprocal sound transmission experiment for current measurement in the Seto Inland Sea, Japan / H. Zheng, N. Gohda, H. Noguchi, T. Ito, H. Yamaoka, T. Tamura, Y. Takasugi, A. Kaneko // Journal of Oceanography. – 1997. – V. 53. – P. 117-127.
107. Adityawarman, Y. Tidal current measurement in the Kurushima Strait by the reciprocal sound transmission method / Y. Adityawarman, A. Kaneko, N. Taniguchi, H. Mutsuda, K. Komai, X. Guo, N. Gohda // Acoust. Sci. & Tech. – 2012. – V. 33. – № 1. – P. 45-51.
108. ГОСТ Р ИСО 5725–1–2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 32 с.
109. OpenCPN A Chartplotter and GPS Navigation Software [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://opencpn.org/opcn/>

Приложение А

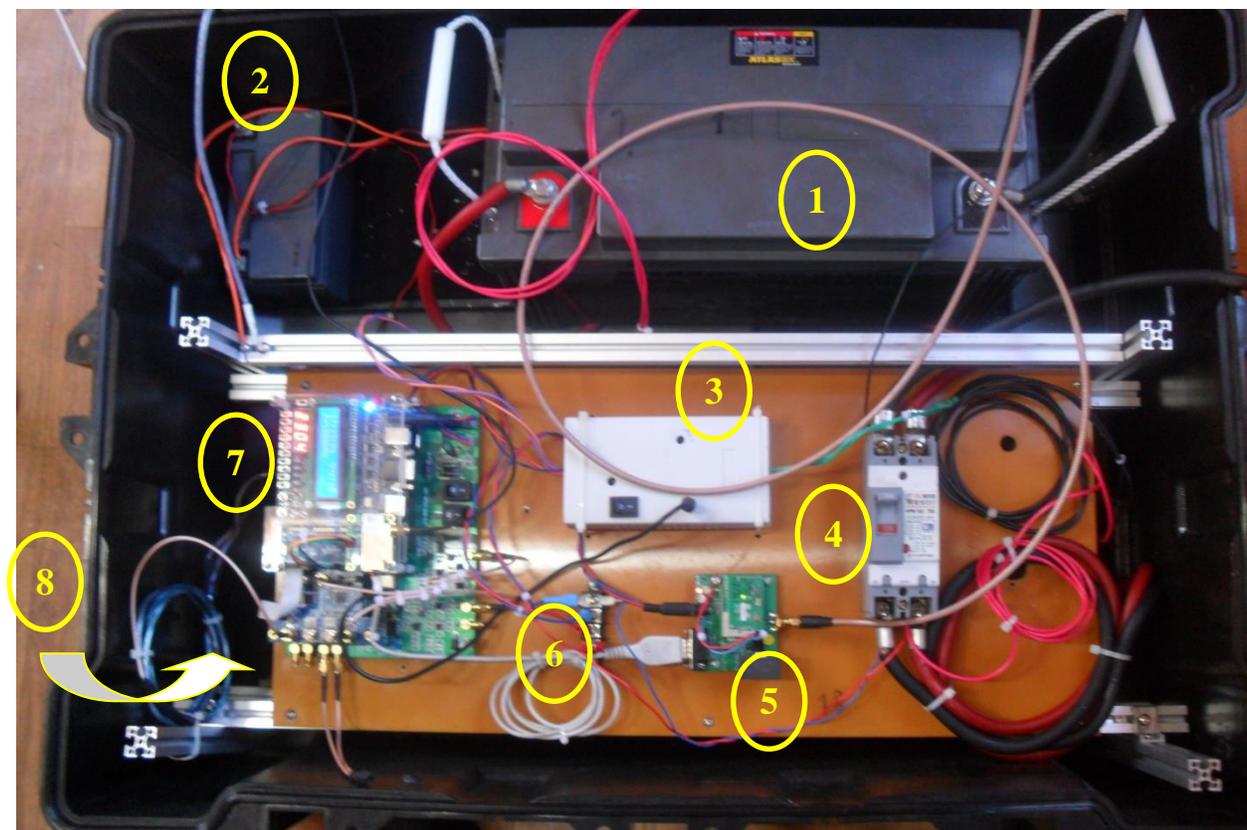
Автономные излучающие системы (АИС) и пьезокерамический преобразователь с кабелем



Радиогидроакустический буй



Приемно-излучающий тракт гидроакустического трансивера на базе АИС



1. Аккумуляторная батарея (120 Ач);
2. Дополнительный аккумулятор для питания коммутатора приема/передачи (7.2 Ач);
3. Коммутатор приема/передачи;
4. Переключатель питания;
5. Радиомодем, функционирующий на частоте 433 МГц. Передача текстовой информации (ASCII-код);
6. Разъем питания;
7. Главная плата (ПЛИС Cyclone III);
8. Усилитель мощности (1500 Вт).

Приложение Б

Расчитанные параметры собственных лучей (для условий 08 ч 16 сентября
2010 г.)

Задержка, сек.	Амплитуда, Отн. Ед.	Угол выхода, °	Угол прихода, °	Отражения, поверхность	Отражения, дно	Группа
0,40238	9,8539E-05	-2,30	-1,27	1	1	1
0,40239	3,7105E-04	0,75	-1,62	1	2	
0,40244	7,8470E-05	-1,00	-1,80	0	2	
0,40245	1,3294E-04	-0,90	-1,17	0	2	
0,40245	7,3648E-05	-1,10	-1,49	0	2	
0,40248	3,6648E-04	-0,95	-0,23	0	5	
0,40250	5,2077E-04	-1,30	1,25	1	2	2
0,40251	4,9376E-04	-0,10	-1,64	1	2	
0,40251	7,4610E-04	-2,35	2,51	2	2	
0,40252	4,7482E-04	-0,55	-1,85	1	3	
0,40253	6,8579E-04	1,00	-2,88	2	3	
0,40253	1,1369E-04	-0,85	1,64	1	2	
0,40255	2,1645E-04	-1,15	1,66	1	2	
0,40256	7,8701E-05	-1,05	1,98	1	2	
0,40256	4,5246E-05	-0,40	1,95	1	3	
0,40256	2,1631E-04	-0,80	2,06	1	3	
0,40258	4,3168E-04	-1,80	2,20	1	2	3
0,40259	1,6442E-04	0,30	2,16	1	3	
0,40265	1,8207E-04	-1,50	2,46	2	2	
0,40265	5,2218E-05	0,45	2,78	2	3	
0,40266	1,6648E-04	0,00	2,61	2	3	
0,40266	1,9679E-05	-0,50	2,66	2	3	
0,40267	1,0420E-04	-2,00	-4,19	2	3	
0,40268	5,8046E-05	0,40	-4,17	2	4	
0,40268	4,1622E-04	-1,60	-3,75	2	3	
0,40269	4,5284E-04	0,25	-4,02	2	4	
0,40272	2,1479E-04	1,10	-4,67	3	3	4
0,40272	2,3751E-04	-2,60	-4,57	3	3	
0,40277	9,5901E-05	-3,15	-4,00	3	3	
0,40294	1,3256E-04	0,35	4,14	3	4	5
0,40294	3,6721E-04	-2,10	4,31	3	3	
0,40295	3,3168E-04	0,65	4,64	3	4	
0,40301	3,6294E-04	-2,70	4,70	4	3	6
0,40302	4,4792E-04	-3,20	4,06	4	3	
0,40302	3,5423E-04	1,25	5,00	4	4	
0,40303	1,1751E-04	-3,50	4,29	4	3	
0,40304	4,6302E-04	1,85	4,66	4	4	
0,40305	2,2606E-04	-2,85	-5,53	4	4	
0,40306	2,3536E-04	-3,55	-4,31	4	4	
0,40306	2,3944E-04	-3,40	-4,69	4	4	
0,40306	2,3718E-04	1,35	-5,59	4	5	

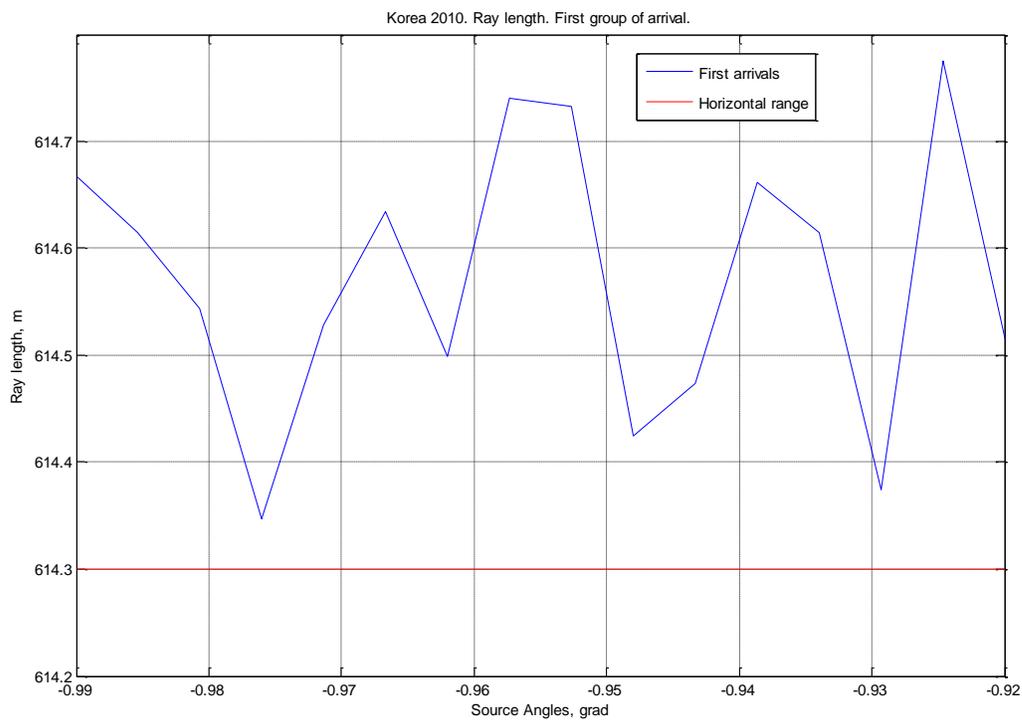
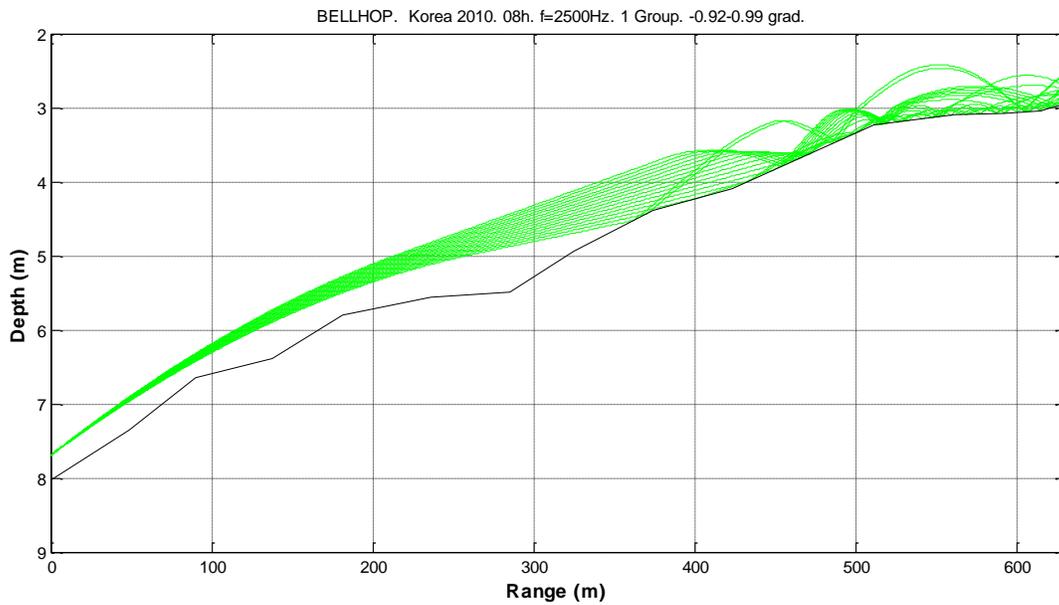
0,40308	4,6961E-04	2,05	-4,37	4	5	
0,40339	1,9588E-04	2,15	5,38	5	5	
0,40340	2,2403E-04	-2,95	5,62	5	4	
0,40340	1,1980E-04	-3,10	6,11	5	4	
0,40342	5,6250E-04	1,60	6,54	5	5	7
0,40342	3,4049E-04	-3,65	-6,12	5	5	
0,40344	2,1924E-04	2,25	-6,20	5	6	
0,40346	1,2173E-04	-3,05	-6,94	5	5	
0,40347	1,1674E-04	1,65	-6,65	5	6	
0,40382	3,5091E-04	-3,80	6,74	6	5	
0,40384	3,5271E-04	2,40	7,01	6	6	
0,40387	2,0740E-04	-3,95	-8,12	6	6	
0,40389	1,9791E-04	2,50	-8,25	6	7	
0,40437	7,4955E-04	-4,05	8,18	7	6	9
0,40439	7,6451E-04	2,85	8,13	7	7	
0,40443	3,1022E-04	-4,40	-8,55	7	7	
0,40445	3,0268E-04	3,00	-8,97	7	8	
0,40502	2,2923E-04	3,10	9,82	8	8	10
0,40509	1,1545E-04	-4,70	-9,66	8	8	
0,40571	7,8278E-04	-4,75	10,52	9	8	11
0,40574	4,4409E-04	3,40	10,71	9	9	
0,40575	2,2982E-04	3,55	10,46	9	9	
0,40579	3,0026E-04	-5,10	-11,38	9	9	
0,40582	2,0214E-04	3,65	-11,51	9	10	12
0,40583	1,1576E-04	3,45	-10,93	9	10	
0,40650	5,4855E-04	-5,25	11,53	10	9	13
0,40650	3,3910E-04	-6,05	11,33	10	9	
0,40653	3,2747E-04	-4,55	12,24	10	9	
0,40653	5,3136E-04	3,90	11,92	10	10	
0,40656	2,3189E-04	3,20	12,66	10	10	
0,40659	4,4258E-04	-5,50	-12,10	10	10	
0,40660	1,1628E-04	-6,20	-11,88	10	10	
0,40662	6,4369E-04	4,20	-12,39	10	11	14
0,40663	2,0555E-04	4,80	-12,33	10	11	
0,40736	1,1659E-04	-5,70	13,37	11	10	15
0,40746	3,3759E-04	-5,75	-13,76	11	11	
0,40746	4,4597E-04	-6,25	-13,48	11	11	
0,40750	4,3365E-04	4,40	-14,01	11	12	16
0,40750	2,1195E-04	4,90	-13,90	11	12	
0,40832	5,5987E-04	-6,45	14,05	12	11	17
0,40832	1,1738E-04	-5,90	14,41	12	11	
0,40833	3,2778E-04	-7,20	13,40	12	11	
0,40836	4,4904E-04	5,10	14,23	12	12	
0,40838	2,2723E-04	5,80	13,55	12	12	
0,40842	2,1129E-04	-6,70	-14,39	12	12	
0,40844	2,3337E-04	-5,95	-14,61	12	12	18
0,40844	4,1875E-04	-7,35	-14,43	12	12	
0,40847	2,3369E-04	5,20	-14,45	12	13	

0,40847	2,3244E-04	4,50	-14,70	12	13	
0,40849	3,2089E-04	5,95	-14,85	12	13	
0,40934	5,5122E-04	-7,55	14,88	13	12	19
0,40934	1,1734E-04	-7,90	14,81	13	12	
0,40936	5,4974E-04	-6,80	15,52	13	12	
0,40939	6,5065E-04	6,25	15,13	13	13	
0,40940	6,4939E-04	5,50	15,82	13	13	
0,40941	4,3197E-04	4,70	15,92	13	13	
0,40946	2,3454E-04	-7,80	-15,24	13	13	
0,40946	1,1743E-04	-7,95	-14,96	13	13	
0,40948	3,4674E-04	-7,05	-15,90	13	13	
0,40951	4,6887E-04	6,45	-15,01	13	14	
0,40952	4,4922E-04	5,70	-16,12	13	14	
0,41047	1,1283E-04	6,50	16,37	14	14	21
0,41055	4,3245E-04	-8,00	-17,00	14	14	
0,41060	3,0964E-04	6,65	-17,25	14	15	
0,41159	9,7163E-05	-8,20	17,23	15	14	22
0,41165	4,4467E-04	6,85	17,64	15	15	
0,41301	4,4251E-04	-8,25	-19,37	16	16	23
0,41304	1,0696E-04	-8,90	-18,95	16	16	
0,41306	9,7438E-05	6,90	-19,58	16	17	
0,41419	3,1740E-04	-8,45	19,56	17	16	24
0,41425	3,2492E-04	7,05	19,72	17	17	
0,41436	4,3279E-04	-8,95	-20,51	17	17	25
0,41440	2,3511E-04	7,15	-20,98	17	18	
0,41442	3,3042E-04	7,55	-20,86	17	18	
0,41562	1,0433E-04	-9,15	20,89	18	17	26
0,41568	4,3925E-04	7,75	21,05	18	18	
0,41579	5,8318E-04	-8,60	-21,93	18	18	27
0,41584	4,7308E-04	7,95	-21,28	18	19	
0,41585	3,3305E-04	7,30	-22,18	18	19	
0,41713	9,9537E-05	-8,85	22,32	19	18	28
0,41719	2,2653E-04	7,40	23,25	19	19	
0,42049	7,0848E-04	-9,20	-25,46	21	21	29
0,42052	1,1031E-04	-10,05	-24,81	21	21	
0,42053	1,2499E-04	-10,65	-24,45	21	21	
0,42201	2,1472E-04	-9,50	25,37	22	21	30
0,42202	3,7410E-04	-10,10	25,60	22	21	
0,42204	1,2628E-04	-10,70	25,58	22	21	
0,42207	2,3349E-04	8,05	26,27	22	22	
0,42209	3,7708E-04	8,70	25,78	22	22	
0,42221	5,8858E-04	-9,60	-26,38	22	22	
0,42223	1,2680E-04	-10,25	-25,89	22	22	
0,42223	5,8623E-04	-10,75	-25,79	22	22	
0,42228	4,8181E-04	8,25	-26,83	22	23	
0,42229	3,6271E-04	8,85	-26,27	22	23	
0,42230	2,2814E-04	9,40	-26,22	22	23	
0,42378	3,4798E-04	-11,00	26,26	23	22	32

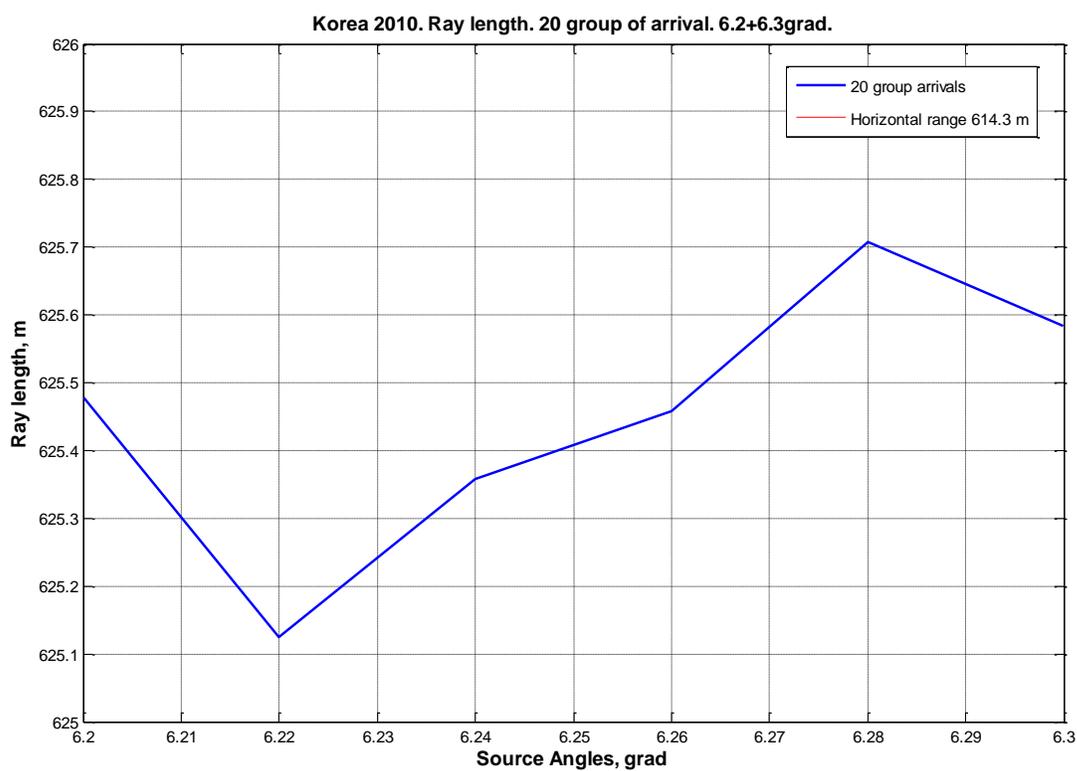
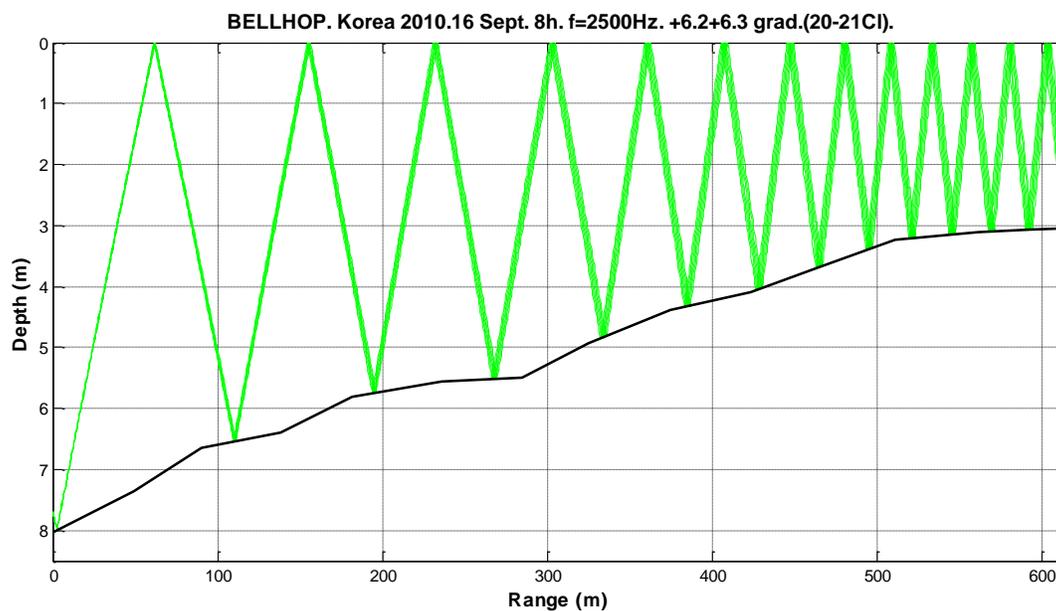
0,42379	4,9175E-04	-10,30	26,53	23	22	
0,42381	2,3756E-04	-9,85	26,85	23	22	
0,42386	1,2761E-04	8,90	26,64	23	23	
0,42386	4,5589E-04	9,60	26,40	23	23	
0,42388	3,3563E-04	8,40	26,96	23	23	
0,42397	1,1098E-04	-11,15	-27,52	23	23	
0,42399	1,2827E-04	-10,50	-26,82	23	23	
0,42401	2,5428E-04	-9,95	-27,33	23	23	33
0,42405	1,0806E-04	9,65	-27,59	23	24	
0,42406	2,5602E-04	9,00	-26,88	23	24	
0,42407	3,7074E-04	8,55	-27,53	23	24	
0,42562	1,0577E-04	-11,20	27,77	24	23	
0,42563	2,5087E-04	-10,55	28,07	24	23	
0,42570	4,8403E-04	9,85	27,94	24	24	
0,42570	3,8452E-04	9,15	28,22	24	24	
0,42591	3,7883E-04	9,30	-28,52	24	25	35
0,42950	1,7522E-04	-11,25	30,12	26	25	36
0,42950	1,1178E-04	-11,50	29,94	26	25	
0,42958	3,8972E-05	9,90	30,33	26	26	
0,42958	5,7405E-05	10,00	30,01	26	26	
0,42973	2,6155E-05	-11,45	-30,68	26	26	
0,42973	3,6840E-05	-11,60	-30,36	26	26	
0,42981	2,4129E-05	9,95	-30,69	26	27	
0,42981	9,9679E-05	10,15	-30,48	26	27	
0,43154	1,8135E-05	-11,65	31,48	27	26	38
0,43156	3,6536E-05	-12,15	31,17	27	26	
0,43162	8,1806E-06	10,20	31,63	27	27	
0,43164	1,1438E-05	10,70	31,29	27	27	
0,43178	2,4535E-05	-12,30	-31,48	27	27	
0,43186	5,2635E-06	10,25	-31,82	27	28	
0,43187	2,5473E-05	10,90	-31,82	27	28	
0,43365	1,9671E-05	-12,50	31,85	28	27	40
0,43366	1,0024E-05	-11,75	32,50	28	27	
0,43373	2,2878E-05	11,15	32,07	28	28	
0,43374	4,8391E-06	10,35	32,66	28	28	
0,43388	8,1420E-06	-12,70	-32,21	28	28	41
0,43390	4,1588E-06	-11,95	-32,85	28	28	
0,43396	1,3102E-06	11,20	-33,02	28	29	
0,43397	3,5610E-06	11,35	-32,76	28	29	
0,43398	5,3247E-06	10,55	-32,98	28	29	
0,43580	1,5536E-06	-12,90	32,95	29	28	42
0,43585	7,4049E-07	-12,10	33,95	29	28	
0,43589	4,6120E-06	11,50	33,11	29	29	
0,43589	1,1433E-06	11,25	33,07	29	29	
0,43593	7,1172E-07	10,60	34,02	29	29	43
0,43604	2,1014E-06	-12,95	-33,49	29	29	

Приложение В

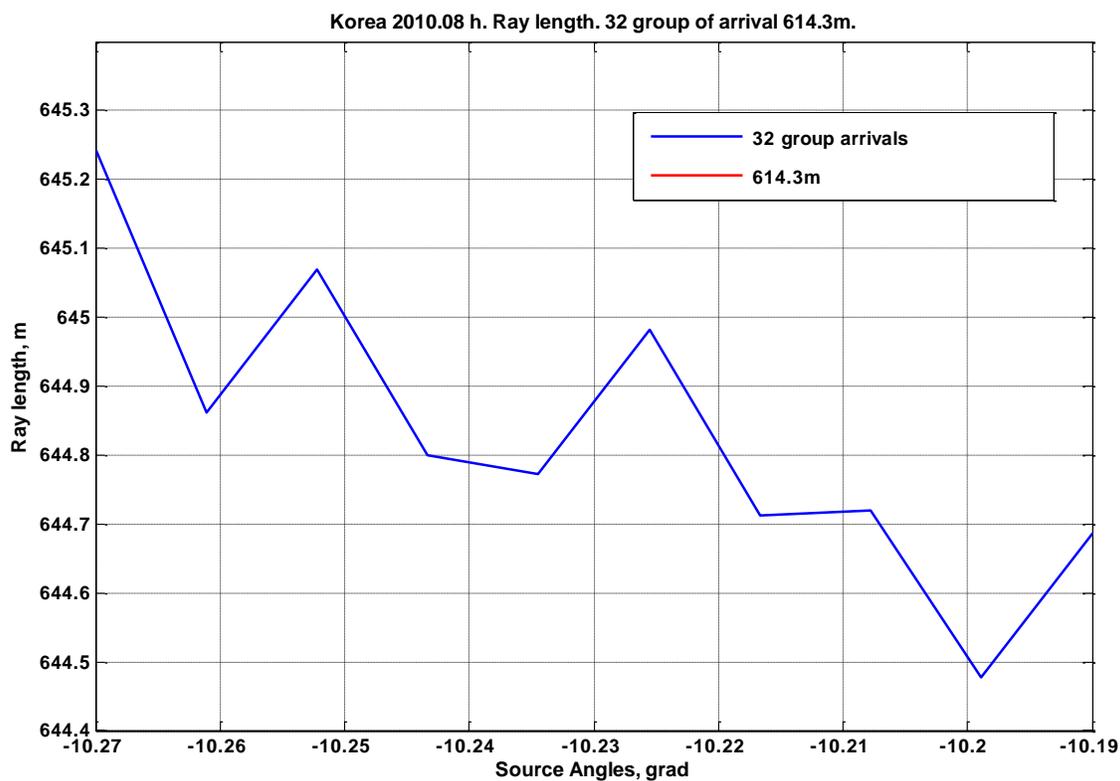
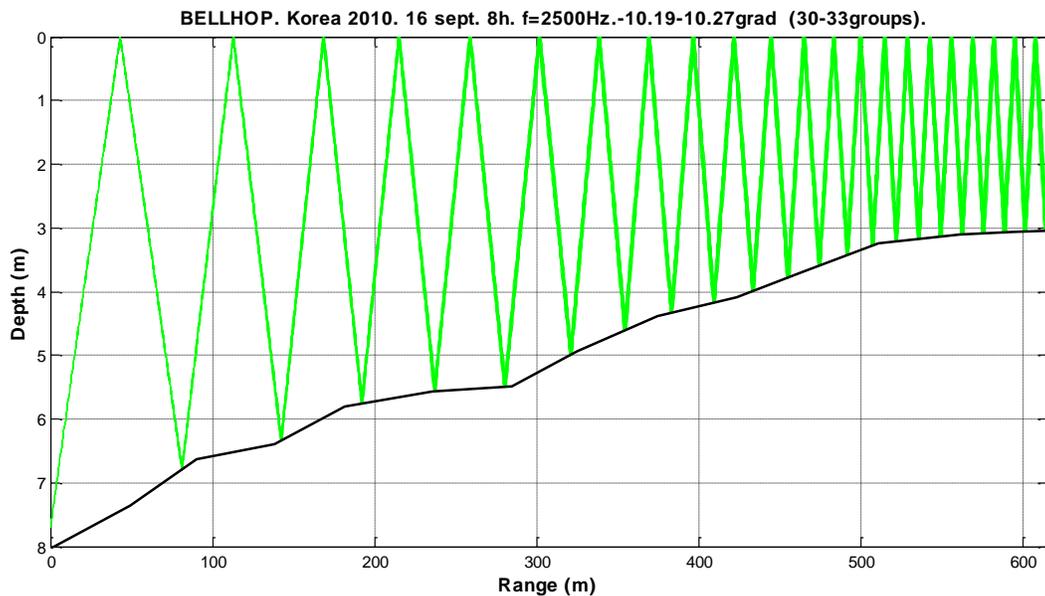
Траектории и длина собственных лучей групп приходов, выделенных в 1-ый кластер, для времени измерений 08 часов 16 сентября 2010 г. Горизонтальная дистанция 614.3м.



Траектории и длина собственных лучей групп приходов, выделенных в 20-й кластер, для времени измерений 08 часов 16 сентября 2010 г. Горизонтальная дистанция 614.3 м.



Траектории и длина собственных лучей группы приходов, выделенных в 30-ый кластер, для времени измерений 08 часов 16 сентября 2010 г. Горизонтальная дистанция 614.3 м.



Приложение Г

Параметры групп собственных лучей для дистанции 808 м и времени измерения

16 чч 05 мм 26 августа 2011 года.

Амплитуда тн. ед.	Время прихода, мс	Углы выхода, град	Углы прихода, град	Отражения поверхность	Отражения но	Номер группы
0,5342	3,03E-04	-7,18	-8,89	1	2	1
0,5343	8,19E-05	-7,13	-8,10	0	2	
0,5343	4,20E-05	-7,08	-7,21	0	2	
0,5344	1,63E-04	-8,23	-10,04	2	2	
0,5344	7,64E-05	-8,28	-9,20	2	2	
0,5344	3,15E-05	-8,33	-8,63	2	2	
0,5345	4,26E-05	15,14	-10,48	1	3	
0,5345	1,36E-04	14,29	-8,78	0	3	
0,5345	5,24E-05	14,99	-10,07	1	3	
0,5345	7,81E-05	14,24	-7,83	0	3	
0,5346	2,91E-05	14,19	-6,87	0	3	
0,5346	1,84E-04	15,34	-10,30	2	3	
0,5347	9,76E-05	15,39	-9,48	2	3	
0,5347	4,31E-05	15,44	-8,78	2	3	
0,5355	3,24E-05	-5,28	1,09	0	2	2
0,5356	2,73E-04	-4,73	3,09	0	2	
0,5357	1,51E-03	-3,33	5,51	0	2	
0,5359	1,15E-04	11,43	2,77	0	3	
0,5359	1,06E-03	11,33	3,24	0	3	
0,5360	1,07E-03	-2,43	-6,26	0	3	
0,5360	1,80E-04	-2,03	-5,30	0	3	
0,5361	6,85E-05	-1,68	-4,55	0	3	
0,5362	7,63E-04	10,68	-7,94	0	4	
0,5362	5,28E-05	-1,03	-3,63	0	3	
0,5362	2,88E-04	10,18	-6,30	0	4	
0,5362	9,26E-05	-5,33	5,95	1	2	
0,5363	3,00E-04	-5,58	6,19	1	2	
0,5363	4,46E-05	9,68	-4,56	0	4	
0,5363	3,21E-05	9,43	-3,84	0	4	
0,5364	7,64E-05	12,94	5,58	1	3	
0,5364	3,67E-05	13,19	5,84	1	3	
0,5366	2,00E-04	-0,58	1,63	0	3	3
0,5366	1,28E-04	-0,28	2,07	0	3	
0,5367	6,59E-04	0,98	2,99	0	3	
0,5368	4,71E-04	9,28	2,14	0	4	
0,5369	1,93E-05	-8,53	8,99	3	2	
0,5370	3,51E-05	-8,58	9,42	3	2	
0,5370	7,16E-04	9,08	-6,40	0	5	

0,5370	5,70E-05	-8,63	10,07	3	2	
0,5370	1,69E-05	8,83	-4,26	0	5	
0,5371	2,94E-04	-8,68	10,68	3	2	
0,5371	1,22E-04	8,68	-3,93	0	5	
0,5371	1,59E-04	8,23	-2,99	0	5	
0,5372	7,31E-05	-8,13	11,06	3	2	
0,5372	1,77E-04	7,78	-2,11	0	5	
0,5372	1,21E-04	-8,18	12,02	3	2	
0,5373	1,95E-04	7,33	-1,27	0	5	
0,5373	2,66E-05	15,69	9,26	3	3	
0,5373	4,53E-05	15,74	9,81	3	3	
0,5373	2,23E-04	6,88	-0,45	0	5	
0,5374	3,78E-04	15,94	11,89	3	3	
0,5374	2,39E-04	6,43	0,37	0	5	
0,5374	4,79E-05	15,24	10,63	3	3	
0,5374	3,11E-04	6,03	1,17	0	5	
0,5375	1,08E-04	16,24	10,57	3	3	
0,5375	9,52E-05	15,29	11,59	3	3	
0,5375	6,44E-04	5,63	2,12	0	5	
0,5376	3,87E-04	-8,83	-14,77	3	3	
0,5376	7,17E-04	-9,03	-13,90	3	3	
0,5377	2,97E-04	5,28	-6,15	0	6	
0,5379	4,07E-04	16,19	-13,83	3	4	
0,5379	3,95E-04	5,13	0,07	0	6	
0,5379	2,21E-03	4,73	0,63	0	6	
0,5379	4,54E-04	16,49	-12,41	3	4	
0,5380	1,13E-04	16,69	-11,76	3	4	
0,5381	2,31E-03	3,28	-0,94	0	7	
0,5382	1,84E-03	2,48	-4,77	0	8	
0,5384	1,92E-03	1,93	-2,05	0	9	
0,5384	1,33E-03	1,58	-2,06	0	9	
0,5384	1,04E-04	1,63	-3,43	0	10	
0,5384	6,77E-05	1,08	-1,45	0	12	
0,5384	3,13E-04	1,18	-2,33	0	11	
0,5385	1,18E-08	1,13	-1,84	0	20	4
0,5410	1,40E-05	-9,88	12,13	4	3	
0,5411	4,93E-05	-9,93	12,33	4	3	
0,5411	8,94E-05	-10,03	12,88	4	3	
0,5411	5,34E-04	-10,13	13,48	4	3	
0,5414	4,26E-05	17,09	12,55	4	4	
0,5415	6,00E-04	17,49	14,74	4	4	
0,5417	6,43E-04	-10,43	-17,40	4	4	
0,5421	6,07E-04	17,89	-16,81	4	5	
0,5421	6,25E-05	18,04	-16,62	4	5	
0,5463	3,58E-05	-12,34	14,76	5	4	
0,5463	1,09E-04	-12,44	15,08	5	4	
0,5464	3,75E-05	-11,68	15,53	5	4	
0,5464	5,56E-04	-12,59	15,77	5	4	5

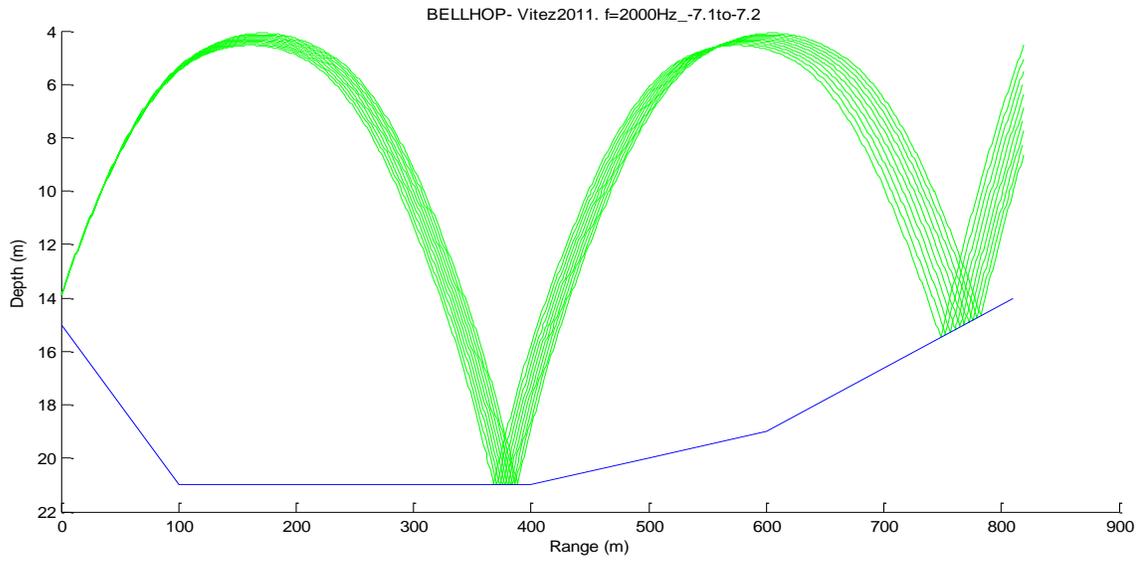
0,5464	1,15E-04	-11,78	15,85	5	4	
0,5465	4,13E-05	-11,93	16,29	5	4	
0,5465	6,59E-05	-11,28	16,98	5	4	
0,5465	2,17E-04	-11,43	17,52	5	4	
0,5467	1,06E-04	19,59	15,49	5	5	
0,5468	6,12E-04	19,99	17,12	5	5	
0,5468	1,03E-04	18,94	16,19	5	5	
0,5468	1,74E-04	19,09	16,86	5	5	
0,5469	9,93E-05	18,54	17,60	5	5	
0,5469	3,27E-05	19,14	16,79	5	5	
0,5469	2,52E-04	18,74	18,47	5	5	
0,5470	7,75E-04	-12,94	-19,83	5	5	
0,5475	6,22E-04	20,39	-19,49	5	6	
0,5476	1,41E-04	20,64	-19,26	5	6	
0,5477	3,84E-04	-19,84	-18,67	5	5	
0,5525	1,57E-05	-13,94	19,63	6	5	
0,5525	2,02E-04	-13,99	19,75	6	5	
0,5526	5,08E-04	-14,24	20,60	6	5	
0,5529	3,26E-05	-20,54	18,56	6	5	
0,5529	2,13E-04	21,24	20,61	6	6	
0,5529	1,08E-04	-20,64	18,83	6	5	
0,5529	5,08E-04	21,54	21,55	6	6	
0,5530	5,78E-04	-20,79	19,46	6	5	
0,5530	2,89E-04	-21,39	18,96	6	5	
0,5534	7,44E-04	-14,54	-24,25	6	6	
0,5535	5,44E-04	-15,09	-22,90	6	6	
0,5536	5,86E-04	28,10	20,58	6	6	
0,5536	1,90E-04	28,50	19,34	6	6	
0,5537	5,36E-04	-21,54	-22,06	6	6	
0,5537	4,55E-04	-21,14	-23,33	6	6	
0,5538	7,50E-04	22,14	-23,95	6	7	
0,5538	4,37E-04	22,59	-22,63	6	7	
0,5539	2,42E-04	-21,84	-21,81	6	6	
0,5543	5,23E-04	28,40	-23,26	6	7	
0,5543	7,57E-04	29,10	-21,67	6	7	6
0,5598	9,70E-05	-23,04	21,30	7	6	
0,5598	1,40E-05	-22,44	21,95	7	6	
0,5598	4,56E-05	-22,49	22,06	7	6	
0,5598	9,60E-05	-15,94	22,92	7	6	
0,5598	6,39E-04	-23,24	21,91	7	6	
0,5599	1,37E-04	-22,59	22,36	7	6	
0,5599	6,92E-04	-16,14	23,46	7	6	
0,5599	9,28E-05	-17,14	23,94	7	6	
0,5603	7,86E-04	23,59	24,77	7	7	
0,5606	2,67E-04	29,80	23,06	7	7	
0,5607	7,95E-04	-23,64	-25,91	7	7	
0,5608	7,27E-04	-16,59	-27,38	7	7	
0,5608	7,95E-04	-17,19	-26,77	7	7	7

0,5612	7,22E-04	24,20	-27,21	7	8	
0,5613	6,77E-04	24,85	-26,59	7	8	
0,5677	7,87E-05	-25,00	24,75	8	7	
0,5678	7,35E-04	-25,15	25,18	8	7	
0,5678	9,76E-05	-24,55	25,94	8	7	
0,5681	9,36E-05	-18,64	25,72	8	7	
0,5682	6,46E-04	-18,79	26,14	8	7	
0,5682	1,97E-04	-18,14	26,84	8	7	
0,5682	3,22E-04	-18,44	27,59	8	7	8
0,5687	7,42E-04	26,20	27,24	8	8	
0,5687	7,45E-04	-25,60	-29,07	8	8	
0,5687	2,02E-04	25,45	27,63	8	8	
0,5688	3,25E-04	25,65	28,20	8	8	
0,5692	8,12E-04	-19,19	-29,92	8	8	
0,5697	7,75E-04	26,80	-29,82	8	9	
0,5767	8,14E-05	-26,50	29,27	9	8	9
0,5768	6,53E-04	-26,65	29,65	9	8	
0,5779	6,09E-04	-27,05	-33,39	9	9	
0,5779	1,23E-03	-27,70	-32,11	9	9	
0,5780	7,03E-04	27,70	31,49	9	9	10
0,5865	1,79E-05	-28,95	31,84	10	9	
0,5866	7,00E-04	-29,00	31,84	10	9	
0,5878	3,66E-04	-29,55	-35,84	10	10	11

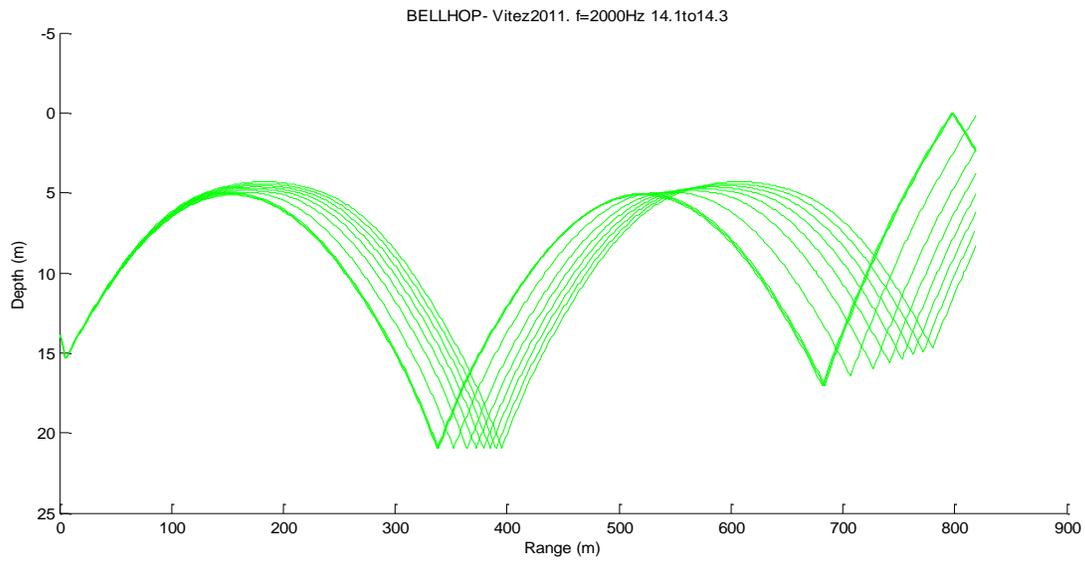
Приложение Д

Рассчитанные траектории собственных лучей.

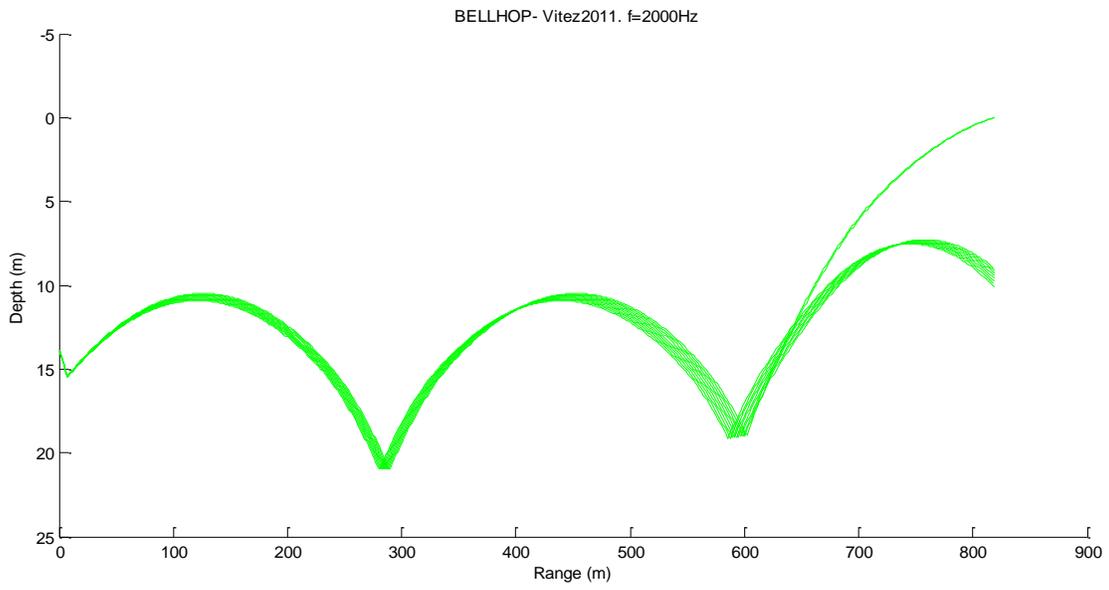
1-я группа (-7-7,2 град.)



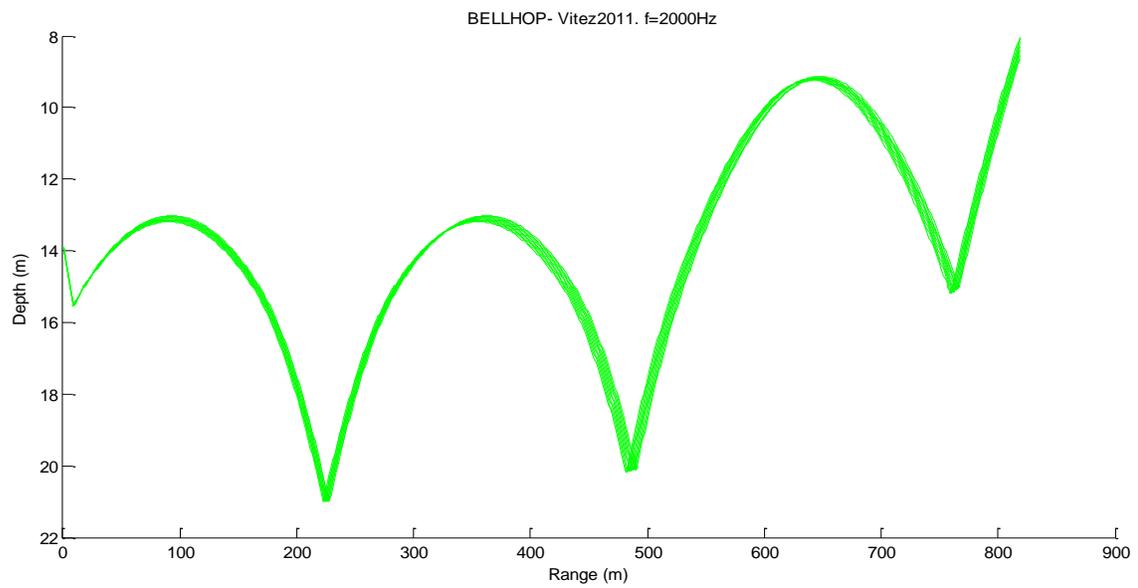
1-я группа (14,1-14,3 град.)



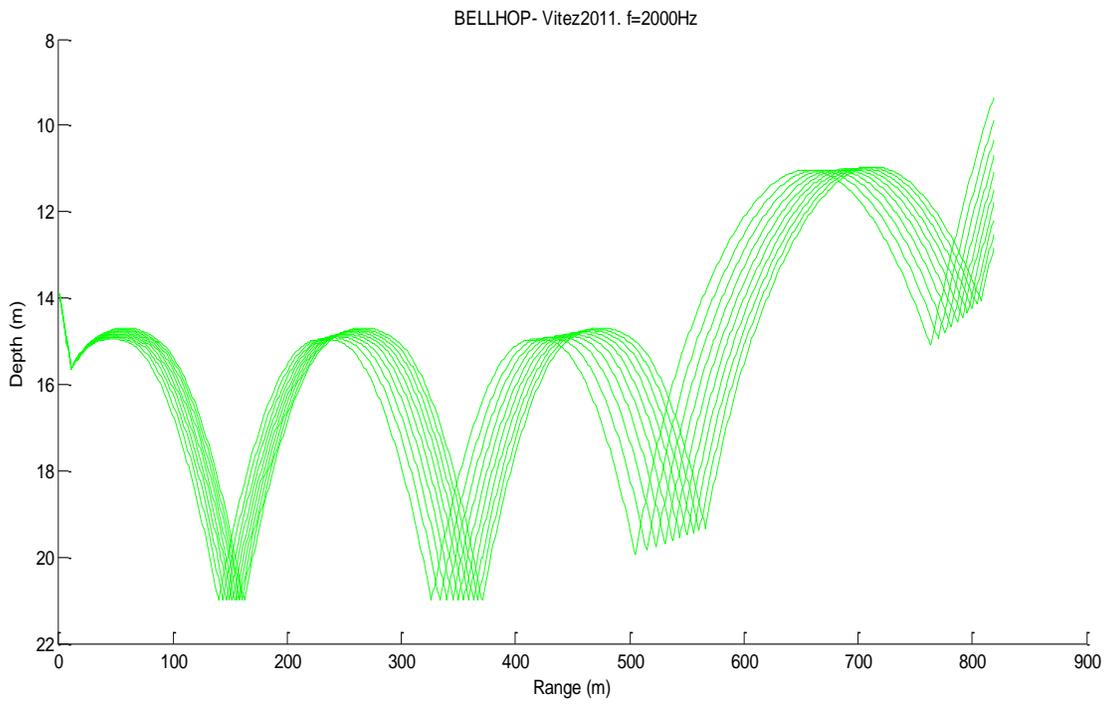
2-я группа (-3,2-3,4 град.)



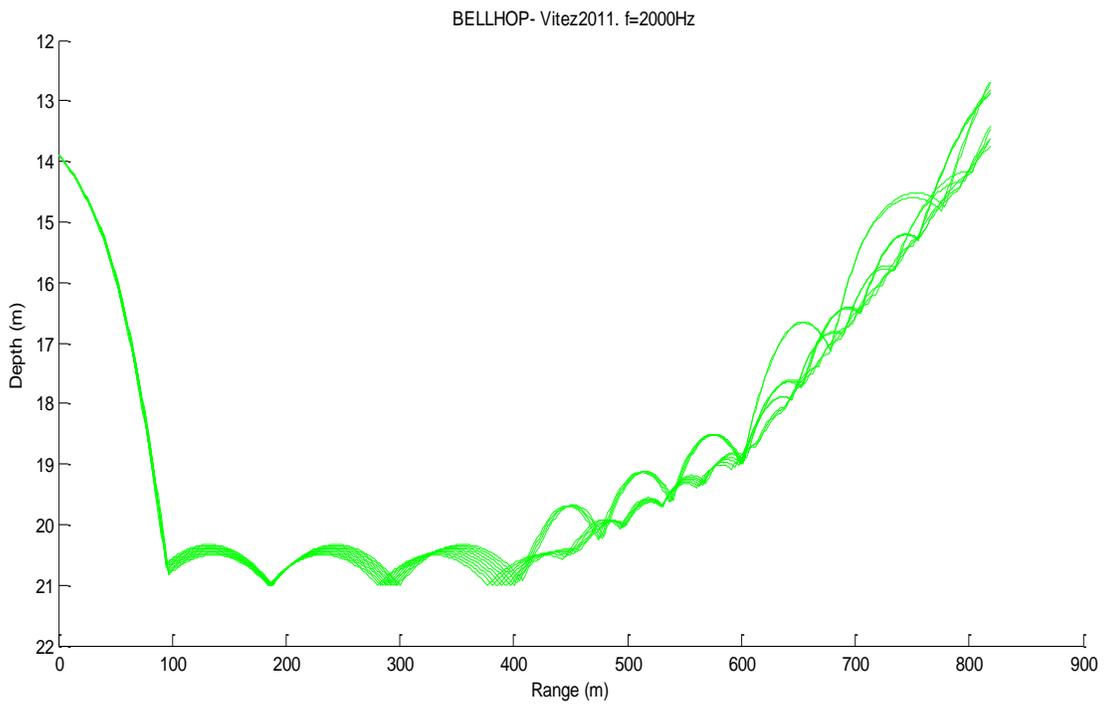
2-я группа (11,3+11,5 град.)



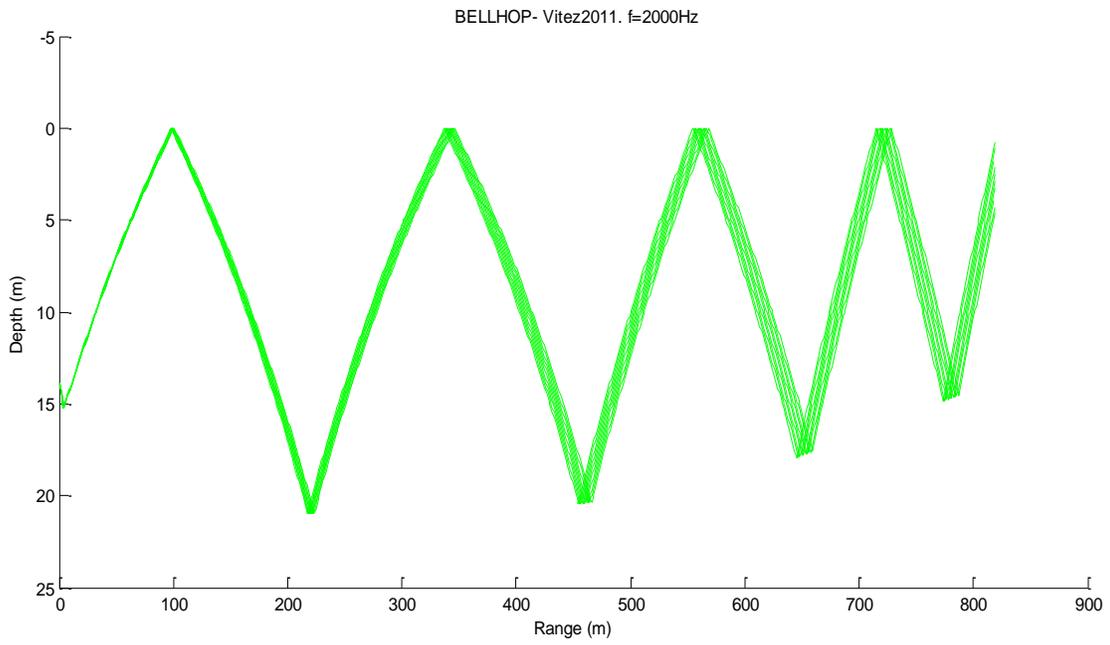
3-я группа (18,9+19,1 град.)



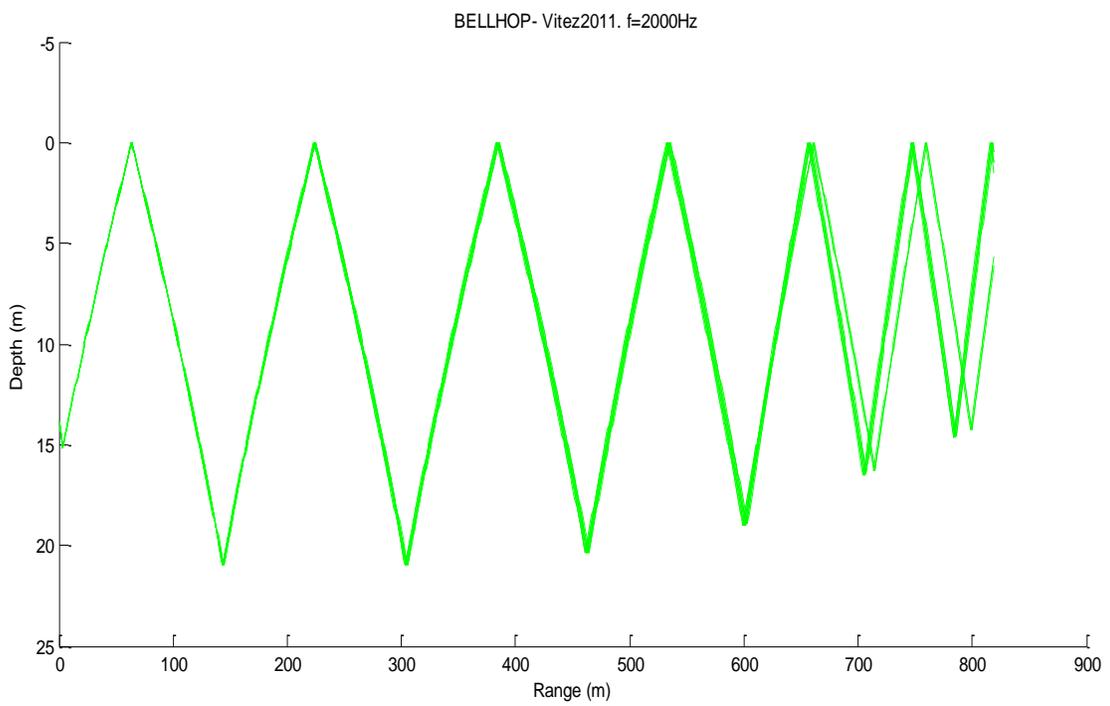
4-я группа (1,1+1,2 град.)



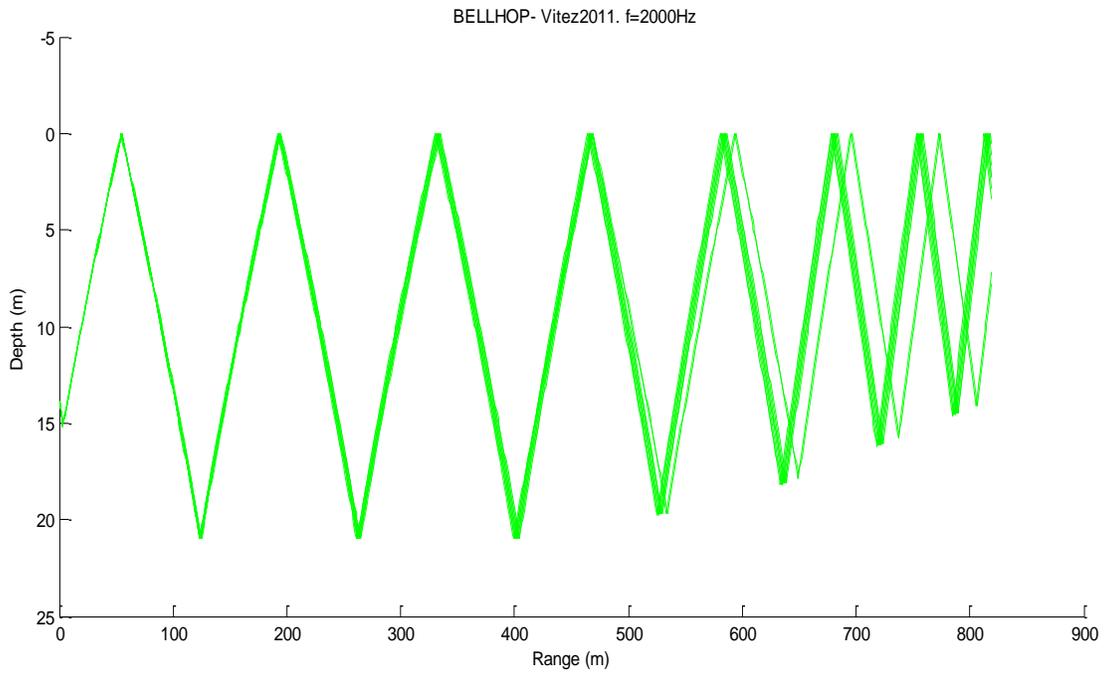
5-я группа (17,8+18,0 град.)



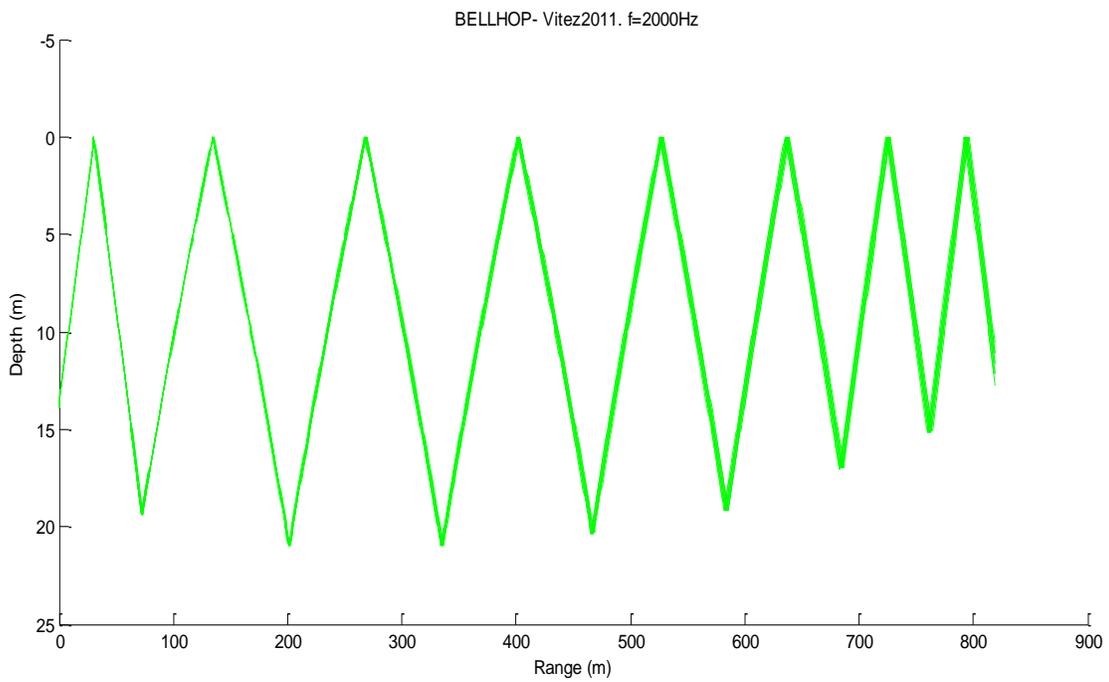
6-я группа (22,1+22,2 град.)



7-я группа (24,1+24,3 град.)

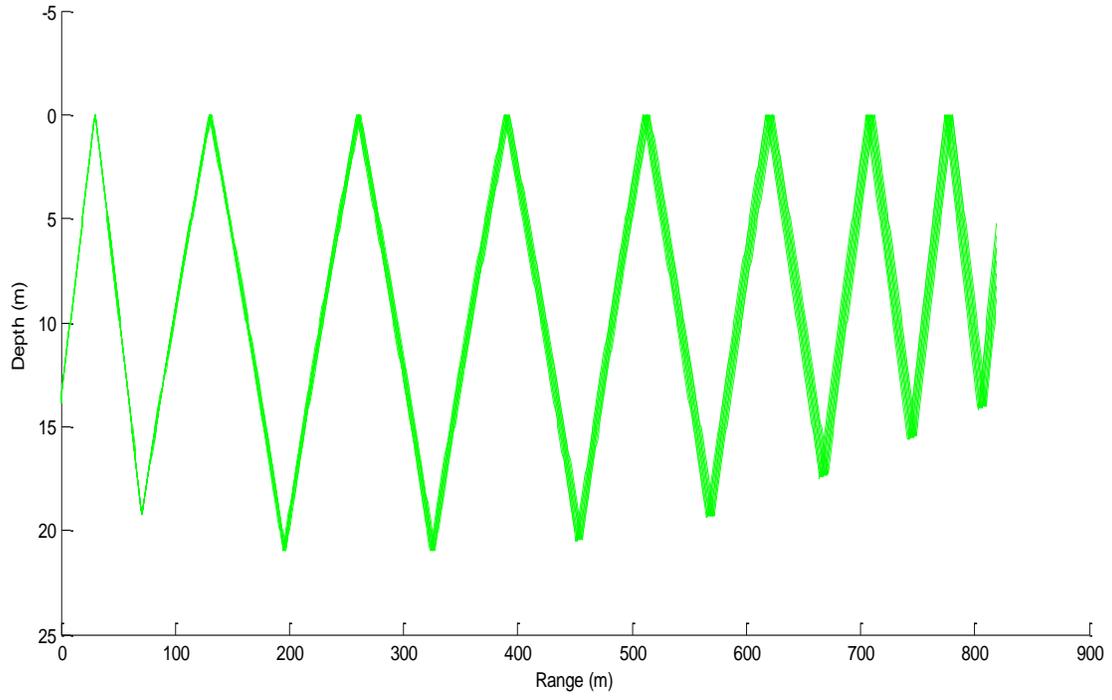


8-я группа (-25,1-25,2 град.)



9-я группа (-25,5-25,7 град.)

BELLHOP- Vitez2011. f=2000Hz



Приложение Е

Длина траектории собственных лучей для соответствующих групп приходов
(с 1-ой по 9-ю).

