Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева

Дальневосточное отделение Российской Академии Наук

На правах рукописи

In

Стробыкин Дмитрий Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР И ТЕЧЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ШЕЛЬФЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Специальность 01.04.06 - Акустика

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

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

Владивосток - 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
ГЛАВА 1. Аналитический обзор теории и практики акустического	22
зондирования морской среды. Постановка задач	
1.1. Томография океана	22
1.2. Проблемы акустической томографии океана	48
1.2.1. Выбор опорного состояния среды	48
1.2.2. Выбор приближения описывающего зондирующее звуковое поле	49
и идентификация приходов	
1.2.3. Оптимизация расстановки источников и приемников	52
1.2.4. Моделирование и численные расчеты	53
1.2.5. Ошибки измерений	54
1.2.6. Синхронизация	55
1.2.7. Позиционирование излучающих и приемных систем	55
1.2.8. Шумы океана	56
1.2.9. Микролучевость	57
1.2.10. Устойчивые и не устойчивые лучи (моды)	57
1.2.11. Априорная информация	58
1.2.12. Временное сглаживание	59
1.2.13. Неблагоприятные особенности томографии в условиях мелкого	60
моря	
1.3. Комбинированные приемники в задачах исследования векторно-	60
скалярных характеристик акустических полей в морской среде	
1.3.1. Проблемы оценки помехоустойчивости комбинированных	67
приемников. Вихревые структуры поля вектора акустической	
интенсивности	
Выводы и постановка задач	74
ГЛАВА 2. Методы и материалы	76
2.1. Методические основы акустического зондирования мелкого моря	76

2.1.1. Метод встречного зондирования	77
2.1.2. Стационарные акустические трассы	78
2.2. Технические средства для акустического зондирования	80
шельфовой части Японского моря	
2.2.1. Излучающие системы	81
2.2.2. Приемные системы	84
2.2.3. Приемно-излучающие системы	91
2.3. Методы численного моделирования распространения	99
акустических сигналов для сопоставления расчетных и	
экспериментально полученных данных, в целях дальнейшего	
применения при решении задач акустической томографии мелкого	
моря	
2.3.1. Обоснование выбора лучевых моделей для задач акустической	99
томографии мелкого моря	
2.3.2. Метод Гауссовых пучков для расчета акустических полей в	100
океане	
2.3.3. Применение программы BELLHOP	102
2.3.4. Метод представления приходящих импульсов в виде вейвлета	104
Морле	
Выводы по главе	111
ГЛАВА 3. Экспериментальные результаты акустического	112
мониторинга динамических процессов в шельфовых зонах	
3.1. Экспериментальные оценки и численные расчеты влияния	112
изменения уровня поверхности моря, связанного с приливно-	
отливными явлениями, на импульсные характеристики волновода	
3.2. Оценка влияния вертикального распределения скорости звука, и	117
захода холодных вод во время приливных явлений на характеристики	

звукового канала

3.2.1. Акустическая трасса длиной 2 км, глубины до 45 м, Японское 117 море

3.2.2. Акустическая трасса длиной 23 км, глубины до 110 м, Японское 122 море

3.2.3. Акустическая трасса длиной 615 м, глубины до 8 м, Корейский 124 пролив

3.3. Сезонные изменения на стационарной акустической трассе 126

3.4. Измерение и расчет скорости и направления течений методом 134 встречного зондирования

3.4.1. Экспериментальные исследования в условиях мелкого моря 136

3.4.2. Тестовый эксперимент в условиях очень мелкого моря 139

3.4.3. Экспериментальные исследования в условиях очень мелкого 145 моря

3.5 Влияние внутренних волн на шельфе на структуру акустических 152 приходов

Выводы по главе 154

ГЛАВА 4. Экспериментальные результаты исследований 156 пространственной векторно-скалярной структуры звуковых полей на шельфе Японского моря

4.1. Экспериментальные исследования импульсного отклика 156 волновода при приеме зондирующих сигналов на векторный приемник

4.2. Экспериментальные исследования особенностей 161 пространственной структуры векторно-скалярных звуковых полей в мелком море

Выводы по главе	169
Заключение	171
Литература	173
Приложение 1	198
П.1. Сложные сигналы	198
П.1.1. Обоснование выбора сложных сигналов для целей мониторинга	198
морской среды	
П.1.2. Широкополосные сигналы	199

П.1.3. Псевдошумовые последовательности. М-последовательности	201
П.1.4. Свойства М-последовательностей	203
П.1.5. Модуляция М-последовательностей	206

ВВЕДЕНИЕ

Шельфовые зоны морских акваторий являются уникальными объектами, с точки зрения стратификации вод, топографии и геологического строения дна. Динамично развивающееся освоение и использование ресурсов прибрежных шельфовых зон приводит к потребности в исследованиях всевозможных акустических характеристик морской акватории. Растущее количество работ по данному направлению исследований, в частности в области шельфа, в российских и зарубежных изданиях указывает на его востребованность и перспективность, особенно в плане обоснования на основе экспериментов в натурных условиях применяемых технических решений и аппаратуры. Осуществление эффективного мониторинга водной среды имеет ряд прикладных применений: морские океанографические исследования, наблюдение за подводными объектами, оборонные задачи, морские транспортные и пассажирские перевозки, обеспечение безопасного строительства, ведения хозяйства, прибрежное отдыха, туризма, освоение биологических и минеральных ресурсов. Однако, это достаточно сложная задача по причине специфических характеристик звукового канала, таких как затухание, сильная многолучевость и рефракция. Малые глубины, наличие береговой черты, ветрового, приливного и конвективного перемешивания вод, прибрежного подъема глубинных вод, эффектов поворота и завихрения течений, связанных с изменениями рельефа дна и формы береговой черты обусловливают значительную изменчивость полей течений и температур. Следует отметить и высокий уровень акустических шумовых помех, вызванных интенсивным судоходством. Для осуществления мониторинга разномасштабных гидродинамических возмущений, и наблюдения за подводными объектами на шельфе мелкого моря, необходимы специальные технические средства, методики проведения экспериментов, методы обработки сигналов.

Актуальность темы исследования. На формирование акустического поля оказывают влияние неоднородности морской среды, которые неизвестны, а сами по себе обратные задачи по реконструкции морских неоднородностей плохо обусловлены, нелинейны, и с математической точки зрения, поставлены некорректно, тем не менее, решение обратных задач возможно посредством регуляризации. Как следствие, появляется потребность в развитии методов проведения экспериментов, сбора. обработки постановки И И анализа информации, которые бы позволили повысить точность описания акустического поля и уменьшить неопределенность при решении обратной задачи, посредством точной синхронизации, позиционирования, «повторяемости» условий И параметров эксперимента, сбора, контроля и использования дополнительной информации как о распространении самих акустических сигналов, так и о параметрах окружающей среды.

C точки зрения стоимости, надежности, простоты эксплуатации, проведения практичности, достоверности, точности, возможности экспериментальных измерений при неблагоприятных погодных/ледовых условиях, организации непрерывных долговременных измерений, обеспечения «повторяемости» условий и параметров экспериментов - наиболее оптимально подходят акустические трассы со стационарно установленными придонными одиночными приемниками И излучателями звука. Большая часть настоящей экспериментальных исследований работы проводилась c использованием приемников/излучателей такого типа исполнения и постановки.

Повышение эффективности акустических приемных систем может быть осуществлено посредством увеличения объема данных об акустическом поле, что может быть реализовано при помощи векторных приемников (ВП), использование которых по некоторым оценкам также дает возможность улучшения соотношения сигнал/шум. Применение комбинированных приемников позволяет получить дополнительную информацию о звуковом поле (градиенты звукового давления, колебательные скорости, углы приходов акустической энергии и т.д.), что позволяет на принципиально новой основе решать разнообразные задачи современной акустики [178]. Нагляднее всего преимущества использования комбинированных приемников на базе ВП проявляются при использовании приемной одиночной системы, что дает возможность нахождения

месторасположения звукового источника и углов приходов акустической энергии в точке. Наиболее существенно данная особенность проявляется для случаев, когда использование развитых в пространстве приемных антенн состоящих из гидрофонов (приемников давления), невозможно или технически затруднительно.

Актуальность данной работы обусловлена немногочисленностью экспериментальных исследований характеристик распространения акустических сигналов на шельфе Японского моря и востребованностью подобного рода данных для решения задач акустического мониторинга морской среды, позиционирования и наблюдения за подводными объектами. На сегодняшний день, несмотря на заметный рост количества исследований на шельфе, остается масса нерешенных проблем, особенно это касается долговременных измерений на стационарных мелководных акустических трассах.

Степень разработанности темы исследования.

была впервые Концепция акустической томографии океана (АТО) представлена Манком и Вуншем [12], и заключается в получении из точных измерений времени распространения и/или других характеристик акустического поля, знания о состоянии той части океана, которую преодолели сигналы, формирующие это поле. Метод линейной АТО был широко использован в основном для глубоководных районов и показал хорошие результаты [12 - 15, 159]. Экспериментальные методики, математическое описание решения прямой задачи распространения и схемы инверсии являются взаимосвязанными частями для развития методов акустической томографии океана. В настоящее время в мировой практике используется множество различных, как трансмиссионных [20, 29, 3, 24, 160], так и эмиссионных [52 - 54] томографических схем, разнящихся по организации томографических трасс и измерений [34, 44, 1, 161], физической природе реконструируемых характеристик [39, 2, 33,162], типу зондирующих сигналов [9, 47, 4], по приближениям, используемым при описании зондирующего поля [86, 21, 16, 164], и методам реконструкции неоднородностей [6, 7, 30, 166]. Экспериментальные исследования по методу динамической томографии [35, 34], где совокупно используются буксируемый

гидрофон/излучатель и стационарно установленная томографическая сеть, что приводит к образованию многочисленных акустических трасс и улучшению горизонтального разрешения, показали возможность ее реализации, однако уменьшение неоднозначности при решении обратной задачи связано с решением таких технических трудностей как точное позиционирование и синхронизация всех приемно-излучающих систем. В работе [37], помимо всего прочего, для упрощения и удешевления измерений, был предложен подход на основе метода согласованного поля (МСП), но уже при использовании одиночного приемника вместо антенной решетки, метод согласованных временных откликов (МСВО), показано, что имеется принципиальная возможность восстановления поля скорости звука и уточнение геометрии эксперимента, но это влечет за собой неоднозначность В получаемых результатах И требует дополнительную дополнительного привлечение априорных данных. При реконструкции течений согласованной невзаимности (МСН) были получены методом неплохие результаты [44], однако, стоит отметить, что МСН не может быть осуществлен одиночными установленными стационарно трансиверами. АТО в настоящее время общепринята, как мощный альтернативный инструмент для мониторинга морской среды, являющийся дополнением к остальным традиционным методам физической океанографии, но в большинстве случаев используется для условий глубокого моря.

В то же время примеры использования томографических методов в шельфовых зонах немногочисленны. Сложная, в сравнении с глубоким океаном, структура акустического поля в мелком море, где значительную роль играют отражения от дна и водной поверхности, дает существенную нестабильность амплитудно-временной структуры акустических приходов. Более того, зачастую по причине малых времен задержек между соседними акустическими приходами, представляется возможным провести ИХ разделение не BO времени, a. следовательно, провести их идентификацию. В работе [51] обсуждаются физические ограничения линейной томографии мелкого моря, показано, что количество приходов несущих независимую информацию о среде меньше, а

иногда и намного меньше, чем число разрешенных приходов. К подобным выводам пришли и авторы работы [163] по исследованию возможности применения лучевой схемы томографии для пассивного (по двухточечной функции корреляции шумов океана) измерения скоростей звука и течений в мелком море. Успешные результаты экспериментов по измерению течений методом встречного акустического зондирования в мелком море были получены авторами работы [48]. Ввиду сложности И изменчивости импульсных характеристик реконструкция течений осуществлялась с привлечением априорной информации упрощенной по лучевой модели, учитывающей время распространения только двух групп приходов. Стоит отметить, что из-за малого количества измерений доплеровским профилометром (ADP) сравнение точности с результатами инверсии течений невозможны, хотя в целом направления и скорости течений, совпадают. Предложенный в работе [49] комбинированный метод реконструкции ВРСЗ и течений в условиях мелкого моря, основанный на МСВО [37] и линейной лучевой томографии, продемонстрировал неплохие результаты, однако, его достаточно сложно реализовать с точки зрения практического применения.

Векторные приемники еще в 30х годах предпринимались попытки использовать в гидроакустике в Германии [178], в 40х были изготовлены ПГД в США и России, однако, не нашли практического применения [179]. В 1956 году были опубликованы первые работы [180, 181] обосновывающие принципы регистрации векторных характеристик поля и описание возможных конструкций приемника колебательной скорости (ПКС). В середине 50х для ВМС США ПКС стал выпускаться серийно, с 1968 года в США - серийный выпуск РГБ с ВП. Что касается серийного выпуска качественных векторных приемников в России, то он имел закрытый характер и доступ большинства исследователей к ним был серьезно ограничен.

Векторные приемники могут применяться в низкочастотной томографии океана [200], задачах определения параметров грунта [199], изучении мелко- и крупномасштабных неоднородностей океана [178]. Размеры мелкомасштабных

неоднородностей могут быть определены КП по углу пеленга на источник сигнала и дисперсию пеленга за это же время [201]. Применяя только сформированную на КП кардиоидную характеристику направленности, можно повысить соотношение сигнал/шум на 6-10 дБ. Это может обеспечить возможность сократить время накопления информации практически на порядок при реконструкции модовой структуры сигнала [200].

До сегодняшнего дня сохраняются существенные разногласия в оценках 184] помехоустойчивости КП. В работах [191, на основе модельных экспериментов, сделано заключение, что помехоустойчивость одиночной КП не превышает 6 дБ, и максимальной помехоустойчивости можно добиться, используя аддитивные алгоритмы обработки, а при мультипликативных алгоритмах - 3.8 дБ. Противоположенного мнения придерживаются авторы экспериментальных работ [178, 67, 194, 193], по их оценкам помехоустойчивость КП, полученная в натурных условиях, составляет 15 – 35 дБ. В работах [196, 197] представлены результаты применения методики экспериментальной оценки помехоустойчивости комбинированных приемных систем. В работе [189] на основе натурных измерений проведен сравнительный анализ помехоустойчивости КП, показано, что возможно увеличение эффективности мультипликативных алгоритмов и потенциальной помехоустойчивости КП посредством увеличения числа обрабатываемых информативных параметров, которые характеризуют акустическое поле источника шумов в векторно-скалярном и тензорном описании.

Также стоит отметить и разногласия, связанные с вихревыми составляющими акустического поля. В работах [206, 202, 204, 205] представлен теоретический анализ движения энергии в акустическом поле в окрестности сингулярностей волнового фронта. Основываясь на анализе характеристик линий тока энергии, определено, что движение акустической энергии в области точек сингулярности становится вихревым, что приводит к обратному движению энергии в области, находящейся между дислокацией (центром вихря) и седлом (точкой застоя). В работе [207], исследуются динамические особенности

дислокаций связанные с приливно-отливными явлениями. В экспериментальных работах [208, 210, 195] рассматривается интерференционная структура вертикальной компоненты ВП и звукового давления и их разность фаз. Представлен анализ взаимосвязи скачков разности фаз и изменения направления прихода вертикальной компоненты ВП и, соответственно, выявления вихрей вектора акустической интенсивности.

В то же время, авторы работ [211, 213, 212] придерживаются другого мнения касательно целесообразности использования вихревой модели потока мощности. Утверждается, что различия интерференционной структуры поля звукового давления и вертикальной составляющей КП связано с подавлением мод первых номеров вертикальным каналом ВП и подчеркиванием мод высоких номеров. Что по этой причине происходит сглаживание амплитудной многомодовой интерференции вертикальной компоненты, и смещение по расстоянию зон минимумов и максимумов полей звукового давления и вертикальной составляющей.

В целом, для условий мелкого моря исследования по большей части разрознены в РФ и проводятся преимущественно отдельными лабораториями в рамках единичных исследовательских грантов и программ без каких-либо отчетливых возможностей перейти к масштабному внедрению томографических инструментов и, в частности, комбинированных приемников в практику океанологических исследований, мониторинга, наблюдения за подводными объектами. В связи с этим, последующее развитие представляется связанным, в первую очередь, с удешевлением и созданием специальных технических средств и методик проведения экспериментов, упрощением томографических схем, привлечением, измерением и использованием дополнительной (например, углы приходов) И априорной информации, позволяющей повысить точность реконструкции и интерпретации полученных результатов, повышением точности синхронизации И позиционирования всех томографических элементов, проведением долговременных измерений.

Исходя из вышеизложенного положения дел, цели и задачи настоящей работы могут быть сформулированы следующим образом.

Цель работы: экспериментальные и теоретические исследования возможности развития акустических методов мониторинга динамических процессов и наблюдения за подводными объектами в мелком море

Для достижения сформулированной цели были определены следующие задачи:

 Разработка методики натурных и численных экспериментов для решения задач реконструкции поля температур и течений в мелком море по данным акустического зондирования;

 Экспериментальные и теоретические исследования влияния неоднородностей морской среды различного происхождения на формирование импульсных характеристик волновода при зондировании морской среды сложными псевдослучайными сигналами;

 Экспериментальные исследования векторных характеристик акустических полей при решении задач мониторинга, контроля динамических процессов и наблюдения за подводными объектами в мелком море.

Научная новизна:

1. Разработана и апробирована в натурных условиях оригинальная методика долговременного мониторинга изменчивости вертикальной структуры поля температур в мелком море с применением методов акустической томографии. Предложен метод тестовой импульсной характеристики (стабильной и полученной в условиях постоянства температуры от поверхности до дна) для идентификации приходов акустической энергии и расчета среднего по слою поля температуры в течение года.

2. Предложен оригинальный метод представления лучевых приходов посредством вейвлета Морле для построения функции отклика акустического канала по данным численного моделирования.

3. На основе экспериментальных данных и численных расчетов, проведена валидация: метода (зондирование фазоманипулированными М-

последовательностями с частотой 2500 Гц, 511 символов, 4 периода частоты несущей на символ), модели (численные расчеты с использованием метода Гауссовых пучков, метода представления приходящих импульсов в виде вейвлета Морле) и аппаратуры, что они обладают достаточной чувствительностью для осуществления зондирования, исследований и мониторинга изменчивости структуры и динамики полей температур в условиях мелкого моря. Показано, что применяемые численные методы с использованием расчетных данных позволяют учитывать влияние прилива на времена распространения акустических приходов в мелководных акваториях.

4. Развиты методы дистанционного измерения скорости и направления течений вдоль стационарной трассы. Показано, что в условиях очень мелкого моря (глубины до 20 метров) необходимо учитывать особенности ветровых режимов и использовать метеорологическую информацию о скорости и направлении ветра, что обычно не входит в практику акустических экспериментальных исследований.

5. На расширенной по сравнению с работой [220] выборке, выполненного численного моделирования, анализе угловой и временной структуры, экспериментальных данных, продемонстрирована эффективность применения направленных свойств векторного приема для анализа импульсных характеристик волноводов при решении задач томографии неоднородностей морской среды, связанных с измерением углов приходов акустической энергии, которые являются дополнительным параметром при проведении идентификации прошедших по различным лучевым траекториям сигналов.

6. На основе полученных в контролируемых условиях данных измерений пространственной структуры векторно-скалярных полей на протяженных акустических трассах при различных гидрологических условиях, углах наклонов и глубин дна получены данные об условиях появления в интерференционных структурах векторно-скалярных полей значительных по дистанции (сотни метров) смещений минимумов и максимумов сигналов в каналах Р, Х, Y относительно канала Z, что открывает возможность организации непрерывного обнаружения и

сопровождения источника тонального сигнала без связанных с интерференцией пропусков за счет обработки сигнальной информации с каналов комбинированного приемника с реализацией эффективного накопления. Таким образом, вертикальная компонента ВП может стать определяющей при приеме сигналов тонального источника звука при прохождении зон тени, образованных в зонах интерференционных минимумов в каналах P, X, Y.

Практическая значимость работы заключается в возможности приложения полученных результатов и разработок в таких областях как: исследование, мониторинг и томография океана; системы наблюдения, звукоподводной навигации, связи и управления подводными аппаратами; информационные системы для добычи разведения биоресурсов. Практическая ценность работы подтверждается И применением ее результатов при выполнении работ с участием автора по грантам ЛВО РАН. проведении совместных российско-корейских исследований ПО контрактам в Японском море и Корейском проливе.

Методы исследования. Решение поставленных задач базируется на экспериментальных данных, полученных при проведении экспериментов в натурных условиях. Использовались методы: зондирования океана тональными и сложными фазоманипулированными М-последовательностью сигналами на несущей частоте, векторно-скалярной регистрации акустических полей, лучевой акустики, Гауссовых пучков, встречного зондирования, цифровой обработки сигналов. Моделирование, численные расчеты, визуализация выполнялись в вычислительной среде Matlab с применением интегрированных прикладных пакетов, и специализированных программ.

На защиту выносятся:

1. Разработанная и экспериментально апробированная методика осуществления долговременного мониторинга изменчивости вертикальной структуры поля температур и течений в условиях мелкого моря с использованием методов тестовой импульсной характеристики и представления лучевых акустических приходов посредством вейвлета Морле.

2. Результаты экспериментальных исследований изменчивости полей температур и течений на стационарных трассах в шельфовой зоне по данным акустического зондирования.

3. Экспериментальные результаты применения векторных приемников в задачах акустической томографии морской среды и наблюдения за подводными объектами.

Объект исследования – Акустические свойства морской среды шельфовой зоны.

Предмет исследования – Влияние неоднородностей морской среды: на формирование акустического отклика волновода при зондировании среды сложными сигналами, в том числе при приеме зондирующих сигналов на векторный приемник.

Степень достоверности результатов. Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов основана на обширном экспериментальном материале, собранном на протяжении 14 лет, и подтверждается использованием апробированных экспериментальных методик и схем проведения акустических экспериментов, методов цифровой обработки сигналов и анализа данных, тщательной калибровкой приемных и излучающих систем, повторяемостью результатов многократных экспериментов и согласованностью экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Анализ и интерпретация полученных экспериментальных данных осуществлялась путем сопоставления с результатами измерений, полученных независимыми контактными/бесконтактными методами, и/или со средними многолетними справочными/расчетными данными.

Личный вклад автора. Весь фактический материал, на основе которого подготовлена диссертация, получен автором в сотрудничестве с коллегами в экспедициях ТОИ ДВО РАН, ИПМТ ДВО РАН. Автором лично были разработаны алгоритмы и коды программ в среде программирования Matlab, реализующие необходимые методы обработки и анализа гидроакустических сигналов, данных из дополнительных источников информации, выполнены численные расчеты. Автором лично выполнены обработка сигналов, анализ данных и численное моделирование. Совместно с коллегами автор принимал участие в планировании, постановке и

проведении экспериментальных исследований. Совместно с научным руководителем автор обсуждал и интерпретировал полученные результаты исследований, разработал положения, выносимые на защиту.

Апробация результатов. На российских конференциях: XVII, XX, XXI, XXII, XXIII, XXVI и XXIV сессии Российского акустического общества (Москва, 2006, 2008, 2009, 2011, 2013; Саратов, 2011); научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана» (Владивосток, 2005, 2007, 2009, 2011); IV всероссийском симпозиуме «Сейсмоакустика переходных зон» (Владивосток, 2005); V и VII Всероссийском симпозиуме «Физика геосфер» (Владивосток, 2007, 2011).

На международных конференциях: IX акустической конференции по западной части Тихого океана (Сеул, Ю. Корея, 2006); конференции по подводной акустике Тихоокеанского побережья «Акустика мелкого моря» (о. Чеджу, Корея, 2011) и 5-ой конференции «Pacific Rim Underwater Acoustic Conference» (Владивосток. 2015): 3-ем конгрессе Альпа-Адриатической акустической ассоциации «A Tradition of Innovation» (Грац, Австрия, 2007); 4-ом симпозиуме «Акустические инженерные разработки и технологии» (Харбин, Китай, 2005); ежегодном заседании Северо-Тихоокеанской организации по морским наукам (Далянь, Китай, 2008; о. Чеджу, Корея, 2009; Хабаровск, 2011); конференции «Потоки и структуры в жидкостях» (Владивосток, 2011); 2-ом, 3-ем, 4-ом симпозиуме по мониторингу ТОИ-КОРДИ (Владивосток, 2006; Джангмок, Ю. Корея, 2007; Владивосток, 2008); симпозиуме «MT-IT Collaboration Technology» (Кванджу, Ю. Корея, 2010); совместном семинаре «MT-IT Collaboration Research Direction and Status» (Кванджу, Ю. Корея, 2011); совместном семинаре МТ-IT Research Collaboration Center "Results and Prospects" (Владивосток, 2012).

Результаты выполненных исследований докладывались и обсуждались на акустическом семинаре ТОИ ДВО РАН.

Результаты работы использовались:

- в рамках руководства проектами, поддержанными грантами ДВО РАН:

1. «Использование акустического метода встречного зондирования для измерения направления и скорости течений исследуемой мелководной акватории», проект № 12-Ш-В-07-139, 2012 г.;

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

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

«Многочастотное встречное акустическое зондирование для измерения скорости и направления течений на мелководной акватории», проект № 15-II-1-045, 2015 г.;

- в рамках выполнения проектов, поддержанных: - грантами ДВО РАН: № 15-I-1-012, 2015 — 2017 гг.; № 10-Ш-Д-07-035, 2010 г.; № 11-Ш-Д-07-038, 2011 г.; грантами Президента РФ поддержки научных школ: НШ-3641.2010.5, 2010-2011 гг.; НШ-1052.2012.5, 2012-2013 гг.; НШ-6084.2014.5, 2014-2015 гг.; - Фундаментальных PAH, НИР исследований, финансируемых ИЗ федерального бюджета N⁰ гос.рег.01200956686, 2009-2011 гг.; - российско-корейского международного сотрудничества между ТОИ ДВО РАН и GIST: НИР, контракты № 2009-099, 2009-2010 гг.; № 2010-097, 2010-2011 гг.; НИР контракты № 2010-060, 2010 г.; № 2011-049, 2011 г.; № 2012-062, 2012 г.; - Фонда перспективных исследований: НИР Дог.№ 01/2014-2016,(1-2 этап), 2015-2016 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ в рецензируемых журналах, из них 16, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией РФ для публикации материалов диссертаций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной объем диссертации 172 страницы, включая 58 рисунков. Список библиографических источников содержит 222 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении охарактеризована тематика диссертации, сформулированы цель и задачи. Обозначены объект, предмет и методы исследования. Аргументирована актуальность, научная новизна, показана достоверность и практическая значимость результатов. Представлены выносимые на защиту положения, информация об апробации и публикациях основных результатов работы, отмечен личный вклад автора.

В главе 1 рассмотрены работы отечественных и зарубежных специалистов, посвященные теоретическому и экспериментальному исследованию влияния неоднородностей на формирование акустического поля. Особое морских внимание уделено методике проведения натурных и численных экспериментов по решению задач реконструкции неоднородностей морской среды (поля течений и температур) на основе данных зондирования водной толщи акустическими сигналами, и возможности их применения для условий мелкого моря и небольших протяженностей (от единиц до десятков километров) акустических трасс. Рассмотрены разнообразные схемы проведения томографических экспериментов, используемая излучающая и приемная аппаратура, частоты, типы и режимы зондирующих сигналов. Наиболее подробно рассмотрены работы ПО экспериментальной реализации томографических методов в натурных условиях. Отмечены проблемы присущие этим методам, их достоинства и недостатки, возможные пути усовершенствования. Рассмотрены особенности применения комбинированных приемников в задачах исследования векторно-скалярных характеристик акустических полей, их преимущества и недостатки, проблемы оценки помехоустойчивости, работы связанные с исследованием вихревых вектора акустической интенсивности, интерференционной структур поля структуры акустического поля. В заключение главы конкретизированы задачи исследования.

В главе 2 представлены результаты методических и технических решений, целью которых была разработка методов, средств и систем для осуществления: мониторинга изменчивости и структуры морской среды в условиях шельфовой зоны Японского моря с использованием сложных фазоманипулированных

акустических сигналов; и исследования особенностей формирования пространственной векторно-скалярной структуры звуковых полей, в том числе в целях исследования возможности наблюдения за подводными объектами.

В разделе 2.1 представлены методические основы акустического зондирования мелкого моря.

В разделе 2.2 приводится описание излучающих, приемных, приемноизлучающих систем, которые входили в состав разработанного в лаборатории акустико-гидрофизического комплекса в процессе проведения исследований по теме диссертации.

Раздел 2.3 посвящен численному моделированию распространения акустических сигналов для сопоставления расчетных и экспериментально полученных данных, в целях дальнейшего применения при решении задач акустической томографии мелкого моря.

В главе 3 и 4 представлены материалы экспериментальных исследований, проведенных в натурных условиях, полученные при участии автора с 2004 по 2017 годы в морских и прибрежных экспедициях ТОИ ДВО РАН.

В главе 3 приведены экспериментальные результаты акустического мониторинга динамических процессов в шельфовых зонах.

В **разделе 3.1** отображены результаты экспериментальных исследований влияния приливно-отливных явлений на формирование акустического поля на стационарных акустических трассах и их связь с вариациями времени пробега акустических импульсов.

В разделе 3.2 представлены результаты экспериментов по исследованию закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических полей и полей температур в условиях мелкого моря на шельфе Японского моря.

В разделе 3.3 представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования импульсной характеристики волновода на шельфе Японского моря в зависимости от сезонных изменений поля температур.

В разделе 3.4 приведены результаты экспериментального исследования возможностей дистанционного акустического мониторинга направления и скорости течений методом встречного зондирования.

В разделе 3.5 приведены экспериментальные данные по определению влияния внутренних волн, проходящих через акустическую трассу, на характеристики распространения акустических сигналов и возможности реконструкции параметров этих волн.

В главе 4 представлены экспериментальные результаты исследований пространственной векторно-скалярной структуры звуковых полей на шельфе Японского моря.

В разделе 4.1 на основе экспериментальных данных продемонстрированы возможности методов акустического зондирования по исследованию и мониторингу изменчивости температурных полей с использованием комбинированного (векторного) приемника.

В разделе 4.2 приведены результаты экспериментальных исследований особенностей пространственной структуры векторно-скалярных полей в целях исследования возможности наблюдения за подводными объектами на шельфе Японского моря.

В приложении 1 обоснован выбор сложных фазоманипулированных Мпоследовательностью сигналов на несущей частоте для целей мониторинга морской среды, рассмотрены их свойства и методы формирования.

В заключении приводятся основные выводы по результатам работы.

ГЛАВА 1. Аналитический обзор теории и практики акустического зондирования морской среды. Постановка задач

В настоящей главе проводится литературный обзор отечественных и зарубежных работ по проблемам акустического мониторинга структуры и динамики водной среды с масштабами изменений пространственных и временных характеристик, которой лежит в пределах от сантиметров до десятков тысяч километров и от минут до нескольких лет. Рассмотрены виды сложных сигналов, особенности корреляционной обработки и вопросы синхронизации излучающей и приемной частей акустических систем.

Концепция акустической томографии океана (АТО) заключается в получении из точных измерений времени распространения и/или других характеристик акустического поля, знания о состоянии той части океана, которую преодолели сигналы, формирующие это поле. Экспериментальные методики, математическое описание решения прямой задачи распространения и схемы инверсии являются взаимосвязанными частями для развития методов акустической томографии океана. В настоящее время в мировой практике используется множество различных, как трансмиссионных, так и эмиссионных томографических схем, разнящихся по организации томографических трасс и измерений, физической природе реконструируемых характеристик, типу зондирующих сигналов, по приближениям, используемым при описании зондирующего поля, и методам реконструкции неоднородностей. АТО в настоящее время общепринята, как мощный альтернативный инструмент для являющийся мониторинга морской среды, дополнением К остальным традиционным методам физической океанографии.

1.1. Томография океана

В статье [3] обсуждаются расчетные характеристики звукового поля в условиях мелкого моря для разных сезонов года, при расположении у дна 10-

километровой горизонтальной линейной цепочки гидрофонов вдоль трассы распространения сигналов килогерцового диапазона. Приведеные данные расчета, с использованием лучевых программ, угловой, временной и энергетической структуры звукового поля, продемонстрировали влияние характеристик донных осадков (песок, ил) на интенсивность сигналов отдельных лучевых приходов принятных у дна, что представляет интерес для некотороых практических задач. В работе [4] предлагается альтернативный способ формирования сложного сигнала связи, основой способа является то, что при использовании комбинаций последовательностей фрагментов с внутренней линейной частотной модуляцией несущей, временные задержки распространения сигнала в многолучевом канале могут быть преобразованы в частотные смещения многолучевых откликов. Однократная фазовая манипуляция применяется для формирования бинарных последовательностей передающихся в качестве информационных пакетов. Последовательность частотномодулированных фрагментов с большим частотным градиентом, без пауз следующих друг за другом, в диапазоне частот от 40 кГц до 80 кГц является несущей. Принимаемый сигнал проходит специальное частотное преобразование, после которого многолучевые приходы могут быть выделены в частотной области традиционной полосовой фильтрацией. Стоит подчеркнуть, что мгновенные частоты всех многолучевых откликов в каждый момент времени имеют разные значения и отличаются от частоты прямого сигнала. При восстановлении узкополосного цифрового сигнала, принятый многолучевый или частично «очищается» и представляется одним сигнал полностью многолучевым компонентом или набором отдельных компонентов, отобранных для совместной обработки.

Организация круглогодичного мониторинга в условиях шельфовой зоны вряд ли может основываться на традиционных контактных методах измерений, а на акваториях длительное время покрытых льдом становятся затруднительны и спутниковые наблюдения. В большинстве случаев измерение солености не является целью акустической томографии, так как в основном скорость звука зависит от температуры, но когда в зимний период времени морская поверхность покрывается людом, температура воды становится близкой к точке замерзания, то возможно оценить соленость верхнего подледного слоя методами акустической В статье [8] рассматривается возможность галинометрии. акустической галинометрии Арктического бассейна в весенне-зимний период, приводятся результаты численного акустического моделирования распространения сигнала с частотой 40 Гц для трассы длиной 600 км. Показано, что измерение средней солености в приледном слое возможно осуществить по времени распространения первой моды. Оптимальная частота для мониторинга выбирается исходя из: длины акустической трассы; льда (сплоченность, толщина, высота неровностей нижней поверхности, соотношение относительно ровных участков ледового покрова и всторошенных); толщины подледного слоя, где температура близка к точке замерзания и скорость звука определяется соленостью; степени влияния нижних слоев волновода, в которых скорость распространения зависит главным образом от температуры. Как продолжение работ по данной тематике, в статье [5] обсуждается возможность дистанционного мониторинга средних по трассе вертикальных профилей солености и температуры Берингова пролива в весеннелетний период, когда наблюдается усиление притока распресненных вод. комбинации Предлагается использование акустических методов В С дополнительными данными, полученными другими способами. Представлены комбинированного результаты численного моделирования акустикоокеанографического мониторинга термохалинного вертикального распределения. В качестве акустических данных рассматриваются времена распространения нормальных адиабатических мод от источника сложных фазоманипулированных сигналов типа М-последовательностей к приемной антенне, а дополнительной информацией служат: данные о температуре поверхности моря (спутниковые измерения); данные о придонной температуре (донные кабели, как распределенные датчики температуры); данные о типичном летнем распределении океанографических характеристик. На первом этапе при линейной устойчивой инверсной схемы (адиабатическая помощи теория нормальных мод, метод малых возмущений, демпфированный метод наименьших

квадратов) производится реконструкция отклонения среднего по трассе профиля скорости звука. На втором этапе производится «улучшенная» инверсия, в которой используются, как акустические данные, так и данные о поверхностной и придонной температуре. Профили средних по трассе температуры и солености расчитываются с помощью регуляризированной процедуры минимизации квадратичного функционала алгоритмом Левенберга-Марквардта.

Существенным моментом при решении реконструкции задач неоднородностей морской среды является выбор так называемых базисных элементов, по которым происходит разложение исследуемых гидрологических параметров. В большинстве случаев в двумерных задачах морская акватория разбивается на квадраты либо треугольники, используемые в качестве базисных элементов, значения внутри которых постоянны, или же для разбиения акватории может использоваться сетка, в этом случае значения задаются в ее узлах, а промежуточные расчитываются интерполяцией. При этом возникают трудности при попадании лучей в углы базисных элементов или появление ложной дифракции в углах сетки. В статье [7] предлагается иной подход, он основан на разложении неоднорости по «нестандартному» «полосчатому» базису состоящему из параллельных полос, которые могут поворачиваться в интервале от 0 до π . Таким образом образуется двухпараметрическое множество полос, с параметрами отдаления полоски от центра круговой области и углом поворота полоски относительно положения ПО горизонтали. Использвование такого базиса позволяет решить ряд проблем возникающих при разбиении исследуемой акватории на элементы с углами. В работе [164] описан численный метод акустических волн, представляющий собой решения задачи излучения комбинацию метода конечных элементов и метода граничных алгебраических уравнений.

Превалирующее число методов решения задач томографии по восстановлению неоднородностей базируется на применении линейного приближения [159, 160], а при существенном отклонении от линейного приближению используют итерационные методы [6, 23, 31]. Однако, существуют

так называемые функционально-аналитические методы, применение которых позволяет обойтись без итерационных процедур и учесть эффекты многократного рассеяния [165]. В работах [166, 167] рассматривается численая реализация функционально-аналитического алгоритма Новикова-Агальцова в одночастотном и многочаститном режимах зондирования. Обсуждаются его возможности для целей томографического восстановления поля скорости звука и течений.

Ha примере монохроматического затухающего зондирующего синусоидального сигнала в работе [9] изложен метод сжатия узкополосных сигналов позволяющий получить более высокое разрешение, которое соответствует полной ширине спектра сигнала. В работе [10] исследуется возможность применения метода сжатия [9] для широкополосных сигналов (Мпоследовательностей) c временного целью увеличения разрешения И, следовательно, улучшения разделения сигналов, распрастраняющихся ПО различным лучевым траекториям при зондировании морской среды. Сжатие сигнала проводится в два этапа. На первом этапе реализуется возможность основанная на том, что спектр корреляционной функции сложного сигнала шире обратной величины его длительности, необходимым условием является количество дискретных временных отсчетов на протяжении достаточное длительности отклика сигнала, максимальное значение дополнительного сжатия равна числу этих отсчетов. На втором этапе осуществляется корректировка позволяющая учесть неравномерность частотной характеристики приемноизлучающего тракта, здесь необходимо чтобы отношение сигнал/шум было не менее 10 дБ.

Акустическая томография океана была впервые представлена Манком и Вуншем в 1979 [12], первоначально основана на лучевой теории, и заключается в реконструкции структуры неоднородностей океана по измеряемым вариациям времени распространения акустических сигналов вдоль отдельных лучей. Оригинальная идея для решения задач инверсии в АТО основана на приближении, что «опорная» среда всегда известна и, что отличия от фактического состояние среды от «опорного» достаточно малы. «Опорное»

состояние обычно соответствует значениям прошлых лет, или измеренным на момент начала эксперимента, либо усредненным измеренным в разных районах исследуемой акватории. При условии, что лучевые приходы могут быть идентифицированы в месте расположения источника, использование N измерений (*N* приходов собственных лучей) может дать в результате выделение скорости звука по траектории луча и, в конечном счете, в отдельных точках водной толщи (вертикального профиля). Эта задача обычно решается путем дискретизации траектории луча, и использовании ортогональных функций для описания вариаций скорости звука с глубиной. связи рассчитанных Для времен распространения акустических приходов С измеренными, правило, как используется линейное приближение, что позволяет свести задачу реконструкции к решению алгебраической линейной системы уравнений или к минимизации квадратичной невязки. Этот метод был широко использован в основном для глубоководных районов и показал хорошие результаты [12-15, 159, 160], основным его достоинством является линейная связь возмущений времени распространения сигнала и возмущений поля скорости звука. Надо отметить, что идентификация пиков, связанных с пиками сигнала в «опорной» среде и полученных в натурных измерениях, очень важна в данном методе.

В тех случаях, когда воздействие неоднородностей на время распространения акустических сигналов настолько велико, что перестают выполняться критерии позволяющие использовать линейное приближение, можно воспользоваться методом итерации [6, 23, 31]. Суть метода заключается в контроле качества производимой инверсии и замене, при необходимости, опорного профиля скорости звука и, соответственно, опорных лучей на новые. При проверке качества инверсии строятся лучи уже для восстановленного состояния среды (первая итерация (ит.1)) И вычисляются времена распространения акустических приходов по ним. Не исключено, что некоторые лучи, построенные для «опорного» состояния среды, исчезнут или могут появиться новые. Если при сравнении рассчитанных времен распространения с измеренными в эксперименте, их отличие для большинства лучей не превышает

погрешности измерений, то качество инверсии считается удовлетворительным, в ином случае требуется дальнейшее уточнение профиля скорости звука. Для этой цели принимается новое «опорное» состояние среды (ит.1), производится инверсия, рассчитывается новое распределение скорости звука (ит.2) и так далее. Подробное описание данного метода применительно к АТО представлено в работе [6] на основе численных расчетов модельного эксперимента.

Альтернативный подход заключается В интерпретации параметров принятого зондирующего сигнала не в лучевом, а в модовом представлении, определении приходов отдельных мод или их фазовых и групповых скоростей. Подробное описание о соотношении лучей и мод как источников информации о неоднородностях скорости звука приведено в [21]. По возмущению характеристик фаз [18, 23] или [16, 17, 20] измеряемых групповых задержек идентифицированных мод, можно получить данные 0 структуре неоднородностей. Расстояние между источником и приемником, на котором отдельные импульсные приходы могут быть отождествлены с индивидуальными модами, довольно велико и помимо характеристик волновода зависит и от свойств зондирующего сигнала. Стоит отметить, что моды, ввиду различий в вертикальной структуре, несут различную своей информацию о разных горизонтах по глубине, что и делает возможным восстановление вертикальной структуры волновода при выделении некоторого количества мод. Выделение мод осуществляется либо при помощи развитых в пространстве приемных систем, посредством идентификации приходов [16, 17], либо соответствующих отдельным модам, по последовательности их времен прихода, аналогично подходу применяемому в лучевой томографии.

В работе [16] проводится теоретический анализ возможности идентификации мод в мелком море для осуществления реконструкции параметров дна при излучении и приеме широкополосного сигнала с центральной частотой 150 Гц одиночными излучателем и приемником расположенными на глубине 20 метров и на расстоянии 10 км друг от друга. Для двух тестовых случаев показано, что возможна идентификация приходов мод низких номеров и по вариациям их

групповых скоростей возможно восстановление параметров скорости звука в донном осадочном слое. В работе [17] обсуждается возможность модовой томографии явления Эль-Ниньо с использованием одиночного приемника и взрывного источника звука. Реконструкция профиля скорости звука верхнего деятельного трехсотметрового слоя проводится на основе величин групповых скоростей 7-12 мод с использованием демпфированного метода наименьших квадратов и метода сингулярных разложений. В работе [18] предложена схема фазовой томографии с использованием нормальных волн, вертикальные приемные и излучающие антенны настраиваются на основную моду, и производится измерение приращений фаз монохроматического сигнала. Данная схема предполагается для использования в условиях мелкого моря, дистанций от 10-30 км и диапазона частот 100-1000 Гц, отмечено, что время измерения фазы ограничивается временем нестационарности мелководных морских акваторий и типичное его значение составляет 5-30 мин для частоты 300 Гц [19]. В принципе, для реконструкции возможно использование не самих абсолютных значений времени распространения или же фаз мод, а их относительных величин, которые отсчитываются от соответствующих значений какой-либо моды [20]. Данный способ трактовки измерений снимает жесткие требования по синхронизации систем излучения и приема и их точности позиционирования, однако теряется некоторая часть информации о неоднородности.

В статье [22] предложен алгоритм трехмерной модовой томографии, как для условий мелкого моря [18], так и для условий узкого приповерхностного канала в глубоком море при дистанциях 100-200 км. При помощи измерений фазы или групповой задержки одной из мод осуществляется двумерное восстановление структуры скорости звука на площади охватываемой в соответствии с расстановкой источников и приемников, и на плоской акватории вычисляется среднее по глубине значение. Это осуществляется следующим образом: акватория разбивается на дискретные ячейки и восстанавливается двумерное поле возмущений волнового числа n-ой моды (фазовая томография). А на втором этапе, с помощью расчитанных возмущений (волнового числа или групповой задержки) и их связи с величиной малых возмущений профиля скорости звука по вертикали, восстанавливается вертикальная структура в каждой из дискретных ячеек.

Результаты численных расчетов ПО модовой схеме реконструкции неоднородностей скорости звука (вихрей) для неоднородных ПО трассе волноводов приведены в работе [23]. В качестве информации для проведения инверсии служат фазовые скорости мод, рассмотрено два случая с глубинами каналов 180 и 400 метров, с излучением одиночным источником звука гармонического сигнала с частотами 110 и 200 Гц, соответственно, и приемом на вертикальную цепочку гидрофонов. Приводятся результаты расчетов, как с использованием эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) в инверсии, так и без их использования, предпочтение отдается в пользу ЭОФ, так как существенно сокращается количество неизвестных в алгебраической линейной системы уравнений. Также произведена реконструкция с помощью разного количества мод 5 и 10, отмечено, что при использовании большего количества мод (10) точность инверсии понизилась, возможно, это связано с тем, что моды высшего порядка более чувствительны к вычислительным ошибкам присущим данной схеме восстановления неоднородностей, однако этот вопрос требует дальнейшего исследования. Во всех представленных расчетах применен метод итерации, количество итераций равно трем.

Метод маломодовой низкочастотной импульсной томографии мелкого моря, основанный на согласовании излучаемых сигналов с океанической средой, которое может достигаться путем задания соответсвующим модам волновода амплитудно-фазовых распределений даваления на каждом излучателе вертикальной решетки, предлагается в работе [24]. На примере численной модели исследуются особенности восстановления параметров неоднородностей при обработке сигналов с трех вертикальных многоэлементных излучающих и приемных решеток, расположенных в вершинах треугольника со сторонами 50 км, на акватории глубиной 300 метор, при селективном возбуждении первой моды, с использованием сигналов типа М-последовательностей с частотой

Гц. несущей 250 В [25,26] работах представлены результаты эксперименталдьных исследований формирования маломодовых импульсов в условиях мелкого моря с помощью вертикально распределенных решеток состоящих из 16 излучателей в диапазоне частот 234-254 Гц. Прием сигналов осуществлялся двумя (1.5 км друг от друга) вертикальными системами состоящими из 32 гидрофонов на дистанции от 1 до 22 км [25], и премными линейными горизонтальными антеннами из 16 гидрофонов расположенными на дне на расстояниях 150 – 250 км [26]. Ввиду конечности апертуры излучающей решетки, ее деформации, течений, неполноты информации о строении дна и вертикального распределения скорости звука в волноводе, не представляется возможным возбудить только одну конкретную моду. В ходе экспериментов при излучении было осуществлено однородное распределение по апертуре атенны и соответствующее первым распределение трем модам волновода. Экспериментально показано, селективное возбуждение ЧТО маломодовых сигналов позволяет обеспечить формирование мощных и стабильных сигналов повышенной когерентности (уровень флуктуаций поля меньше по сравнению с применением одиночного излучателя, в следствии меньшего взаимодействия формируемого поля с поверхностью и дном) и уменьшить их затухание на протяженных мелководных трассах.

Лучевая и модовая томография основываются на измерениях вариаций времени распространения сигналов соответствующих лучам или модам или вариаций фаз отдельных мод. При измерении фазы можно столкнуться с трудностями связанными с неоднозначностью определения фазы, так как ее определение возможно только с точностью до компоненты $2\pi n$, а, например, при прохождении звука через синоптический вихрь возмущения фаз мод способны достигать десятков и даже сотен циклов [27]. Опять же, при восстановлении неоднородностей синоптического масштаба, значительные флуктуации фазы мелкомасштабными неоднородностями, ΜΟΓΥΤ быть связанны с мезо-И выступающими как помеха в данном случае. К примеру, возмущения фаз мод могут достигать 2π на расстояниях порядка сотни километров под влиянием

внутренних волн [27]. По этим причинам в ряде случаев является целесообразным использование не самих возмущений фаз мод, а их межмодовой разности. Для близких мод их разность фаз может быть малой и в случаях вариаций фаз значительно больших 2π. Разность фаз мод, по сравнению с самой фазой отдельных мод, может быть менее чувствительна к воздействию мезо- и мелкомасштабных неоднородностей. В случае с реконструкцией синоптических неоднородностей это является ее преимуществом, однако, это приводит к частичной потере информации о вариациях скорости звука и, следовательно, возрастают требования к априорной информации. Экспериментально измерить разность фазовых набегов мод возможно вертикальными или горизонтальными антеннами. Но, более притягательная возможность это – измерение разности фаз по интерференционной структуре акустического поля [28]. Разнообразные океанические неоднородности приводят к изменению интерференционной структуры, в частности, смещению зон акустической освещенности или засветкам зон тени [27]. Так как вариации интерференционной структуры зависят от возмущений скорости звука, то информацией служащей для оценки изменений в межмодовой разности фаз, могут выступать отклонения интенсивности звука от значений ee В опорном океаническом волноводе. Акустическая интерференционная схема томографии океана представлена в работе [29]. Показано, что по измерениям возмущений интенсивности звукового поля от квазимонохроматического источника возможно восстановление мезомасштабных неоднородностей поля скорости звука. Рассмотрен алгоритм реконструкции структуры волновода с применением метода регуляризации по А.Н. Тихонову, обсуждается эффект сглаживания части интерференционной структуры и необходимость привлечения априорной информации о вертикальной структуре неоднородностей.

Метод акустической томографии океана предложенный Манком и Вуншем [12] основывается на сопоставлении экспериментально полученных задержек времени распространения сигнала с рассчитанными численно по лучам или модам, довольно серьезные трудности связанны с проблемой идентификации

рассчитанных приходов с измеренными в эксперименте. Достаточно остро эта проблема встает для пологих лучей распространяющихся в канале, так как эти наиболее информативные приходы имеют близкие времена задержки, и при проведении экспериментов на мелководных акваториях, что и способствовало привлечению метода согласованного поля (МСП) к задачам акустической томографии океана. Данный метод заключается в замене обратной задачи на прямую многократно рассчитанную С различными параметрами задачу, минимизируется оптимально выбранная невязка между полями, которые были измерены экспериментально и рассчитаны численно. В число неизвестных могут быть включены такие характеристики волновода как положение приемных и излучающих систем по расстоянию и глубине, поле скорости звука, параметры грунта, поле течений [30] и т.д. Подробное описание метода применительно к акустической томографии океана представлено в работе [31]. На основе численных расчетов представлен анализ возможностей трехмерной реконструкции двух вихрей находящихся на акватории 250 км² с радиусом 125 и 175 км и глубиной неоднородностей от поверхности до 900 метров для условий глубокого моря (4500 метров). По периметру исследуемой акватории располагалось 36 источников взрывного типа, частота сигнала, выбранная для анализа, составляла 20 Гц, прием осуществлялся четырьмя вертикальными антеннами, перекрывающими диапазон глубин от 0 до 1000 метров. Расчет акустического поля производился методом нормальных волн. Для уменьшения пространства поиска параметров для описания профилей скорости звука были использованы эмпирические ортогональные функции, которые являются одними из наиболее эффективных бызисных функций для описания (разложения) эмпирических случайных функций, в частности, профилей скорости звука. В большинстве случаев необходимо всего две или три таких функции для точного представления профиля. Таким образом, пространство поиска параметров уменьшается до нахождения двух или трех коэффициентов разложения по ЭОФ на каждый профиль скорости звука, вместо того, чтобы искать все значения этого профиля на каждом горизонте. Кроме того, профиль, разложенный по ЭОФ,

становится более гладким, что положительным образом сказывается при моделировании акустического поля, однако, для описания аномальных профилей, значительно отличающихся от профилей образующих ЭОФ, может т.е. понадобиться большее количество коэффициентов разложения [23, 31, 37]. Показано, что при использовании ЭОФ, оптимальной расстановки источников и приемников (обсуждается разное расположение приемных вертикальных антенн на акватории и варьируется их число от трех до четырех), применении итерационной процедуры (31 итерация), возможно довольно точно восстановить трехмерные параметры скорости звука морской среды. Продолжением описанных выше исследований стала статья [32] с более сложными моделями реконструируемой среды. В первом случае трехмерное «реалистичное» неоднородное глубокое море 1000 км² (4 горизонтальных антенны длиной 1000 м, 174 источника звука 20 Гц), во втором – слоистое мелкое море, площадь акватории 10 км², 1 горизонтальная антенна длиной 1600 м, 36 источников звука 100 Гц. Продемонстрировано, что при должном количестве пространственно развитых приемных решеток и значительном количестве одиночных излучателей возможна реконструкция профилей скорости звука водного слоя и параметров грунта.

При проведении океанологических исследований обширных морских акваторий с помощью контактных методов (протяженные гидрологические разрезы) есть вероятность пропуска неоднородностей с размерами меньшими, чем соседними станциями измерения. Прямые дистанция между измерения океанологических характеристик можно дополнить, если в начальной точке разреза установить приемник или излучатель звука и в каждой последующей точке разреза, по мере удаления от места установки акустической системы, проводить параллельно гидрологические и акустические измерения. В работе [33] описывается метод пошаговой акустической томографии морской среды. заключающийся в последовательной реконструкции поля скорости звука в промежуточных пространственных ограниченных интервалах между близлежащими станциями измерений гидрологии, что существенно снижает

степень неоднозначности при решении обратной задачи. Проведено моделирование на основе экспериментально полученных данных акустического зондирования и контактных измерений в присутствии внутритермоклинных «холодной» и «теплой» линз на дистанциях 260 км между корреспондирующими точками. Отмечено, что, наиболее крутые лучи мало подвержены влиянию неоднородности, в то время как наиболее пологие напротив очень чувствительны и при использовании линейной схемы лучевой томографии существует большая вероятность интерпретировать «теплую» неоднородность (линзу) как «холодную» на основе данных задержек последних. По этой причине восстановление было проведено на основе анализа акустических приходов из «общей» области, не включающей наиболее пологие и крутые лучи.

В традиционной АТО, предложенной Манком и Вуншем [12], применяются заякоренные источники и приемники звука, отличный от нее метод динамической заключается в использовании приемных/излучающих томографии систем. которые опускаются с борта судна и буксируются по исследуемой акватории. Совокупное использование перемещаемого гидрофона/излучателя и стационарно установленной томографической сети приводит к образованию многочисленных акустических трасс и, как следствие, к улучшению горизонтального разрешения поля скорости звука. В работе [34] рассмотрена схема динамической томографии, где, в отличии от предложенной в [35], применялись мобильные приемные системы вместо излучающих. По бассейну западной части Средиземного моря вблизи оси подводного звукового канала (ПЗК) были установлены 7 трансиверов на якоре, зондирование производилось сигналами на основе 511-символьных Мпоследовательностей, 4 периода несущей на символ, с центральной частотой 250 и 400 Гц. Дистанции от трансиверов до судна, осуществляющего прием на перемещаемый одиночный гидрофон, варьировались от 10 до 660 километров. Гидрофон погружался на глубину 300 м при расположении оси ПЗК на 150 м для уменьшения неразрешаемых по времени поздних акустических приходов. Экспериментальные исследования показали, что динамическую томографию возможно реализовать на практике, однако уменьшение неоднозначности при

решении обратной задачи связано с решением таких технических трудностей как точное позиционирование и синхронизация всех приемо-излучающих систем.

В лучевом представлении схема разностной томографии, в которой взамен абсолютных значений времен распространения сигнала, полученных экспериментально и для опорной среды, используются разности времен задержки выбранного относительно «эталонного» луча, которые являются менее чувствительными к систематическим ошибкам измерения, описана в работе [36]. Также рассмотрен вопрос выбора оптимальной расстановки источников и $z(\alpha)$ -диаграммы, представляющей собой приемников звука с помощью зависимость горизонта прихода луча по глубине от угла выхода из излучателя на расстоянии. Затрагивается момент выбора пространственного заданном томографических расположения пар относительно горизонтального местоположения неоднородности на акустической трассе.

Как уже отмечалось, при осуществлении приема акустических сигналов на вертикальные или горизонтальные цепочки гидрофонов для восстановления параметров среды может быть использован метод согласованного поля (МСП), освобождающий ОТ потребности В решении нетривиальной проблемы идентификации рассчитанных лучевых или модовых приходов с измеренными. Вместе с тем, в работе [37] авторами предлагается подход на основе МСП, но уже при использовании одиночного приемника, получивший название метода согласованных временных откликов, в котором согласуются рассчитанное и измеренное звуковое поле во временной области. Эксперимент проводился в глубоком море, стационарно установленным источником звука излучалась Мпоследовательность с частотой несущей 250 Гц, прием осуществлялся с дрейфующего судна одиночным гидрофоном на глубине ~300 м на дистанциях 41 и 62.4 км от излучателя. Измерение вертикальных профилей скорости звука осуществлялось на тех же дистанциях. В месте постановки источника гидрологические измерения не проводились, задача заключалась в реконструкции вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в начальной точке трассы. Для расчета зависимостей функции отклика канала от времени использовались
первые четыре коэффициента разложения ВРСЗ по ЭОФ, определяемые, как по измеренным профилям, так и по информации из банка данных соответствующей местоположению и сезону измерений, а также вариации изменения глубины приемника (ошибка определения составляла 20 м) и длины акустической трассы (ошибка вычисления по судовым навигационным приборам ~ 100 метров), то есть зависимость функции корреляции от шести переменных. Далее производилось вычисление среднеквадратичной невязки между рассчитанной И экспериментальной корреляционными функциями. Следует упомянуть, что при реконструкции не использовались абсолютные времена распространения, так как ввиду дрейфа приемника их определение производилось с большими ошибками, поэтому при анализе совмещались первые измеренные и рассчитанные приходы. Показано, что по схеме нелинейной лучевой томографии, по методу согласованных временных откликов имеется принципиальная возможность восстановления, поля скорости звука, так уточнение геометрии как И эксперимента, впрочем, совместная реконструкция ВРСЗ и дистанции между излучателем и приемником влечет за собой дополнительную неоднозначность в получаемых результатах.

Акустическая томография океана получила широкое признание как метод мониторинга, как полей температуры, так и полей течений. Ввиду того, что скорость звука на 3 – 5 порядков больше, чем скорость течения, в большинстве случаев ее вариации влияют на акустическое поле гораздо сильнее движущегося потока жидкости. Тем не менее, существует значимое физическое различие - в отличие от возмущений скорости звука, течения нарушают взаимность акустического поля, т.е. инвариантность поля к перемене местами излучателя и приемника. Распространение звука по течению происходит быстрее, нежели против течения, в то время как вариации поля скорости звука идентично воздействуют на время распространения в противоположных направлениях. Следовательно, путем измерения невзаимности акустической величины (разности ее значений при зондировании морской среды во встречных направлениях), имеется возможность отделения слабых эффектов течений от, оказывающих

превалирующее влияние, эффектов изменения скорости звука. Впервые в работе [38] было предложено использование разницы во времени задержки акустических импульсов при распространении в противоположенных направлениях между разнесенными трансиверами (обратимыми горизонтально акустическими преобразователями, выполняющими функцию, как приемников, так и излучателей звука, либо близко расположенные приемники и источники звука) для измерения течений. В работе [39] была произведена экспериментальная апробация данного метода. Каждые 30 секунд одновременно излучались во встречных направлениях акустические импульсы (13символьные коды Баркера) на центральной частоте 2250Гц двумя трансиверами, свешанными с борта судов находившихся на расстояние 25 км друг от друга. Трансиверы состояли из излучателя и близко расположенной к нему вертикальной 18метровой приемной антенны состоящей из 4 гидрофонов. Эксперимент проводился в условиях глубокого (3.5 км) моря, оба излучателя устанавливались на глубине 1 км вблизи оси подводного звукового канала. По разнице во времени распространения чисто водных лучей, не испытывающих отражения от дна и поверхности, были восстановлены «средние по лучу» скорости течений. Интерпретация данных различий во времени распространения во встречных направлениях сигналов проводилась по чрезмерно упрощенной модели, но данный показательный эксперимент привел к развитию дистанционных средств зондирования морской среды, в частности, В.Манк, консультировал и поддерживал автора [39] в проводимом исследовании, и двумя годами позднее в соавторстве с К.Вуншем они предложили метод и ввели сам термин «акустическая томография океана» [12], в который также вошло и встречное зондирование.

Для измерения продольной компоненты течений используется метод встречного зондирования, пространственно же разнесенные акустические трассы применяются для регистрации поперечной компоненты скорости течений методом акустической сцинтилляции [40]. Основой измерений служат задержки флуктуаций сигнала, которые измеряются на параллельно расположенных акустических трассах, и таким образом определяется поперечная компонента потока жидкости, перпендикулярно направленная относительно распространения зондирующего сигнала. В работе [2] ведется речь о двухчастотном акустическом методе мониторинга поперечных течений при измерении приливных течений в проливе. Данная методика была реализована ранее при измерении скорости ветра, с двухчастотной функции помощью когерентности радиоволн, распространяющихся в атмосфере. Флуктуации амплитуды и фазы когерентны в низкочастотной области и слабо когерентны в области высоких частот флуктуаций для акустических сигналов, имеющих разные частоты. Измерение скорости поперечного течения возможно при определении частоты срыва функции когерентности, разделяющей ЭТИ две полосы. Преимущество двухчастотного метода состоит в использовании только одной акустической трассы вместо двух параллельных трасс, как в сцинтилляционном методе.

Модовый подход также используется для реконструкции полей течений, восстановление основывается на параметрах отдельных мод, для выделения которых применяются вертикально-развитые антенны, где элементами являются трансиверы [41]. Вместе с тем, требуется высокая точность информации о пространственном местоположении трансиверов антенны. В свою очередь в качестве приемников могут применяться вертикальные антенны, состоящие из гидрофонов, при условии, что взаимодействием нормальных волн можно пренебречь [42].

В последнее время для измерения течений все большее применение находит использование высокочастотных акустических доплеровских профилографов (ADP, ADCP), обладающих преимуществами явными В сравнении С традиционными контактными методами. Тем не менее, следует упомянуть о некоторых ограничениях и недостатках присущих высокочастотным методам. Ввиду того, что поглощение звука быстро растет с увеличением частоты, дальности их действия ограничиваются пределами соразмерными с глубинами морей. Акустические доплеровские профилографы предназначены ДЛЯ определения распределения векторов скорости потока по вертикали, однако в горизонтальной плоскости измерения являются локальными. Для получения

распределения течений по акватории требуется создание дорогостоящей сети из множества таких приборов.

Как известно, неоднородности морской среды. связанные с пространственно-временной изменчивостью характеристик океанографических полей, имеют тесную связь с изменчивостью полей течений. В работе [11] анализируются возможности применения акустических допплеровских измерителей течений (ADCP) для исследования тонкой пространственной структуры и динамики вод на морских шельфах (мелкомасштабные вихри, внутренние волны). Обсуждаются недостатки и достоинситва данных приборов при заякоренных и буксируемых вариантах постановки. Показано, что акустические профилометры течений могут применяться для этих целей, но с некоторыми ограничениями, сязанными со значительными ошибками измерений, которые превышают заявленную производителями погрешность, что приводит к необходимости усреднения полученных данных по времени и пространству, а масштабы усреднения выбираются исходя из целей проводимого исследования, параметров аппаратуры, свойств морской среды и методики измерений.

К важнейшим проблемам акустики океана относится развитие методов акустической томографии океана, при этом большое внимание уделяется измерению вертикального распределения акустического поля. Обычно измерения вертикальной структуры производятся с помощью вертикальных антенн, но использование данной методики измерений приводит к таким проблемам как: трудоемкость создания, технические трудности в постановке достаточно протяженных антенн, дороговизна, ограниченность охватываемого интервала глубин. В большинстве случаев длина вертикальных антенн не превышает 100 м. Существуют и другие способы измерения вертикальной структуры. Одним из них является использование равномерно опускаемого гидрологоакустического зонда (ГАЗ), измеряющего звуковое давление и глубину нахождения устройства приема. В работе [1] рассмотрена схема измерений акустического поля при помощи ГАЗ в глубоком океане. Для устранения мелких флуктуационных максимумов и минимумов амплитуды акустического поля предложен способ

усреднения - спектральный анализ экспериментальных данных где, производится переход от амплитудного описания поля к пространственному спектру распределения акустического поля по вертикали. Показано неплохое совпадение экспериментальных данных с расчетным спектром, что дает возможность решения некоторых обратных задач акустики океана, а так же возможность применения ГАЗ для этих целей.

Для проведения акустического мониторинга течений в работе [43] был предложен метод согласованной невзаимности (МСН) объединяющий в себе традиционную акустическую томографию океана и метод согласованного поля (МСП). Решение обратной задачи методом МСП сводится к решению набора прямых задач состоящему из двух этапов. Первый этап заключается в численном моделировании распространения звука с набором разных значений возможных Второй этап состоит в сопоставлении параметров среды. результатов моделирования и эксперимента. МСП основывается на допущении, что чем точнее совпадают рассчитанное и экспериментально полученное звуковое поле, ближе модель соответствует истинной среде распространения. Поля тем сопоставляются с помощью количественной меры их подобия – ценовой функции, зависящей от данных эксперимента и параметров модели, варьируя которые находится такой набор параметров, при котором достигается минимум этой функции. Ценовой функцией, например, может служить среднеквадратичная невязка времен распространения, ИЛИ какой-либо другой величины, рассчитанного и экспериментального сигналов. Ввиду сложности структуры акустического поля в мелком море зачастую многие отдельные лучевые приходы не разрешаются во времени, что препятствует идентификации, однако сложность структуры приходов при использовании МСП позволяет произвести выбор среди близких моделей среды распространения. В работе [44] авторами исследуется акустических величин, возможность применения невзаимности различных помимо традиционно используемой невзаимности времен распространения, для мониторинга течений при встречном зондировании. Численные эксперименты показали, что в низшем порядке невзаимность фазы поля, по сравнению с

невзаимностью интенсивности звука и комплексного акустического поля, является малочувствительной к таким вариациям как: скорость звука, дальность распространения, плотность среды, топография дна. В связи с этим, в ценовых функциях [44, 45] использовалась невзаимность фазы в качестве основного источника информации, в последующей работе [46] вместо невзаимности фазы рассчитывались значения ее синуса и косинуса, что позволило избавить результаты реконструкции от зависимости неоднозначности определения фазы, так как ее измерения возможны только «по модулю 2π » (не известно число ее полных периодов) [47].

В работе [44] моделировалось зондирование монохроматическим сигналом с частотой 100 Гц, томографическая пара состояла из единичного трансивера на глубине 360 м и синтезированной вертикальной антенны [1] трансиверов, расстояние между корреспондирующими точками 20 км, при глубине моря 400 м. Среда распространения предполагалась слоистой. Применение антенны с синтезированной апертурой обусловлено малочувствительностью MCH К неопределенному положению трансиверов, рассматривались варианты антенн с различным количеством элементов, разной глубиной их расположения и расстоянием между приемоизлучателями. Исследовалась чувствительность МСН на основе невзаимности фазы, полученный минимум ценовой функции имеет довольно выраженный минимум, который достаточен для восстановления профиля течений, при условии отношения сигнал-шум в 10 дБ, невязки длины трассы в 50 м, отклонении антенны на 10° от вертикали, систематических невязок (0.25 м/с) и случайных флуктуаций (0.5 м/с) ВРСЗ, ограничения длины (до 150 м) и числа трансиверов (до 16) антенны.

Организация синтезированной апертуры антенны возможна с помощью изменения глубины расположения единичного трансивера, что может быть осуществлено с борта судна или лебедки установленной на дне, однако МСН не может быть осуществлен одиночными установленными стационарно трансиверами. В следующей работе по МСП [47] обсуждается возможность применения многочастотного монохроматического зондирования и на основе

численных экспериментов показывается возможность совместного использования данных о зависимости невзаимности фазы от частоты и глубины, что позволяет в некоторых случаях ограничиться меньшим количеством трансиверов в антенне. В работе [162] рассмотрен метод анализа угловой структуры акустических приходов, основанный на преобразовании Хусими. Метод позволяет с помощью вертикальной антенны из гидрофонов, которая перекрывает лишь частично водную толщу, приближенно установить связь между волновым полем и лучевыми приходами.

В работе [48] обсуждаются возможности акустической томографии в условиях мелкого моря, где значительную роль играют отражения от дна и водной поверхности, и в сравнении с глубоким океаном отмечается существенная нестабильность амплитудно-временной структуры акустических приходов. Для проведения экспериментальных исследований на шельфе Черного моря были установлены на дно три трансивера, геометрия расположения которых образовала треугольник с длиной сторон около 1 км. Глубины установки для двух приемоизлучателей составляли 41 метр, и 46 метров для третьего с пологим линейным перепадом рельефа дна относительно двух других. Излучались 2047-М-последовательности 10 символьные с частотой несущей кГц. c последовательным временным разнесением межу посылками OT каждого трансивера 3с. Синхронизация осуществлялась посредствам GPS приемников расположенных на буях и соединенных кабелем с приемопередающими акустическими системами, с точностью порядка 10 мкс. Гидрологические условия характеризовались практически изоскоростным верхним слоем. резким термоклином и придонным слоем с небольшим отрицательным градиентом. Для реконструкции использовалась модель состоящая из двух изоскоростных слоев и варьировалась их глубина, соответствующая изменению нижней границы термоклина. Восстановление скорости звука в приповерхностном и придонном каналах, и течений в них, а также смещение границы раздела между слоями, проводилось по вариациям времен трех стабильных идентифицированных групп приходов (из 9 наблюдаемых) по методу лучевой томографии [12]. Уточнение

длин трасс было проведено расчетным путем, методом согласованных временных откликов [37]. При инверсии, в приповерхностном слое, использовался метод наименьших квадратов в качестве функционала невязок уравнений и процедура регуляризации с привлечением априорной информации. По результатам встречного зондирования получены проекции течений для трех акустических пересчитаны в трасс, которые были горизонтальные векторы течений. Сопоставление результатов рассчитанных течений для приповерхностного слоя (длительность 22 часа) и двух измерений ADP в 5-м часу и 3-мя часами после окончания акустического зондирования показывает близкие значения ПО скоростям и направлениям течений. Однако в придонном слое наблюдается сильная изменчивость, как направлений, так и скорости течений с периодом менее получаса, что может быть связано с наличием короткопериодных внутренних волн, в этом случае требуется менее упрощенная модель среды и проведение более детального восстановления ВРСЗ и течений. Измерения ADP в придонном слое давали неверные результаты ввиду отсутствия объемных рассеивателей [11]. Также по рассчитанным средним скоростям течений на трех трассах была вычислена средняя циркуляция по замкнутому контуру был образован треугольника, который установленными трансиверами, И получены значения средней завихренности поля скоростей течения.

При проведении томографических работ в условиях мелкого моря, например, при наличии придонного ЗВУКОВОГО канала И расположении приемников и источников звука вблизи дна, довольно часто наблюдается значительное искажение траекторий распространения многократно отразившихся от дна лучей даже при малых изменениях ВРСЗ в этом канале, что указывает на выход за границы применимости традиционной линейной томографии [12]. В связи с ЭТИМ В работе [49] предлагается комбинированный метод, основывающийся на методе согласованных временных откликов [37] и линейной лучевой томографии [12]. Реконструкция проводится в два этапа. Первый этап заключается в вычислении корреляционной функции между измеренными и набором рассчитанных импульсных характеристик с различными градиентами в

придонном слое, и выборе опорного состояния среды исходя из максимального корреляции для большинства акустических приходов, значения a также уточнении расстояния между корреспондирующими точками. Второй этап состоит в реконструкции ВРСЗ и поля скоростей течений (в случае встречного зондирования) методом линейной лучевой томографии. Условия описанного в [49] эксперимента были таковы, что собственными лучами, количество которых оказалось близко к сотне, были образованы компактные группы, сформировавшие единые импульсные приходы. В связи с этим каждая группа лучей описывалась одним «эффективным» усредненным уравнением, для этого производилось почленное сложение уравнений для лучей входящих в эту группу и деление на их число. В итоге получается система для усредненных величин с меньшим числом уравнений равным количеству групп приходов. Далее при решении обратной задачи к данным уравнениям был применен метод наименьших квадратов и больших регуляризатор не допускающий вариаций скорости звука И ограничивающий ее градиенты. В последующей работе [50] описывается влияние внутренних волн на область придонного термоклина и, как следствие, сильную изменчивость акустических сигналов распространяющихся в придонном канале.

В статье [51] обсуждаются проблемы линейной томографии мелкого моря основанной на времени распространения акустических приходов. На основе численных расчетов с помощью линейной инверсии показывается, что для глубокого моря количество разрешенных приходов, при условии расположения источника и приемника звука на разных глубинах, соответствует количеству независимых приходов. Для осуществления линейной томографической инверсии требуется использование информации о времени распространения только стабильных и разрешенных во времени акустических приходов, и хотя в условиях мелкого моря может наблюдаться большое их количество, как канализированных, так и отражающихся от поверхности и дна, далеко не все из них подходят по этим критериям. Более того, количество приходов несущих независимую информацию о среде меньше, а иногда и намного меньше, чем число разрешенных приходов,

что и показано на примере подробного анализа среды с постоянной скоростью звука посредством лучевой теории.

Идея использования альтернативных источников акустических сигналов, таких как, например, шум от проходящих судов на оживленной морской трассе для целей акустической томографии океана была впервые предложена в работе [52]. Также для этих целей возможно использование шумовой составляющей ветрового волнения, как, например, в работе [53]. В пассивной акустической томографии океана в отличие от «активной» используемые сигналы обладают неизвестными характеристиками и неподконтрольны экспериментаторам, их амплитуда и ширина полосы флуктуируют, а положение источника сигналов обычно неизвестно и возможно изменяется со временем. В работе [54] представлены результаты первой экспериментальной реализации пассивной акустической томографии в условиях глубокого моря. Эксперимент проводился в северной части Тихого океана при глубине места 1800 метров, использовались две вертикальные линейные антенны состоящие из 20 гидрофонов каждая и располагавшиеся на глубинах от 400 до 1100 метров, дистанция между антеннами составляла 3500 м. Запись окружающего шума осуществлялась в течение 20 минут через каждые четыре часа в диапазоне частот 6-130 Гц. Контроль смещения элементов антенн осуществлялся сетью транспондеров располагающихся на дне. С помощью функции взаимной корреляции (ФВК) окружающего шумового поля полученного на гидрофонах двух антенн возможно выявление волновых фронтов достигающих одной точки и распространяющихся в окрестности другой точки, однако требуется достаточно большое время усреднения (несколько десятков часов). При фиксированном расстоянии между антеннами корреляция данных, полученных на отдельных приемниках двух антенн, позволяет произвести оценку зависимости ФВК OT времени задержки И глубины гидрофонов. Продемонстрированы возможности пассивного восстановления усредненных во времени (несколько суток) вертикальных профилей скорости звука при помощи корреляции шумов полученных на вертикально развитых антеннах, однако стоит учитывать трудоемкость в постановке, эксплуатации и контроле, как самих

вертикальных антенн, так и контролирующих смещение систем транспондеров. В работе [161] описан эксперимент с применением пассивной схемы шумовой интерферометрии, где в качестве источника сигналов использованы шумы океана, а выделение мод осуществляется одиночными гидрофонами. В работе [163] исследуется возможность использования лучевой томографии для восстановления вертикальных профилей скорости звука и течений по двухточечной функции корреляции шумов океана. Базируясь на принципах пассивной акустической томографии, в работе [55] была предложена, а позднее [56] и апробирована экспериментально идея слепой акустической томографии океана (САТО). В ее цели, помимо восстановления температуры океана посредством альтернативных пассивных источников звука, также входит полное восстановление среды (глубина волновода, свойства дна, расположение источника и приемника (геометрия вертикальной антенны)) и энергетического спектра источника. Таким образом, основной задачей САТО является поиск решения многопараметрической задачи. Возможным методом при решении такого рода задач является метод акустической фокализации, предложенный в работе [57], суть которого заключается во включении дополнительных (уже известных) параметров в лучшего процесс поиска для нахождения соответствия результатов моделирования и натурного эксперимента. Эксперимент [56] проводился в прибрежных водах Португалии. Вертикальная антенна из 16 гидрофонов охватывала диапазон глубин от 30 до 90 метров при глубине места 120 м и использовалась в качестве приемной системы. Было реализовано три варианта подсветки окружающей среды и три акустические трассы. В первом случае излучались ЛЧМ (170-600 Гц) буксируемым и удаляющимся от приемной системы источником (ровное песчаное дно, 120 м глубина, до 5.5 км дистанция, горизонтально-однородная среда). Bo 2-м излучались псевдослучайные полосой 150-1100 последовательности с частот Γп буксируемым И приближающимся источником (неоднородное неровное дно, перепад глубин 120-80м, до 5.5 км дистанция, горизонтально-неоднородная среда). В 3-м шумы самого судна идущего со скоростью ~10 узлов использовались как акустическая

подсветка (неровное дно, перепад глубин 120-100м, до 3.2 км дистанция, горизонтально-однородная среда). Для описания среды использовалось 2 коэффициента ЭОФ и модовое приближение, для реконструкции параметров – генетический алгоритм. Неплохое соответствие рассчитанных и измеренных значений получено в 1-м случае, в 2-х других помимо чрезвычайной сложности многопараметрической задачи, по мнению авторов [56], серьезные погрешности были внесены неконтролируемыми изменениями геометрии вертикальной приемной антенны.

Результаты экспериментальных измерений временной когерентности акустических сигналов обсуждаются в работе [58]. Измерения проводились в трех разных шельфовых зонах со слабыми, умеренными и сильными проявлениями внутренних волн. Акустические широкополосные сигналы (ЛЧМ, Mпоследовательности) охватывали диапазон низких (ниже 1.5 кГц), средних (от 2 до 5 кГц) и высоких (20 кГц) частот. Рассматриваются акустические трассы длинной 3, 5, 10 и 42 км. На основе эмпирического анализа получены зависимости временной когерентности от частоты акустического сигнала, дистанции между приемником и излучателем, и среднеквадратической девиации скорости звука, показано, что последние две, существенно отличаются от теоретически рассчитанных для условий глубокого моря. Полученные результаты могут быть использованы при планировании экспериментов, анализе полученных данных и проектировании гидроакустических систем мониторинга неоднородностей морской среды.

1.2. Проблемы акустической томографии океана

1.2.1. Выбор опорного состояния среды

Выбору опорного состояния среды (поля скорости звука) присущи определенные трудности. В районах, где наблюдается повышенная динамическая изменчивость океана реальное поле скорости звука отличается от климатического-среднего или средне-сезонного и их использование в качестве

опорных в рамках линейной томографии затруднительно. Не исключен вариант, что на момент начала эксперимента, флуктуации скорости звука настолько велики, что линеаризация неприменима. Целесообразным представляется выбор состояния среды измеренного на момент начала эксперимента в качестве опорного, однако гидрологические измерения на обширной акватории растянуты во времени и ввиду динамической изменчивости среды и разного времени проведения измерений, полученное таким образом ПСЗ, будет отличаться от его реального состояния. Тем не менее, при не слишком больших отличиях, можно воспользоваться итерационной процедурой [59, 60] для уточнения самого опорного состояния. Стоит также отметить, что при высокой динамической активности среды, с течением какого-то периода времени выбранное опорное состояние, удовлетворяющее условиям распространения на момент начала томографических измерений, может оказаться неприемлемым для дальнейшего проведения инверсии по причине сильных изменений ПЗС, даже с учетом возможности применения метода итераций. В таком случае необходимо проведение новых инструментальных измерений гидрологических параметров среды, либо применение, например, метода согласованного поля [61], который требует многократных (каждый раз для нового набора параметров среды) трудоемких вычислений. после чего можно продолжить процедуру восстановления в рамках линейной томографии [63], до наступления следующего такого момента, после которого рассчитывается новое распределение скорости звука по МСП и так далее.

1.2.2. Выбор приближения описывающего зондирующее звуковое поле и идентификация приходов

В случае линейной лучевой акустической томографии океана входными данными для решения томографической задачи служат разности времен прихода Δt_n сигнала по *n*-му лучу Γ_n измеренные экспериментально и рассчитанные для опорного луча Γ_n^0 [12, 62]. Предполагается, что возможно установить

соответствие между Г_n и Г⁰_n, т.е. провести идентификацию лучей. В большинстве осуществляют случаев идентификацию сравнением экспериментально измеренной временной структуры акустических приходов по отдельным лучам (группам (квадруплетам) лучей при невозможности их разделения [48, 49, 63, 64] с рассчитанной для опорного состояния среды временной структурой приходов. Затруднения идентификации возникают, когда времена распространения отдельных приходов при многолучевости настолько близки, что интервалы между ними оказываются меньше вариаций по времени самих этих приходов. Также сложности возникают при временном разрешении системы регистрации сигналов задержка между лучевыми При меньшем, чем приходами. данных обстоятельствах существует вероятность ошибочного присвоения времени распространения одного луча другому.

В силу ряда причин, некоторые лучи принципиально не поддаются идентификации. Как уже отмечалось выше, при сильной изменчивости среды могут появиться траектории лучей не имеющие аналогов в опорной среде, или же ранее идентифицированные лучи исчезнут, т.е. их траектории изменятся настолько, что не смогут попасть в приемную систему. Значительное количество исчезнувших ранее идентифицированных лучей или появившихся и не поддающихся идентификации указывает на необходимость введения нового удовлетворяющего опорного состояния среды изменившимся условиям распространения акустических сигналов. Затруднения с идентификацией могут возникнуть и по причине флуктуаций интенсивности отдельных лучевых приходов (перестанут выделяться на фоне шумов), что может быть связанно с изменением факторов фокусировки, увеличением уровня окружающего шума среды, волнением поверхности моря, появлением пузырьков, взвесей или иных рассеивателей в водной среде.

Повышение эффективности процедуры идентификации возможно путем привлечения дополнительной информации, такой как углы приходов акустических сигналов, что может быть осуществлено с помощью вертикальных

или горизонтальных антенн [65, 66], либо векторного приемника (комбинированного приемника) [67, 68].

Преимущество модового подхода заключается в том, что моды несут информацию о различных по глубине горизонтах ввиду своей различной вертикальной структуры. Модовой томографии основанной на измерении вариаций групповых скоростей отдельных мод при использовании одиночного гидрофона в качестве приемника [17, 69] присущи те же проблемы идентификации, что и для лучевого метода основанного на измерении времен приходов, требуется довольно большое расстояние между источником и приемником, на котором отдельные импульсные приходы могут быть отождествлены с индивидуальными модами [70]. При использовании пространственно развитых приемных антенн возможно измерение групповых или фазовых скоростей отдельных мод [72]. Однако в условиях натурного эксперимента из всех распространяющихся мод может быть выделена лишь некоторая их часть, возможность их выделения зависит от достаточно полной априорной информации о волноводе [71], зависит от частоты и длительности зондирующего сигнала, от характеристик волновода, а также, стоит отметить, что расстояние на котором возможно разделение отдельных мод достаточно велико. Использование модового представления (по мнению авторов [18]) целесообразно для условий мелкого моря на дистанциях более нескольких десятков километров на частотах 100-1000 Гц и ниже, когда лучевое представление теряет силу.

Метод согласованного поля [30, 73, 74] может быть применен при использовании развитых в пространстве горизонтальных или вертикальных приемных многоэлементных антенн. Этот метод освобождает от необходимости решения проблем идентификации рассчитанных приходов с измеренными. МСН заключается в замене решения обратной задачи путем многократного расчета прямой задачи с различными параметрами, и минимизированием невязки между рассчитанными и экспериментально измеренными полями.

В случае применения одиночного гидрофона возможно использования подхода, на основе МСП, метода согласованных временных откликов [37, 63], в

котором измеренное и рассчитанное звуковое поле согласуются во временной области, однако стоит учитывать его вычислительную трудоемкость и необходимость привлечения большего количества априорной информации для уменьшения неоднозначности при решении обратной задачи.

Согласно мнению авторов [28], для успешной идентификации необходимо:

- выбирать в качестве опорного распределение поля скорости звука близкое к реальному;

- отслеживать временную структуру акустических приходов с достаточно малым шагом по времени;

- своевременно обновлять опорное состояние среды.

1.2.3. Оптимизация расстановки источников и приемников

Одной из важных проблем томографии океана является оптимизация расстановки источников и приемников акустических сигналов с целью получения как можно большего числа независимых акустических приходов, т.е. приходов несущих независимую информацию о той или иной части среды, и получении максимально возможного разрешения акустических приходов. Основополагающим фактором при выборе мест постановки источников и приемников выступают условия распространения акустических сигналов в районе планируемого эксперимента. Оптимальная расстановка должна обеспечить: технически осуществимый прием и разделение (разрешение) акустических приходов на фоне шумов; надежную и устойчивую идентификацию приходов; получение максимального числа независимых приходов.

Задача оптимизации расположения излучателей и приемников может быть формализована таким образом (например, в рамках лучевой теории): каждой паре источник – приемник соответствует набор значений:

- углы выхода собственных лучей, которые соединяют источник и приемник;

- времена акустических приходов по собственным лучам;

- фактор фокусировки для лучей приходящих в приемник.

С помощью полученного набора данных возможно произвести оценку:

- ширины спектра углов выхода полученного набора лучей, чем он шире, тем лучше;

интервалов разнесения по времени между акустическими приходами, чем
больше интервалы, тем проще произвести прием, разделение и идентификацию
измеренных приходов с рассчитанными;

- возможности выделения акустического сигнала на фоне шумов, чем больше фактор фокусировки, тем больше мощность и, как следствие, надежность используемого сигнала.

Совокупность полученных оценок позволяет сделать вывод о пригодности данной пары источник-приемник как элемента томографической схемы или же необходимо произвести поиск более удачного расположения этой томографической пары.

1.2.4. Моделирование и численные расчеты

Основной вопрос, возникающий при обсуждении акустической томографии океана, это - точность восстановления параметров среды по результатам ее акустического зондирования/мониторинга. Немаловажным является адекватность модели описания среды распространения, и выбора приближения описывающего звуковое поле. Выбор основывается как на физической стороне вопроса (свойства волновода (геометрические размеры, свойства границ, изменчивость), временные И пространственные параметры исследуемой неоднородности, частоты и проходимые дистанции зондирующих сигналов), так и на технической стороне вопроса (используемые акустические системы, наличие средств и возможности сбора достаточного количества требуемой априорной информации, точности позиционирования И синхронизации систем). Более того, качество томографического восстановления среды в сильной степени зависит от точности измерений параметров акустических приходов (время распространения, амплитуда, и т.д.), которая зависит от совершенства применяемой акустической, регистрирующей/записывающей аппаратуры, и способа обработки данных.

Если рассматривать численные расчеты (прямое моделирование) с точки зрения натурного эксперимента, то они в первую очередь позволяют определить адекватность выбранной модели среды и определить, на сколько точно соответствуют рассчитанные параметры акустического поля экспериментально измеренному. В последующем, позволяя оценить потенциально достижимую точность томографической реконструкции среды в реальных условиях. С другой стороны, если речь идет, в принципе, об оценке потенциальной точности самого томографического метода инверсии, то данная процедура осуществляется проведением численных экспериментов «идеальных» В условиях, когда инструментальные ошибки «измерений» характеристик сигналов равны нулю, собственные лучи или моды безошибочно идентифицируются (выделяются), и звуковое поле, измененное неоднородностью с заданными параметрами, заранее известно. Однако стоит отметить, что точность реконструкции среды в условиях реального эксперимента, безусловно, будет хуже. Еще одной целью проведения численных экспериментов является анализ устойчивости томографического восстановления среды, когда варьируются различные элементы томографической системы, такие как: количество, места и способы расстановки излучателей и приемников, методы реконструкции и привлечения априорных данных [36].

1.2.5. Ошибки измерений

В условиях натурного эксперимента времена приходов акустических сигналов измеряются с ошибками, природа происхождения которых носит как чисто технический характер (недостаточность разрешения по времени измерительных средств, неточности синхронизации и позиционирования), так и природный: окружающие шумы моря, приливные и внутренние волны, волнение моря, изменение местоположения излучателей и приемников ввиду природного воздействия. В результате времена распространения звуковых сигналов, как правило, определяются со случайными и систематическими погрешностями, величина которых зависит в совокупности от этих двух факторов.

1.2.6. Синхронизация

Поскольку, в превалирующем числе случаев, основной информацией для решения томографических задач служат времена акустических приходов, то при использовании автономных источников и приемников звука, для осуществления координированной работы, требуется ИХ система единого времени. Следовательно, каждый из корреспондирующих элементов томографической схемы должен быть снабжен высокоточным прибором счета времени. При отсутствии автономных элементов, когда контроль и регистрация осуществляется в едином центре управления, синхронизация возможна и без установки высокоточных часов на приемниках и излучателях, однако, это накладывает жесткие требования к каналам связи центра управления-регистрации И контролируемыми системами.

1.2.7. Позиционирование излучающих и приемных систем

В большинстве случаев, при проведении широкомасштабных томографических экспериментов в океане в качестве носителей излучателей и приемников звука используются заякоренные буи. Смещения буев, вызванные воздействием океанических течений, от их первоначального положения могут достигать сотен метров, что, в свою очередь, приводит к появлению абсолютно погрешностей Применение неприемлемых В измерениях Δt . донных акустических приемопередатчиков (маяков) позволяет осуществлять контроль истинного местоположения излучателей/приемников (точность определения места составляет ~1 метр) и предотвратить появление ошибок позиционирования. Начальные координаты устанавливаемых на заякоренных буях акустических систем определяются с помощью приборов навигации плавсредства, с которого осуществляется постановка. Дальнейшее уточнение начального положения, необходимое по причине: погрешностей систем навигации, дрейфа при постановке, наличия течений и тому подобных – возможно при выполнении инверсии, когда в число подлежащих реконструкции неизвестных включаются и

малые неточности местоположения приемников и излучателей [75]. В случае использования одиночных (не развитых в вертикальной плоскости) стационарно установленных придонных систем отпадает необходимость постоянного контроля изменяющегося местоположения излучателей и приемников, ввиду отсутствия последнего. Координаты места постановки подобных систем также уточняются по данным акустического зондирования, либо в процессе реконструкции [48], либо (при наличии гидрологических данных на акустической трассе) по результатам прямого моделирования. При уточнении положения приемно-излучающих систем по акустическим данным, особенно когда идет речь о широкомасштабных экспериментах, дополнительными источниками ошибок могут служить океанические течения синоптических и глобальных масштабов, приводящие к возникновению флуктуаций времени приходов акустических сигналов [76, 77].

1.2.8. Шумы океана

Широкое томографических применение практике длительных В исследований получили автономные излучающие системы. Мощность излучаемого акустического сигнала подобных систем в большинстве случаев требуется обеспечить невелика. поскольку функционирование источника течение длительного периода времени при ограниченности сигналов В энергоресурсов. В результате на дистанциях порядка тысячи километров шумы океана превышают на несколько десятков децибел уровень принятого акустического сигнала. Применение, определенным образом кодированных, сложных импульсных акустических сигналов с последующим вычислением функций взаимной корреляции между принятым и излученным сигналами позволяет осуществить их выделение на фоне шумов [78]. Максимум, полученной таким образом, функции корреляции и отождествляется с временем прихода. При корреляционной обработке с помощью накопления сигнала, то есть увеличении длительности зондирующего сигнала, возможно многократное увеличение отношения сигнал/шум, однако существует предел. Длительность зондирующего

импульса ограничивается функцией временной когерентности акустического канала, т.е. декорреляции звукового поля, вызванной внутренними волнами и тонкой структурой поля скорости звука в океане [28].

1.2.9. Микролучевость

При распространении звука на большие дистанции, влияние внутренних волн и тонкой структуры скорости звука может привести к тому, что произойдет расщепление некоторого количества лучей на трубки «случайных» лучей, т.е. к проявлению такого явление как микролучевость. В результате сигнал, распространяющийся по этим «микролучам», имеет некоторое различие по времени задержки, что служит причиной интерференции и затягивания принимаемого сигнала во временной области. По результатам экспериментальных работ [79] для расстояния порядка 500 километров и частот зондирующего сигнала 206±25 Гц значение затягивания составило 10 мс. Возможными вариантами борьбы с микролучевостью могут быть: переход на более низкие частоты, временное усреднение измеряемых данных с интервалом усреднения не менее суток.

1.2.10. Устойчивые и не устойчивые лучи (моды)

Довольно часто в морской среде могут наблюдаться лучи (моды), которые малочувствительны к изменениям профиля скорости звука и, в связи с этим, обладающие стабильной и устойчивой структурой, что крайне удобно для осуществления идентификации при успешном выборе опорного состояния среды. В то же время, они являются малоинформативными, так как несут очень ограниченное количество информации об изменяющейся среде. Также существуют лучи (моды), которые, напротив, очень чувствительны к вариациям ПЗС, что делает их информативными для осуществления томографической реконструкции среды, но их структура значительно менее устойчива, а проведение идентификации затруднительно или вообще невозможно в рамках

линейной томографии или при использовании модели с невозмущенным опорным профилем скорости звука. Таким образом, следует искать некоторый компромисс при выборе акустических приходов, на которых будет основываться реконструкция среды, опираясь на результаты предварительного анализа и численного моделирования томографического восстановления.

1.2.11. Априорная информация

«Недоопределенность томографических задач является ИХ существеннейшей чертой, и обусловлена она тем, что, с математической точки зрения, подобные задачи поставлены некорректно.» [28, с. 12]. В превалирующем большинстве случаев в задачах акустической томографии океана число искомых неизвестных больше числа входящих в систему уравнений. Это говорит о системы уравнений, что приводит к необходимости недоопределенности привлечения дополнительной априорной информации, которая позволит получить единственное решение этой системы. Может случиться так, что при решении обратной задачи своего минимума функционал невязок достигнет в определенной области значений, а не в точке. Если рассмотреть случай двух переменных, то область значений примет вид линии, чтобы получить единственное решение, на основе априорной информации вводится, к примеру, критерий, требующий минимальности вариаций искомых переменных или же, в случае плавности вариаций, критерий, по которому модуль разности двух переменных будет минимален. При поиске решения томографической задачи априорная информация о типичных вариациях и градиентах скорости звука на исследуемой акватории может выступать в качестве стабилизатора, при помощи которого, например, ограничиваются вариации вертикальных и горизонтальных градиентов, не допускаются чрезмерные отклонения от значений опорного профиля. Чем меньше количество независимых проекций полученных в результате акустического зондирования водной большее толщи, тем значение имеет априорная информация.

Следует также отметить, что при исследовании неоднородностей с малыми временными масштабами относительно периода проведения измерений, априорная информация о более медленных неоднородностях может служить опорным фоном и использоваться в методе реконструкции. В свою очередь, по причине того, что некоторые типы неоднородностей существенно различаются по временным масштабам изменчивости, то посредством подбора соответствующего временного интервала анализа возможно разделить влияние оказываемое ими на морскую среду.

Как уже упоминалось, при решении томографических задач, в большинстве случаев, требуется привлечение априорных данных. Количество и характер которых зависит от погрешностей измерений, от необходимой точности восстановления параметров среды, и от реализованной схемы измерений. Совокупность этих факторов и определяет оптимальный алгоритм, который будет использоваться при численном решении обратной задачи.

Еще один аспект использования априорной информации, заключается в том, что априорные данные могут привлекаться непосредственно при планировании томографического эксперимента. Например, выбор мест расстановки источников и приемников может основываться на априорных данных о расположении, временных И пространственных характеристиках предполагаемой(мых) К исследованию неоднородности (неоднородностей), основываясь на предыдущих измерениях или их осреднениях за какой-либо период. Подобного рода априорные данные могут быть использованы для выбора: мест, глубин и количества используемых при зондировании приемо-передающих систем; типов и частот используемых сигналов; частоты дискретизации; метода зондирования, и Т.Д.

1.2.12. Временное сглаживание

При формировании звукового поля на фазовые соотношения между модами оказывают влияние мезо- и мелкомасштабные неоднородности, такие как временные изменения профиля скорости звука. Вследствие этого происходит

пространственное смещение минимумов и максимумов интенсивности звука, т.е. меняется интерференционная структура во времени, вызывая дополнительные возмущения в интенсивности звукового поля. Основываясь на том, что временные масштабы изменчивости синоптических неоднородностей существенно больше временной изменчивости мезо- и мелкомасштабных неоднородностей, можно осуществить усреднение интенсивности звукового сигнала по времени.

1.2.13. Неблагоприятные особенности томографии в условиях мелкого моря

При проведении томографических исследований в мелком море стоит учитывать неблагоприятные особенности данного типа акваторий. В большинстве случаев, практически все (зачастую все) лучевые траектории претерпевают отражения от неровной границы раздела двух сред – вода-дно и/или от взволнованной поверхности моря, что приводит К появлению труднопрогнозируемых погрешностей при расчете, как самих опорных лучей, так и времени распространения сигнала по ним. Более того, зачастую по причине малых времен задержек между соседними акустическими приходами, представляется возможным провести их разделение во времени, а, следовательно, провести их идентификацию. Однако, при данных обстоятельствах, существует возможность опираться на групповые свойства лучей, т.е. отслеживать максимумы огибающей групп лучевых приходов. В частности, авторы работ [80, 81] приходят к мнению, что из-за проблем с идентификацией, с помощью лучевой томографии возможно определить только средние по трассе параметры среды.

1.3. Комбинированные приемники в задачах исследования векторноскалярных характеристик акустических полей в морской среде

Впервые еще в 30х годах были предприняты попытки использовать приемник градиента звукового давления (ПГД) в задачах гидроакустики в Германии [178]. В 1942 году был изготовлен первый ПГД в США, но, из-за

проблем со стабильностью работы датчиков-преобразователей, эти ПГД не нашли практического применения [179]. В конце 40х годов на кафедре МГУ был создан отечественный векторный приемник (BΠ). B 1956 первый году была опубликована первая работа [180] обосновывающая принципы регистрации векторных характеристик поля (колебательной скорости частиц среды в акустической волне) посредством размещения приемного устройства внутри малой по сравнению с длиной волны сфере. В этом же году была опубликована и первая зарубежная работа [181], с описанием возможных конструкций приемника колебательной скорости (ПКС), а в середине 50х годов разработан приемник для ВМС США, который стал выпускаться серийно. В 60х годах в США разработали технологичный ПГД с пьезокерамическими датчиками, с характеристиками, сравнимыми с разработанными приемниками в 50х годах в МГУ. С 1968 года в США для нужд ВМС начался серийный выпуск РГБ, в которых использовались векторно-скалярные методы. В 1974 был создан комбинированный ПГД с двумя ортогональными каналами градиента давления, который с 1977 года стал использоваться ВМС США. Что касается серийного выпуска качественных векторных приемников в России, то он имел закрытый характер и доступ большинства исследователей к ним был серьезно ограничен.

Решение большого круга задач по определению свойств, местоположения, движения источника акустического шума, дистанционному определению параметров неоднородностей морской среды, основанных на измерении характеристик акустического поля, требует все большего усовершенствования акустических методов и аппаратуры, и полноты измерения и изучения этих характеристик.

Одной из таких задач является выявление поля излучения и характеристик слабых акустических источников низкой частоты, и их распознавание и классифицирование [182]. На сегодняшний момент проводятся многочисленные работы по повышению эффективности приемных систем обнаружения малошумных объектов путем улучшения алгоритмов обработки. Однако в работе [178] выдвигается предположение, что известные на данный момент методы

обработки информации получаемой с гидрофонов достигли своих предельных возможностей. Тем самым, дальнейшее развитие целесообразно проводить на основе увеличения объема данных об акустическом поле, что может быть достигнуто при помощи векторных приемников. К преимуществам векторноскалярных методов можно отнести их компактность, по сравнению с развитыми в вертикальной и/или горизонтальной плоскости антеннами, состоящими из гидрофонов (приемников звукового давления). Существует возможность определения местоположения звукового источника с использованием только одного комбинированного приемника (КП). Более того, за счет одновременных измерений различных компонентов акустического поля, возможен анализ характера движения частиц в волне, что существенно при постановке векторных приемников в грунт или на морское дно. Еще одной особенностью точечной КП является – возможность измерения потока акустической мощности (энергии), т.е. мощности. той части обшей которая выделение вызвана наличием сосредоточенных источников звука.

Повышение эффективности акустических приемных систем может быть осуществлено посредством увеличения объема данных об акустическом поле, что может быть реализовано при помощи векторных приемников, использование которых также дает возможность улучшения соотношения сигнал/шум. Применение комбинированных приемников позволяет получить дополнительную информацию о звуковом поле (градиенты звукового давления, колебательные скорости, углы приходов акустической энергии и т.д.), что позволяет на принципиально новой основе решать разнообразные задачи современной акустики [178]. Нагляднее всего преимущества использования комбинированных приемников на базе ВП проявляются при использовании одиночной приемной системы, что дает возможность нахождения местоположения звукового источника и углов приходов акустической энергии из точки.

В процессе исследования закономерностей формирования звуковых полей, вызванных гидродинамическими эффектами обтекания объектов, было выяснено, что такого типа поля способны присутствовать и в дальнем поле обтекаемых тел

[168, 169, 170]. Так как частота шумов обтекания находится, как правило, ниже 20 Гц, то такие сигналы способны преодолевать существенные расстояния. Определить пеленг на низкочастотный источник (1-10 Гц) возможно при использовании, или протяженной (порядка 1-2 км) антенны из гидрофонов, или точечного низкочастотного комбинированного приемника. Вместе с тем, основополагающей проблемой является борьба основной С помеховой составляющей на столь низких частотах – шумы обтекания и вибрации конструктивных элементов самой приемной системы, которые передаются на векторный приемник [171, 172], воздействию которых он более подвержен, чем приемник давления [173]. Соответственно, это привело к разработке методов и особого внимания к защите ВП от вибраций и низкочастотных шумов обтекания, в частности приведены данные в работе [171]. Также были разработаны второго порядка (биградиентные приемники), которые более приемники устойчивы к окружающим шумам за счет своей узкой направленности [174].

Стоит отметить, что в странах НАТО нашли широкое применение авиационные радиогидроакустические буи на базе двухкомпонентных приемников градиента давления, используемые для обнаружения подводных объектов. Также, приведенные в [175] тестовые испытания продемонстрировали, что приемная комбинированная система позволяет существенно улучшить разрешение определения местонахождения источников шумов на обшивке корабля в сравнении с применением антенных решеток состоящих из приемников давления.

Проблемы векторных приемников:

- Невзирая на многообразие конструкторских решений построения самих векторных приемников и приемных систем на их основе, большая часть из них на практике применяются чрезвычайно редко. Основной камень преткновения - это конструктивные проблемы, не позволяющие эффективно их использовать для метрологически обеспеченного решения задач обнаружения слабых сигналов в присутствии окружающих шумов океана [68].

- К следующему фактору можно отнести недостаточную экспериментальную проработку исследований при использовании векторных приемников и проблем устойчивости комбинированных приемных систем.

- В этот же список могут быть включены и осложнения при измерении амплитуд низкочастотных сигналов, поскольку одной из слабых сторон векторных приемников в данной частотной области является их существенная восприимчивость к помехам гидродинамической природы.

Преимущества векторных приемников:

Приведем наиболее значительные обстоятельства, при которых использование векторно-скалярных методов более предпочтительно, нежели применение стандартных решений на основе приемников давления.

1. Имеют место значительные ограничения геометрических размеров пространства предназначенных для приемной системы, и/или применение и контроль развитых в пространстве систем связан с существенными трудностями.

2. Нахождение пеленга на источник звука одиночным приемником.

3. Определение вертикальных углов приходов акустической энергии одиночной (точечной) системой.

Информация о местоположении источника звука в векторноскалярных характеристиках поля в точке

Определение направления на источник звука, в большинстве случаев, реализуется за счет распределения в пространстве нескольких приемников давления обеспечивающих направленные свойства приемной системы. В случае же использования векторно-скалярных методов, информация о местоположении источника уже содержится в измеряемых одиночным комбинированным приемником компонентах акустического поля.

Для определения направления на источник звука с помощью комбинированного приемника используют амплитудный либо фазовый метод.

Амплитудный метод. При распространении акустической волны происходит колебание частиц в том же направлении, следовательно, полярный и азимутный углы могут быть найдены из следующих соотношений амплитуд компонентов звукового поля:

$$tg \varphi = \frac{V_y}{V_x}; \quad tg \vartheta = \mp \sqrt{\frac{(V_x + V_y)^2}{V_z^2}}.$$

где *P* - канал приемника давления, *V_x*,*V_y*,*V_z* - горизонтальные и вертикальные каналы векторного приемника, φ - азимут, 9 – полярный угол.

Ввиду того, что характеристика направленности каждого канала векторного приемника симметрична, то требуются меры по устранению неоднозначности определения направления с помощью приемника давления. Для этого используется либо разность фаз, либо знак взаимной корреляции между каналами давления и векторного приемника.

Разностно-фазовый метод. Определение пеленга реализуется с помощью фазовращателя, одна из горизонтальных компонент сдвигается на 90° и производится суммирование с другой горизонтальной компонентой. Из разности фаз между сформированным таким образом сигналом и сигналом с приемника давления определяется пеленг равный этой разности.

Вертикальная компонента

В большинстве случаев в дальней зоне возможно найти только горизонтальный пеленг на объект. Это основывается на том, что горизонтальные компоненты колебательной скорости и поле давления ведут себя одинаково в слое и в свободном пространстве. По разности фаз звукового давления и любой горизонтальной компоненты возможно однозначное определение пеленга на объект, что обусловлено разностью хода лучей и одинаковостью знака распространяющегося звука в слое и глубоком океане. Как правило, амплитуда вертикальной компоненты акустического поля меньше амплитуды горизонтальной компоненты и меньше по амплитуде, чем звуковое давление.

Существенное влияние на амплитудное соотношение между этими величинами оказывает: профиль дна, ВРСЗ по акустической трассе, состояние водной поверхности, мелкомасштабные неоднородности. Как правило, вертикальная компонента ниже на 10-20 дБ горизонтальных компонент [178]. А фаза, по причине проявлений интерференции по вертикали, варьируется в больших пределах относительно звукового давления.

Обнаружение сигналов, помехоустойчивость, прием слабых сигналов на фоне помех

Использование векторных приемников в составе комбинированных систем позволяет получить дополнительную информацию о акустическом поле и расширить возможности и варианты ее обработки и анализа. Алгоритмы обработки сигналов с КП делятся на аддитивные и мультипликативные. Аддитивные – предоставляющие возможность сформировать характеристику направленности с требуемой ориентацией в виде диполя или кардиоиды с помощью одного точечного комбинированного приемника. Мультипликативные – здесь можно выделить регистрацию потоков акустической энергии и их реактивной составляющей. Сюда же можно отнести и комбинированные алгоритмы, в которых, к примеру, вначале формируют кардиоиду, перемножают с проекциями колебательной скорости, а потом определяют их взаимные спектры.

Векторные приемники могут применяться в низкочастотной томографии океана [200], задачах определения параметров грунта [199], изучении мелко- и крупномасштабных неоднородностей океана [178]. Размеры мелкомасштабных неоднородностей могут быть определены КП по углу пеленга на источник сигнала и дисперсию пеленга за это же время [201].

При низкочастотной томографии и распространении сигнала на дистанции порядка сотен и тысяч километров в большинстве случаев используются протяженные приемные антенны, но даже при их использовании соотношение сигнал/шум не всегда является удовлетворительным. Применяя только сформированную на КП кардиоидную характеристику направленности, можно

повысить соотношение сигнал/шум при изотропной помехе на 6-10 дБ. Это может обеспечить возможность сократить время накопления информации практически на порядок при реконструкции модовой структуры сигнала, а при двухэлементном приеме уменьшить время до одного часа взамен нескольких десятков часов [200].

В случае применения гидрофонов и развитых в пространстве многоэлементных антенн на их основе, возможности такого рода систем по выделению слабых сигналов на фоне помех широко исследованы и, по большому счету, известны. Однако, иначе обстоят дела для систем приема на базе комбинированных приемников, до сих пор имеются противоречия в оценках возможных выигрышей и недостатков.

1.3.1. Проблемы оценки помехоустойчивости комбинированных приемников. Вихревые структуры поля вектора акустической интенсивности

Практическое внедрение комбинированных приемников в мобильные и стационарные системы различного назначения связано с необходимостью объективной оценки помехоустойчивости КП. Стоит признать, что и до сегодняшнего дня сохраняются существенные разногласия во мнениях и количественных оценках касательно помехоустойчивости комбинированных приемников, которая зависит от состава и характеристик системы приема, применяемых алгоритмов обработки, методики проведения измерений и условий эксплуатации. На ранних этапах исследования помехоустойчивости КП, на основе теоретического зависимости отношения сигнал/шум анализа от времени усреднения для плотности энергии и плотности потока энергии [183] было сделано предположение, что, при отсутствии сигнала, на выходе векторного приемника будет центрированный случайный процесс, который будет быстро стремиться к нулю при сглаживании. Исходя из этого предположения, мог быть сделан вывод, что помехоустойчивость способна увеличиваться безгранично, т.к. при наличии сигнала постоянная составляющая процесса много больше. Ввиду

этого автором работы [178] было отмечено, что приему сигнала мешают акустической флуктуации потока мощности, которые имеют векторную структуру, вследствие чего, суммируются с полем сигнала как вектора, а не энергетически. В дополнении к этому, что в динамических шумах также содержится и анизотропная составляющая, которой при регистрации на приемник давления можно пренебречь, т.к. ее вклад в поле давления, как правило, незначителен. Однако, в случае КП эта составляющая (в случае отсутствия иных источников помех) определяет возможности алгоритмов обработки. В то же время, оценка помехоустойчивости КП авторами работ [184, 185] основывалась на критерии сигнал/помеха, который был развит для антенн состоящих из приемников давления. На основе этого было сделано предположение, что использование векторных приемников преимуществ не дает В помехоустойчивости, а лишь позволяет поворачивать диаграмму направленности косинусоидальной формы (такую же, как у приемника давления), чем можно реализовать только сферический или круговой обзор [186]. Исходя из сравнений выходных отношений сигнал/помеха, при теоретических расчетах иногда принимается, что различие в процессах P^2 и PV заключается только в постоянных коэффициентах, а усреднение по времени влияет на них идентично. Но в то же время, как было отмечено в работе [178], данный подход справедлив только в случае плоской волны, и, что, когда на приемнике регистрируется сигнал смешанный с помехой, то P^2 является произведением полностью коррелирующих процессов, а PV – произведением частично коррелирующих или вовсе (при отсутствии сигнала и изотропности помехи) некоррелирующих процессов, отсюда следует, что и их усреднение происходит неодинаково [187]. Также стоит отметить, что при регистрации сигнала коэффициент корреляции р_{вр} всегда равняется +1, тогда как коэффициент корреляции р_{ру} способен принимать значения от 0 до ± 1. Таким образом, вопреки тому, что математические выражения вычисления P^2 и PV внешне схожи, измеряются, тем не менее, разные физические величины с отличающимися свойствами. Подчеркивается, что в приемных системах, в которых реализовано перемножение откликов, в целях

острой формирования более характеристики направленности (включая мультипликативную обработку [177]), перемножение не является эквивалентом увеличения количества приемников, И не велет к увеличению помехоустойчивости, причине того. при использовании ПО что мультипликативной обработки или приемника потока акустической мощности, помехоустойчивость не определяется коэффициентом концентрации [178]. В работе [189] на основе натурных измерений проведен сравнительный анализ помехоустойчивости комбинированной приемной системы с использованием различных обработки векторных, алгоритмов скалярных. тензорных характеристик звукового поля инфразвукового диапазона движущегося судна. увеличение эффективности Показано, что возможно мультипликативных алгоритмов и потенциальной помехоустойчивости КП посредством увеличения количества обрабатываемой информации, т.е. увеличения числа информативных параметров, которые характеризуют акустическое поле источника шумов в векторно-скалярном и тензорном описании.

Основания для разногласий оценки помехоустойчивости КП довольно подробно представлены, в работе [191] и опираются на результаты модельных экспериментов работы [192], а изложенные в данных публикациях аргументы опираются по большей части на результаты теоретической работы [184]. На авторами сделано достаточно обоснованное основе результатов этих работ заключение о помехоустойчивости одиночной комбинированной приемной которая не превышает 6 дБ, И 0 TOM, что максимальной системы. помехоустойчивости при изотропной помехе можно добиться, используя аддитивные алгоритмы обработки, тогда как при мультипликативных алгоритмах оценка помехоустойчивости в диффузном поле помехи составляет 3.8 дБ. Противоположенного мнения придерживаются авторы экспериментальных работ [178, 67, 193, 194, 190], по их оценкам помехоустойчивость КП, полученная в натурных экспериментальных условиях при различном типе помех, составляет 15 - 35 дБ. В работе [189] было сделано предположение, что настолько значительное отличие оценок связано с тем, что модельное описание работы комбинированного

приемника в модельных условиях, как в [191, 192, 184], может иметь существенные отличия от его работы в натурных условиях. Как пример, можно упомянуть о помехоустойчивости системы состоящей из ненаправленных гидрофонов в изотропном поле помехи, которая равна коэффициенту концентрации, который в свою очередь определен исходя из характеристики направленности системы приема. Но в то же время, что коэффициент концентрации, что характеристика направленности системы приема корректно описана лишь для условий свободного пространства, в котором существуют плоские волны. При понижении используемых частот, в особенности в условиях мелкого моря, следует учитывать влияние границ раздела и дисперсионных свойств водной среды [189]. Следует отметить и особенность звукового поля в реальной морской среде, где, в отличие от модельного, вектор интенсивности приобретает вихревую составляющую [195]. В звуковом поле реального нерегулярного волновода, в отличие от модельных условий свободного пространства, могут быть выполнены условия существования структуры типа стоячих волн в поле помехи. Возникновение такой ситуации наиболее вероятно в вертикальном канале КП [189], если учитывать присутствующие в акустическом вихревые структуры, локальные инверсии горизонтальных потоков поле мощности, стоячие волны и реактивную составляющую в энергетической структуре акустического поля. В работах [196, 197], на основе экспериментально полученных данных, представлены результаты применения методики экспериментальной оценки помехоустойчивости комбинированных приемных систем.

Отдельные каналы векторных приемников обладают помехоустойчивостью в диапазоне 3 – 8 дБ, зависящей от ориентированности каналов в пространстве и характеристик поля шумов. Повышение помехоустойчивости в некоторых случаях возможно при использовании аддитивного сложения откликов с каналов векторного приемника и приемника давления. К примеру, в случае сформированной кардиоиды с минимальной чувствительностью по направлению к морской поверхности, то помехоустойчивость может возрасти до 10-13 дБ, если

вдоль поверхности, то до 5 дБ [188]. Также суммирование сигналов с каналов осуществляться комбинированного приемника может с использованием различных коэффициентов. Оптимальный подбор значений коэффициентов, в первую очередь, обуславливается типом помехи. При изотропном шуме оптимальным будет формирование характеристики направленности (XH) с наибольшим коэффициентом концентрации равным 4, т.е. суперкардиоиды. При наличии сосредоточенного источника шума, оптимальным будет кардиоида с коэффициентом концентрации 3, т.к. в точке минимума ХН не образуется дополнительный При лепесток направленности. наличии поля двух сосредоточенных источников шума, которые разнесены на небольшой угол, оптимальная отстройка возможна при подборе ХН от кардиоиды в сторону круговой ХН, т.к. это приводит к появлению двух минимумов в характеристике направленности, с изменением коэффициента концентрации от 3 ЛО 1. соответственно.

Если говорить 0 помехоустойчивости, то горизонтальные каналы приемника, как и их комбинации с приемником давления, векторного незначительно реагируют на характеристики дна, в том числе и в условиях Однако. вертикальный мелкого моря. на канал оказывают достаточно существенное влияние донные отражения. В условиях мелкого моря, в особенности, если комбинированный приемник имеет кардиоидную ХН, то уменьшение помехоустойчивости составит 4 – 6 дБ в сравнении со свободным пространством.

В статье [176] приводятся результаты расчетов и сравнения коэффициентов концентрации для разных типов приемников колебательной скорости и антенн состоящих из них. В работе [177], которая является продолжением исследований по данной тематике, проводится анализ на основе результатов по максимизации коэффициента концентрации с учетом собственных шумов векторных приемников, в том числе, расположении их на разных расстояниях в линейной антенне для целей оптимального детектирования слабых сигналов и локализации источников сигналов.

В работе [188] приводятся экспериментально полученные в различных условиях значения помехоустойчивости комбинированных приемных систем:

1. Если используются аддитивные алгоритмы обработки, то, в большинстве случаев, оценка помехоустойчивости каналов комбинированного приемника может быть установлена из соотношения P^2/V^2 полученного для поля шумов. Обычно для акваторий с ПЗК или с отрицательным градиентом ВРСЗ по всей водной толще, помехоустойчивость лежит в пределах 5-6 дБ.

2. В условиях глубокого моря, наиболее эффективно отстроится от шумов океана возможно при формировании кардиоидной ХН в вертикальной плоскости и направлении ее минимума вверх, что позволяет добиться помехоустойчивости 10-13 дБ.

3. В районах океана с двумерной стратификацией (глубоководные линзы, к примеру) возможности аддитивной обработки оказались малоэффективны и помехоустойчивость составила 1-3 дБ.

4. Использование линейной антенны из комбинированных приемников позволяет значительно уменьшить уровни боковых лепестков ХН не применяя специальные алгоритмы, благодаря чему происходит повышение помехоустойчивости.

В работах [202-206]| представлен теоретический анализ движения энергии в акустическом поле в окрестности сингулярностей волнового фронта. Основываясь на анализе характеристик линий тока энергии определено, что движение акустической энергии в области точек сингулярности становится вихревым, что приводит к обратному движению энергии в области, находящейся между дислокацией (центром вихря) и седлом (точкой застоя). То есть, точки с сингулярностью фазы, где в зоне интерференционного минимума образуется дислокация (центр вихря), а в зоне нулевого градиента фазы или скачка разности фаз вектора колебательной скорости и звукового давления, образуется седловая точка (точка застоя) фазового фронта.

В работе [207], исследуются динамические особенности дислокаций связанные с приливно-отливными явлениями. В экспериментальных работах [208,
209, 195, 210] рассматривается интерференционная структура вертикальной компоненты ВП и звукового давления и их разность фаз. Представлен анализ взаимосвязи скачков разности фаз и изменения направления прихода вертикальной компоненты ВП и, соответственно, выявления вихрей вектора акустической интенсивности.

В то же время, авторы работ [211, 212, 213] придерживаются другого мнения касательно целесообразности использования вихревой модели потока мощности. Утверждается, что различия интерференционной структуры поля звукового давления и вертикальной составляющей КП связано с подавлением мод первых номеров вертикальным каналом ВП и подчеркиванием мод высоких номеров. Именно по этой причине происходит сглаживание амплитудной многомодовой интерференции вертикальной компоненты, и смещение по расстоянию зон минимумов и максимумов полей звукового давления и вертикальной составляющей.

Выводы к главе и постановка задач

В данной главе рассмотрены работы, посвященные теоретическому и экспериментальному исследованию влияния морских неоднородностей происхождения динамических различных размеров, И характеристик на Особое формирование акустического поля. внимание уделено методике натурных численных проведения И экспериментов ПО решению задач реконструкции таких неоднородностей морской среды как поля течений и температур на основе данных зондирования водной толщи акустическими сигналами, и возможности их применения для условий мелкого моря и небольших протяженностей (от единиц до десятков километров) акустических трасс.

Рассмотрены разнообразные схемы проведения томографических экспериментов, используемая излучающая и приемная аппаратура, частоты, типы и режимы зондирующих сигналов. Наиболее подробно представлены работы по экспериментальной реализации томографических методов в натурных условиях. Отмечены проблемы присущие описанным методам, их достоинства и недостатки, возможные пути усовершенствования этих методов.

В Приложении 1 обоснован выбор сложных фазоманипулированных Мпоследовательностью сигналов на несущей частоте для целей мониторинга морской среды, рассмотрены их свойства и методы формирования.

Рассмотрены особенности применения векторных приемников в задачах исследования векторно-скалярных характеристик акустических полей, их преимущества и недостатки, проблемы оценки помехоустойчивости, работы связанные с исследованием вихревых структур поля вектора акустической интенсивности, интерференционной структуры акустического поля. В заключении главы конкретизированы задачи исследования.

На основе проведенного анализа осуществлена постановка задач, отвечающих достижению цели диссертационной работы:

- разработка методики натурных и численных экспериментов для решения задач реконструкции поля температур и течений в мелком море по данным акустического зондирования;
- экспериментальные и теоретические исследования влияния неоднородностей морской среды различного происхождения на формирование импульсных характеристик волновода при зондировании морской среды сложными псевдослучайными сигналами;
- экспериментальные исследования векторных характеристик акустических полей при решении задач мониторинга, контроля динамических процессов и наблюдения за подводными объектами в мелком море.

ГЛАВА 2. Методы и материалы

В данной главе представлены результаты методических и технических решений, целью которых была разработка методов, средств и систем для осуществления: мониторинга изменчивости динамики и структуры вод морской среды в условиях шельфовой зоны Японского моря с использованием сложных фазоманипулированных акустических сигналов; и исследования особенностей формирования пространственной структуры векторно-скалярных полей.

2.1. Методические основы акустического зондирования мелкого моря

В данном разделе приводится описание акустических методов мониторинга изменчивости полей температур и течений в условиях шельфовой зоны Японского моря с использованием разработанного в лаборатории акустикогидрофизического [102, 214]. Основной комплекса акцент сделан на использование одиночных акустических приемников и источников звука с придонным размещением. Основой представленных разработок послужило применение сложных псевдослучайных широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией для мониторинга изменчивости структуры и динамики вод, что позволяет проводить выделение, разделение и идентификацию акустических импульсов распространяющихся по разным лучевым траекториям. Технически метод реализован на основе применения М-последовательностей на несущей с фазовой манипуляцией [218] для зондирования водной среды с последующим расчетом функции корреляции между принятым и излученным сигналами. При корректном выборе полосы частот, длительности, количества периодов несущей частоты на символ и прочих параметров сигнала это дает возможность выделения на фоне помех и разрешения во времени отдельных акустических приходов, которые несут информацию о скорости распространения акустических импульсов вдоль различных лучевых траекторий и, соответственно, о температуре водных

слоев через которые они проходят. Также при использовании метода встречного зондирования возможно выделение скоростей течений по разнице времени распространения акустической энергии вдоль потока и против него.

2.1.1. Метод встречного зондирования.

Как известно, изменения в движущемся потоке жидкости влияют на 3 – 5 порядков слабее на акустическое поле, чем вариации скорости звука, однако, присутствие течений на акустической трассе нарушает инвариантность поля, если поменять местами излучатель и приемник, в отличие от возмущений скорости звука. Звук распространяется по течению быстрее, чем против течения, тогда как вариации скорости звука идентично влияют на время задержки приходов при распространении в противоположных направлениях. Отсюда следует, что посредством измерения невзаимности акустического поля, например, разности времен задержки акустических приходов при зондировании морской среды во встречных направлениях, существует возможность определения поля течений и отделения их от эффектов вариаций скорости звука.

В случае линейной лучевой томографии при распространении сигнала по течению, вариация времени прихода сигнала по *m*-му лучу

$$t_{m}^{(\to)} = -\int_{\Gamma_{m}^{0}} c_{0}^{-2} (\Delta c + V l_{m}^{0}) ds, \quad m = 1, 2, ..., l,$$
(2.1)

где l - среднее количество собственных опорных лучей Γ_m^0 соединяющих источник и приемник, c_0 - опорное состояние скорости звука, Δc - вариация скорости звука, V – вектор скорости течения.

При противоположном направлении излучения

$$t_m^{(\leftarrow)} = -\int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} (\Delta c - V l_m^0) ds, \quad \mathbf{m} = 1, ..., \mathbf{M}, \mathbf{l}$$
(2.2)

тогда уравнение отдельно для Δc

$$-\int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} \Delta c ds = \Delta t_m, \qquad (2.3)$$

и для Vl_m^0

$$-\int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} (V l_m^0) ds = \Delta * t_m,$$
(2.4)

где $\Delta t_m = (\Delta t_m^{(\to)} + \Delta t_m^{(\leftarrow)})/2, \ \Delta^* t_m = (\Delta t_m^{(\to)} - \Delta t_m^{(\leftarrow)})/2.$

Так как структура уравнений для вариаций скорости звука и течения идентична, то, соответственно совпадают и способы решения томографических задач для них. При расчете скорости и направления течений так же должно учитываться, что Vl_m^0 - это проекция вектора скорости течения на направляющий вектор l_m^0 *m*-го опорного луча.

Несмотря на скептицизм ряда авторов по проблемам применимости данного метода (или методов на его основе) в условиях значительной временной нестабильности акустических сигналов, которая наблюдается в условиях мелкого моря в отличие от глубоководных акустических каналов, автором настоящей работы получены экспериментальные данные подтверждающие его работоспособность [102]. Также стоит отметить успешные результаты авторов работы [48].

2.1.2. Стационарные акустические трассы

Длительный мониторинг характеристик водной среды с использованием традиционных контактных методов может оказаться чрезвычайно дорогим и а спутниковое зондирование не обладает непрактичным, возможностью обеспечения информацией распределении характеристик 0 глубине, ΠО распространение же звука в воде между стационарно расположенными респондирующими точками может использоваться как источник информации, и как метод для получения и использования этой информации.

В случае с акустической томографией океана, основной требуемой информацией является температурная структура океана, иногда связанная со структурой течений в той же акватории. Этот тип информации в большинстве случаев то, в чем нуждаются океанографы для того, чтобы, или напрямую получить необходимую информацию об изменении океанографических процессов, или обеспечить данными соответствующие численные модели, для

того, чтобы сделать прогнозирование. Надо отметить, что концепция «временное изменение» требует необходимости в проведении повторяющихся измерений в разные периоды времени. С точки зрения практичности, достоверности, точности, возможности проведения экспериментальных измерений при неблагоприятных погодных/ледовых условиях, организации непрерывных долговременных измерений, обеспечения «повторяемости» условий и параметров экспериментов - наиболее оптимально подходят стационарные акустические трассы.

Как известно, акустическая томография океана использует тот факт, что акустические свойства. подлежащие измерению, такие как время распространения, фаза или даже полное поле связаны с температурой и скоростью течения в океане. Получение профилей температуры и скоростей течений из измерений звукового поля является основной целью акустической томографии океана. Дополнительной особенностью океана является то, что звук низкой частоты распространяется на большие дистанции в водной толще, и таким образом быть исследованы могут длинные трассы акустического распространения.

В случае с акустической томографии океана, параметры модели это скорость звука с и скорость течения v в водной толще. В общем, оба параметра это функции от пространственных и временных координат $c(\vec{x},t)$, $v(\vec{x},t)$. Для того, чтобы упростить задачу, принимается, что параметры модели это только функции координат, а временная зависимость восстанавливается с помощью последующих экспериментов, что наиболее практично реализуется при условии стационарного расположения приемников и источников звука.

Во многих случаях в условиях мелкого моря изменчивость структуры вод сопровождается существенной перестройкой звукового канала, что в свою очередь приводит к сильным флуктуациям поля скорости звука и, соответственно, флуктуациям звуковых полей. При такого рода обстоятельствах, как правило, использование среднеклиматических (многолетних типовых справочных данных) усредненных значений распределения скорости звука является недостаточным, чтобы охарактеризовать гидрологическую и акустическую обстановку на

акустической трассе. Статистическое описание динамически меняющихся неоднородностей морской среды в условиях шельфа и, соответственно, изменений звукового поля, связанных с этими неоднородностями, также не может считаться удовлетворительным, так как по причине крайней высокочастотности и разномасштабности этих неоднородностей, накопление большого массива данных, достаточного для получения ИХ достоверных статистических характеристик, является затруднительным. Помимо этого, вызванные данными неоднородностями изменения характеристик среды и поля скорости звука могут быть настолько значительны, что статистические усредненные оценки этих характеристик не будут давать адекватной картины в сложившейся ситуации. По этой причине представляется целесообразным создание систем, которые бы осуществляли мониторинг – непрерывное слежение 3a изменчивостью акустических параметров среды в представляющих интерес шельфовых зонах Мирового океана. Для этих целей как нельзя лучше подходят стационарно установленные акустические излучатели и приемники, соединенные кабельными линиями с центром генерации, приема и обработки данных. Необходимо отметить, что измеренные флуктуации акустических сигналов, распространяющихся через водную толщу, могут быть использованы не только для реконструкции распределения скорости звука, но И для других океанографических параметров среды: температуры, солености, течения, плотности, теплопереноса и теплосодержания среды, спектра волновых движений [28, 75, 12, 99, 100, 101], представляющих интерес для океанологических и климатических прогнозов.

2.2. Технические средства для акустического зондирования шельфовой части Японского моря

В данном разделе приводится описание излучающих, приемных, приемноизлучающие систем, которые использовались В процессе проведения исследований по теме диссертации И входили В состав акустикогидрофизического комплекса разработанного в лаборатории «Акустической

томографии» [102, 214]. Составные части комплекса менялись в соответствии с задачами, условиями и требованиями проводимых экспериментов. Также приводится описание излучающей и приемной систем предназначенных для исследования особенностей формирования пространственной структуры векторно-скалярных полей.

2.2.1. Излучающие системы

Одной из особенностей разработанного акустико-гидрофизического комплекса является возможность работы в его составе различных приемных и излучающих систем, как в варианте стационарной постановки его элементов и соединении их кабельными линиями с центром обработки данных, так и при автономном исполнении приемных и/или излучающих систем.

В зависимости от поставленных задач исследований, дальностей расположения корреспондирующих точек и глубин волновода применялись различные излучающие системы. Одним из ключевых условий возможности использования тех или иных излучающих систем является их способность обеспечить формирование широкополосных акустических сигналов в заданном диапазоне частот, притом, что фазово-частотные характеристики излучаемых сигналов могут быть изменены в процессе проведения натурного эксперимента.

В представленной работе в большинстве описанных ниже экспериментов, исключительно в качестве источника акустических сигналов использовался пьезокерамический излучатель (рис. 2.1), стационарно установленный на морское дно и соединенный кабельной линией с береговой лабораторией [130]. Помимо самого излучателя в излучающую систему входят блоки формирования, генерации, усиления, синхронизации, оцифровки сигналов.

Сам широкополосный пьезокерамический излучатель был установлен на грунт в 400 метрах от береговой черты на глубине 39 метров стационарно на постаменте, он способен развить акустическое давление порядка 5000 Па/м в диапазоне частот 300 – 2500 Гц и позволяет излучать М-последовательности различной длительности и сложности. Акустический центр излучателя находится на высоте 1 м от грунта. Излучатель был установлен в 1999 году в заливе Посьета у мыса Шульца, после планового технического осмотра и некоторой модернизации несущей конструкции и пассивных элементов в 2013 году, продолжает функционировать и по сей день и остается основным источником сигналов комплекса для проведения исследований закономерностей формирования гидроакустических полей и распространения звука.



Рис. 2.1. Широкополосный пьезокерамический излучатель.

На рис. 2.2 представлена нормированная амплитудно-частотная характеристика, измеренная вблизи излучателя.

Для проведения экспериментальных исследований направленных на изучение пространственной структуры векторно-скалярных звуковых полей в условиях мелкого моря использовался электромагнитный буксируемый гидроакустический излучатель [198, 219, 220]. Он предназначен для излучения акустических сигналов в диапазоне частот 140-270 Гц и позволяет работать при глубине погружения источника от 1 до 25 м и, в зависимости от рабочей частоты и оснащения конструктивными элементами, способен обеспечивать звуковое давление до 3700 Па (191 дБ/1 мкПа).



Рис. 2.2. Нормированная амплитудно-частотная характеристика излучателя.

В состав буксируемой излучающей системы (рис. 2.21) входят: электродинамический излучатель, буксируемый каркас с заглубителем и стабилизаторами, система компенсации статического давления, буксировочный фал длиной 100 м, сигнальный кабель с элементами крепления к каркасу, шланг высокого давления длиной 100 м с воздушным компрессором, генератор сигналов (ноутбук) c усилителем мощности И блоком компенсации реактивной составляющей нагрузки, приборы контроля глубины буксировки излучателя.



Рис. 2.21. Буксируемый гидроакустический электромагнитный излучатель.

Система компенсации статического давления представляет собой воздушный компрессор, устанавливаемый на борту буксировщика, и шланг

высокого давления, который соединяет компрессор через штуцер с внутренней полостью излучателя.

Наблюдение за текущей глубиной излучателя осуществляется по показаниям приборов контроля электрической стороны излучателя, при этом уравновешивание давлений обеспечивается подкачкой или стравливанием воздуха во внутреннем объеме излучателя до достижения заданного значения электрических параметров.

2.2.2. Приемные системы.

решения задач мониторинга шельфовой Для ЗОНЫ Японского моря применялись как мобильные, так и стационарные приемные системы. При помощи мобильных автономных гидрофонных систем на базе радиогидроакустического буя (рис. 2.5) осуществлялись оперативные постановки в области морского шельфа для проведения недолгосрочных (от часов до нескольких суток) измерений и для оценки оптимальности выбранных мест в которых планируются постановки стационарных кабельных систем на длительное время. Эти системы изготавливались на основе авиационных радиогидроакустических буев, которые были модернизированы под многоразовое использование с требуемой полосой частот. Информация, принятая гидрофоном, передается посредствам радиоканала на береговую лабораторию или на плавсредство. Сама система состоит из прегруженной фермы с расположенным в ней гидрофоном и аппаратурой, кабельной линии и плавающего на поверхности радиобуя (рис. 2.3). Ферма устанавливается на дно, акустический центр находится в 0.5 метре от грунта. (рис. 2.5). Блок-схема приемной системы с передачей информации по радиоканалу представлена на рис. 2.4, система состоит из морского и приемного блоков.



Рис. 2.3. Схема постановки радиогидроакустического буя: 1 - радиобуй, 2 – кабельная линия, 3 – груз, 4 – ферма с гидрофоном и аппаратурой.



Рис. 2.4. Блок-схема приемной системы с передачей информации по радиоканалу: Гф – гидрофон, ПУ – предварительный усилитель, ИП – источник питания, ФНЧ – фильтр низких частот.

Гидроакустические сигналы, принятые гидрофоном, проходят через тракт усиления (ПУ, Усилитель) и передаются посредством FM-передатчика, размещенного на плавающем буе, по радиоканалу на приемный блок, который располагается в центре сбора и анализа данных (рис. 2.4). Прием радиосигналов осуществляется при помощи стандартных широкополосных радиоприемников AOR AR-8000 и AR-3000. Принятый сигнал фильтруется (ФНЧ), выделяется и передается через линейный выход на аппаратуру регистрации.



Рис. 2.5. Радиогидроакустический буй.

Мобильные системы данного типа применялись при участии автора для исследований влияние внутренних волн на шельфе на структуру акустических приходов [102], более поздняя модификация системы для исследований температуры и динамики вод в Корейском проливе [103, 104], подобная, свободно дрейфующая система, оборудованная приемником GPS и расположением гидрофона на требуемом горизонте, использовалась для изучения особенностей применения акустических сигналов для измерения импульсных откликов на шельфе Японского моря [105, 217].

Стационарная приемная система (рис. 2.6) была установлена на глубине 43 метров, на расстоянии 2 километров от широкополосного пьезокерамического излучателя (рис. 2.1), и соединена кабельной линией с береговой лабораторией. Она состоит из прегруженной пирамидоидальной фермы с расположенным в ее

центре гидрофоном, снабженным предварительным усилителем с коэффициентом усиления 500. Гидрофон обладает линейной чувствительностью 120 мкВ/Па в частотном диапазоне 300 – 16000 Гц. По кабельной линии из береговой лаборатории осуществляется прием сигнальной информации и электроснабжение системы, которое обеспечивается источником напряжения 15 – 30 В.



Рис. 2.6. Схема расположения стационарных излучающей и приемной систем.

Использование данной системы позволило организовать стационарную акустическую трассу (рис. 2.6) и проводить круглогодичные долговременные эксперименты в течение нескольких лет. С ее помощью были проведены исследования влияния приливно-отливных изменений уровня поверхности моря на импульсные характеристики волновода [106], исследования закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических и температурных полей [107, 142], сезонной изменчивости температурных полей [108].

Для осуществления идеи совмещения преимуществ временной селекции акустических приходов, и так называемой «векторно-скалярной» обработки

выделенных импульсов, которая позволяет измерять углы приходов применялся комбинированный приемник.



Рис. 2.7. Комбинированный приемник.

Комбинированный приемник представляет из себя трехкомпонентный векторный приемник колебательного ускорения соколеблющегося типа с пъезокерамическими инерционными преобразователями, размещенными в сфере диаметром 230мм, в то же время он оснащен шестью соединенными в параллель плоскостными пъезокерамическими гидрофонами, равномерно распределенными по поверхности сферы (рис. 2.7).

Сама сфера на растяжках устанавливалась в металлической ферме так, чтоб акустический центр комбинированного приемника при установке приемной системы на грунт находился на расстоянии 0.6 метров от дна. Каждый канал комбинированного приемника оснащен предварительным усилителем и частотным фильтром. Данная система была установлена стационарно на глубине 43 метра и соединена кабелем с береговой лабораторией, на расстоянии порядка 2 километров от нее располагался излучатель (рис. 2.8).

Эта приемная система применялась для исследования возможностей векторно-скалярных методов для целей акустической томографии океана [109, 215, 216].



Рис. 2.8. Схема расположения комбинированного приемника.

2.81) Автономная (рис. приемная система С использованием **(КП)** собой комбинированного приемника представляет устройство, предназначенное для проведения исследований структуры звуковых полей в условиях мелкого моря посредством регистрации звукового давления и трех ортогональных компонент градиента звукового давления, а также данных о положении системы в пространстве. Формирование, накопление пакетов информации от комбинированного приемника и датчиков ориентации и глубины осуществляется посредством автономного цифрового блока регистрации с записью на SD карту.

Внешний вид КП в защитном ограждении-клети с гермоконтейнерами приемного тракта изображен на рисунке 2.81.

Состав устройства:

- КП, объединяющий в общей конструкции с единым фазовым центром трехкомпонентный векторный приемник (ВП) и приемники звукового давления (ПД), расположенные симметрично вокруг воспринимающего элемента ВП,

- система подвеса ВП и ПД в защитной клети, включающая эластичные лонжи и элементы крепления,

- жесткая клеть для установки в нее ВП и ПД в целях ориентации в пространстве и механической защиты,

- обтекатель на клеть для снижения воздействия гидродинамической помехи,

- гермоконтейнеры с электроникой и блоками электропитания,

- система постановки клети с КП на якоре с элементами защиты от структурной помехи и возможностью изменения глубины постановки.



Рис. 2.81. Автономная система КП.

Система постановки представлена на рис. 2.82, включает в себя груз массой 40 кг, фал, притопленные на глубину 5 – 10 метров от поверхности плавучести (что обеспечивает защиту фала и клети с КП от вибрации под воздействием поверхностного волнения), выборочный конец, проблесковый маяк.



Рис. 2.82. Система постановки автономной системы КП.

Электронная часть устройства, находится в гермоконтейнерах, состоит из четырехканального тракта усиления сигналов КП с НЧ и ВЧ фильтрами, АЦП, микроконтроллера, модуля определения заглубления, крена, дифферента, азимута, (SD карта) блоков (БП). накопителя ланных И ДВУХ электропитания поддерживающих автономную работу устройства в течение 3 суток. Даная система использовалась для проведения экспериментальных исследований по изучению пространственной структуры векторно-скалярных звуковых полей в условиях мелкого моря [198, 219, 220].

2.2.3. Приемно-излучающие системы

Для проведения экспериментальных исследований полей течений методом встречного была акустического зондирования создана система, корреспондирующие которой могут совмещать функции, элементы как приемников, так и излучателей звука (трансиверы). В качестве одного из элементов данной системы, с помощью добавления в систему управления коммутатора, который служит переключателем между режимами излучения и установленный обратимый приема, использовался стационарно

пьезокерамический акустический преобразователь (рис. 2.1) описанный выше. Вторая приемно-передающая система была разработана и установлена на 2098 метров от первой системы, так же стационарно на дно и расстояние соединена кабельной линией с береговой лабораторией (рис. 2.9). Она состоит из двух разнесенных на расстояние 3 м гидрофонов и находящегося в центре преобразователя с центральной 2500 пьезокерамического частотой Гп. работающего в режиме излучения и приема. Акустические центры гидрофонов и излучателя располагаются на высоте 35 см от дна. Система снабжена датчиками глубины (точность 2,5 см) и температуры (точность 0,01 градуса). Питание и управление системой осуществляется по 4-х жильному кабелю. Береговой и морской электронные блоки связаны аналого-цифровой линией (рис. 2.9). Акустический сигнал передается в аналоговом виде (каждый канал передается по отдельной жиле), а данные о температуре и давлении в цифровом. Частотно модулированные цифровые сигналы с датчиков суммируются с аналоговым сигналом от второго гидрофона. Команды управления с берегового поста передаются по линии первого гидрофона.

Рельеф дна в районе установки систем представляет собой пологий клин с перепадом глубин от 40 до 43 м. Азимут направления от ближней, к береговой черте системы, на дальнюю составляет 173 градуса, то есть практически совпадает с направлением с севера на юг.

В режиме встречного излучения сигналов для измерения скорости течения сложные сигналы, синхронизованные системой единого времени, одновременно излучаются преобразователями обеих систем, а затем через коммутаторы принимаются преобразователями ближней и дальней систем и подаются на АЦП в береговой пост.

В результате использования данной системы были проведены эксперименты по исследованию структуры и динамики вод дистанционными акустическими методами [102].



Рис. 2.9. Схема расположения приемно-передающих систем.

Позднее акустический комплекс для исследований полей течений методом встречного акустического зондирования был существенно модернизирован, и проведено тестовое исследование возможностей акустического мониторинга и используемой аппаратуры в условиях очень мелкого моря, где существенную роль играют донно-поверхностные отражения и, в отличие от глубокого моря, наблюдается значительная временная нестабильность сигналов.

Исследования проводились с помощью комплекса, который построен по модульному принципу и ориентирован на акустический мониторинг шельфовых зон океана, однако может применяться и в исследованиях по распространению сигналов на акустических трассах большой протяженности.

Для проведения исследований была организована стационарная (шельфовая зона Японского моря) акустическая трасса в бухте Витязь 152 протяженностью Μ. Использовались пьезокерамические трансиверы, установленные стационарно вблизи дна на глубинах 4 м (трансивер № 1) и 12 м (трансивер № 2), соединенные кабельными линиями с береговой лабораторией.



Рис. 2.10. Схема тестового эксперимента по встречному зондированию.

В состав комплекса (рис. 2.10) входит два пьезокерамических трансивера выполняющих, как функцию излучателя, так и функцию приемника, и центр анализа томографических сигналов (находящийся на берегу или на плавсредстве), где обеспечивается прием, обработка и отображение поступающих акустических гидрофизических Характеристики данных. трансиверов (рис. 2.11) И используемых в данном эксперименте позволяют работать с широкополосными сигналами на центральной частоте 6 кГц. Особенностью комплекса является возможность синхронизации работы его составляющих с помощью системы единого времени (СЕВ). Это позволяет оперативно исследовать качество томографических сигналов, условия распространения их на акватории, определить степень влияния гидрологической и сигнально-помеховой обстановки и разработать рекомендации по выбору мест и способов постановки трансиверов. В данном эксперименте обе приемо-излучающие системы были установлены стационарно и соединены кабельными линиями с центром анализа данных. Принятые сигналы от обоих трансиверов передавались на береговой пост по кабелю, где производилась обработка сигналов с частотой дискретизации 48 кГц. Однако комплекс способен обеспечить и автономную работу всех составных частей, когда аппаратура генерации, усиления, синхронизации размещается в

гермоконтейнере и питается от аккумуляторов, а принятые акустические сигналы передаются с помощью радиобуя по радиоканалу в центр обработки данных.



Рис. 2.11. Трансивер 6 кГц в сборе.

Проведение с помощью комплекса экспериментальных исследований предполагает, что типы и частотные характеристики применяемых сигналов могут быть различны и ограничены только полосой рабочих частот усилителя мощности и используемого излучателя, который может быть заменен на более низко- или высокочастотный. Структурная схема акустического комплекса 2.12. В томографических представлена на рисунке качестве сигналов фазоманипулированные Mиспользуются сложные сигналы типа последовательностей. Для их генерации кодировщик формирует сигнальный фрейм с помощью сдвигового регистра с определенными обратными связями. Сигнальный фрейм поступает на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и затем на усилитель мощности под управлением логического устройства, функции которого синхронизированы с другими устройствами акустико-гидрофизического CEB. комплекса импульсами Источником эталонной частоты является MV103 прецизионный термостатированный генератор относительная нестабильность которого 10⁻⁸.



Рис. 2.12. Структурная схема акустического приемно-передающего комплекса.

После усилителя мощности сигнал поступает на коммутатор служащий переключателем между режимом излучения и приема трансивера. В режиме приема после коммутатора сигнал поступает на предусилитель, затем на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и на коррелятор, где производится свертка принятого сигнала с репликой излученного. Настройка и управление всех программных модулей (реализованных на плате FPGA Cyclone III фирмы Altera) производится логическим устройством. Далее кодировщик формирует конечный вид выходного сигнала (результат вычисления корреляционной функции) и после АЦП подаётся на один из каналов ПК вместе с метками системы единого времени. Таким образом, под каждую приемно-излучающую систему выделен один канал стерео входа ПК для регистрации корреляционных функций и меток времени.

Центр анализа представляет собой функционально связанный комплект приборов и портативный компьютер. Здесь принятые гидрофоном томографические сигналы и данные дополнительных приборов (метеостанция, ADP) регистрируются, отображаются и обрабатываются.

Результаты тестового эксперимента по акустическому мониторингу полей течений в условиях очень мелкого моря представлены в работах [145, 146].

В частности, результаты тестового эксперимента по встречному зондированию в условиях очень мелкого моря показали необходимость увеличения разрешающей способности системы мониторинга по времени, так как при невысоких скоростях течений (5-10 см/с) в акватории бухты Витязь определения погрешность скоростей при помощи акустического метода зондирования довольна высока (5-7 см/с). Улучшить разрешение системы по времени можно либо за счет повышения частоты дискретизации регистрирующей аппаратуры выше 48 кГц, либо путем увеличения разницы во времени распространения сигнала в прямом и обратном направлениях. На момент проведения эксперимента из-за технических ограничений приборов регистрации частоту дискретизации невозможно было сделать выше, поэтому дискретность была увеличена путем удлинения акустической трассы со 152 до 1220 м. Так же, одна из приемно-передающая система была заменена на автономный вариант сигнальной информации исполнения, С передачей ПО радиоканалу, И апробирована в натурных условиях.



Рис. 2.13. Структурная схема акустического приемно-передающего комплекса с одной автономной приемно-передающей системой.

В состав комплекса (рис. 2.13) входит два пьезокерамических трансивера (рис. 2.11), и центр анализа томографических сигналов, который находился на берегу. Приемо-передатчик акустических сигналов (трансивер <u>№</u>2) был установлен на грунт, и соединен кабелем с гермоконтейнером, в котором размещается аккумуляторный источник питания (обеспечивающий автономную работу не менее 24 часов) и аппаратура генерации, усиления и синхронизации (рис. 2.13). Синхронизация излучения и приема осуществляется с помощью системы единого времени (СЕВ). Системы генерации (кодер), цифроаналогового преобразования (ЦАП), синхронизации (СЕВ) управляются и настраиваются с помощью логического устройства и реализованы все программно на плате FPGA Cyclone III фирмы Altera. После формирования и усиления сигнал подается на коммутатор служащий переключателем между режимом излучения и приема трансивера. В режиме излучения усиленный сигнал подается на трансивер. Также

гермоконтейнер соединен кабелем с плавающим радиобуем посредством которого в режиме приема осуществляется передача принятых и усиленных акустических сигналов по радиоканалу (FM-передатчик) в центр обработки данных.

Трансивер №1 был установлен стационарно и соединен кабельной линией с центром анализа данных. В прибрежной лаборатории располагалась вся аппаратура синхронизации, приема, формирования и усиления сигналов, с питанием от центральной электросети. Вместе с сигналами принятыми трансивером №1 на вход ПК подаются метки системы единого времени, на второй вход ПК посредством радиоприемника (FM-приемник) подаются акустические сигналы принятыми трансивером №2. В центре анализа обеспечивается прием, обработка, запись и отображение поступающих акустических данных и данных дополнительных приборов (метеостанция и т.д.).

Результаты эксперимента по акустическому мониторингу полей течений в условиях очень мелкого моря представлены в работах [147, 148, 149].

2.3. Методы численного моделирования распространения акустических сигналов для сопоставления расчетных и экспериментально полученных данных, в целях дальнейшего применения при решении задач акустической томографии мелкого моря

2.3.1. Обоснование выбора лучевых моделей для задач акустической томографии мелкого моря

Построение лучевых траекторий старейших ЭТО ОДИН ИЗ методов моделирования распространения звука в океане. Волновые методы уже вытеснили лучевые методы из многих областей применения, но, как бы то ни было, лучевое моделирование до сих пор широко используется. Основная проблема лучевых методов, это их репутация, что они обладают низкой точностью расчета. Их преимущество, основное ЭТО задачи при расчете высокочастотного

распространения, волновые модели обычно чрезвычайно медленны для применения в таких задачах. Кроме того, точность лучевых моделей возрастает для высоких частот.

Еше одним несомненным плюсом лучевых моделей, является их способность эффективно решать задачи с широкой полосой частот. В волновых моделях каждая новая частота обычно требует нового запуска всех расчетов модели. Противоположная ситуация складывается для лучевых методов, многие части вычислений независимы от частоты, т.е. траектории лучей и времена распространения. Более того, лучевая теория непосредственно применима для неоднородных в горизонтальном направлении задач. Таким образом, задачей идеально подходящей для ее решения методами лучевой теории является задача с высокой частотой сигнала, широкополосным источником и зависящей от расстояния средой распространения. Именно по этому, до сих пор лучевые доминируют В таких областях как: моделирование активной методы гидролокации и акустическая томография океана.

Метод Гауссовых пучков построения траекторий был предложен как естественная замена и развитие лучевых методов [110, 111]. В этом подходе пучки ассоциируются с отдельными лучами в веере лучей. Поле в любой из заданных точек рассчитывается путем суммирования вклада каждого из лучей приходящих в эту точку (Гауссовы пучки). При правильно выбранной ширине пучка и кривизне, метод Гауссовых пучков, как правило, гораздо более точен.

2.3.2. Метод Гауссовых пучков для расчета акустических полей в океане

Метод Гауссовых пучков в сравнении со стандартным лучевым представлением (построением хода луча), не имеет определенного рода недостатков, как лучевой метод, таких артефактов как идеальные зоны тени и бесконечно высокая энергия в каустиках. Он также устраняет необходимость в расчете собственных лучей. Эта методика чрезвычайно привлекательна для высокочастотных, зависящих от расстояния задач, для которых модели

нормальных мод, FFP или параболического уравнения не являются практической альтернативой. Метод Гауссовых пучков представляет каждый луч, как пучок с Гауссовым нормальным распределением интенсивности к лучу. Ширина пучка и его кривизна задается дополнительной парой дифференциальных уравнений, которые интегрируются наряду с обычными лучевыми уравнениями, для того чтобы посчитать поле пучка находящегося поблизости к центральному лучу пучка.

Методу пучков уделяется большое внимание для решения задач по распространению волн [112-115, 221, 222]. В частности, в литературе по сейсмологии имеется большое количество ссылок на него. В сущности, метод заключается в аппроксимации заданного источника как веера пучков и построение распространения этих пучков через среду. Величины, которые нас интересуют, т.е. акустическое давление или смещение частиц, затем рассчитываются для заданного местоположения путем суммирования вкладов каждого отдельного пучка.

Бакер разработал теорию пучков, основанную на законах рассеяния в однородной среде, в которой пучки разворачиваются (раскрываются) тем больше, чем больше увеличение длины дуги [116]. В представленной теории используются дифференциальные уравнения, которые интегрированы наряду с обычными лучевыми уравнениями и которые управляют эволюцией, как кривизны пучка, так и его шириной.

В сущности, построение начинается с интегрирования обычных лучевых уравнений для того, чтобы получить центральный луч пучка. Затем пучки строятся по лучам путем интегрирования пары вспомогательных уравнений, которые управляют эволюцией пучка, т.е. его шириной и кривизной являющиеся функцией от длины дуги. Результирующее поле давления описывает пучок, где поле затухает по Гауссовому закону как функция нормальной дистанции от центрального луча пучка.

Центральный луч пучка удовлетворяет условиям стандартных лучевых уравнений. При рассмотрении системы с цилиндрической системой координат,

где *г* - горизонтальная дистанция, а *z* координата глубины. Лучевые уравнения принимают вид:

$$\frac{d}{ds} \cdot \left(\frac{1}{c \cdot (r,z)} \cdot \frac{dr}{ds}\right) = -\frac{1}{c^2 \cdot (r,z)} \cdot \nabla \cdot c \cdot (r,z),$$
(2.5)

где r = r(s), r(s) и z(s) координата луча как функция длины дуги s, и c(r,z) скорость звука. Тогда в виде первого порядка, лучевые уравнения запишутся как:

$$\frac{dr}{ds} = c \cdot p(s) \tag{2.6}$$

$$\frac{d\rho}{ds} = -\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial c}{\partial r}$$
(2.7)

$$\frac{dz}{ds} = c \cdot \zeta(s) \tag{2.8}$$

$$\frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial c}{\partial z}$$
(2.9)

Кривизна пучка и его ширина получаются из величин p(s) и q(s), которые вычисляются путем интегрирования дополнительной пары обычных дифференциальных уравнений вдоль центрального луча. Эти дополнительные уравнения выводятся путем решения параболического уравнения поблизости от каждого луча.

$$\frac{dq}{ds} = c(s) \cdot p(s) \tag{2.10}$$

$$\frac{dp}{ds} = -\frac{c_{nn}}{c^2(s)} \cdot q(s) \tag{2.11}$$

Здесь, c_{nn} обозначает вторую производную по нормали скорости звука c(r,z).

2.3.3. Применение программы BELLHOP

ВЕLLHOP это программа, реализующая метод Гауссовых пучков [110] по алгоритму, описанному в [117], в которой динамические уравнения и система дифференциальных уравнений движения луча решаются с применением метода Рунге-Кутта. Программа написана Майклом Портером, как часть тулбокса "Acoustic Toolbox", данный тулбокс находится в свободном доступе на веб-сайте Ocean Acoustic Library. Сам тулбокс предназначен для установки и дальнейшей работы в среде Matlab. BELLHOP предназначен для расчета акустического поля методами лучевой акустики по заданному профилю скорости звука, который может быть, как однородный, так и не однородный по трассе. Также могут задаваться разнообразные профили дна, слои осадков с различными скоростями звука, коэффициентами отражения и затухания, шероховатость границ волновода, направленность излучателя и т.д. С помощью этой программы можно рассчитать координаты лучей, время распространения, амплитуды, собственные лучи, акустическое давление, затухание. Расчеты акустического давления выполняются по методу Гауссовых пучков [110, 118], который может быть выполнен по следующим приближениям: геометрические лучи [117], полярная и декартова система координат, Гауссовы пучки [119].

Программа BELLHOP с момента ее появления нашла широкое применение среди акустиков по всему миру, она постоянно развивается и совершенствуется. Многочисленные работы (среди них [121-126]), в которых используется расчеты акустического поля по методу Гауссовых пучков, реализованному в этой программе, неоднократно подтвердили адекватность данного метода и показали хорошую точность при сопоставлении расчетных и экспериментально полученных данных, особенно в области высоких частот (более 1 кГц).

настоящей работе все представленные расчеты по численному B моделированию распространения акустических сигналов выполнены автором с использованием программы BELLHOP (метод Гауссовых пучков) и программ разработанных автором. Данный метод и программа были выбраны для осуществления расчетов, так как, в соответствии с целями и задачами, поставленными в настоящей работе посвященной экспериментальным И теоретическим исследованиям возможности применения акустических методов для мониторинга и контроля динамических процессов в мелком море. используемые частоты сигналов акустического зондирования находятся выше 100 Гц (в большинстве случаев выше 1 кГц), а расстояния не превышают 10 – 30 км (в

большинстве случаев менее 3 км), что согласно теоретическим И экспериментальным данным (в частности [18]) может быть выполнено с использованием лучевых методов расчета акустического поля. В указанном диапазоне частот и расстояний результаты численных расчетов показали хорошее соответствие экспериментально полученным данным [102-109], однако, стоит отметить, что и при расчетах распространения акустических сигналов методом Гауссовых пучков на большие расстояния [120] были получены неплохие результаты.

2.3.4. Метод представления приходящих импульсов в виде вейвлета Морле

Предложен оригинальный метод представления приходящих импульсов в виде вейвлета Морле [127, 128, 129] для построения функции отклика акустического канала по данным численного моделирования (выполненного в программе BELLHOP по методу Гауссовых пучков) - расчетам амплитуд и времен приходов по отдельным лучам, с учетом разрешения и точности измерительных систем и методик обработки. Рассчитанные лучевые приходы в точке приема представляются как взвешенная сумма комплексного вейвлета Морле ширина пакета которого (масштабирование вейвлета) выбирается согласно используемым зондирующим сигналам, параметрам эксперимента и систем. В результате данного преобразования лучевые приходы огибающей принимают ВИД корреляционной функции соответствующей представлению результатов экспериментальных измерений функции отклика акустического канала при корреляционной обработке сложных сигналов (рис. 2.12).

Вейвлеты – это волнообразные колебания, представленные семейством математических функций, амплитуда которых, начиная с нуля, увеличивается и потом затухает обратно в ноль, т.е. быстро затухающие осцилляции конечной длины (локализованные по времени и частоте). С помощью них можно представить сигнал s(t) как взвешенную сумму одной базисной функции $\psi_k(t)$

путем ее смещений и растягиваний на оси времени, которые задаются коэффициентами *C*_{*k*}:

$$s\left(t\right)=\sum_{k}C_{k}\psi_{k}\left(t\right)$$



Рис. 2.11. Представление комплексного вейвлета Морле.

В настоящей работе используется представление сигналов на основе комплексного вейвлета Морле, который задается функцией:

$$W_{M}(t) = (\pi \cdot F_{b})^{0.5} \cdot \exp(2 \cdot \pi \cdot i \cdot F_{c} \cdot t) \cdot \exp(-(t^{2})/F_{b})$$

Параметры F_b и F_c определяют полосу частот и центральную частоту вейвлета Морле, соответственно. В графическом виде, свойства данного вейвлета представлены на рис.2.11.

Воспользуемся модифицированным представлением вейвлета Морле:

$$W_{imp}(t) = \mathbf{A} \cdot \exp\left(2 \cdot \pi \cdot i \cdot \mathbf{F}_{c} \cdot t\right) \cdot \exp\left(-\left(\left(t - \mathbf{F}_{c}\right)^{2}\right) / \mathbf{w}\right)$$

где A – амплитуда отдельного прихода в точке приема, F_c – время распространения до точки приема, w – ширина импульса, величина которой задается исходя из условий эксперимента и ширины автокорреляционной функции излученного сигнала.



Рис. 2.12. Представление акустических приходов с использованием вейвлета Морле. а) 1 – время прихода (t) = 5, Амплитуда (A) = 0.3, ширина импульса (w) = 1; 2 – (t=5, A=1, w=1); 3 – результирующая. б) 1 – (t=3, A=0.3, w=1); 2 – (t=6, A=1, w=1); 3 – результирующая. в) 1 – (t=4, A=0.3, w=2); 2 – (t=7, A=1, w=2); 3 – результирующая.

На представленных ниже рисунках (2.13 – 2.15) показано, как при моделировании, происходит изменение амплитудно-временной характеристики канала для первых приходов для разных частот и длительностей излучаемых сигналов. Моделирование распространения акустических импульсов осуществлялось в диапазоне углов выхода лучей 0 – 5 градусов для зимней гидрологии и условий эксперимента описанного в Главе 3, раздел 3.1.



Рис. 2.13. Моделирование распространения акустических импульсов для зимней гидрологии, углы выхода лучей 0 – 5 градусов (частота излучения 400 Гц): а) – «лучевые» приходы; б) - вейвлет представление, в) – вейвлет представление, амплитуда показана градацией цвета.



Рис. 2.14. Моделирование распространения акустических импульсов для зимней гидрологии, углы выхода лучей 0 – 5 градусов (частота излучения 2500 Гц): а) – «лучевые» приходы; б) - вейвлет представление, в) – вейвлет представление, амплитуда показана градацией цвета.



Рис. 2.15. Моделирование распространения акустических импульсов для зимней гидрологии, углы выхода лучей 0 – 5 градусов (частота излучения 2500 Гц): а) – «лучевые» приходы; б) – углы выхода, в) – углы прихода.



Рис. 2.16. Моделирование распространения акустических импульсов для летней гидрологии (частота излучения 2500Гц): а) – «лучевые» приходы; б) - вейвлет представление, в) – углы выхода; г) – вейвлет представление, амплитуда показана градацией серого.
На рисунках 2.16 и 2.17 приведены графики примеров расчетов распространения акустических импульсов в диапазоне углов выхода лучей ± 35 градусов для летней гидрологии в условиях шельфовой зоны Японского моря.



Рис. 2.17. Моделирование распространения акустических импульсов для летней гидрологии (частота излучения 400Гц): а) – «лучевые» приходы; б) - вейвлет представление, в) – углы выхода; г) – вейвлет представление, амплитуда показана градацией серого.

В большинстве случаев для построения рассчитанной функции отклика канала применяется БПФ для вычисления частотного спектра излучаемого сигнала, расчет спектра принятого сигнала, спектра функции корреляции «идеальных» принятого сигнала с излученным. Далее, обратным БПФ получают функцию корреляции, огибающую которой и используют потом для сравнения рассчитанных импульсных откликов с экспериментальными. Также для лучшего соответствия экспериментальному разрешению по времени и/или избавлению от высокочастотных составляющих, применяется сглаживание для рассчитанных огибающих [37]. Использование же в численном моделировании амплитудновременной структуры приходящих импульсов вейвлета Морле, позволяет учесть разрешение и точность измерительной и регистрирующей аппаратуры в эксперименте, методик обработки. Результаты численных расчетов неоднократно подтвердили адекватность данного метода и показали хорошую точность при сопоставлении расчетных и экспериментально полученных данных [102-109] (Глава 3, разделы 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, Глава 4, раздел 4.1).

Выводы по главе

На основании сформулированных задач были отобраны, разработаны и протестированы:

• программные средства, осуществляющие регистрацию, расчет, и отображение принятой гидроакустической информации, импульсных характеристик волновода и сопутствующих данных с дополнительных датчиков, станций и приборов;

• программы для осуществления моделирования, численных расчетов, анализа и отображения характеристик распространения акустических сигналов в условиях шельфа;

В том числе, были проанализированы, отобраны и апробированы в натурных условиях:

• оптимальные параметры сложных модулированных Мпоследовательностью сигналов с фазовой манипуляцией;

• оптимальные параметры режимов излучения для акустического мониторинга изменчивости структуры вод морской среды;

• оптимальные параметры режимов излучения при встречном акустическом зондировании в условиях мелкого моря и очень мелкого моря.

ГЛАВА 3. Экспериментальные результаты акустического мониторинга динамических процессов в шельфовых зонах

В настоящей главе представлены материалы экспериментальных исследований, проведенных в натурных условиях, полученные при участии автора с 2004 года по 2017 год в морских и прибрежных экспедициях ТОИ ДВО РАН. Экспериментальная апробация разработанных методик и систем, и исследований с их применением осуществлялась в шельфовой зоне Японского моря у мыса Гамова, в районе расположения акустико-гидрофизического полигона Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева ДВО РАН (МЭС Шульц) и прилегающей акватории Японского моря [102-109, 145-149, 152, 198, 214-219].

Все представленные ниже экспериментальные исследования проходили при непосредственном участии автора в процессе планирования, постановки, выполнения, сбора, обработки, моделирования, анализа и интерпретации данных. Все экспериментальные работы осуществлялись совместно с сотрудниками лаборатории акустической томографии океана ТОИ ДВО РАН.

3.1. Экспериментальные оценки и численные расчеты влияния изменения уровня поверхности моря, связанного с приливно-отливными явлениями, на импульсные характеристики волновода

Ниже представлены результаты экспериментального исследования, которое было проведено на стационарной акустической трассе (рис. 2.6) расположенной на акватории акустико-гидрофизического полигона ТОИ ДВО РАН для обоснования возможности применения расчетных данных высоты прилива [137] при анализе зависимости времен пробега импульсов по различным лучевым траекториям для реконструкции поля температуры в волноводе [106, 107].

При исследованиях гидрофизических процессов методами акустической томографии в мелководных акваториях важно учитывать влияние изменений глубины моря при прохождении приливной волны в зоне установки излучающих и приемных систем на стационарных трассах. Прямые измерения высоты прилива океанологическими приборами возможны лишь в штилевую погоду при отсутствии нагонных явлений. Попытки выделить приливную составляющую при анализе флуктуаций акустических сигналов часто (летне-осенний период) приводят к ошибкам из-за превалирующего влияния колебаний температурного фона на стационарной трассе, вызванных приливной волной, т.к. внутренний прилив достигает измерительных систем позже, чем изменение глубины моря, изза меньшей скорости распространения по шельфу. Интересные данные по этому вопросу приведены в [138].

Исследования проводились в период с 28 февраля по 2 марта 2006 года в штилевую погоду. Гидрологические условия в это время характеризовались постоянством скорости звука и температуры от поверхности до дна. Изменение уровня прилива, рассчитанного на период проведения измерений, и изотермы представлены на рис. 3.16.

Стационарно установленный излучатель (рис. 2.1) использовался для ежеминутного зондирования морской среды акустическими сигналами типа М-последовательностей с фазовой манипуляцией (511 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 2500 Гц. Управление режимами излучения осуществлялось по кабелю с берегового поста.



Рис. 3.1. (а) Импульсная характеристика волновода; (б) изменение уровня прилива, рассчитанного на период проведения измерений, и изотермы; (в) вариации времен пробега импульса по лучу (эксперимент - пунктирная линия; расчет – сплошная линия).

Приемная стационарная система (рис. 2.6) была установлена вблизи дна на удалении ~2100 метров от излучателя и соединена кабелем с береговой лабораторией, где в реальном масштабе времени вычислялась функция взаимной корреляции между принятыми и излученными сигналами.

На полученной таким образом импульсной характеристике волновода (рис. 3.1a) было зафиксировано до девяти приходов лучей в точку приема. На большинстве приходов явно прослеживаются вариации времен с периодом близким к 12 часам. При этом, величина вариаций времен прихода для максимума и минимума прилива хорошо выделяется для поздних приходов и достигает величины 2 мс, рис. 3.1a. На рис. 3.1в приведены эти вариации для седьмого прихода (сплошная линия). Сравнение рисунков 3.1б и 3.1в показывает, что максимальные и минимальные значения времен пробега импульса по данному лучу соответствуют максимумам и минимумам уровня воды в фазе прилива и отлива соответственно. Лучевая картина представлена на рисунке 3.2.



Рис. 3.2. Лучевая картина распространения звука и рельеф дна.

Для периода эксперимента было выполнено численное моделирование в программе BELLHOP с использованием метода Гауссовых пучков [110], метода представления приходящих импульсов в виде вейвлета Морле (Глава 2, раздел 2.3.4.) и программ разработанных автором. Проведено сравнение рассчитанных и измеренных значений функции отклика канала, рис. 3.3



Рис. 3.3. Измеренная функция отклика акустического канала и результаты численного моделирования параметров приходов в соответствии с условиями эксперимента.

Представленные на рис. 3.3 результаты свидетельствуют о хорошем совпадении расчетов с данными натурных измерений, что позволяет использовать численное моделирование для идентификации групп лучей и расчета их характеристик. Так для рассматриваемой трассы идентифицируется девять групп лучей с углами выхода в диапазоне $\pm 20^{\circ}$, имеющих число отражений от дна и поверхности от 1 до 9. Для первой группы лучей, имеющих близкие к нулевым углы выхода, влияние приливных вариаций уровня в несколько раз меньше в силу геометрического эффекта многократных отражений от дна и поверхности и более короткого пути лучей. распространения В указанная тоже время группа лучей более чувствительна к изменениям средних параметров среды вдоль всей трассы. На рис. 3.1в приведены также результаты расчетов времен пробега импульса по лучу

с учетом влияния прилива на глубину волновода. Глубины менялись с шагом 10 см по данным расчета высоты прилива, приведенным на рис.3.16. Как видно, моделирования довольно точно описывают результаты экспериментально зафиксированные вариации времени пробега импульса по лучу, связанные с приливом. На экспериментальной зависимости отмечаются вариации с периодом 2 - 3 часа, что возможно связано с сейшами, индуцированными приливом. при Подобные результаты были получены И проведении дальнейших исследований в различных акваториях [103 - 105].

Расчеты показывают, что вариации уровня поверхности моря, связанные с приливно-отливными явлениями, изменяют времена прихода, в представленной схеме измерений в зимний период времени, на ± 1 мс, что соответствует для температуры величине 0.4 градуса °C и такие изменения должны учитываться.

Использование среднестатистических данных профилей скорости звука при расчете времен приходов собственных лучей и моделировании функции отклика канала (Глава 2, раздел 2.3.1. - 2.3.4.) позволяет точно идентифицировать приходы большинства импульсов на частоте 2500 Гц в эксперименте в зимний период времени.

Для реализации метода непрерывного мониторинга мгновенных значений температуры и скорости звука в среде в реальном масштабе времени, необходимо учитывать влияние изменений уровня моря на времена приходов собственных лучей.

3.2. Оценка влияния вертикального распределения скорости звука, и захода холодных вод во время приливных явлений на характеристики звукового канала

3.2.1. Акустическая трасса длиной 2 км, глубины до 45 м, Японское море

Далее представлены результаты экспериментов по исследованию закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических полей и полей температур в условиях мелкого моря на шельфе Японского моря [107].

Экспериментальные исследования проводились на базе МЭС м. Шульца в шельфовой зоне Японского моря в августе 2005 года на акустической трассе, состоящей из стационарно установленных источника (рис. 2.1) и приемника звука (рис. 2.6). Излучение сложных фазоманипулированных сигналов на основе Мпоследовательностей (2500 Гц центральная частота, 511 символов, 4 периода частоты несущей на символ) осуществлялось раз в минуту на протяжении суток. Данная томографическая пара была соединена кабельными линиями с береговым постом. где В масштабе реального времени происходило вычисление корреляционной функции принятого и излученного сигналов и определялись времена распространения акустических приходов по различным лучевым траекториям. В месте расположения приемной системы, с борта установленной на якорь яхты, каждый час выполнялись гидрологические измерения вертикального распределения солености и температуры.



Рис. 3.4. а - зависимость температуры воды от времени суток и глубины; б – расчетные, в – экспериментальные, вариации импульсной характеристики акустического канала.

Гидрологические условия характеризовались наличием периодических полусуточных приливов вызывавших изменения в распределении поля температур, при заходе с внутренним приливом на шельф холодных вод в придонные слои, теплая вода с поверхности опускалась вниз (рис. 3.4а).

Экспериментально полученные вариации времен приходов акустических импульсов на стационарной акустической трассе, представлены на рисунке 3.4в. Как следует из приведенных импульсных характеристик, наблюдается хорошая корреляция между изменениями температуры воды придонного слоя и временами поздних акустических приходов. Когда придонные холодные воды начинают заходить на акустическую трассу прослеживается подъем термоклина, вследствие чего формируется придонный звуковой канал. Что в свою очередь ведет к захвату основной энергии сигнала придонным каналом и ее распространению по лучам, углы скольжения которых малы, а скорости распространения минимальны. Во время отлива теплая вода с поверхности опускалась вниз, и ширина придонного звукового канала уменьшалась, что приводило к перераспределению энергии в верхнюю часть волновода, увеличению амплитуды ранних приходов, которые формируются лучами с крутыми углами скольжения и более высокими скоростями распространения. В период времени с 06:30 до 15:30, когда происходило уменьшение толщины термоклина (согласно гидрологическим данным (рис. 3.4а)), соответствующее изменение времени распространения поздних импульсов с максимальной амплитудой, т.е. его уменьшение, на импульсной характеристике (рис. 3.4в) наблюдалось с трехчасовым сдвигом (с 09:30 до 18:30). По-видимому, это связано с тем, что гидрологические измерения производились в точке расположения приемной системы, а за трехчасовой период происходит максимальное заполнение акустической времени трассы, ориентированной практически перпендикулярно приливному фронту, теплыми или холодными водами.

Суточная зависимость времен распространения ранних акустических приходов, которые формируются лучами с крутыми углами скольжения, имеет куда более сложную структуру, однако даже при качественном анализе

прослеживается ее корреляция с изменчивостью температуры верхних слоев волновода. К примеру, с 04:00 до 20:00 (рис. 3.4в) уменьшается время распространения ранних приходов, это соответствует опущению теплой воды в более глубинные слои (рис. 3.4а).



Рис. 3.5. Импульсные характеристики акустического канала для времени 21:30 (а), 23:30 (б), 11:30 (в). Сплошная черная линия – эксперимент; пунктирная серая – расчет.

На основе данных гидрологических измерений, профиля дна (полученного путем промера глубин эхолотом в штилевую погоду), и атласных [140] данных о строении и акустических свойствах дна на исследуемой акватории, была построена модель акустической трассы. Численное моделирование

осуществлялось в программе BELLHOP с использованием метода Гауссовых пучков [110] и программ разработанных автором, что позволило более точно идентифицировать акустические приходы. На рисунке 3.46 приведены результаты моделирования для всего периода эксперимента, а на рисунке 3.5 представлены рассчитанные и экспериментальные импульсные характеристики акустического канала для нескольких характерных моментов связанных с прохождением приливного фронта.

Так как используемые частоты сигналов акустического зондирования находятся выше 100 Гц, а расстояния не превышают 10 – 30 км, то согласно теоретическим и экспериментальным данным (в частности [18]) моделирование может быть выполнено с использованием лучевых методов расчета акустического поля. Выбор метода Гауссовых пучков и самой программы, в которой реализован этот метод, для расчета акустического поля был основан на многочисленных неоднократно работах (среди которых [121-126]), в которых была продемонстрирована его адекватность и достаточно хорошая точность расчетов при сопоставлении с экспериментально полученными данными, в особенности в высокочастотной области выше 1 кГц.

Стоит отметить довольно неплохое соответствие экспериментальных и рассчитанных времен и амплитуд акустических приходов с различными лучевыми траекториями распространения (рисунки 3.4 и 3.5), что в свою очередь служит основанием полагать, что данный метод, программы и модель могут быть использованы в дальнейшем для успешного решения задач по восстановлению полей температур. Также следует заметить, что без каких-либо технических сложностей возможна организация передачи информации об изменениях температуры придонного слоя в месте расположения акустического источника посредством изменения излучаемых последовательностей. Кроме того, возможно дальнейшее повышение точности решения обратной задачи путем интеграции в схему измерений спутниковых данных о поверхностной температуре на акватории расположения акустической трассы. 3.2.2. Акустическая трасса длиной 23 км, глубины до 110 м, Японское море

Экспериментальные исследования в заливе Посьета направленные на исследование закономерностей формирования импульсных характеристик волновода по единой методике проводились в июне, июле и августе 2009 г. в различных гидролого-акустических условиях на трассе протяженностью 23 км [105]. Источник звука (широкополосный стационарно установленный излучатель (рис. 2.1) расположенный на глубине 40 м в 400 м от м. Шульца (рис. 2.8) излучал М-последовательности в широких пределах с центральными частотами 366-2500 Гц. В качестве имитатора приемного тракта АПА (автономного подводного аппарата) был использован радио-гидроакустический буй с GPS (рис. 2.5), он дрейфовал на удалении 23 км от излучателя. Глубина моря составляла 110 метров, гидрофон заглублялся на 100м.

Гидрологические условия В июне характеризовались небольшим отрицательным градиентом от поверхности до дна и началом захода холодных вод на шельф (рис. 3.6а). Это наиболее сложное время для идентификации приходящих лучей, так как импульсная характеристика представляет собой ансамбль импульсных сигналов, приблизительно равных по амплитуде и длительностью около 0.1с (рис. 3.6а). Первый импульс идентифицировался как прошедший с минимальным количеством отражений по всему волноводу, а рефрагировавший последний _ как В нижнем более холодном слое. Максимальный импульс может быть зафиксирован как в начале ансамбля, так и в середине, и если расстояние рассчитывать по времени его прихода, то ошибка может составить 140 м. Анализ рассчитанных скоростей звука по данным GPS и временам приходов первого и последнего импульса показал, что средняя скорость первого импульса составляла 1474.8 м/с с максимальным отклонением 1.5 м/с; а средняя скорость последнего – 1468 м/с с таким же отклонением. Таким образом, при правильном определении средней скорости луча, прошедшего по всему слою с минимальным количеством отражений (первый импульс), ошибка измерения

дистанции составит около 20 м, что может быть связано с точностью GPS. В нашем случае ошибка измерения координат GPS составляла 18 м.



Рис. 3.6. Вертикальные разрезы скорости звука и экспериментальные импульсные характеристики, полученные в различных гидрологических условиях: (а) июнь; (б) июль; (в) август.

Эксперимент в июле 2009 г. проводился на той же трассе по аналогичной методике. К этому времени сформировался прогретый слой от поверхности до 40 м, далее промежуточный слой теплой воды до 65 м и затем холодный придонный слой. Импульсная характеристика волновода определяется тремя основными приходами сигналов (рис. 3.6б). Первая группа лучей, прошедшая через все слои, распространяется со средней скоростью 1483.5 м/с. Две последующие группы с приблизительно равными амплитудами и средними скоростями 1475.7 и 1471.4 м/с сформированы лучами, траектории которых проходят через промежуточный и придонный слои. Общая длительность ансамбля приходов, как и в июне, около 0.1 с и значения скоростей распространения этих импульсов оставались стабильными в течение нескольких часов. Таким образом, как и в июне, измерение времени по

максимальному импульсу может привести к ошибке расчета расстояния 140 метров.

Эксперимент в августе и предыдущие исследования [107] показали, что с увеличением отрицательного градиента вертикального распределения скорости звука с глубиной, при излучении и приеме сигналов вблизи дна, максимальная энергия одного или двух близкорасположенных импульсов концентрируется в придонном звуковом канале (рис. 3.6в). Следовательно, при правильном определении эффективной скорости распространения звука от источника до приемника при расположении АПА вблизи дна ошибка в измерении расстояния составит несколько метров.

Таким образом, в результате натурного эксперимента показана зависимость импульсного отклика канала распространения акустической энергии от вертикального распределения скорости звука с глубиной. Полученный данные интерпретированы для применения в задачах навигации АПА при измерении расстояния до источника сигналов в условиях многолучевости на шельфе Японского моря.

3.2.3. Акустическая трасса длиной 615 м, глубины до 8 м, Корейский пролив

В сентябре 2010 г. вблизи острова Норёк в Корейском проливе проводились исследования закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических и гидрофизических полей при зондировании сложными фазоманипулированными сигналами с центральной частотой 2500 Гц [103, 104]. Вблизи дна были установлены излучатель (глубина 8 м) и на расстоянии 615 м от него приемная система на базе радиогидроакустического буя (глубина 6 м). Каждую минуту в течение 15 ч излучались сложные широкополосные сигналы (М-последовательности, длина 255 символов, 4 периода несущей частоты на символ). Взаимнокорреляционная обработка принятых сигналов с репликой излученного позволила получить и проанализировать изменчивость импульсной характеристики волновода на данной трассе (рис. 3.7а).



Рис. 3.7. Импульсные характеристики (а) и распределение температур по глубине и изменение уровня моря из-за приливных явлений (штриховая линия) (б).

На импульсных характеристиках четко фиксируется до двенадцати приходов акустической энергии с различным количеством отражений от дна и поверхности. Синхронно с акустическими работами в точке размещения приемной системы проводились гидрофизические измерения. На рис. 3.76 приведены распределение температур по глубине, измеренное вблизи приемной системы CTD-зондом, и изменение уровня моря из-за приливных явлений. По гидрологическим данным были произведены расчеты лучевых траекторий, которые показали, что первые два-три прихода соответствуют траекториям вблизи дна без отражений от поверхности, и распространяются под углами близкими к нулю, остальные же распространяются во всем слое воды с

отражениями от дна и поверхности. Такая структура акустического поля позволила оценить изменчивость средней по трассе скорости звука (температуры) в придонном слое по данным времен распространения первого импульса, так как пройденный им путь практически равен горизонтальному расстоянию между источником и приемником сигналов. На начальном этапе измерений (до 20:00 часов) рассчитанные значения скорости звука составили 1526 м/с, а затем увеличились до 1527 м/с. Соответственно, температуры, рассчитанные по формуле Дель-Гроссо, изменились от 23.7 до 24.4 градуса. Можно отметить хорошее соответствие полученных значений с результатами гидрологических измерений. Небольшое уменьшение температуры у дна до 20:33 часов объясняется заходом более холодных вод с приливом из глубоководной части Корейского пролива. Можно также отметить однозначную зависимость вариаций времен последних приходов от изменений уровня моря с приливами и отливами. Приливы отмечались в 18:00 и в 05:00 (максимальный 1.1м в 18:00). В эти же часы зафиксированы и максимальные времена приходов. Это связано с тем, что времена пробега многократно отраженных от дна и поверхности импульсов чувствительны к изменениям глубины и по амплитуде их вариаций могут быть определены уровни приливов и отливов [158].

3.3. Сезонные изменения на стационарной акустической трассе

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования импульсной характеристики волновода на шельфе Японского моря в зависимости от сезонных изменений поля температур [108]. Приведены численные расчеты акустических полей для различных гидрологических условий, подтверждающие возможность решения задач реконструкции гидрофизических полей по результатам зондирования морской среды сложными фазоманипулированными сигналами.

Решение задач реконструкции гидрофизических полей по данным акустического зондирования BO многих случаях связано с измерением импульсной характеристики диагностируемого распространения канала

акустической энергии. Для мелководных акваторий С многолучевым распространением сигналов основной проблемой является идентификация и измерение времен пробега звуковых импульсов, распространяющихся вдоль лучей. соединяющих источники и приемники звука. Для исследования возможности ее решения при участии автора был разработан акустический аппаратно-программный комплекс, который позволил проводить долговременные эксперименты в этом направлении [141, 107].

Техническая реализация метода исследований основана на применении сложных фазоманипулированных сигналов с центральной частотой 2500 Гц (Мпоследовательность, 511 символов, 4 периода несущей частоты) для зондирования морской среды с последующим вычислением взаимной корреляционной функции принятого и излученного сигналов. Что позволяет измерять импульсную характеристику волновода, т.е. разрешать во времени отдельные приходы акустической энергии, которые напрямую связаны со скоростью распространения акустической энергии по различным лучевым траекториям и температурой в соответствующих слоях.

Измерения осуществлялись на стационарной акустической трассе (рис. 2.6) протяженностью 2092 метров практически ежемесячно в 2006 – 2007 годах. Источник (рис. 2.1) и приемник (рис. 2.6) звука были установлены в одном метре от дна при глубинах моря 40 и 43 метра соответственно.

Карта-схема района эксперимента с расположением приемника и излучателя, а также с точками, для которых имеются средние многолетние измерения гидрологических параметров среды [140], представлена на рис. 3.8. Средние за месяц, распределения скорости звука по глубине в точке G2 по данным [140] использовались для численного моделирования сезонных вариаций скорости звука рис. 3.9, в районе измерений, для определения их влияния на амплитудно-временную функцию отклика акустического канала.



Рис. 3.8. Схема экспериментов по акустическому мониторингу гидрофизических характеристик на шельфе вблизи м. Шульц Японского моря (S - излучатель, R - приемник, G1-G3 - точки гидрологических измерений).



Рис. 3.9. Средние за месяц распределения температуры в точке G2.

Для более наглядного представления вида сезонной изменчивости гидрофизических параметров среды по глубине и во времени, данные рис. 3.9 представлены в 3-х мерном виде (рис. 3.10), где амплитудам величин соответствуют градации серого. Вид представленных на рис. 3.10 распределений температуры свидетельствует о «пилообразном» характере процессов сезонной изменчивости этих параметров с минимальными значениями в период времени январь-апрель, И нахождения абсолютного минимума В феврале-марте. Увеличение значений температуры и скорости звука наблюдается с июня по октябрь. При этом глубина слоя, в котором эти параметры существенно увеличиваются по абсолютным значениям, крайне мала, составляя величину порядка 50-60 метров.



Рис. 3.10. Пространственно-временная изменчивость температуры на шельфе Японского моря.

По данным многолетних исследований (рис. 3.10) в зимние месяцы, с декабря по апрель, вертикальное распределение скорости звука в этом районе близко к изоскоростному. В остальное время, с прогревом верхних слоев, отмечается отрицательный градиент скорости звука от поверхности до дна. По данным

гидрологических измерений полученных при проведении акустических экспериментов на шельфе в районе расположения акустической трассы, в августе и сентябре, с периодическим заходом холодных вод из глубокого моря, связанного с приливом, формируется придонный слой с меньшими значениями скорости звука, толщиной 5-10 метров.



Рис. 3.11. (а) Типичные для каждого месяца импульсные характеристики канала; (б) относительные времена приходов импульсов; (в) средние температуры в водном слое: (светлые кружки) - рассчитанные по данным акустического зондирования; (сплошная линия) - полученные по данным многолетних океанологических наблюдений в данном районе; (темные кружки) - значения измеренных средних температур во всем слое и температуры в придонном слое; (звездочки) - рассчитанные значения температуры в придонном слое.



Рис. 3.12. Рассчитанные по средним многолетним значениям скорости звука в районе эксперимента функции отклика акустического канала.

Типичные для каждого месяца импульсные характеристики канала приведены на рис. 3.11а. На рис. 3.12 представлены результаты моделирования функции отклика акустического канала в соответствии с параметрами эксперимента по средним многолетним данным скорости звука в районе наблюдений. Наряду функцией с отклика акустического канала, при моделировании рассчитываются траектории распространения и углы выхода и прихода импульсов, что позволяет полностью сформировать систему уравнений, для решения обратной задачи – расчета реального профиля скорости звука на основании их средних многолетних значений и измеренных в эксперименте функций отклика.

Анализ экспериментально измеренных и рассчитанных функций отклика акустического канала, приведенных на рис. 3.11а. и рис. 3.12, свидетельствует о хорошей корреляции результатов в среднем за исследуемый период. Наблюдается более высокое соответствие между измеренными и рассчитанными значениями функций отклика в зимние месяцы, что связано с более низкой дисперсией

результатов измерений профиля скорости звука в этот период. Более сложная вертикальная стратификация профиля скорости звука в районе эксперимента наблюдается с августа по октябрь месяц. В этот период расчет по средним значениям дает более ранние последние приходы по сравнению с экспериментом, что свидетельствует о более холодном (скорость звука ниже) придонном звуковом канале в осенне-летнем периоде 2006-2007 года по сравнению со средними многолетними значениями.

Условия проведения эксперимента позволили выделить И идентифицировать до девяти импульсов, которые проходят путь между излучателем и приемником по различным лучевым траекториям рис. 3.11а. Для августа приведены две импульсные характеристики, измеренные при наличии холодного придонного слоя (прилив) и без него (отлив). Февральские измерения были использованы как тестовые, т.к. в условиях постоянства температуры с глубиной импульсная характеристика была стабильна в течение трех суток с небольшими вариациями, связанными с приливом [106]. Все девять импульсов, идентифицированных по количеству отражений между дном и поверхностью, распространяются с одинаковой скоростью (1449 м/с), которая определяется по измеренному времени и рассчитанному расстоянию для любого из импульсов. В соответствие с формулой Дель-Гроссо средняя температура на диагностируемой акватории составляет 0.8 градуса. Сравнение импульсных характеристик, полученных в течение года, и в феврале (тестовая импульсная характеристика) показало, что характерные промежутки времени между импульсами, по которым может быть определено количество отражений и, соответственно, рассчитано расстояние по лучу, отмечаются и в остальные месяцы. Это хорошо иллюстрирует 3.116, где приведены относительные времена приходов импульсов, рис. полученных при сдвиге импульсных характеристик, изображенных на рис. 3.11а, таким образом, чтобы времена приходов поздних импульсов совпадали. Как видим, при этом приблизительно совпадают и времена приходов многих остальных импульсов (они обозначены светлыми кружками), т.к. рефракция лучей в разные сезоны года на столь малом расстоянии существенных поправок в

геометрию донно-поверхностных отражений не вносит. Сравнение с тестовой импульсной характеристикой позволяет определить количество отражений для любого импульса и с большой точностью рассчитать пройденное им расстояние. Тогда для решения задачи реконструкции среднего по слою поля температуры достаточно измерить время прохождения одного из этих импульсов (рис. 3.11а) и рассчитать скорость, зависящую от средней температуры в слое. Следует отметить, что более точные значения скорости будут получены с учетом расстояния, пройденного импульсом по траектории с меньшим количеством отражений, т.к. минимизируется ошибка, связанная с необходимостью учета рельефа дна между корреспондирующими точками. На рис. 3.11в приведены средние температуры в водном слое, рассчитанные по данным акустического зондирования (светлые кружки), и полученные по данным многолетних океанологических наблюдений (сплошная линия) в данном районе [140].

Наличие импульсов, которые не укладываются в отмеченные выше промежутки времени (они отмечены темными кружками на рис. 3.11б), свидетельствуют о появлении в теплое время года рефрагировавших под прогретым слоем воды лучей. Особо следует отметить максимальные по амплитуде импульсы (они отмечены звездочками), полученные при измерениях в августе. Они сформированы лучами, вышедшими под малыми углами и распространяющимися вблизи дна в холодном слое воды. Пройденное расстояние в данном случае приблизительно равно длине акустической трасы и рассчитанные значения температуры в придонном слое составляют около 5 градусов (на рис. 3.11в они обозначены звездочками). Синхронно с измерениями импульсных характеристик в августе проводились измерения вертикального распределения температур в точке размещения приемной системы гидрологическим зондом. На рис. 3.11в темными кружками обозначены значения средних температур во всем слое и температуры в придонном слое. Как можно заметить, измерение температур гидрологическими приборами и акустическими методами дают близкие результаты и в некоторых случаях существенно отличаются от среднегодовых данных.

3.4. Измерение и расчет скорости и направления течений методом встречного зондирования

Ниже приведены результаты экспериментального исследования возможностей дистанционного акустического мониторинга направления И скорости течений методом встречного зондирования [102, 145. 147] С использованием разработанного в лаборатории акустико-гидрофизического комплекса и его модификаций [102, 214]. Подробное описание приемноизлучающих систем комплекса (рис.2.1, рис. 2.9, рис. 2.11), их расположение (рис. 2.9, рис. 2.10), структурные схемы систем встречного зондирования (рис. 2.12, рис. 2.13), и описание самого метода встречного акустического зондирования представлены в Главе 2, подразделы 2.1.1, 2.2.1 и 2.2.3.

Шельфовые зоны морей И океанов играют важную роль В жизнедеятельности человека, в то же время они являются сложными объектами исследования С океанографической И физической точек зрения. для Осуществление эффективного мониторинга водной среды имеет ряд прикладных применений: морские океанографические исследования, морские транспортные и пассажирские перевозки, прибрежное освоение биологических и минеральных ресурсов, оборонные задачи. В последнее время вызывают все больший интерес исследования с помощью акустического зондирования морской среды в условиях мелкого моря [48, 131, 132] и очень мелкого моря [135, 136, 151, 133, 134]. Акустический подводный мониторинг является основной технологией для удовлетворения возрастающего спроса на подобного рода измерения. Однако это достаточно сложная задача по причине уникальных характеристик звукового канала, таких как затухание, сильная многолучевость и рефракция. Попытки адаптирования методов мониторинга, разработанных для других типов сред. привели к успешному их применению в глубоководных бассейнах. Вместе с тем достижения, полученные для мелководных акваторий, довольно скромны. Мелководный акустический канал обладает двумя основными особенностями: быстроменяющимися траекториями распространения акустической энергии и высокими уровнями негауссовского шума окружающей среды, связанного с

активным судоходством. Оба этих фактора ухудшают эффективность методов стандартного акустического мониторинга.

Поэтому для осуществления мониторинга параметров среды мелководного бассейна требуется создание специальных аппаратных средств и методов обработки сигналов. Эти комплексы должны охватывать весь спектр динамических процессов, происходящих на шельфе. Под динамическими процессами в данном случае подразумеваются: приливные колебания уровня моря, приливные и непериодические течения, нагонные явления и штормовое волнение. Приборы, производимые на мировом рынке (например, ADP – Acoustic Doppler Profiler и ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler) позволяют измерять течения только в точке постановки данных систем, не давая картины по трассе или акватории в целом, хотя зачастую эта информация представляет наибольший практический интерес. Кроме того, при отсутствии объемного рассеяния от взвешенных частиц в среде данные приборы могут давать ошибочные результаты [48]. Стоит упомянуть и их высокую стоимость.

Существуют более дешевые варианты – механические измерители течения. Они в свою очередь дают информацию о скорости и направлении движения водных масс в локальной точке и только на горизонте их расположения.

Основным недостатком названных приборов является тот факт, что при исследовании больших акваторий со сложной динамикой вод требуется большое их количество для получения объективной картины на всей площади морской акватории.

В данном подразделе описаны результаты исследований полей течений методом встречного зондирования: для условий мелкого моря - в заливе Посьет (шельфовая зона Японского моря), полученные в октябре 2007 г.; для условий очень мелкого моря - зондирования в бухте Витязь полученные в сентябре 2012 г. Все эксперименты проводились в районе расположения акустико-гидрофизического полигона ТОИ ДВО РАН.

3.4.1. Экспериментальные исследования в условиях мелкого моря

В качестве зондирующих сигналов применялись сложные фазоманипулированные сигналы с несущей частотой 2500 Гц на трассе протяженностью 2098 M, при этом использовали 511-символьные Мпоследовательности с длиной символа в 4 периода несущей частоты, встречное излучение осуществлялось синхронно один раз в минуту [102]. В точке расположения дальней от берега системы был установлен ADP для измерения скоростей течений, а также с борта яхты проводились ежечасные измерения вертикальных профилей температуры и солености с помощью СТД-зонда (рис. 2.9). Принятые сигналы от обоих трансиверов передавались на береговой пост по кабелю. Для получения временных откликов среды при обработке сигналов проводилась полосовая фильтрация и вычисление функций корреляции принятых сигналов с репликами излученных. Полученные таким образом импульсные характеристики волновода (рис. 3.13) (максимумы которых соответствуют временам приходов акустических сигналов, распространяющихся по разным траекториям вдоль потока и против него) использовались для расчета проекций течений на звуковую трассу вдоль различных лучей и восстановления величины и направления горизонтальных течений.

При встречном зондировании измеряются времена приходов n-й группы лучей t_n^- и t_n^+ , соответствующие распространению акустических сигналов против потока и вдоль него. Далее находится сумма времен прихода $S_n = t_n^+ + t_n^-$ и их разность $\Delta t_n = t_n^- - t_n^+$ и определяются компоненты скорости потока $V_n = \Delta t_n \cdot c_n^2 / 2r$ в направлении трассы длиной *r*, связанные с n-й группой лучей и скоростью распространения этой группы $c_n = 2r/S_n$.

Гидрологические условия (рис. 3.14) во время проведения эксперимента характеризовались постоянным наличием придонного слоя холодной воды (от 35 до 43 метров), в котором распространялась основная часть энергии сигнала (4-й приход, на рис. 3.13).



Рис. 3.13. Импульсные характеристики волновода, полученные за весь период эксперимента: а) – направление излучения от берега; б) - в обратном направлении.



Рис. 3.14. Зависимость температуры от времени суток и глубины.

На рисунках 3.15а и 3.15б приведены импульсные характеристики, измеренные при встречном зондировании и лучевая картина, соответственно. Первые три импульса прошли путь по лучам с различным количеством отражений между дном и поверхностью. Максимальный по амплитуде четвертый импульс образован группой лучей, распространяющихся в придонном слое с более холодной водой. Сравнение двух зависимостей (см. рис. 3.13) показывает, что основные закономерности формирования структуры акустического поля при распространении акустического сигнала по течению и против него идентичны, т.е. соблюдается принцип взаимности. Расчет скорости и направления течения были проведены для второго, третьего и четвертого приходов, т.к. они выделяются с хорошим превышением над помехой.



Рис. 3.15. а) – Нормированная импульсная характеристика волновода при встречном зондировании морской среды (мгновенные значения): темная кривая – направление излучения от берега, светлая кривая – направление излучения к берегу; б) – характерная лучевая картина для всего времени эксперимента.



Рис. 3.16. а) – скорость течений усредненных по часовому скользящему интервалу: светлые кривые – 2й и 3й приход, темная кривая – 4й приход; б) – направление и скорости течений по горизонтам, полученные по данным ADP.

Анализ данных расчета показал, что в придонном слое течение направлено от берега, а суммарное течение во всем волноводе к берегу (рис. 3.16а). С этими данными хорошо согласуются результаты измерений, полученные с помощью ADP (рис. 3.16б).

3.4.2. Тестовый эксперимент в условиях очень мелкого моря

Особый интерес в последние годы стали представлять исследования по акустическому зондированию морской среды, проводимые в условиях так называемого очень мелкого моря [135, 136, 131-134]. Глубины в таких районах не превышают 30 м. Малые глубины, наличие береговой черты, ветрового, приливного и конвективного перемешивания вод, прибрежного подъема

глубинных вод, эффектов поворота и завихрения течений, связанных С рельефа береговой черты изменениями дна И формы обусловливают значительную изменчивость полей течений и температур [150, 136, 151]. Следует отметить и высокий уровень акустических шумовых помех, вызванных интенсивным судоходством.

Мотивацией для проведения тестового эксперимента послужил цикл работ [133,134,135], где использованы схожие с применяемыми автором настоящей работы методы [105, 152], частоты и аппаратура, но уже в условиях очень мелкого моря.

Результаты, приведенные в работе [133], показывают сильную зависимость времени приходов акустической энергии от фазы прилива и значительных вариаций вертикального распределения скорости звука. Это делает невозможным определение времени распространения сигнала по максимальному значению функции корреляции, так как происходит «перекачка» основной энергии сигнала в канал распространения, отличный от взятого за опорный [105, 152]. Результаты, приведенные в работах [134, 135], характеризуются большим разбросом скоростей течений, полученных с использованием метода встречного зондирования (от -500 до 500 см/с), в отличие от данных измерений ADP (от -15 20 до см/с). По-видимому, ЭТО связано с неустойчивостью, сильной изменчивостью и чрезвычайной сложностью структуры импульсных приходов, близостью расположения трансиверов к жестким стенам пирсов, что приводит ко множественным переотражениям, с необходимостью доработки алгоритма детектирования пиков корреляционной функции (что и отмечают авторы работы [134]). Учитывая данные, полученные авторами работ [133, 134], представляется целесообразным провести тестирование используемых автором настоящей работы систем [105, 152], сигналов, аппаратуры и методов обработки в условиях малых глубин (4–12 м) на шельфе Японского моря.

Ниже представлены результаты исследования поля течений методом встречного зондирования в б. Витязь, полученные в сентябре 2012 г [145]. Цель работы – исследование возможностей акустического мониторинга и используемой аппаратуры в условиях очень мелкого моря, где существенную роль играют донно-поверхностные отражения и, в отличие от глубокого моря, наблюдается значительная временная нестабильность сигналов.

В качестве зондирующих применялись сигналов сложные несущей частотой фазоманипулированные сигналы 6 кГц c на трассе 152 использовались 255-символьные протяженностью Μ, при ЭТОМ Mпоследовательности с длиной символа в 4 периода несущей частоты (рис. 2.10). Использовались пьезокерамические трансиверы, установленные стационарно вблизи дна на глубинах 4 м (трансивер № 1) и 12 м (трансивер № 2), соединенные кабельными линиями с береговой лабораторией.

При проведении исследований в точке расположения трансивера № 2 с моторной лодки проводились ежечасные измерения вертикальных профилей температуры и солености морской воды с помощью СТД-зонда (рис. 3.19). Встречное излучение сигналов осуществляли каждые 30 с в течение 24 ч, временное разнесение между зондированием в прямом и обратном направлениях – 5 с. Принятые сигналы от обоих трансиверов передавались на береговой пост по кабелю, где производилась обработка сигналов с частотой дискретизации 48 кГц. На время проведения эксперимента примерно в центре акустической трассы на дно был установлен ADP для измерения скоростей течений (рис. 3.17). Эти данные использовались для сравнения результатов независимых методов измерения скоростей течений. Для получения временных откликов среды проводили полосовую фильтрацию и вычисление функций корреляции принятых сигналов с излученными. Полученные импульсные характеристики (рис. 3.18) использовались для расчета проекций скоростей течений на звуковую трассу вдоль различных лучей и восстановления величины и направления горизонтальных течений. Метод встречного зондирования описан в разделе 2.1.1.



Рис. 3.17. Карта-схема эксперимента по встречному зондированию (б. Витязь, Японское море).



Рис. 3.18. Импульсные характеристики волновода, полученные за весь период эксперимента. Распространение акустического сигнала от трансивера № 1 к трансиверу № 2 (а) и в обратном направлении.

Расчет скорости и направления течения проведен для первого и четвертого приходов, так как они имеют хорошее превышение над помехой и стабильны во

времени. Оба они распространяются по всей водной толще и различаются количеством отражений от дна и поверхности.



Рис. 3.19. Зависимость скорости звука от времени суток и глубины.

Ввиду большего количества отражений и, соответственно, большего пройденного пути четвертый приход сильнее подвержен влиянию состояния поверхности моря и особенностей рельефа дна.

При скоростей течений сопоставлении результатов измерения независимыми методами стоит учитывать тот факт, что скорости и направления течений в точке и интегральные по трассе, даже при ее малой длине (152 м), могут различаться. Кроме того, здесь сказываются перепад глубин расположения трансиверов (от 4 до 12 м), особенности топографии дна, наличие внутренних волн, о чем свидетельствуют резкие перепады температуры в придонном слое в точке расположения ADP с 03:30 до 08:00, а также наличие регулярно генерируемых вихревых структур между о-вом Таранцева и мысом Шульца (по всей видимости, связанных с взаимодействием приливного течения и подводного углубления в бухте Витязь [153]). Следует отметить и недостаточную точность определения скоростей течений, что в первую очередь связано с недостаточной частотой дискретизации сигнала 48 кГц, которую на момент проведения

эксперимента не представлялось возможным сделать выше ввиду технических ограничений записывающей аппаратуры.



Рис. 3.20. Данные, полученные в ходе эксперимента: (а) направление и скорость ветра, полученные по данным метеостанции. (б) 1- данные о придонной температуре, полученные с датчиков ADP, 2 - приливные колебания уровня моря, по данным ADP. (в) усредненные по скользящему трехчасовому интервалу значения скорости течения по данным ADP, приведенные к направлению акустической трассы: 1 - усредненное значение по всей водной толще, 2 значения в придонном слое; скорости течения, полученные по результатам акустических измерений: 3 - расчетные значения по времени распространения первого акустического прихода, 4 расчетные значения ПО времени распространения четвертого прихода; 5 – средние взвешенные значения скорости течения.
Оценки показали, что погрешность определения скоростей течений акустическим методом составляет 5–7 см/с. Это почти совпадает с погрешностями ADP (если сравнивать отклонения скоростей течений от средних взвешенных линий (см. рис. 3.20в). Для полученных в данном эксперименте величин инструментальная погрешность по паспортным данным ADP составляет 10%.

Следует также отметить, что, возможно, результаты акустического измерения течений зависят от состояния поверхности моря. По-видимому, завышенные значения рассчитанных скоростей течений в период с 15:07 до 21:07 связаны с повышенными скоростями ветра и, как следствие, с повышенной шероховатостью поверхности моря.

Точность измерения скоростей течений можно потенциально повысить, если при тех же невысоких скоростях – порядка 5–10 см/с – увеличить разрешающую способность системы по времени, т.е. разницу во времени распространения в прямом и обратном направлении, что может быть достигнуто увеличением длины акустической трассы до 300 м и более.

Тестирование акустического аппаратно-программного комплекса для исследования и мониторинга течений методом встречного зондирования в условиях натурного эксперимента показало стабильность работы и детектирования сигнала в условиях сильных помех, связанных с судоходством, малой протяженности акустической трассы, небольших глубин и невысоких скоростей течений.

Относительная устойчивость импульсных характеристик канала и малое количество ложных определений времени распространения сигнала позволяет рассчитывать на успешное применение данного метода и аппаратуры при дальнейшем проведении экспериментальных работ с учетом коррекции частоты дискретизации или/и длины трассы.

3.4.3. Экспериментальные исследования в условиях очень мелкого моря

Описанные ниже экспериментальные исследования являются продолжением работы [145] по акустическому мониторингу полей течений с

использованием разработанного в ТОИ ДВО РАН комплекса [105, 152]. Ранее была показана необходимость увеличения разрешающей способности системы мониторинга по времени, так как при невысоких скоростях течений (5–10 см/с) в акватории бухты Витязь погрешность определения скоростей при помощи акустического метода зондирования довольна высока (5-7 см/с). Улучшить разрешение системы по времени можно либо за счет повышения частоты дискретизации регистрирующей аппаратуры выше 48 кГц, либо путем увеличения разницы BO времени распространения сигнала в прямом И обратном направлениях. На момент проведения описанного ниже эксперимента из-за технических ограничений приборов регистрации частоту дискретизации невозможно было сделать выше, поэтому дискретность была увеличена путем удлинения акустической трассы со 152 до 1220 м.

Ниже представлены результаты исследования возможностей акустического мониторинга полей течений методом встречного зондирования в условиях очень мелкого моря [147]. Исследования проводились в бухте Витязь.



Рис. 3.21. Схема эксперимента по встречному зондированию (б. Витязь, Японское море).

Зондирование морской среды осуществлялось сложными фазоманипулированными сигналами с центральной частотой 6 кГц (М-последовательность, 255 символов, 4 периода несущей частоты на символ).

Трансивер № 1 был установлен стационарно на грунт на глубине 4 м и соединен кабельной линией с береговой лабораторией. На расстоянии 1220 м от него вблизи дна на глубине 10 м был установлен трансивер № 2 (рис. 3.21) с расположенным в гермоконтейнере автономным блоком генерации, усиления, синхронизации и питания. Трансивер № 2 был соединен с радиобуем, посредством которого в режиме приема осуществлялась передача принятых акустических сигналов по радиоканалу в центр обработки данных. Примерно в центре акустической трассы для измерения скорости течений на весь период эксперимента на дне (глубина 18 м) был размещен ADP, работавший в автономном режиме. Данные ADP использовались для сопоставления результатов измерения скоростей течений, полученных разными методами. Вблизи места расположения ADP с борта постановленной на якорь яхты СТД-зондом проводились ежечасные измерения вертикальных профилей температуры и солености воды. Сеансы излучения акустических сигналов во встречном направлении осуществлялись каждую минуту в течение суток, с временным разнесением в 5 с между зондированием в прямом и обратном направлениях. Сигналы, принятые ОТ обоих трансиверов, регистрировались и записывались с частотой дискретизации 48 кГц.



Рис. 3.22. Зависимость температуры от времени суток и глубины.

Распределение температуры по глубине во время проведения эксперимента имело довольно сложный характер и характеризовалось наличием небольшого отрицательного градиента и периодическими заходами холодных придонных вод, связанных с приливом (рис. 3.22), что и нашло отражение в сложной структуре акустических приходов (рис. 3.23).



Рис. 3.23. Нормированные импульсные характеристики волновода за весь период эксперимента. Распространение акустического сигнала от трансивера № 2 к трансиверу № 1 (а) и в обратном направлении (б).

Обработка сигналов была аналогична описанной в разделе 3.4.2. Полученные временные отклики среды представлены на (рис. 3.23, 3.24).

Данные гидрологических измерений (рис. 3.22) свидетельствуют о наличии небольшого отрицательного градиента температуры (соответственно и скорости звука) с глубиной, недостаточного для формирования стабильного придонного звукового канала. В результате анализа импульсных характеристик волновода (рис. 3.23) и гидрологических условий установлено, что реконструкция течений может быть проведена по первому, наиболее стабильному и обладающему максимальной энергией акустическому приходу, который распространяется по всей толще волновода, а, следовательно, несет информацию об интегральной скорости течения на трассе по глубине. Соответственно расчет скорости и направления течения проводился по времени распространения максимального по амплитуде прихода.



Рис. 3.24. Нормированные по амплитуде импульсные отклики среды на момент начала эксперимента; сплошная линия - от трансивера № 2 к трансиверу № 1, пунктирная - в обратном направлении.



Рис. 3.25. Скорости течения, приведенные к направлению акустической трассы, по данным ADP.

Колебания уровня моря относятся к неправильному полусуточному типу приливов с максимальными значениями уровня в 22:10 и 09:40 ч и минимальными в 15:30 и 03:30 ч, достигающими 35 см. Усредненные по скользящему четырехчасовому интервалу значения скорости течения, полученные по данным ADP и приведенные к направлению акустической трассы, представлены на рис. 3.25.



Рис. 3.26. а – скорость ветра, приведенная к направлению акустической трассы (по данным метеостанции); б – скорости течения, усредненные по скользящему четырехчасовому интервалу: 1 – расчетные значения, полученные по результатам акустических измерений; данные ADP, приведенные к направлению акустической трассы: 2 – усредненные значения по всей водной толще; 3 – усредненное значение для слоя от 4 до 16 м.

Как видно из рис. 3.25 и 3.26, верхний трехметровый слой водной толщи в месте установки ADP сильно подвержен влиянию ветра. С 15:00 до 19:00 ч и с 11:00 до 15:00 ч направление ветра практически соответствовало направлению акустической трассы от трансивера № 1 к трансиверу № 2, а с 05:00 до 10:00 ч ветер имел противоположное направление, что и нашло отражение в данных ADP. При сопоставлении результатов измерения скоростей течений методом акустического встречного зондирования и ADP стоит учитывать, что скорости и направления течений, измеренные ADP в точке и интегральные по трассе, могут различаться. Также оказывают свое влияние перепад глубин расположения измерительных средств (трансивер $N_{2} 1 - 4$ м, трансивер $N_{2} 2 - 10$ м, ADP – 18 м), особенности топографии дна, наличие внутренних волн. На результатах экспериментов, по-видимому, также сказались особенности рельефа суши. Приблизительно одна треть акустической трассы с наименьшими значениями глубин (4-8 м) закрыта высоким мысом от воздействия юго-западного ветра. В то же время вся акустическая трасса открыта северо-восточным ветрам, чем и объясняются завышенные значения скорости течения, полученные при акустическом зондировании в период с 05:00 до 10:00 ч и заниженные с 15:00 до 19:00 ч. Вероятно, по той же причине прослеживается лучшая корреляция акустических измерений и данных ADP, усредненных на интервале глубин от 4 до 16 м, не учитывающих вклад в общую интегральную картину течений верхнего трехметрового слоя, подверженного сильному влиянию ветра в наиболее открытой для ветрового воздействия точке постановки ADP. В период с 14:00 до 16:00 ч произошло перераспределение максимума акустической энергии с первого на второй приход при распространении от трансивера № 1 к трансиверу № 2, т.е. вычисление скорости течения производилось между разными приходами с разными количествами отражений и соответственно с разными расстояниями пройденного ими пути, что говорит о необходимости усовершенствования алгоритма расчета, который бы учитывал данные обстоятельства.

Оценки показывают, что погрешность определения скоростей течений акустическим методом, при сопоставлении времени распространения

соответствующих акустических приходов вдоль потока и против него, составляет 1,5–3,0 см/с, что в принципе сопоставимо с погрешностями ADP, которые на практике могут достигать бо́льших значений, чем указывается в их технических характеристиках, особенно при эксплуатации на малых глубинах [11].

3.5. Влияние внутренних волн на шельфе на структуру акустических приходов

Одной из задач при проведении акустического зондирования являлось определение влияния внутренних волн, проходящих через акустическую трассу, на характеристики распространения акустических сигналов и возможности реконструкции параметров этих волн [102].

Эксперимент проводился в шельфовой зоне Японского моря. Акустическое зондирование морской среды сигналами типа М-последовательностей с центральной частотой 2500 Гц (511 символов, 4 периода на символ) осуществлялось с дискретностью 1 минута установленным у дна излучателем (рис. 2.1). Прием сигналов производился на расстоянии ~2025 м от излучателя с помощью мобильной автономной приемной системы (радиогидроакустический буй (рис. 2.3, рис. 2.5)), с расположением гидрофона в 0.5 метре от грунта (подробное описание приемной системы представлено в разделе 2.2.3). Принятый сигнал подвергался взаимно-корреляционной обработке совместно с излученным.

На удалении 320 м от буя был установлен ADCP (измерения проводились совместно с А.Н. Серебряный) регистрировавший изменение плотности морской среды, направление и скорости течений. Вблизи точки приема на время проведения исследований устанавливалась на якорь которой яхта, с осуществлялись ежечасные измерения вертикальных профилей температуры и обстановка шельфе солености. Гидрологическая на характеризовалась неправильным полусуточным типом приливов. При полной воде, начиная с глубины порядка 20 м, происходила замена теплых прибрежных вод холодными и более солеными морскими водами, при этом колебания температуры в нижних слоях достигали 10 градусов.



Рис. 3.27. a) Импульсная характеристика волновода; б) данные ADCP

Подробный анализ импульсной характеристики в момент захода холодных вод на акустическую трассу показал, что происходит перераспределение акустической энергии между поздними приходами с периодом около 15 минут (рис. 3.27а). На ADCP, регистрировавшем изменение плотности морской среды в 320 метрах от приемной системы, был зафиксирован проход интенсивных внутренних волн с таким же периодом (рис. 3.27б). Разница во времени между регистрацией внутренних волн на приемной системе и ADCP составила 19 минут, из чего следует, что скорость распространения внутренних волн равна примерно 28 см/с. Таким образом, акустическая система позволяет дистанционно фиксировать и измерять параметры внутренних волн.

Выводы по главе

1. Результаты эксперимента и численные расчеты по изучению влияния изменения уровня поверхности моря на импульсные характеристики волновода показали, что при проведении акустических исследований в мелководных акваториях, где значительную роль играют отражения от дна и поверхности, связанных с численным моделированием и требующих высоких точностей при измерении времен распространения сигналов, необходимо и возможно учитывать влияние прилива, применяя расчетные данные. Расчеты показали, что приливноотливные вариации уровня поверхности в 40 см на стационарной акустической трассе длиной ~2 км и глубинами порядка 40 метров, приводят к изменениям времени распространения в зимний период времени на ± 1 мс, что соответствует для температуры величине 0.4 градуса °C. Такие изменения должны учитываться, в особенности принимая во внимание, что в этот период времени в месте наблюдений среднее значение температуры по глубине по среднестатистическим многолетним измерениям составляет + 0.40 °C.

2. В результате натурных экспериментов по оценке влияния захода холодных вод во время приливных явлений на характеристики звукового канала показано, что представленные метод, модель и аппаратура, апробированные при различных гидролого-акустических условиях, на трассах протяженностью от 600 метров до 23 км, с глубинами от 8 до 110 метров, обладают достаточной чувствительностью осуществления зондирования, исследований ДЛЯ И мониторинга изменчивости структуры и динамики полей температур в условиях мелкого моря. Показано, что численное моделирование в программе BELLHOP с использованием метода Гауссовых пучков и применение метода представления приходящих импульсов в виде вейвлета Морле, позволяет учесть разрешение и точность измерительной и регистрирующей аппаратуры в эксперименте, методик обработки. Результаты численных расчетов показали хорошую точность при сопоставлении расчетных и экспериментально полученных данных, коэффициент корреляции 0.7 – 0.87.

3. На основе серии экспериментов направленных на исследование сезонных изменений на стационарной акустической трассе показано, что, анализируя временную структуру импульсной характеристики, можно качественно оценивать вертикальное распределение температур на диагностируемой акватории и осуществлять мониторинг изменчивости средних температур в характерных слоях волновода. Результаты экспериментальных наблюдений И численного моделирования свидетельствуют о реальной возможности дистанционного акустического мониторинга скорости звука и температуры в течение длительного времени. Определение средней температуры в характерных слоях осуществимо с оценочной погрешностью не превышающей 1 – 1.5 °C.

4 Экспериментальные исследования возможностей акустического мониторинга полей течений в условиях мелкого моря при сопоставлении с данными ADP показали, что измерения скоростей течений методом встречного зондирования могут быть произведены с погрешностью порядка 5 – 7 см/с. Это позволяет рассчитывать на успешное применение данного метода И разработанной аппаратуры в дополнение к стандартным океанологическим методам, а также в качестве самостоятельного источника информации о течениях.

5. Результаты экспериментальных исследований возможностей дистанционного измерения течений методом встречного акустического зондирования в условиях очень мелкого моря с глубинами до 20 метров (б. Витязь, Японское море) показали, что основной вклад в формирование направлений и скоростей течений на исследуемой акватории вносят ветровые условия. Это говорит о том, что при проведении, планировании и анализе экспериментальных данных подобных исследований необходимо учитывать особенности ветровых режимов и использовать метеорологическую информацию о скорости и направлении ветра, что обычно не входит в практику акустических экспериментальных исследований. Так же стоит отметить отсутствие явной корреляции динамики изменения скоростей и направлений течений с приливом, что, напротив прослеживается в большинстве случаев в условиях мелкого моря.

ГЛАВА 4. Экспериментальные результаты исследований пространственной векторно-скалярной структуры звуковых полей на шельфе Японского моря

4.1. Экспериментальные исследования импульсного отклика волновода при приеме зондирующих сигналов на векторный приемник

В данном разделе представлены результаты эксперимента направленного на исследование закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических полей и полей температур в условиях мелкого моря, на основе которых продемонстрированы возможности методов акустического зондирования по исследованию и мониторингу изменчивости температурных полей с использованием комбинированной приемной системы состоящей из векторного приемника и гидрофона [109, 143, 144].

Решение проблемы идентификации лучевых приходов акустической энергии по различным траекториям при анализе импульсных характеристик диагностируемых волноводов потребовало от авторов [143] разработки способа зондирования с применением векторных приемников звука. Физической предпосылкой для его разработки явилась идея совмещения преимуществ временной селекции лучевых приходов на приемной системе путем применения сложных широкополосных зондирующих сигналов и векторно-скалярной обработки выделенных импульсов, позволяющей измерять углы приходов по соотношению амплитуд в ортогональных каналах векторного приемника. В соавторстве с коллегами, автором настоящей диссертации в работе [109] были приведены предварительные результаты экспериментальной апробации метода, подтвердившие принципиальную возможность измерения углов с использованием фазоманипулированных сигналов при приеме на точечный комбинированный приемник.

Экспериментальные исследования проводились в заливе Посьет в шельфовой зоне Японского моря в сентябре 2004 г. Источник звука, стационарно размещенный на расстоянии 1 м от дна на глубине 40 м (рис. 2.1), в течение суток

ежеминутно излучал на частоте 2500 Гц сложные сигналы (Мпоследовательности, 511 символов, 4 периода несущей частоты на символ). Комбинированный приемник (рис. 2.7), состоящий из трехкомпонентного векторного приемника и совмещенного с ним гидрофона был установлен в 0.6 м от дна на глубине 43 м и на удалении от излучателя ~2 км (рис. 2.8).

Акустические данные обрабатывались по следующей методике. Для сигналов принятых гидрофоном и каждым каналом векторного приемника производилось вычисление взаимной корреляционной функции принятого s(t) и излученного $s_0(t)$ сигналов.

$$K_{ss_0}(\vec{r},t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) G(\omega,\vec{r}) \cdot e^{i\omega t} d\omega$$
(4.1)

где: $H(\omega) = S_0(\omega)S^*(\omega), S_0(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t) \cdot e^{-i\omega t} dt$ - спектр Фурье излученного сигнала; $S^*(\omega)$ - комплексно сопряженный спектр принятого сигнала; $G(\omega, \vec{r}) = \sum_{j=1}^{N} A_j(\vec{r}) \cdot e^{-i\omega t_j(\vec{r})}$ - функция Грина; $t_j(\vec{r})$ - время распространения и $A_j(\vec{r})$ амплитуда сигнала, распространяющегося по *j*-му лучу от источника к приемнику, расположенному в точке \vec{r} ; N - число лучей, приходящих на приемник.

Горизонтальные углы приходов вычисляются по соотношению амплитуд (A_{Vx}, A_{Vy}, A_{Vz}) в каналах векторного приемника по формуле $arctg[A_{Vy}/A_{Vx}]$, а вертикальные как

$$arctg\left[A_{Vz} / \sqrt{A_{Vy}^2 + A_{Vx}^2}\right]$$
(4.2)

На рис. 4.16 приведены вариации времен приходов импульсов в течение суток, полученные на данной акустической трассе с ненаправленного гидрофона, и суточные вариации вертикального профиля температуры (4.1a).



Рис. 4.1. Суточные изменения: (а) – температуры, (б) – времен приходов с приемника давления, (в) – углов максимального по энергии позднего прихода (• - мгновенные значения, линия – усредненные значения по 20-минутной выборке).

На основании анализа импульсных характеристик, полученных в течение суток, на рис. 4.2а представлена типичная мгновенная импульсная характеристика волновода и отмечены углы разрешенных приходов, полученные по данным с векторного приемника. Для каждого момента гидрологических измерений было проведено моделирование, в программе BELLHOP по методу Гауссовых пучков, рассчитаны углы и времена распространения акустических приходов. Типичная структура углов времен приходов, наблюдаемая В эксперименте И И соответствующая моменту времени представленному на рис. 4.2а, показана на рис. 4.26, (рассчитанные отмечены - *, экспериментально полученные с каналов КП отмечены - о), лучевая картина – рис. 4.2в.



Рис. 4.2. (а) – Типичная мгновенная импульсная характеристика волновода для периода проведения эксперимента (Х, Ү, Z - каналы ВП; Р – приемник давления); (б) – зависимость углов приходов от времени: * - расчет, о – эксперимент; (в) – лучевая картина.

Основываясь на данных моделирования и анализе угловой структуры приходов, можно выделить три группы сигналов:

 пришедшие с максимальной амплитудой по лучам с углами скольжения 3°–10°, распространяющиеся в придонном слое холодной воды на глубинах от 35 метров до дна с минимальными групповыми скоростями;

2) пришедшие по лучам с углами скольжения 11°–16°, распространяющиеся в основном термоклине на глубинах от 20 м до дна;

3) пришедшие по лучам с углами скольжения 17°–25°, распространяющиеся во всем слое воды.

На рис. 4.26 выделены три прямоугольные области, в которых идентификация акустических приходов, без использования данных с КП, представляет определенные трудности:

I – (обозначена пунктирным прямоугольником, рис. 4.26) времена приходов 3й (17°–25°) и 2й (11°–16°) группы имеют очень близкие значения, достоверная идентификация, только по данным ПД, к какой группе относится принятый сигнал сильно затруднена. Однако возможна с определенной долей вероятности опытным оператором при тщательном анализе данных моделирования и экспериментальных данных на продолжительном отрезке времени (сутки и более), т.к. лучи 3й группы, распространяющиеся во всем слое волновода, зачастую стабильнее, чем лучи распространяющиеся в основном термоклине, которые более чувствительны к приливным придонным заходам холодных вод, имеющим неправильный полусуточный характер на данной акватории. С другой стороны, при аналогичной гидрологической обстановке, но в условиях развитого поверхностного волнения, лучи 2й группы могут быть стабильнее, чем 3й, т.к. не контактируют с поверхностью.

II – (обозначена пунктирными круглыми скобками, рис. 4.26) времена приходов 3й (17°–25°), 2й (11°–16°) и 1й (3°–10°) группы имеют очень близкие значения, достоверная идентификация, по данным ПД, к какой группе принадлежит принятый сигнал чрезвычайно затруднительна. Все три группы лучей, в данной области, не стабильны, как во времени, так и по энергетическим характеристикам.

III – (обозначена сплошным прямоугольником, рис. 4.26) времена приходов 1й (3°–10°) придонной группы имеют близкие значения. Рассчитанное количество лучей распространяющихся в придонном звуковом канале велико, что естественно для данного типа гидрологии, и имеет плотную структуру заполнения приходами по времени и по углам (рис. 4.26). Хотя, используемые сигналы, частота и методика обработки и проведения эксперимента во многих случаях позволяет получить хорошее разрешение по времени акустических приходов, однако при столь плотном ИХ количестве иногда бывает несколько затруднительно определить ПО данным ΠД под каким углом пришел максимальный по энергии приход.

Использование данных комбинированного приемника позволяет провести идентификацию акустических приходов в областях I и II, где она затруднительна, и облегчить ее в области III (рис. 4.26, 4.1в).

На рис. 4.1в представлены вариации углов позднего прихода с максимальной амплитудой, рассчитанных по данным с векторного приемника по формуле 4.2. Как видно, изменения времени и углов позднего прихода акустических импульсов четко коррелируют с изменениями температуры в придонном слое (рис. 4.1а). С заходом на акустическую трассу более теплых вод отмечается уменьшение времен и увеличение углов приходов. На угловой зависимости в период захода на трассу приливного фронта (с 9:00 до 19:00) фиксируются 2-часовые колебания, что связано, по-видимому, с влиянием внутренних волн.

4.2. Экспериментальные исследования особенностей пространственной структуры векторно-скалярных звуковых полей в мелком море

В представленном ниже материале обсуждаются экспериментальные результаты исследования особенностей пространственной структуры векторноскалярных полей, полученные на шельфе Японского моря при использовании комбинированной приемной системы 2.81. 2.82) автономной (рис. И низкочастотного буксируемого электромагнитного излучателя (рис. 2.21) [198]. Подробное описание излучающей и приемной систем представлены в разделах 2.2.1 и 2.2.2, соответственно. Причина акцента на проведение экспериментов в разных по глубине районах и при различных глубинах приема сигналов базировалась фундаментальных результатах на теории распространения низкочастотных тональных сигналов в мелком море и особенностях приема (обнаружения) развитой этих сигналов В маломодовых волноводах С

интерференционной структурой. Наличие глубоких минимумов акустической энергии, которые возникают при изменении расстояния между источниками и приемниками, могут приводить к периодическим потерям контактов с источником, а в некоторых случаях взаимного маневрирования и к полной потере контакта. Естественно было предположить, что при приеме сигналов векторными приемниками формирование интерференционной структуры на каналах XYZ будет иметь более сложный характер и зависеть от глубины моря и глубины точки приема [154]. Как известно из теоретических работ, при распространении в маломодовом канале могут образовываться сдвиги в интерференционных минимумах и максимумах по расстоянию между звуковым давлением и компонентами ВП [155, 67]. На поиск таких эффектов и исследование возможности их применения для повышения помехоустойчивости приемных систем и были направлены экспериментальные исследования. Для этого осуществлялась буксировка излучателя с частотой 134 Гц в различных волноводах с глубинами от 30 до 90 метров на удаления до 10 км.

Эксперимент №1

Экспериментальные исследования интерференционной структуры поля тонального источника звука проводились 14 июня 2015 года вблизи мыса Шульца. Комбинированный приемник был стационарно установлен в бухте Витязь на глубине 17 метров при глубине моря 27 метров. Буксировка источника тональных сигналов (частота 134Гц) осуществлялась с борта яхты на глубине 20 метров со скоростью 3 узла по двум трассам: на удаление от приемной системы и на приближение. На рис. 4.3 приведена схема маневрирования судна при буксировке излучателя.

Гидрологическая обстановка в районе эксперимента была типичной для весеннего сезона и характеризовалась близким к изотермическому вертикальному профилю температуры (рис. 4.4). На этом же рисунке приведен рельеф дна на трассе.



Рис. 4.3. Карта эксперимента 2015.06.14.



Разрез по темпертатуре при замере проходной характеристики

Рис. 4.4. Вертикальные профили температуры вдоль трассы.

Дистанция между излучателем и приемной системой определялась с помощью системы GPS. Длина трасс составляла немногим более 9000 м. Определение точного положения излучателя при буксировке выполнялось относительно антенны GPS, расположенной на рубке яхты, с учетом глубины погружения и длины буксировочного фала. На рисунке 4.5 приведена зависимость амплитуд сигналов с гидрофона и с датчиков XYZ векторного приемника от расстояния между корреспондирующими точками. Анализ зависимостей показывает, что на обеих трассах, на удалениях более 1500 м от приемной системы, формируется стабильная, идентичная для гидрофона и датчиков XYZ, интерференционная структура с периодом около 390 метров. Можно отметить отличия амплитуд сигналов на каналах X и Y на расстояниях около 6500 м на первой трассе и 5000 м на второй, которые связаны с наличием направленности этих каналов и могут быть использованы для расчетов пеленга на источник сигнала [156, 157].





Главной особенностью приведенных зависимостей на рис. 4.5 является практически полное совпадение минимумов и максимумов интерференционной структуры для гидрофона и датчиков ХҮΖ, с перепадом амплитуд до 15-20 дБ. Следовательно, ни аддитивная, ни мультипликативная обработка сигнальной информации с каналов комбинированного приемника в данном случае не избавляет от потери контакта с источником звука при нахождении его в интерференционных минимумах.

Эксперимент №2

Эксперимент проводился 12 июля 2015 года в заливе Посьета. На рис. 4.6 приведена карта района исследований и нанесена трасса буксировки излучателя.



Рис. 4.6. Карта эксперимента 2015.07.12.

Буксировка излучателя осуществлялась на глубине 20 метров, излучался тональный сигнал с частотой 134 Гц. Комбинированный приемник был установлен в двух метрах от дна в точке с глубиной моря 58,5 м. Буксировка вначале осуществлялась от приемной системы на удаление около 10 км в сторону глубокого моря до изобаты 100 м. Затем в сторону берега до изобаты 35 м и удаления от приемной системы 10 км и, наконец, возвращение к приемной системе (рис. 4.6 и рис. 4.7). На рис. 4.7 приведены данные гидрологических и измерений. В батиметрических июле уже наблюдался значительный отрицательный градиент температуры с глубиной. На этом же рисунке пронумерованы галсы, на которые была разбита трасса для удобства обработки и анализа сигнальной информации.



Рис. 4.7. Гидрология и рельеф дна.

На рисунке 4.8 (а - г) приведены зависимости уровней сигналов на канале давления и каналах XYZ от расстояния для каждого из четырех галсов. Так же на нем отмечены (символом - 🕕) 2-х минутные паузы излучения, которые были организованы каждые полчаса для оценки уровня окружающих ШУМОВ. Превышение сигналов над шумом составило 20-45 дБ на всех галсах. Расчет интерференционной средних значений периодов структуры выполнялся усреднением измеренных по минимальным и максимальным значениям периодов и показал значения около 375 м для галсов №№ 3 и 4 и 750 м для галсов №№ 1 и 2.



Рис. 4.8. Зависимости уровней сигналов в каналах давления (Р) и колебательного ускорения (Х, Ү, Z) от расстояния: а) 1 галс, б) 2 галс, в) 3 галс, г) 4 галс. Символом – (I) отмечены 2-х минутные паузы излучения сигнала. Некоторые характерные участки глубоких минимумов в каналах Р, Х, Ү, где фиксируется максимум амплитуды в канале Z, отмечены пунктирными прямоугольниками.

Следует подчеркнуть также, что обработка сигнальной информации во всех обсуждаемых экспериментах проводилась по единой методике на идентичных приборах. Анализ зависимостей на рисунке 4.8a и 4.8б показывает, что для условий эксперимента на участках с глубокими минимумами амплитуд сигналов в каналах давления и ХҮ, фиксируется максимум амплитуды в канале Z (некоторые

характерные участки отмечены пунктирными прямоугольниками на рис. 4.8а и 4.86). Это может быть связано с тем, что в звуковом поле реального нерегулярного волновода, могут быть выполнены условия существования структуры типа стоячих волн. Возникновение такой ситуации наиболее вероятно вертикальном канале ВП [189]. Может быть обусловлено В вихревыми составляющими акустического поля, когда движение акустической энергии в области точек сингулярности становится вихревым, так и тем, что различия интерференционной структуры поля давления и XY компонент с Z связано с подавлением мод первых номеров вертикальным каналом ВП и подчеркиванием мод высоких номеров, в связи с чем, происходит сглаживание амплитудной многомодовой интерференции вертикальной компоненты, и смещение по расстоянию зон минимумов и максимумов полей звукового давления и вертикальной составляющей. Характерно, что эта особенность наблюдается при движении источника, как в сторону глубокого моря, так и обратно. Результат обнаружения значительных по дистанции смещений максимумов и минимумов интерференционной структуры в каналах Р, Х, У относительно канала Z, требует тщательного анализа и дополнительных исследований, направленных на прогнозирование и выявление подобных особых точек в толще мелководных акваторий, и их зависимости от частоты сигналов, глубины моря и т.п. Однако, эффект свидетельствует о возможности использования ВП/КП ЭТОТ для организации обнаружения, локализации и сопровождения источника тонального сигнала (дискреты подводных объектов) при любых вариантах взаимного маневрирования источника и приемника без потери акустического контакта, в отличие от ПД. Следует лишь корректно подобрать схему обработки информации с каналов комбинированного приемника.

Выводы по главе

1. В условиях натурного эксперимента на расширенной по сравнению с [220] работой выборке подтверждена возможность определения **УГЛОВ** акустических приходов распространяющихся вдоль различных лучевых траекторий при помощи одиночного векторного приемника. Вместе с тем, выполнено численное моделирование, проведен анализ экспериментальных данных, угловой и временной структуры, которые показали, что данные приемника позволяют провести идентификацию векторного акустических приходов, когда она чрезвычайно затруднительна по данным ПД, ввиду того, что времена распространения сигналов пришедших по лучам с углами скольжения 17°-25° (которые распространяются во всем слое воды), углами 11°-16°, (распространяющиеся 3°-10° В основном термоклине), И углами (канализирующиеся в придонном слое холодной воды), имеют очень близкие значения. А также облегчить идентификацию углов максимальных по энергии приходов 3°-10° в придонном звуковом канале. Применение векторных приемников в томографических схемах может позволить получить независимый дополнительный параметр импульсной характеристики диагностируемого волновода и, таким образом, повысить эффективность решения прямых и обратных задач гидроакустики в таких практических приложениях, как томография неоднородностей морской среды, звукоподводная связь и телеметрия.

2. В результате натурного эксперимента, в контролируемых условиях, получены характеризующие особенности данные. формирования интерференционной структуры векторно-скалярного поля тонального источника в мелководных акваториях залива Посьета Японского моря. Контролируемые условия, повторяемость гидрологические акустических трасс позволяет рассчитывать на успешное применение полученных результатов ДЛЯ совершенствования вычислительных методов и программ описания векторноскалярных полей в мелком море. Важным результатом является, обнаружения в интерференционных структурах векторно-скалярных полей значительных по дистанции смещений минимумов и максимумов сигналов в каналах звукового давления и горизонтальных компонент ВП относительно канала Z в поле тонального источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Экспериментально показано, что представленные метод (зондирование фазоманипулированными М-последовательностями с частотой 2500 Гц, 511 символов, 4 периода частоты несущей на символ), модель (численные расчеты с использованием метода Гауссовых пучков, применение предложенного метода представления приходящих импульсов в виде вейвлета Морле) и аппаратура, обладают достаточной чувствительностью для осуществления зондирования, исследований и мониторинга изменчивости структуры и динамики полей температур в условиях мелкого моря.

2. Показано, что разработанные численные методы с использованием расчетных данных позволяют учитывать влияние прилива на времена распространения акустических приходов, которое необходимо и возможно принимать во внимание при проведении требующих высоких точностей акустических исследованиях в мелководных акваториях.

3. На основе серии экспериментов, показано, что анализируя временную структуру акустических приходов с помощью тестовой импульсной характеристики и средних многолетних океанологических данных, можно качественно оценивать вертикальное распределение температур на акватории ~2 км и осуществлять мониторинг изменчивости средних температур в характерных слоях волновода в течение длительного времени.

4. Экспериментально показана возможность получения данных не только о скоростях, но и о структуре морских течений на шельфе в характерных слоях волновода при использовании метода встречного зондирования (фазоманипулированные М-последовательности, несущая 2500 Гц) с погрешностью порядка 5 – 7 см/с.

5. В условиях очень мелкого моря (глубины до 20 метров) на двух трассах длинной 152 и 1220 метров, показано, что основной вклад в формирование

направлений и скоростей течений вносят ветровые условия. Погрешность определения скоростей течений методом встречного зондирования (М-последовательности, несущая 6 кГц) на трассе длиной 1220 метров составила 1,5–3,0 см/с.

6. Ha основе экспериментальных (зондирование данных фазоманипулированными М-последовательностями, несущая 2500 Гц) с помощью одиночного векторного приемника получены углы разрешенных акустических приходов, численное моделирование и анализ угловой структуры которых за весь период эксперимента показал, что использование данных ВП позволяет провести идентификацию акустических приходов в областях, где времена распространения всей толще воды, в термоклине, и придонном звуковом канале имеют очень близкие значения, где она затруднительна, и облегчить области ee В максимальных по амплитуде значений придонного канала.

7. На основе данных натурного эксперимента в поле тонального (134 Гц) источника с помощью одиночного КП получены новые данные об условиях появления в интерференционных структурах векторно-скалярных полей значительных по дистанции смещений минимумов и максимумов сигналов в каналах звукового давления и горизонтальных компонент ВП относительно канала Z. На практике этот результат может быть использован для организации обнаружения, локализации и сопровождения источника тонального сигнала (дискреты подводных объектов) при любых вариантах взаимного маневрирования источника и приемника, т.к. в этом случае, в отличие от ПД, не возникнет потери акустического контакта.

ЛИТЕРАТУРА

 Диденкулов, И.Н., Измерение и расчет вертикальной структуры звукового поля в океане / И.Н. Диденкуло, В.А. Зверев, В.П. Иванов, Г.К. Иванова // Акустический журнал. – 2004. – Т. 50. – № 6. – С. 783-791.

2. Чарнотский, М.И. Экспериментальная проверка акустического двухчастотного метода мониторинга поперечных течений / М.И. Чарнотский, И.М. Фукс, К.А. Наугольных, А.В. Смирнов, Д. Ди Иорио, И.Б. Есипов // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52. – № 2. – С. 269-274.

 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.

4. Кебкал, К.Г. Способ цифровой связи по многолучевым гидроакустическим каналам с применением частотно-модулированного несущего сигнала / К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал, С.Г. Яковлев // Акустический журнал. – 2004. – Т. 50. – № 2. – С. 220-230.

5. Крупин, В.Д. Мониторинг температурной и соленостной стратификации вод Берингова пролива с помощью акустической томографии / В.Д. Крупин, К.Д. Сабинин // Сборник докладов IX школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана". – М.: ГЕОС, 2002. – С. 164-167.

6. Malanotte-Rizzoli, P. Long-range inversions for ocean acoustic tomography / P. Malanotte-Rizzoli // J. Geophys. Res. – 1985. – V. 90. – № C4. – P. 7098-7116.

Буров, В.А. Акустическая томография океана при использовании нестандартного представления рефракционных неоднородностей / В.А. Буров, А.Ю. Попов, С.Н. Сергеев, А.С. Шуруп // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – № 5. – С. 602-613.

 Козубская, Г.И. О возможности акустической галинометрии Арктического бассейна / Г.И. Козубская, В.М. Кудряшов, К.Д. Сабинин // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45. – № 2. – С. 250-257. 9. Зверев, В.А. Временное разрешение в радио, сейсмо- и акустической локации /
В.А. Зверев // Известия вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. 43. – № 5. – С. 406-412.

10. Зверев, В.А. Увеличение временной селекции сигналов, принимаемых по лучам при зондировании океана посредством М-последовательности / В.А. Зверев, А.А. Стромков // Акустический журнал. – 2003. – Т. 49. – № 4. – С. 514-518.

11. Сабинин, К.Д. Применение акустических допплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды / К.Д. Сабинин, А.Н. Серебряный // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 5. – С. 639-648.

12. Munk, W. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring / W.
Munk, C. Wunsch // Deep Sea Research. – 1979. – V. 26. – № 2. – P. 123-161.

13. Kerr, R.A. Acoustic tomography of the ocean / R.A. Kerr // Science. – 1982. – V.
217. – № 4554. – P. 38.

14. Behringer, D. A demonstration of ocean acoustic tomography / D. Behringer, T. Birdsall, M. Brown, B. Cornuelle, R. Heinmiller, R. Knox, K. Metzger, W. Munk, J. Spiesberger, R. Spindel, D. Webb, P. Worcester, C. Wunsch // Nature. – 1982. – V. 299. – P. 121-125.

15. Munk, W.H. Ocean acoustic tomography: From a stormy start to an uncertain future, in Physical Oceanography: Developments Since 1950 / W.H. Munk; edited by M. Jochum and R. Murtugudde. – New York: Springer, 2006. – P. 119-138.

16. Taroudakis, M.I. Identifying modal arrivals in shallow water for bottom geoacoustic inversions / M.I. Taroudakis // Journal of Computational Acoustics. – 2000. – N_{2} 8. – P. 307-324.

17. Shang, E.C. On the possibility of monitoring El Niño by using modal ocean acoustic tomography / E.C. Shang, Y.Y. Wang // J. Acoust. Soc. Am. – 1992. – V. 91. – № 1. – P. 136-140.

18. Кравцов, Ю.А. О возможности фазовой томографии океана с использованием нормальных волн / Ю.А. Кравцов, В.Г. Петников // Известия Академии Наук СССР. – ФАО. – 1986. – Т. 22. – № 9. – С. 992-994. Бункин, Ф.В. Предварительные результаты исследования пространственновременной изменчивости мелкого моря на стационарной акустической трассе / Ф.В. Бункин, А.В. Вавилин, В.А. Журавлев, Ю.А. Кравцов, А.Ю. Любченко, Н.Н. Омельченко, В.Г. Петников, Л.Т. Худиев, А.Ю. Шмелев // Акустический журнал. – 1984. – Т. 30. – № 5. – С. 594-598.

20. Rodriguez, O.C. Range dependent tomography of internal tides with relative arrivals / Rodriguez O.C., Jesus S.M. // Proceedings of International Conference on Computational and Experimental Eng. Sciences. – Portugal: Madeira, 2004. – P. 1747-1752.

21. Munk, W. Ocean acoustic tomography: rays and modes / W. Munk, C. Wunsch // Reviews of Geophysics and Space Physics. – 1983. – V. 21. – N_{2} 4. – P. 777-793.

22. Зайцев, В.Ю. Об алгоритме трехмерной модовой томографии океана / В.Ю.
Зайцев, А.Г. Нечаев, Л.А. Островский // Акустический журнал. – 1987. – Т. 33. – № 6. – С. 1124-1125.

23. Taroudakis, M.I. A modal inversion scheme for ocean acoustic tomography / M.I.
Taroudakis, J.S. Papadakis // Journal of Computational Acoustics. – 1993. – V. 1. – №
4. – P. 395-421.

24. Хилько, А.И. Маломодовая томография неоднородностей мелкого моря / А.И. Хилько, А.Г. Лучинин, В.Г. Бурдуковская, И.П. Смирнов // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53. – № 3. – С. 437-450.

25. Лучинин, А.Г. Экспериментальное исследование формирования маломодовых акустических импульсов в мелком море / А.Г. Лучинин, А.И. Хилько, А.А. Стромков, Б.Н. Боголюбов, П.И. Коротин, А.С. Чащин, А.В. Циберев, А.А. Ковальчук, И.И. Леонов // Сборник докладов Х школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XIV сессией РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 216-221.

26. Гринюк, А.В. Экспериментальное исследование когерентности низкочастотных зондирующих маломодовых звуковых импульсов на томографических трассах большой протяженности в мелком море / А.В. Гринюк, В.П. Демкин, В.Н. Кравченко, А.Г. Лучинин, А.И. Хилько, А.А. Стромков, И.И.

Леонов, А.Г. Кошкин // Сборник докладов XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XVII сессией РАО. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 163-166.

27. Куртепов, В.М. Влияние внутренних волн, волн Россби, мезомасштабных вихрей и течений на распространение звука в океане / В.М. Куртепов // Акустика океана. Современное состояние; под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой. – М.: Наука, 1982. – С. 36-52.

 28. Гончаров, В.В. Акустическая томография океана / В.В. Гончаров, В.Ю.
 Зайцев, В.М. Куртепов, А.Г. Нечаев, А.И. Хилько. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997. – 255 с.

29. Любавин, Л.Я. Акустическая интерференционная томография океана / Л.Я. Любавин, А.Г. Нечаев // Акустический журнал. – 1989. – Т. 35. – № 4. – С. 703-710.

30. Гончаров, В.В. Метод согласованного поля в задачах акустической томографии океана / В.В. Гончаров // Сборник докладов VII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с VII сессией РАО. – М.: ГЕОС, 1998. – С. 30-37.

31. Tolstoy, A. Acoustic Tomography via matched field processing / A. Tolstoy, O. Diachok, L.N. Frazer // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – V. 89. – № 3. – P. 1119-1127.

32. Tolstoy, A. Matched field tomographic inversion / A. Tolstoy // Proceedings OCEANS '93 "Engineering in harmony with Ocean" . – BC: Victoria, 1993. – V. 3. – P. 365-368.

33. Гончаров, В.В. Пошаговая акустическая томография океана / В.В. Гончаров, Ю.А. Чепурин // Сборник докладов XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XVII сессией РАО. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 159-162.

34. Михин, Д.Ю. Динамическая томография Средиземного моря / Д.Ю. Михин, О.А. Годин, Ю.А. Чепурин, В.В. Гончаров, С.В. Буренков, Д.Л. Алейник, В.В. Писляков // Сборник докладов VII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских

"Акустика океана", совмещенной с VII сессией РАО. – М.: ГЕОС, 1998. – С. 24-30.

35. Cornuelle, B. Ocean acoustic tomography from ships / B. Cornuelle, W. Munk, P. Worcester // J.Geophys.Res. – 1989. – V. 94. – № C5. – P. 6232-6250.

36. Гончаров, В.В. Численные эксперименты по томографии океана / В.В. Гончаров, В.В. Куртепов // Акустика океанской; под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой. – М.: Наука, 1989. – С. 107-115.

37. Гончаров, В.В. Метод согласованных временных откликов в акустической томографии океана / В.В. Гончаров // Акустический журнал. – 1997. – Т. 43. – № 5. – С. 622-629.

38. Stallworth, L.A. A new method for measuring ocean and tidal currents / L.A. Stallworth // Proceedings Ocean'73, IEEE Intern. Conf. On Engineering in the Ocean Environment. – New York: IEEE, 1973. – P. 55-58.

New York: IEEE, 1973. P. 55-58.

Worcester, P.F. Reciprocal acoustic transmission in a midocean environment / P.F.
 Worcester // J. Acoust. Soc. Am. – 1977. – V. 62. – № 4. – P. 895-905.

40. Farmer, D.M. Remote sensing of ocean flows by spatial filtering of acoustic scintillations: Observation / D.M. Farmer, G.B. Crawford // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – V. 90. – № 3. – P. 1582-1591.

41. Baykov, S.V. Mode tomography of moving ocean / S.V. Baykov, V.A. Burov, S.N. Sergeev // Proceedings of the Third European Conference on Underwater Acoustics; ed.: J. Papadakis. – Greece, Crete, Heraklion: FORTH-ICAM, 1996. – P. 845-850.

42. Godin, O.A. Computer simulation of acoustic tomography of ocean currents in coastal regions / O.A. Godin, D.Y. Mikhin // Theoretical and Computational Acoustics-97; ed.: E. Shang. – Singapore: World Scientific, 1999. – P. 499-513.

43. Godin, O.A. A full field inversion method for acoustic tomography of oceanic currents / O.A. Godin, D.Y. Mikhin, A.V. Mokhov // Full Field Inversion Methods in Ocean and Seismo-Acoustics / Eds. O. Diachok, A. Caiti, P. Gertstoft, H. Schmidt. – Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1995. – P. 261-266.

44. 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.

45. Godin, O.A. An opportunity for improved observation of ocean currents in the coastal zone / O.A. Godin, D.Y. Mikhin // Proceedings of Oceans '96 . – N.J.: IEEE, 1996. – P. 345-350.

46. Mikhin, D.Y. Computer simulations of acoustic tomography of ocean currents in coastal regions / D.Y. Mikhin, O.A. Godin // Theoretical and Computational Acoustics '97; ed.: Y.C. Teng et al. – Singapore: World Scientific, 1999. – P. 499-513.

47. Годин, О.А. Мониторинг океанских течений в прибрежной зоне / О.А. Годин, Д.Ю. Михин, Д.Р. Палмер // Известия АН. – Серия Физика атмосферы и океана.

- 2000. - T. 36. - № 1. - C. 141-153.

48. 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. – С. 614-622.

49. Гончаров, В.В. К локальной акустической томографии на морском шельфе / В.В. Гончаров, В.Н. Иванов, О.Ю. Кочетов, Б.Ф. Курьянов, А.Н. Серебряный //

Сборник докладов XXII сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 225-229.

50. Гончаров, В.В. Локальная акустическая томография неоднородностей в придонном термоклине мелкого моря / В.В. Гончаров, Б.Ф. Курьянов // Сборник докладов XIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXIII сессией РАО. – М.: ГЕОС, 2011. – С. 193-196.

51. Rodriguez, O.C. Physical limitations of travel time based shallow water / O.C. Rodriguez, S.M. Jesus // J. Acoust. Soc. Am. – 2000. – V. 108. – N \circ 6. – P. 2816-2822.

52. Buckingham, M.J. A new shallow-ocean technique for determining the critical angle of the seabed from the vertical directionality of the ambient noise in the water column /

M.J. Buckingham, S.A. Jones // J. Acoust. Soc. Am. – 1987. – V. 81. – № 4. – P. 938-946. 53. Harrison, C.H. Bottom reflection properties by inversion of ambient noise / C.H. Harrison, A. Baldacci // Proceedings of sixth of European conf. of underwater acoust., ECUA'02. – Poland: Gdansk, 2002. – P. 471-476.

54. Годин, О.А. Пассивная акустическая томография океана по окружающему шуму / О.А. Годин, В.В. Гончаров, Н.А. Заботин // Сборник докладов XIII школысеминара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXIII сессией РАО. – М.: ГЕОС, 2011. – С. 187-192.

55. Jesus, S.M. Blind ocean acoustic tomography: Experimental results on the INTIFANTE'00 data set / S.M. Jesus, C. Coares, J. Onofre, P. Picco // Proceedings of sixth of European conf. of underwater acoust., ECUA'02. – Poland: Gdansk, 2002. – P. 9-18.

56. Jesus, S.M. An experimental demonstration of blind ocean acoustic tomography /
S.M. Jesus, C. Soares, E. Coelho, P. Picco // J. Acoust. Soc. Am. – 2006. – V. 119. – №
3. – P. 1420-1431.

57. Collins, M.D. Focalization: Environmental focusing and source localization / M.D. Collins, W.A. Kuperman // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – V. 90. – № 3. – P. 1410-1422.
58. Yang ,T.C. Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water / T.C. Yang // J. Acoust. Soc. Am. – 2006. – V. 120. – № 5. – P. 2595-2614.

59. Rabaste, O. Estimation of a shallow water channel impulse response via an MCMC method with application to an ocean acoustic tomography experiment / O. Rabaste, T. Chonavel // Proceedings of Oceans 2007. – Europe, Brest: ENST Bretagne, 2007. – P. 1-6.

60. Lambare, G. Iterative asymptotic inversion in the acoustic approximation / G. Lambare, J. Virieux, R. Madariaga, S. Jin // Geophysics. – 1992. – V. 57. – № 9. – P. 1138-1154.

61. Tolstoy, A. Matched field processing (MFP)-based inversion method (SUB-RIGS) for range-dependent scenarios / A. Tolstoy // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2004. – V. 29. – N_{2} 1. – P. 59-77.

62. Spiesberger, J.L. Perturbations in travel time and ray geometry due to mesoscale disturbances: A comparison of exact and approximate calculations / J.L. Spiesberger, P.F. Worcester // J. Acoust. Soc. Am. – 1983. – V. 74. – № 1. – P. 219-225.

63. Курьянов, Б.Ф. Акустическая томография водной среды на шельфе Черного моря / Б.Ф. Курьянов, В.Н. Иванов, О.Ю. Кочетов, В.В. Гончаров, А.Н. Серебряный // Сборник докладов XIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXIII сессией РАО. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 252-257.

64. Гончаров, В.В. Диагностика гидродинамических возмущений среды в мелком море на основе данных по встречному распространению звука / В.В. Гончаров, Б.Ф. Курьянов // Сборник докладов XIV школы-семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXVI сессией РАО. – М.: ГЕОС, 2013. – С. 166-169.

65. Worcester, P.F. An example of ocean acoustic multipath identification at long range using both travel time and vertical arrival angle / P.F. Worcester // J. Acoust. Soc. Am. $-1981. - V. 70. - N_{2} 6. - P. 1743-1747.$

66. Yang, T.C. Measurements of spatial coherence, beamforming gain and diversity gain for underwater acoustic communications / T.C. Yang // Proceedings of MTS/IEEE,
Oceans 2005. – USA, Washington, DC: IEEE, 2005. – V. 1. – P. 268-272.

67. Щуров, В.А. Векторная акустика океана / В.А. Щуров. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 307 с.

68. Гордиенко, В.А. Векторно-фазовые методы в акустике / В.А. Гордиенко. – М.: Физматлит, 2006. – 560 с.

69. Shang, E.C. Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory / E.C. Shang // J. Acoust. Soc. Am. – 1989. – V. 85. – № 4. – P. 1531-1537.

70. Чупров, С.Д. Селекция мод и лучей в подводном звуковом канале / С.Д.
Чупров // Акустика океанской среды; под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой.
– М.: Наука, 1989. – С. 56-64.

71. Зайцев, В.Ю. Лабораторное моделирование томографического восстановления структуры океанического волновода по возмущениям характеристик нормальных
волн зондирующего акустического сигнала / В.Ю. Зайцев, В.В. Курин // Тезисы 40го Всесоюзного симпозиума по вычислительной томографии. – Ч. 2. – Ташкент, 1989. – 35 с.

72. Зайцев, В.Ю. О возможности модовой томографии океана / В.Ю. Зайцев, А.Г. Нечаев, Л.А. Островский // Акустика океанской среды; под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой. – М.: Наука, 1989. – С. 98-107.

73. Hermand, J. Inversion of broadband multitone acoustic data from the Yellow-Shark experiments / J. Hermand, P. Gerstoft // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1996.
– V. 21. – P. 324-346.

74. Tolstoy, A. Match field tomographic inversion to determine environmental properties / A. Tolstoy // Current topics in acoustic research. -1994. - V. 1. - P. 53-61.

75. Cornuelle, B. Tomographic maps of the ocean mesoscales. Pt. 1: Pure acoustics / B. Cornuelle, C. Wunsch, D. Behringer, T. Birdsall, M. Brown, R. Heinmiller, R. Knox, K. Metzger, W. Munk, J. Spiesberger, R. Spindel, D. Webb, P. Worcester // J. Phys. Oceanography. – 1985. – V. 15. – P. 133-152.

76. Hamilton, K.G. Simplified calculation due to ocean-environmental variation / K.G. Hamilton, W. L. Siegman, M. J. Jacobson // J. Acoust. Soc. Am. – 1980. – V. 67. – № 4. – P. 1193-1206.

77. Itzikowitz, S. Modelling of longrange acoustic transmission through cyclonic and anticyclonic eddies / S. Itzikowitz, M.J. Jacobson, W.L. Siegman // J. Acoust. Soc. Am. $-1983. - V. 73. - N_{2} 5. - P. 1556-1566.$

78. Spiesberger, J.L. Stability and identification of ocean acoustic multipaths / J.L.
Spiesberger, R.C. Spindel, K. Netzger // J. Acoust. Soc. Am. – 1980. – V. 67. – № 1. –
P. 2011-2017.

79. Jobst, W. Measurements of the temporal, spatial and frequency stability of the underwater acoustic channel / W. Jobst, L. Dominijanni // J. Acoust. Soc. Am. – 1979. – V. $65. - N_{2} 1. - P. 62-69.$

80. De Ferrary, H.A. Acoustic reciprocal transmission experiments. Florida Strait / H.A. De Ferrary, H.B. Hguyen // J. Acoust. Soc. Am. – 1985. – V. 79. – № 2. – P. 299-315.

81. Ko, D.S. Acoustic tomography in the Florida Strait: temperature, carrent and vorticity measurements / D.S. Ko, H.A. De Ferrary, P. Malanette-Rizzoli // J. Acoust. Soc. Am. – 1989. – V. 94. – No 5. – P. 6197-6211.

 Каврилов, А.Н. Теоретические и экспериментальные исследования возможности акустической термометрии климатической изменчивости Северного Ледовитого океана / А.Н. Гаврилов, М.М. Славинский, А.Ю. Шмелнв // Успехи Физических Наук. – 1995. – Т. 165. – № 7. – С. 837-840.

83. Морозов, А.К. Применение методов квазикогерентного накопления импульсной реакции гидроакустического канала при обработке шумоподобных сигналов в эксперименте THETIS-2 / А.К. Морозов // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42. – № 6. – С. 829-834.

84. Heard, G.J. Time compressing of M-sequence transmissions in a very long waveguide with a moving source and receiver / G.J. Heard, I. Schumacher // J. Acoust. Soc. Am. – 1996. – V. 99. – N_{2} 6. – P. 3431-3438.

85. Зверев, В.А. Выделение сигналов из помех численными методами / В.А.
Зверев, А.А. Стромков. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2001. – 188 с.

86. Абросимов, Д.И. Идентификация лучевых импульсов в лучевой схеме акустической томографии с движущимся приемником / Д.И. Абросимов, А.Ф. Еркин, А.Ю. Казарова, П.А. Капустин, А.Л. Матвеев, А.Г. Нечаев, А.И. Потапов, А.А. Стромков, К.А. Шаргаев // Акустический журнал. – 1995. – Т. 41. – № 4. – С. 632-635.

87. Ипатов, В.П. Широкополосные сигналы / В.П. Ипатов. – США: Г Wiley, 2004.
– 373 с.

88. Стейн, С. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений / С. Стейн, Дж. Джонс. – М.:Связь, 1971. – 376 с.

89. Варакин, Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радио, 1985. – 386 с.

90. Бурдинский, И.Н. О применении сложных сигналов в гидроакустических системах навигации и управления подводными роботами / И.Н. Бурдинский, Ю.В.

Матвиенко, А.С. Миронов, Р.Н. Рылов // Подводные исследования и робототехника. – 2008. – Т. 1. – № 5. – С. 39-46.

91. Вировлянский, А.Л. Лучевой и волновой хаос в подводных акустических волноводах / А.Л. Вировлянский, Д.В. Макаров, С.В. Пранц // Успехи Физических Наук. – 2012. – Т. 182. – № 1. – С. 19-48.

92. Чепурин, Ю.А. Эксперименты по подводной акустической томографии / Ю.А. Чепурин // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53. – № 3. – С. 451-476.

93. Munk ,W.H. Ocean Acoustic Tomography: Monograph / W.H. Munk, P.F. Worcester, C. Wunsch. – New York: Cambridge University Press, 1995. – 433 c.

94. Варакин, Л.Е. Теория систем сигналов / Л.Е. Варакин. – М.: Советское радио, 1970. – 376 с.

95. Стародубцев, П.А. Математическое обоснование параметров зондирующих сигналов для реализации бистатической локации в низкочастотной томографии / П.А. Стародубцев, Е.П. Стародубцев // Журнал радиоэлектроники. – 2003. – № 1. (электронный журнал, ISSN 1684-1719).

96. Харкевич, А.А. Влияние вида модуляции. Борьба с помехами / А.А. Харкевич.
– М.: Радиосвязь, 1965. – С. 50-60.

97. Способ приема упругой волны в морской среде (варианты): Пат. 2158029 С2 Российская Федерация / В.И. Короченцев, М.В. Мироненко, М.И. Звонарев, С.А. Бахарев, И.Н. Суртаев / заявитель и патентообладатель: Дальневосточный государственный технический университет— № 98122520/28, заявл. 15.12.1998; опубл. 20.11.2000, Бюл. № 19. : ил.

98. Алексеев, А.И. Теория и применение псевдослучайных сигналов / А.И. Алексеев, А.Г. Шереметьев, Г.И. Тузов, Б.И. Глазов. – М.: Наука, 1969. – 365 с.

99. Munk, W.H. Global ocean warming: An acoustic measure? / W.H. Munk, A.M. Forbes // J. Phys. Oceanog. – 1989. – V. 19. – P. 1765-1778.

100. Mikhalevsky, P.N. Acoustic thermometry in the Arctic Ocean / P.N. Mikhalevsky, A.N. Gavrilov // Polar Research. $-2001. - V. 20. - N_{2} 1. - P. 185-192.$

101. Бурлакова, И.Б. О возможности акустической томографии взволнованной поверхности океана / И.Б. Бурлакова, Ю.А. Дубовой, А.Л. Зейгман, А.Г. Нечаев,

М.М. Славинский, Н.М. Смирнов // Акустический журнал. – 1988. – Т. 34. – № 3. – С. 423-430.

102. Akulichev, V.A. An estimation of water structure and dynamics in the East/Japan sea shelf zone using acoustic tomography / V.A. Akulichev, V.V. Bezotvetnykh, Y.N. Morgunov, Y.A. Polovinka, D.S. Strobykin // Ocean and Polar Research. – 2009. – V. $31. - N_{\rm P} 1. - P. 1-9$.

103. Акуличев, В.А. Акустико-гидрофизический эксперимент в прибрежных водах Корейского пролива / В.А. Акуличев, А.А. Голов, Ю.Н. Моргунов, Д.С. Стробыкин, Кисеон Ким, Чансан Ким // Доклады академии наук. – 2012. – Т. 444. – № 5. – С. 558-561.

104. Моргунов, Ю.Н. Акустико-гидрофизическое тестирование мелководной акватории в прибрежных водах Корейского пролива / Ю.Н. Моргунов, А.А. Голов, Д.С. Стробыкин, Кисеон Ким, Чансан Ким, Шинрае Ро // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 3. – С. 350-355.

105. 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.

106. Моргунов, Ю.Н. Экспериментальные исследования влияния прилива на формирование акустического поля на стационарной трассе в шельфовой зоне Японского моря / Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, Д.С. Стробыкин // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54. – № 4. – С. 587-588.

107. Акуличев, В.А. Термометрия шельфовых зон океана акустическими методами / В.А. Акуличев, В.В. Безответных, А.В. Буренин, Е.А. Войтенко, С.И. Каменев, Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, Д.С. Стробыкин // Доклады академии наук. – 2006. – Т. 409. – № 4. – С. 543-546.

108. 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.

109. Акуличев, В.А. Векторно-фазовые методы в акустической томографии океана / В.А. Акуличев, А.В. Буренин, С.И. Каменев, Е.А. Войтенко, Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, Д.С. Стробыкин // Доклады академии наук. – 2006. – Т. 406. – № 1. – С. 104-107.

110. Porter, M.B. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields / M.B.
Porter, H.P. Bucker // J. Acoust. Soc. Am. – 1987. – V. 82. – № 4. – P. 1349-1359.

111. Deschamps, G.A. "Beam tracing and applications", Quasi-Optics / G.A. Deschamps, P.E. Mast. – Brooklyn: Polytechnic, 1964. – P. 379-395.

112. Popov, M.M. A new method of computation of wave fields using Gaussian beams /
M.M. Popov // Wave Motion. - 1982. - V. 4. - P. 85-97.

113. Cerveny, V. Computation of wave fields in inhomogeneous media - Gaussian beam approach / V. Cerveny, M.M. Popov, I. Psencik // Geophys.J.R.Astron.Soc. – 1982. – V. 70. – P. 109-128.

114. Cerveny, V. Gaussian beams in elastic 2-D laterally varying layered structures / V. Cerveny, I. Psencik // Geophys.J.R.Astron.Soc. – 1984. – V. 78. – P. 65-91.

115. Muller, G. Efficient calculation of Gauseian-beam seismograms for twodimensional inhomogeneous media / G. Muller // Geophys.J.R.Astron.Soc. – 1984. – V. 79. – P. 153-166.

116. Bucker, H.P. Gaussian beams and 3-D bottom interacting acoustic systems / H.P.
Bucker, M.B. Porter // Ocean Seismo-acoustics "Low-frequency underwater acoustics"
/ edited by T. Akal and J. Berkson. – New York: Plenum, 1986. – 898 p.

117. Porter, M.B. Finite-Element Ray Tracing / M.B. Porter, Y-C. Liu // Theoretical and computational acoustics. – V. 2. – Singapore.: World Scientific Publishing, 1994. – P. 947-956.

118. Jensen, F. Computational Ocean Acoustics / F. Jensen, W. Kuperman, M. Porter,H. Schmidt. – New York: American Institute of Physics, 1994. – 612 p.

119. Weinberg, H. Gaussian ray bundles for modeling high-frequency propagation loss under shallow-water conditions / H. Weinberg, R.E. Keenan // J. Acoust. Soc. Am. – 1996. – V. 100. – N_{2} 3. – P. 1421-1431.

120. Akulichev, V.A. Experimental Studies of Pulsed Signal Propagation from the Shelf Zone to the Continental Slope and then to the Deep Sea [Электронный ресурс] / V.A. Akulichev, A.V. Burenin, Y.N. Morgunov, D.S. Strobykin // Proceedings of the 10th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC X). – China: Beijing, 2009. – P. 62-63. – CD-ROM.

121. Torres, J.C. Modeling of high-frequency acoustic propagation in shallow water :
M.S. thesis / J.C. Torres. – USA, California, Monterey, Naval Postgraduate School,
2009. – 106 p.

122. Thompson Scott., R. Sound propagation considerations for a deep-ocean acoustic network : M.S. thesis / R. Thompson Scott. – USA, California, Monterey, Naval Postgraduate School, 2009. – 120 p.

123. Zeiger, V. Model-Based Positioning / V. Zeiger, S. Badri-Hoeher, P.A. Hoeher // Proceedings of Oceanology International (OI'12). – UK: London, 2012. – P. 1-4.

124. Alexander, P. Modelling sound propagation under ice using the Ocean Acoustics Library's Acoustic Toolbox / P. Alexander, A. Duncan , N. Bose // Proceedings of Acoustics 2012. – Australia: Fremantle, 2012. – P. 82-88.

125. DeRuiter, S.L. Propagation of narrow-band-high-frequency clicks : measured and modeled transmission loss of porpoise-like clicks in porpoise habitats / S.L. DeRuiter, M. Hansen, H.N. Koopman, A.J. Westgate, P.L. Tyack, P.T. Madsen // J. Acoust. Soc. Am. $-2010. - V. 127. - N \ge 1. - P. 560-567.$

126. Dong, L. Bellhop - a modelling approach to sound propagation in the ocean / L. Dong, H. Dong, J. Hovem // Proceedings of the 37th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics. – Norway: Geilo, 2014. – P. 1-4.

127. Дьяконов, В.П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2002. – 440 с.

128. Петухов, А.П. Введение в теорию базисов всплесков / А.П. Петухов. – СПб: СПбГТУ, 1999. – 132 с.

129. Френкс, Л. Теория сигналов / Л. Френкс. Нью-Джерси, 1969; пер. с англ., под ред. Д. Е. Вакмана. – М: Сов. радио, 1974. – 344 с.

Акуличев, В.А. Акустогидрофизический комплекс для морских томографических исследований / В.А. Акуличев, В.В. Безответных, С.И. Каменев, Е.В. Кузьмин, Ю.Н. Моргунов, А.В. Нужденко, С.И. Пенкин // Приборы и техника эксперимента. – 2000. № 6. – С. 112-115.

131. Caiti, A. Acoustic sensing techniques for the shallow water environment: Inversion methods and experiments / A. Caiti, R. Chapman, J. Hermand, S. Jesus. – Dordrecht: Springer, 2006. – 332 p.

132. Geyer, W.R. The impact of acoustic oceanographic methods on estuarine dynamics research [Электронный ресурс] / W.R. Geyer, P. Traykovski, A. Lavery // J. Acoust. Soc. Am. – 2013. – V. 19. – Режим доступа: http://www.ica2013montreal.org/Proceedings/mss/005001_1.pdf

133. Kamimura, S. Tidal effect of sound propagation experiment at Hashirimizu port /
S. Kamimura, H. Ogasawara, K. Mori, T. Nakamura // Proceedings of Pacific Rim
Underwater Acoustic Conf. Shallow Water Acoustics. – Korea: Jeju Island, 2011. – P.
92-93.

134. Ogasawara, H. A case study of sound propagations in consideration of ocean fluctuations / H. Ogasawara, K. Mori, T. Nakamura // Proceedings of Symp. Ultrasonic Electronics. – Japan: Kyoto, 2009. – V. 30. – P. 163-164.

135. Ogasawara, H. Reciprocal sound propagation experiment in very shallow water area of Hashirimizu port [Электронный ресурс] / H. Ogasawara, K. Mori, T. Nakamura // Jap. J. Appl. Phys. – 2010. – V. 49. – Режим доступа: http://iopscience.iop.org/1347-4065/49/7S/07HG15.

136. Ranz, C. Very shallow water noise impact of offshore windfarms. Parameters to be considered / C. Ranz // Proceedings of the 15th Int. Congr. on Sound and Vibration. – Korea: Daejeon, 2008. – P. 1074-1081.

137. Harris, M. Tidecomp world wide predictor – V. 7.03 [Электронный ресурс] / М.
Harris // Pangolin Communications. – 2000. – Режим доступа: www.pangolin.co.nz.
138. Микрюков, А.В. Влияние внутреннего прилива на медленные флуктуации
энергии импульсных сигналов в эксперименте на протяженной стационарной

трассе / А.В. Микрюков, О.Е. Попов // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52. – № 3. – С. 351-359.

139. 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.

140. Yurasov, G.I. Oceanographic Atlas of the Bering Sea Okhotsk Sea and Japan/East Sea [Электронный ресурс] / G.I. Yurasov, N.I. Rudyh, V.V. Moroz, E.V. Dmitrieva, V.I. Rostov, A.A. Nabiullin, F.F. Khrapchenkov, V.M. Bunin, I.D. Rostov // V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS). – Russia, Vladivostok, 2001. . – V. 2. – CD-ROM.

141. Моргунов, Ю.Н. О возможности применения дистанционных акустических средств и методов для термометрии шельфовых зон океана / Ю.Н. Моргунов // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 45-50.

142. Morgunov, Y. Acoustic Thermometry of the Japan Sea Shelf Zone [Электронный pecypc] / Y. Morgunov, D. Strobykin. // Proceedings of the 3rd Congress of the Alps Adria Acoustics Association "A Tradition of Innovation"). – Austria: Graz, 2007. – CD-ROM.

143. Способ акустического зондирования океана: Пат. 2221261 С1 Российская Федерация / В.И. Коренбаум, А.А. Тагильцев, Ю.Н. Моргунов, С.И. Каменев, А.В. Нужденко, В.П. Дзюба / заявитель и патентообладатель: ТОИ ДВО РАН – № 2002118525/09, заявл. 09.07.2002; опубл. 10.01.2004, Бюл. № 13. : ил.

144. Akulichev, V.A. Study of the Angular Structure of Acoustic Field in a Shallow Sea with the Use of a Combined Receiver / V.A. Akulichev, S.I. Kamenev, Y.N. Morgunov, V.V. Bezotvetnykh, A.V. Burenin, E.A. Voytenko, D.S. Strobykin // Proceedings of the 4-th Int. Symposium on Acoustic Engineering and Technology. – China: Harbin, 2005. – P. 45.

145. Стробыкин, Д.С. Тестовый эксперимент с аппаратно-программным комплексом для дистанционного акустического мониторинга течений в мелком

море / Д.С. Стробыкин // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2013. – № 6. – С. 109-115.

146. Strobykin, D.S. Remote Acoustic Monitoring of Currents in East/Japan Sea Shelf Zone [Электронный ресурс] / D.S. Strobykin, E.A. Tikhomirova // Proceedings of the Eleventh ISOPE Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS-2014)). – China: Shanghai, 2014. – P. 373-376. – CD-ROM. (ISBN 978–1 880653 90-6: ISSN 1946-004X).

147. Стробыкин, Д.С. Исследование возможностей мониторинга течений методом встречного акустического зондирования в условиях очень мелкого моря / Д.С. Стробыкин // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2015. – № 2. – С. 138-145.

148. Strobykin, D.S. Study of possibilities of flow field acoustic monitoring by the reciprocal sounding method in conditions of very shallow water / D.S. Strobykin, A.V. Burenin, E.A. Voitenko, M.S. Lebedev // Proceedings of the 5th Pacific Rim Underwater Acoustics Conference (PRUAC 2015). – Russia: Vladivostok, 2015. – P. 32.

149. Strobykin, D.S. Study of flow field acoustic monitoring by the reciprocal sound transmission method in very shallow water conditions [Электронный ресурс] / D.S. Strobykin, A.V. Burenin, E.A. Voitenko, M.S. Lebedev // Proceedings of Meetings on Acoustics. – 2016. – V. 24. – №. 070015. – CD-ROM.

150. Природопользование, состояние и тенденции изменений морской среды прибрежных районов России в Японском море[Электронный ресурс] // Информационные ресурсы ТОИ ДВО РАН. Океанография. – 2010. – Т. 11. – Режим доступа: http://www.pacificinfo.ru/data/cdrom/11/index.html

151. Tan, B. Multichannel communication based on adaptive equalization in very shallow water acoustic channels / B. Tan, M. Motani, M. Chitre, S. Quek // Proceedings of Acoust. – New Zealand: Christchurch, 2006. – P. 515-522.

152. 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, Y.N. Morgunov, Y.A. Polovinka, D.S. Strobykin // Ocean Sci. J. – 2006. – V. 41. – № 2. – P. 105-111.

153. Konstantinov, O.G. Generation of topographic vortices by tidal current of Japan Sea shelf / O.G. Konstantinov, A.F. Karnaukhov, K.V. Koshel, N.P. Malikova // Proceedings of Int. conf. «Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres-2009» (selected papers). – Russia: Moscow, 2010. – P. 217-222.

154. Гордиенко, В.А. Векторно-фазовые методы в акустике / В.А. Гордиенко, В.И. Ильичев, Л.Н. Захаров. – М.:Наука, 1989. – 223 с.

155. Щуров, В.А. Вихри акустической интенсивности в мелком море / В.А. Щуров, В.П. Кулешов, Е.С. Ткаченко // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2010. – № 12. – С. 1-6.

156. Hawkes, M. Wideband source localization using a distributed acoustic vectorsensor array / M. Hawkes, A. Nehorai // IEEE Trans. Signal Processing. – 2002. – V. $27. - N_{2} 3. - P. 628-637.$

157. Santos, P. Source localization with vector sensor array during the makai experiment / P. Santos, P. Felisberto, P. Hursky // Proceedings of the 3rd Inter. Conf. and Exhib. on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. – Greece: Heraklion, 2007. – P. 985-990.

158. Григорьев, В.А. Флуктуации времен прихода НЧ сигналов в мелком море и возможности акустического позиционирования / В.А. Григорьев, Б.Г. Канцельсон, М. Badie // Сборник трудов XXII сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2010. – Т. 2. – С. 180-183.

159. Munk, W. The sound of climate change / W. Munk // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. $-2011. - V. 63. - N_{2} 2. - P. 190-197.$

160. Storch, H. Seventy Years of Exploration in Oceanography: A Prolonged Weekend Discussion with Walter Munk / H. Storch, K. Hasselmann. – Heidelberg, Germany: Springer, 2010. – 137 c.

161. Сергеев, С.Н. Выделение акустических мод во Флоридском проливе методом шумовой интерферометрии / С.Н. Сергеев, А.С. Шуруп, О.А. Годин, А.И. Веденев, В.В. Гончаров, П.Ю. Муханов, Н.А. Заботин, М.G. Brown // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – № 1. – С. 73-83.

162. Макаров, Д.В. Об измерении углов прихода акустических импульсов с помощью вертикальной антенны / Д.В. Макаров // Акустический журнал. – 2017.
- Т. 63. – № 6. – С. 637-645.

163. Гончаров, В.В. Томографическая инверсия измеренных функций взаимной корреляции шумов океана в мелкой воде с использованием лучевой теории / В.В. Гончаров, А.С. Шуруп, О.А. Годин, Н.А. Заботин, А.И. Веденеев, С.Н. Сергеев, М.G. Brown, А.В. Шатравин // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62. – № 4. – С. 431-441.

164. Поблет-Пуиг, Ж. О новом численном методе решения задачи излучения акустических волн / Ж. Поблет-Пуиг, А.В. Шанин // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64. – № 2. – С. 257-265.

165. Буров, В.А. Решение двумерной обратной задачи акустического рассеяния на основе функционально-аналитических методов / В.А. Буров, О.Д. Румянцева // Акустический журнал. – 1992. – Т. 38. – № 3. – С. 413-420.

166. Румянцева, О.Д. Уравнение для волновых процессов в неоднородных движущихся средах и функциональное решение задачи акустической томографии на его основе / О.Д. Румянцева, А.С. Шуруп // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – № 1. – С. 94-103.

167. Шуруп, А.С. Совместное восстановление скорости звука, поглощения и течений функциональным алгоритмом Новикова-Агальцова / А.С. Шуруп, О.Д. Румянцева // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – № 6. – С. 700-718.

168. Клюкин, И.И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах / И.И. Клюкин. – Ленинград: Судостроение, 1971. – 416 с.

169. Урик, Р.Дж. Основы гидроакустики / Р.Дж. Урик. – Ленинград: Судостроение, 1978. – 446 с.

170. Корякин, Ю.А. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы / Ю.А. Корякин, С.А. Смирнов, Г.В. Яковлев. – СПб: Наука, 2004. – 410 с.

171. Щуров, В.А. Мобильные акустические комбинированные приемные системы на основе автономных необитаемых подводных аппаратов / В.А. Щуров, С.Г.

Щеглов, Е.Н. Иванов // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – Т. 2. – № 14. – С. 4-12.

172. Красовский, П.А. Проблемы измерения гидроакустических характеристик морских объектов / П.А. Красовский, С.Г. Цыганков, Г.В. Теверовский // Военно-морской салон. – Россия: С-Петербург, 2011. – С. 20-24.

173. Гордиенко, В.А. Особенности формирования векторно-фазовой структуры шумовых полей океана / В.А. Гордиенко, Б.И. Гончаренко, Я.А. Илюшин // Акустический журнал. – 1993. – Т. 39. – № 3. – С. 455-466.

174. Brouns, A.J. Second-Order Gradient Noise-Cancelling Microphone / A.J. Brouns // Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics: Speech and Signal Processing. – USA: New York, 1981. – P. 786-789.

175. Jean-Alain, R. Centre Technique des Systèmes Navals, Toulon, France.
Measurement of ships' underwater radiated noise on ranges / R. Jean-Alain //
Proceedings of UDT Pacific 98. – Australia: Sydney, 1998. – P. 290-295.

176. Cray, B.A. Directivity factors for linear arrays of velocity sensors / B.A. Cray,
A.H. Nuttall // J. Acoust. Soc. Am. – 2001. – V. 110. – № 1. – P. 324-331.

177. D'Spain, G.L. Vector sensors and vector sensor line arrays: Comments on optimal array gain and detection / G.L. D'Spain, J.C. Luby, G.R. Wilson, R.A. Gramann // J. Acoust. Soc. Am. – 2006. – V. 120. – N_{2} 1. – P. 171-185.

178. Гордиенко, В.А. Векторно-фазовые методы в акустике / В.А. Гордиенко. – Москва: Физматлит, 2007. – 480 с.

179. Боббер, Р. Гидроакустические измерения / Р. Боббер. – М.: Мир, 1974. – 364 с.

180. Ржевкин, С.Н. Некоторые следствия из теории дифракции звука на гибкой сфере / С.Н. Ржевкин // Акустический журнал. – 1956. – Т. 2. – № 4. – С. 366-371.

181. Leslie, C. Hydrophone for measuring particle velocity / C. Leslie, J. Kendall, J. Jones // J. Acoust. Soc. Am. – 1956. – V. 28. – N_{2} 4. – P. 711-715.

182. Бурдик, В.С. Анализ гидроакустических систем / В.С. Бурдик. – Ленинград: Судостроение, 1988. – 392 с. 183. Щуров, В.А. Особенности формирования отношения сигнал/шум для комбинированного акустического приемника в поле динамических шумов океана / В.А. Щуров, В.П. Дзюба, А.Н. Швырев, А.В. Щуров // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 1997. – № 4. – С. 62-74. 184. Смарышев, М.Д. Помехоустойчивость плоских антенн в анизотропном поле помех / М.Д. Смарышев, Е.Л. Шендеров // Акустический журнал. – 1985. – Т. 31. – № 4. – С. 502-506.

185. Смарышев, М.Д. Направленность гидроакустических антенн / М.Д. Смарышев. – Ленинград: Судостроение, 1973. – 280 с.

186. Смарышев, М.Д. О помехозащищенности гидроакустического комбинированного приемника / М.Д. Смарышев // Акустический журнал. – 2005.
– Т. 51. – № 3. – С. 357-358.

187. Гордиенко, В.А. Об особенностях определения направления прихода слабых сигналов в поле шумов океана одиночным векторным приемником / В.А. Гордиенко, Я.А. Илюшин, В.И. Ильичев // Доклады академии наук. – 1994. – Т. 339. – № 6. – С. 321-325.

188. Гордиенко, В.А. Векторно-фазовые методы в акустике / В.А. Гордиенко. – М.: Наука, 1989. – 223 с.

189. Касаткин, Б.А. Экспериментальная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника в инфразвуковом диапазоне частот / Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин // Подводные исследования и робототехника. – 2019. – Т. 1. – № 27. – С. 38-47.

190. Щуров, В.А. Помехоустойчивость гидроакустического комбинированного приемника / В.А. Щуров, А.В. Щуров // Акустический журнал. – 2002. – Т. 48. – № 1. – С. 110-119.

191. Смарышев, М.Д. Об использовании комбинированных приёмников и антенн в корабельной гидроакустике / М.Д. Смарышев // Гидроакустика. – 2016. – Т. 25. – № 1. – С. 5-15. 192. Смарышев, М.Д. Компьютерное моделирование алгоритмов обработки процессов на выходе комбинированного приёмника / М.Д. Смарышев // Гидроакустика. – 2016. – Т. 26. – № 2. – С. 14-19.

193. Глебова, Г.М. Способ повышения помехоустойчивости цилиндрической гидроакустической антенны / Г.М. Глебова, Г.А. Жбанков, И.А. Селезнев // Гидроакустика. – 2015. – Т. 21. – № 1. – С. 28-36.

194. Гордиенко, В.А. Помехоустойчивость гидроакустических приёмных систем, регистрирующих поток акустической мощности / В.А. Гордиенко, Е.Л. Гордиенко, Н.В. Краснописцев, В.Н. Некрасов // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54. – № 5. – С. 774-785.

195. Щуров, В.А. Локальная структура интерференционного поля мелкого моря / В.А. Щуров, А.С. Ляшков, С.Г. Щеглов, Е.С. Ткаченко, Г.Ф. Иванова, А.В. Черкасов // Подводные исследования и робототехника. – 2014. – Т. 1. – № 17. – С. 58-67.

196. Касаткин, Б.А. Оценка помехоустойчивости комбинированного приёмника в звуковом поле мелкого моря / Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин, Д.В. Злобин, Г.В. Косарев // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – Т. 2. – № 24. – С. 41-51.

197. Злобин, Д.В. Некоторые результаты исследований скалярно-векторных звуковых полей в инфразвуковом диапазоне частот / Д.В. Злобин, Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин, Г.В. Косарев // Гидроакустика. – 2017. – Т. 31. – № 3. – С. 65-78.

198. Матвиенко, Ю.В. Особенности формирования пространственной структуры векторно-фазовых акустических полей в условиях шельфовой зоны Японского моря / Ю.В. Матвиенко, Ю.Н. Моргунов, Д.С. Стробыкин // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – Т. 2. – № 24. – С. 36-41.

199. Гончаренко, Б.И. Об определении параметров морского дна по частотноугловым зависимостям коэффициента отражения / Б.И. Гончаренко, В.А. Гордиенко // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52. – № 2. – С. 283-287.

200. Гордиенко, В.А. Основные возможности гидроакустических приемных систем, использующих векторный приемник, при оценке сигнально-помеховой

ситуации на акватории и решении некоторых задач томографии океана / В.А. Гордиенко, Б.И. Гончаренко, Е.О. Ермолаева, Н.В. Краснописцев, В.Н. Некрасов // Сборник трудов XXII сессии РАО и Сессии Научного совета РАН по акустике. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 240-243.

201. Способ определения характерных размеров неоднородностей в океане: Пат. 1789945 А1 АС СССР / В.А. Гордиенко, Б.И. Гончаренко, А.А. Коропченко / заявитель и патентообладатель: МГУ ИМ.М.В.ЛОМОНОСОВА – № 4781329, заявл. 11. 01. 1990; опубл. 23.01.1993, Бюл. № 3. : ил.

202. Журавлев, В.А. Дислокационная томография океана: новый метод акустической диагностики / В.А. Журавлев, И.К. Кобозев, Ю.А. Кравцов, В.Г. Четников, В.А. Попов, А.Ю. Шмелев // Акустический журнал. – 1993. – Т. 39. – № 4. – С. 764-765.

203. Журавлев, В.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового поля волнового фронта / В.А. Журавлев, И.К. Кобозев, Ю.А. Кравцов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1993. – Т. 104. – № 5(11). – С. 3769-3783.

204. Chien, C.F. Singular points of intensity streamlines in two-dimensional sound fields / C.F. Chien, R.V. Waterhouse // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – V. 101. – № 2. – P. 705-712.

205. Елисеевнин, В.А. Поток акустической мощности в волноводе / В.А. Елисеевнин, Ю.И. Тужилкин // Акустический журнал. – 2001. – Т. 47. – № 6. – С. 781-788.

206. Журавлев, В.А. Дислокации фазового фронта в океаническом волноводе и их проявление в акустических измерениях / В.А. Журавлев, И.К. Кобозев, Ю.А. Кравцов // Акустический журнал. – 1989. – Т. 35. – № 2. – С. 260-265.

207. Кузькин, В.М. Влияние гидродинамической изменчивости на частотные смещения интерференционной структуры звукового поля в мелком море / В.М. Кузькин, А. В. Огурцов, В.Г. Четников // Акустический журнал. – 1988. – Т. 44. – № 1. – С. 94-100.

208 Щуров, В.А. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море / В.А. Щуров, В.П. Кулешов, А.В. Черкасов // Акустический журнал. – 2011. – Т. 57. – № 6. – С. 837-843.

209. Щуров, В.А. Аномальные особенности структуры поля вектора интенсивности в акустических волноводах / В.А. Щуров, А.В. Черкасов, Б.А. Касаткин, Ч.В. Злобина, С.Б. Касаткин // Подводные исследования и робототехника. – 2011. – Т. 2. – № 12. – С. 4-17.

210. Щуров, В.А. Вихри вектора акустической интенсивности в интерференционных полях мелкого моря / В.А. Щуров, А.С. Ляшков, А.В. Черкасов // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – Т. 1. – № 13. – С. 4-14.

211. Белова, Н.И. Экспериментальное исследование интерференционной и фазовой структуры потока мощности от локальных источников в мелком море / Н.И. Белова, Г.Н. Кузнецов, А.Н. Степанов // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62. – № 3. – С. 318-329.

212. Кузнецов, Г.Н. Закономерности ослабления векторно-скалярных звуковых полей в зонах интерференционных максимумов / Г.Н. Кузнецов, А.Н. Степанов // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65. – № 2. – С. 203-213.

213. Белов, А.И. Пространственное затухание различных составляющих звуковых полей в водном слое и в осадках мелкого моря / А.И. Белов, Г.Н. Кузнецов // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – № 6. – С. 614-622.

214. Стробыкин, Д.С. Акустико-гидрофизический измерительный комплекс для дистанционных исследований морской среды / Д.С. Стробыкин, Ю.Н. Моргунов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск: «Дистанционные методы, технические средства и алгоритмы в прикладных задачах исследования природных сред». – 2014. – № 9422. – С. 162-175.

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

216. Безответных, В.В. Аппаратно-программный комплекс для измерения угловой структуры акустических полей в задачах акустической томографии / В.В. Безответных, А.Е. Бородин, А.В. Буренин, Е.А. Войтенко, Ю.Н. Моргунов, Д.С. Стробыкин // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 2. – С. 142-146.

217. Акуличев, В.А. Особенности распространения низкочастотных псевдослучайных сигналов из прибрежной зоны в глубокое море в условиях слабого отрицательного градиента скорости звука на шельфе / В.А. Акуличев, Ю.Н. Моргунов, А.В. Буренин, Д.С. Стробыкин // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 462. – № 4. – С. 475-478.

218. Стробыкин, Д.С. Особенности применения М-последовательностей на несущей с фазовой манипуляцией для целей акустического мониторинга неоднородностей морской среды / Д.С. Стробыкин // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2017. – № 5. – С. 121-129.

219. Акуличев, В.А. Особенности формирования интерференционной структуры скалярно-векторных звуковых полей на шельфе Японского моря / В.А. Акуличев, В.В. Безответных, А.В. Буренин, Е.А. Войтенко, А.А. Голов, Ю.Н. Моргунов, Д.С. Стробыкин, А.А. Тагильцев // Доклады академии наук. – 2018. – Т. 480. – № 5. – С. 601-604.

220. Буренин, А. В. Исследование особенностей распространения низкочастотных псевдослучайных сигналов для задач акустической дальнометрии подводных объектов: дис. ... канд. техн. наук : 01.04.06 / Буренин Александр Викторович. – Владивосток, 2013. – 112 с.

221. Соловьев, А.А. Об одной задаче в томографии океана / А.А. Соловьев // В сб.: Морские технологии; под ред. М.Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – Вып. 1. – С. 294-304.

222. Соловьев, А.А. Об особенности метода Гауссовых пучков на слабых границах / А.А. Соловьев // В сб.: Морские технологии; под ред. М.Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – Вып. 2. – С. 111-123.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

П.1. Сложные сигналы

П.1.1. Обоснование выбора сложных сигналов для целей мониторинга морской среды

Наиболее пригодным с практической точки зрения представляется измерение времени распространения импульсного сигнала. По причине высокого уровня помеховой составляющей морской среды применение единичных детерминированных импульсных сигналов не представляется целесообразным. Для целей зондирования, в частности, протяженных акустических трасс акустических преобразователей конструирование мощных импульсных сопряжено с ограничением технических возможностей, нелинейными эффектами звукового поля и прочими трудностями. Нецелесообразно и применение источников взрывного типа из-за больших различий в спектре и интенсивности излучения даже при использовании однотипных зарядов. Более того, применение мощных акустических источников негативным образом может сказаться на экологии. Импульсный отклик гидроакустического канала распространения может быть получен путем излучения протяженного во временной области шумового (псевдошумового) сигнала и последующей корреляционной обработки. При использовании подобных сигналов отношение сигнал/шум улучшается при и прочих квазикогерентного накопления сигнала [83] помощи методов подавления шумовой помехи. С прикладной точки зрения, одним из наиболее практичных и, по этой причине, распространенных способов формирования такого сигнала является создание псевдошумовых сигналов при помощи фазовой манипуляции несущего гармонического сигнала М-последовательностью [82, 84].

В условиях многолучевости для выделения сигналов распространяющихся по лучам, в качестве зондирующих успешно применяют М-последовательности [90, 91, 48, 10, 92, 15, 93]. Вкратце, М-последовательность – это псевдослучайная последовательность из единиц и нулей, автокорреляция апериодической функция

которой обладает очень низким уровнем боковых лепестков. По этой причине для исследования импульсной характеристики волновода и применяются Мпоследовательности на несущей [85, 86]. Взаимная корреляционная функция между принятым и репликой излученного сигнала (реплика отличается от излученного сигнала при наличии эффектов Доплера) позволяет получить импульсный отклик исследуемого гидроакустического канала. При условии разности времен распространения по соседним лучевым траекториям большей, чем ширина автокорреляционной функции зондирующего сигнала, это дает возможность реализовать временную селекцию распространяющихся по лучам сигналов.

П.1.2. Широкополосные сигналы

Сигнал называется широкополосным, если произведение длительности сигнала T на занимаемую им полосу частот Δf (частотно-временное произведение или, так называемая, база сигнала) которого:

 $\Delta f \cdot T >> 1.$

и ширина полосы которого может изменяться независимо от его длительности, т.е. энергия широкополосного сигнала распределена в четырехугольнике на плоскости время-частота, площадь которого много больше единицы [87, 98]. Также такие сигналы принято называть сложными, составными или сигналами с расширенным спектром. Достоинство широкополосных сигналов заключается в том, что при их использовании представляется возможность разделения принятого гидрофоном многолучевого сигнала на отдельные приходы прошедшие каждый по своему пути распространения. Естественно подразумевается, что функция автокорреляции таких сигналов представляет собой один существенный узкий максимум, а боковые лепестки при всех сдвижках при взаимной корреляции незначительно малы. Статистические свойства таких сигналов близки к свойствам шума, они обладают практически равномерным энергетическим спектром. Поэтому детерминированные сигналы, которые обладают такими же свойствами принято называть шумоподобными или псевдошумовыми. Для применения шумоподобных сигналов качестве зондирующих В В томографических исследованиях морской среды, будучи полностью детерминированными и обладающими многими свойствами, которые присущи случайным последовательностям, они должны также удовлетворять некоторым дополнительным требованиям, например, необходимо, чтобы огибающая сигнала была близка к постоянной, т.е. сигнал должен иметь минимальный пик-фактор. Это связано с тем, что пиковая мощность ограничена техническими характеристиками излучателя и максимальная энергия будет у такого сигнала, у которого огибающая постоянна и мощность которого равна пиковой мощности излучателя. Также необходимо, чтобы хотя бы два шумоподобных сигнала в обладали реализации хорошими автокорреляционными И взаимнокорреляционными свойствами, т.е. чтоб каждый из сигналов обладал единственным узким автокорреляционным максимумом, а при взаимной корреляции с любым сдвигом относительно своей реплики (кроме нулевого) или копией любого сигнала из реализации обладал близкими к нулю значениями корреляционной функции. Кроме того, необходимо реализовать хранение либо генерацию точной копии излученного сигнала на приемной стороне системы и обеспечить синхронизацию излучающих и приемных систем.

Помехоустойчивость системы зондирования зависит OT энергии шумоподобного спектральной плотности шумовой сигнала И помехи, следовательно, при увеличении базы сигнала возможно осуществление устойчивого приема, когда отношение сигнал/шум будет меньше единицы, т.е. сигнал полностью маскируется шумами. Таким образом, данное свойство широкополосных сигналов позволяет осуществлять уверенный прием слабых сигналов при томографическом зондировании океанической среды, что открывает дополнительные возможности для уменьшения энергозатрат на излучение при использовании автономных излучателей, уменьшения возможного негативного влияния на окружающую среду, и повышение скрытности подобных систем при такой необходимости. В то же время сам сигнал обладает значительной энергией, которая распределена в частотно-временной области, и, поскольку, накопление

200

сигнала происходит когерентно, а шумов – некогерентно [88, 89], это и открывает возможность выделения широкополосного сигнала на фоне шумов.

П.1.3. Псевдошумовые последовательности. М-последовательности

Детерминированные сигналы на основе псевдошумовых (псевдослучайных) последовательностей обладают всеми свойствами характерными для случайных сигналов, и, что примечательно, инвариантны к сдвигу по времени.

М-последовательности. Также ИХ называют последовательностями максимальной длины это - псевдослучайные двоичные последовательности, порожденные n-разрядным регистром сдвига с линейной обратной связью и имеющие максимально возможный период. Ключевой особенностью Мпоследовательностей является TO, что ИХ значение автокорреляционной периодической функции равно N при нулевом сдвиге, и -1/N для всех остальных сдвигов. Другими словами они являются оптимальными, с точки зрения минимальности уровня боковых лепестков автокорреляции, среди возможных бинарных последовательностей с периодом N=2ⁿ -1.

Основные свойства М-последовательностей можно получить рассмотрев механизм их генерации. Каждая М-последовательность характеризуется двоичным полиномом степени n:

$$h(x) = h_0 x^n + h_1 x^{n-1} + \dots + h_{n-1} x + h_n$$

который определяет проверочное уравнение

$$h_0 u_i \oplus h_1 u_{i-1} \oplus h_2 u_{i-2} \oplus \dots \oplus h_n u_{i-n} = 0$$
 (II.1.1)

или

$$u_{i+n} = h_n u_i \oplus h_{n-1} u_{i+1} \oplus \dots \oplus h_1 u_{i+n}$$
 (II.1.2)

В выражениях (П.1.1) и (П.1.2) суммирование производится по модулю 2 (mod2), коэффициенты h_i могут принимать значения 0 или 1. Выражение П.1.2 является рекуррентным правилом определения любого символа М-последовательности исходя из значений предыдущих п символов.

Последовательность коэффициентов $\{h_i\}$ *i* = 0,...,*n* состоящая из нулей и единиц представляет собой характеристическое уравнение, посредством которого определяются обратные связи в формирователе М-последовательности: i-й разряд (тригтер) сдвигового регистра подключается к обратной связи (на вход сумматора по mod2), если коэффициент $h_i = 1$, в противном случае, если ($h_i = 0$), i-й разряд к цепи обратной связи не подключается.

Касательно порождающего М-последовательности полинома h(x) следует отметить, что он должен быть примитивен, то есть неприводим и первичен на поле двоичных чисел Галуа.

На рисунке П.1.1 представлен генератор М-последовательности, построенный в соответствии с неприводимым полиномом $h(x) = x^4 + x + 1$. Этот полином имеет степень n=4 и дает М-последовательность длиной N=15. В схеме формирователя выходы первого и четвертого разрядов регистра сдвига подключаются к обратной связи, так как характеристическое уравнение этого полинома 10011, т.е. $h_1 = h_4 = 1$, а младшая единица $h_0 = 1$ не учитывается.



Рис. П.1.1. Генератор М-последовательности длительностью N=15 символов, характеристическое уравнение 10011.

Генерация М-последовательности осуществляется следующим образом. С каждым новым тактом содержимое триггеров регистра сдвигается на одну позицию вправо. Содержимое триггеров Т1 и Т4 суммируется по модулю 2, а результат суммирования при помощи обратной связи подается на входной триггер Т1. Итоговая последовательность это то, что формируется на выходе триггера Т4.

Положим, в сдвиговом регистре содержатся следующие начальные значения (рис. П.1.2):



Рис. П.1.2. Схема генератора М-последовательности, характеристическое уравнение 10011, начальное состояние 1001.

Тогда на выходе Т4 при каждом новом такте будут следующие значения:

1 такт	1001	1
2 такт	0100	0
3 такт	0010	0
4 такт	0001	1
5 такт	1000	0
6 такт	1100	0
7 такт	1110	0
14 такт	0110	0
15 такт	0011	1
16 такт	1001	1

Таблица состояний регистра сдвига.

Таким образом, на выходе сдвигового регистра получим последовательность: 100100011110101

П.1.4. Свойства М-последовательностей. Как следует из представленного выше процесса формирования М-последовательности, ее:

• генерация сдвиговым регистром осуществляется циклично с периодом повторения $N=2^n$ -1, т.е., пройдя последовательно все состояния, на такте 2^n в триггерах регистра будут содержаться те же первоначальные значения, что и на первом такте. Следовательно:

• каким бы не было выбрано начальное состояние значений триггеров, схема генератора может дать N различных последовательностей, которые будут ни чем иным, как циклическими сдвигами одной последовательности. Стоит так же отметить, что начальное значение в триггерах регистра сдвига состоящее из всех нулей запрещено, так как в таком случае будет генерироваться последовательность из одних только нулей. Из чего так же можно заключить что:

• в каждом периоде М-последовательности количество «единиц» всегда больше на одно значение, чем количество «нулей».

Из примитивности порождающего полинома следует, что:

• при перемещении окна шириной n (степень полинома) вдоль Мпоследовательности, каждый бинарный набор чисел будет виден только один раз.

Отсюда следует, что генерируется процесс (сигнал) обладающий статистическими свойствами случайного процесса бросания симметричной монеты, и в то же время являющийся полностью детерминированным процессом, значения которого известны заранее.

Свойство сдвига и сложения:

• при поэлементном сложении по mod2 двух циклических сдвигов Мпоследовательности даст эту же М-последовательность, но со сдвигом отличающимся от двух исходных.

Если последовательность длиной полного периода N сравнить с той же последовательностью длиной N, но сдвинутой на какое-либо количество тактов, то количество несовпадений будет превышать число совпадений на одну единицу, т.е.:

• функция автокорреляции М-последовательности равна N при нулевой задержке, и -1 при всех остальных задержках не кратных N.

 $R_{A}(\tau) = \begin{cases} N, & \text{при } \tau = 0\\ -1, & \text{при } \tau \neq 0 \end{cases}$

М-последовательность состоит из 0.5(*N*+1) блоков, иными словами последовательностей одинаковых элементов. К примеру, последовательность 1110010 состоит из четырех блоков: 111, 00, 1, 0. Такое количество блоков с увеличением N приближает М-последовательность к оптимальной последовательности, у которой уровень максимальных боковых лепестков корреляционной функции составляет 0.5*N* [94].



Рис. П.1.3. М-последовательность с N=15: а) двоичная последовательность; б) последовательность на видеочастоте; в) периодическая автокорреляционная функция (АКФ); г) апериодическая АКФ.

На рис. П.1.3 изображена М-последовательность с периодом N=15 и длиной одного символа τ_0 , на рис. П.1.3а и П.1.3б двоичная последовательность символов, и последовательность на видеочастоте, соответственно. На рис. П.1.3в представлена периодическая автокорреляционная функция (АКФ), и на рис. П.1.3г - апериодическая АКФ. АКФ М-последовательности представляет собой один узкий треугольник. При вычислении корреляционной функции непрерывной М-последовательности или же, что эквивалентно, серии из нескольких М-последовательностей следующих друг за другом без интервалов, значение корреляционного шума равняется константе $\frac{1}{N}$, а при вычислении АКФ апериодической М-последовательности вместо константы появляется квазислучайный шум (боковые лепестки) с уровнем - $\frac{1}{\sqrt{N}}$.

П.1.5. Модуляция М-последовательностей. По большому счету, варианты формирования сложных сигналов ограничиваются двумя основными типами модуляции, это: внутриимпульсная частотная модуляция с большой девиацией (например, ЛЧМ); и фазовая манипуляция.

Использование сигналов, частотное заполнение которых имеет переменную частоту, возможно, но: на практике могут возникнуть случайные источники сигналов такого типа; корреляционная функция подобного класса сигналов имеет достаточно большие боковые лепестки, которые могут замаскировать меньшие по амплитуде более слабые приходы, и таким образом ухудшить разрешающую способность системы по времени; ширина полосы частот несущей подобных сигналов составляет величину порядка нескольких кГц, тем самым, ограничивая дальности и области применения данных сигналов в подводной акустике и, в частности, акустической томографии [95].

Фазовая манипуляция это – одна из разновидностей фазовой модуляции, где фаза несущей меняется скачкообразно при изменении значения символа последовательности. В большинстве случаев ввиду изменчивости среды в подводной акустике используется двоичная фазовая манипуляция, при которой смещение фазы несущего колебания производится на одно из двух возможных значений, л или нуль, это связано с тем, что два одинаковых по мощности импульса различающиеся только фазой на величину равную π имеют максимально возможную степень различия. Значение ИХ взаимной корреляционной функции при отсутствии сдвига по времени равняется единице, именно по этой причине применение таких сигналов обеспечивает наибольшую помехоустойчивость [96].



Рис. П.1.4. Фазовая манипуляция М-последовательности с N=15: a) последовательность на видеочастоте; б) шумоподобный сигнал на несущей; в) энергетический спектр сигнала.

Сигнал фаза которого манипулирована М-последовательностью:

$$y(t) = A \cdot \cos\left[2\pi f t + \frac{\pi}{2}M(t)\right].$$

Корреляционная функция данного сигнала:

$$R(\tau) = \begin{cases} (2^n - 1) \cdot (1 - \frac{|\tau|}{\tau_0}) \cdot \cos(2\pi f \tau), & |\tau| \le \tau_0 \\ -\cos(2\pi f \tau), & |\tau| > \tau_0. \end{cases}$$

Обработку периодических модулированных М-последовательностью сигналов при вычислении спектров и корреляционных функций следует проводить на интервалах кратных длительности одного периода принятой М-последовательности. При нарушении данного условия для периодических сигналов уровень корреляционного шума возрастает в \sqrt{N} раз, а сам шум перестает быть константой, что значительно увеличивает его маскирующие свойства.

На нестационарных трассах, например, при движении приемника или источника звука, ввиду влияния эффекта Доплера происходит искажение сигнала,

207

меняется частота несущей сигнала, а, следовательно, и временная длительность М-последовательности. Вследствие этого стоит учитывать величину возможных ошибок при вычислении взаимно корреляционной функции, так как она, без учета влияния эффекта Доплера, возможно, будет сильно отличаться от искомой импульсной характеристики волновода. Также, при работе в нестационарных условиях стоит учитывать тот факт, что М-последовательности на несущей обладают большой чувствительностью к доплеровскому смещению частоты, что может приводить к сильным искажениям корреляционных функций, появлению боковых лепестков большой амплитуды, снижению уровня корреляционной функции, или полному ее пропаданию на фоне шумов, если не преобразовать реплику излученного сигнала соответственно доплеровскому искажению масштаба времени.

Преобразование М-последовательности с N=15 в шумоподобный сигнал представлено на рис. П.1.4, на рис. П.1.4в изображен его спектр. Так как фазоманипулированные М-последовательностью сигналы являются периодическими, с периодом $T = N\tau_0$, то соответственно они обладают дискретным спектром [97]. Специфическая структура М-последовательности при фазовой манипуляции не изменяет постоянной частотной составляющей, но увеличивает в $\sqrt{N+1} = 2^{\sqrt{n}}$ раз амплитуды всех гармоник сигнала. Спектральные характеристики шумоподобного сигнала полностью определяются Mпоследовательностью, при этом ширина его спектра равняется ширине спектра одного символа последовательности длительностью τ_0 , $\Delta f = \frac{1}{\tau_0}$. Из этого следует,

что база сигнала, которая определяет размеры диаграммы неопределенности равна $B = \Delta f \cdot T = N = 2^n - 1$. Акустические системы использующие такие сигналы позволяют получить высокое разрешение, как по времени (пространственная структура неоднородностей), так и по частоте (скорость перемещения неоднородностей). Использование сложных сигналов в сравнении с простыми импульсными сигналами позволяет увеличить энергию сигнала в N раз, а энергетическую дальность действия повысить в \sqrt{N} раз [95].

208

К преимуществам сигналов на основе М-последовательностей стоит отнести и достаточную несложность устройств их формирования, как при аппаратной, так и программной их реализации. Однако, при использовании цифровых устройств в качестве генераторов или приемников фазоманипулированных сигналов, необходимо соблюдение условия кратности частоты дискретизации f_s и несущей частоты сигнала f₀, другими словами, в символе М-последовательности каждом элементарном ллительностью $\tau_0 = K_T \cdot \frac{1}{f_0} = \frac{K_T \cdot p}{f_s}$ (где K_T - число периодов несущей частоты на символ, p – число

отсчетов на один период частоты несущей $p = \frac{f_s}{f_0}$) должно содержаться целое число цифровых отсчетов. В противном случае, особенно при небольших значениях p < 4, сигнал будет сильно искажен ввиду шумов квантования.

В заключение анализа свойств и характеристик сложных сигналов с фазовой манипуляцией на основе М-последовательностей, можно сделать вывод, что они являются наиболее оптимальным вариантом для осуществления зондирования морской И получения объективных среды данных 0 неоднородностях различной физической природы [218]. Особенно их применение предпочтительно в условиях мелкого моря, так как данные сигналы обладают нестабильностям хорошей устойчивостью К гидроакустического канала распространения и высокой помехоустойчивостью.

There is no knowledge that is not power. $\ensuremath{\mathbb{C}}$ Ralph Waldo Emerson