

На правах рукописи

Стробыкин Дмитрий Сергеевич

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

Специальность 01.04.06 – Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Владивосток – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН).

Научный руководитель – Моргунов Юрий Николаевич, доктор технических наук, заведующий Отделом технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН.

Официальные оппоненты:

Серебряный Андрей Нинелович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, лаборатория акустики океана, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук» (ИО РАН)

Стаценко Любовь Григорьевна, доктор физико-математических наук, заведующая кафедрой Электроники и средств связи (ЭиСС), профессор, кафедра Электроники и средств связи (ЭиСС), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ)

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет» (ТОГУ)

Защита состоится «18» декабря 2020 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 005.017.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте имени В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанского океанологического института имени В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, а также на сайте ТОИ ДВО РАН по адресу: <https://www.poi.dvo.ru/index.php/node/1186>

Автореферат разослан «___» октября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук



Костин А. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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 натуральных 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 отдыха, туризма, строительства, ведения хозяйства, прибрежное 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 обуславливают 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.

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 постановки и проведения экспериментов, сбора, обработки 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.

С точки зрения стоимости, надежности, простоты эксплуатации, 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 акустические трассы со стационарно установленными придонными одиночными приемниками и излучателями звука. Большая часть экспериментальных исследований настоящей работы проводилась с 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 (Гордиенко В.А., 2007). Нагляднее всего преимущества использования комбинированных приемников на базе ВП проявляются при использовании одиночной приемной 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.

Концепция акустической томографии океана (АТО) была впервые представлена Манком и Вуншем (Munk W., Wunsh C., 1979), 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 (Munk W., et. al., 1979; Kerr R., 1982; Behringer D., et. al., 1982; Munk W., 2006, 2011). 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 (Rodriguez O., et. al., 2004; Любавин Л.Я. и др., 1989; Галкин О.П. и др., 2006; Хилько А.И. и др., 2007; Storch H., et. al., 2010), так и эмиссионных (Buckingham M., et. al., 1987; Harrison C., et. al., 2002; Годин О.А. и др., 2011) томографических схем, разнящихся по организации томографических трасс и измерений (Михин Д.Ю. и др., 1998; Годин О.А. и др., 1996; Диденкулов И.Н. и др., 2004; Сергеев С.Н. и др., 2017), физической природе реконструируемых характеристик (Worcester P., 1977; Чарнотский М.И. и др., 2006; Гончаров В.В. и др., 2006; Макаров Д.В., 2017), типу зондирующих сигналов (Зверев В.А., 2000; Годин О.А. и др., 2000; Кебкал К.Г. и др., 2004), по приближениям, используемым при описании зондирующего поля (Кравцов Ю.А. и др., 1986; Munk W., et. al., 1983; Taroudakis M., 2000; Поблет-Пуиг Ж. и др., 2018), и методам реконструкции неоднородностей (Malanotte-Rizzoli P., 1985; Буров В.А. и др., 2005; Гончаров В.В., 1998; Румянцева О.Д. и др., 2017). Экспериментальные исследования по методу динамической томографии (Cornuelle V., et. al., 1989; Михин Д.Ю. и др., 1998), 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 (Гончаров В.В., 1997), 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 дополнительную неоднозначность в получаемых результатах и требует дополнительного привлечения априорных данных. При реконструкции течений методом согласованной невзаимности (МСН) были получены неплохие результаты (Годин О.А. и др., 1996), 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, не представляется возможным провести их разделение во времени, а, следовательно, провести их идентификацию. В работе (Rodriguez O., et. al., 2000) 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 (Гончаров В.В. и др., 2016) 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 (Гончаров В.В. и др., 2012). Ввиду сложности и изменчивости импульсных характеристик реконструкция течений осуществлялась с привлечением априорной информации по упрощенной 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 невозможно, хотя в целом направления и скорости течений, совпадают. Предложенный в работе (Гончаров В.В. и др., 2010) комбинированный метод реконструкции ВРСЗ и течений в условиях мелкого моря, основанный на МСВО (Гончаров В.В., 1997) 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 (Гордиенко В.А., 2007), в 40х были изготовлены ПГД в США и России, однако, не нашли практического применения (Боббер Р., 1974). В 1956 году были опубликованы первые работы (Ржевкин С.Н., 1956; Leslie C., et. al., 1956) 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 (Гордиенко В.А. и др., 2010), задачах определения параметров грунта (Гончаренко Б.И. и др., 2006), изучении мелко- и крупномасштабных неоднородностей океана (Гордиенко В.А., 2007). Размеры мелкомасштабных неоднородностей могут быть определены КП по углу пеленга на источник сигнала и дисперсию пеленга за это же время (Патент на изобретение № 1789945, 1990). 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 (Гордиенко В.А. и др., 2010).

До сегодняшнего дня сохраняются существенные разногласия в оценках помехоустойчивости КП. В работах (Смарышев М.Д., 2016; Смарышев М.Д. и др., 1985) 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 (Гордиенко В.А., 2007; Щуров В.А., 2003; Гордиенко В.А. и др., 2008; Глебова Г.М. и др., 2015), по их оценкам помехоустойчивость КП, полученная в натуральных условиях, составляет 15 – 35 дБ. В работах (Касаткин Б.А. и др., 2017; Злобин Д.В. и др., 2017) представлены результаты применения методики экспериментальной оценки помехоустойчивости комбинированных приемных систем. В работе (Касаткин Б.А. и др., 2019) на основе натуральных 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 (Журавлев В.А. и др., 1989, 1993; Chien C.F. et. al., 1997; Елисеевнин В.А. и др., 2001) 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 (Кузькин В.М. и др., 1988), исследуются динамические особенности дислокаций связанные с приливо-отливными явлениями. В экспериментальных работах (Щуров В.А. и др., 2011, 2012, 2014) 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 (Белова Н.И. и др., 2016; Белов А.И. и др., 2017; Кузнецов Г.Н. и др., 2019) 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:**

1. Разработка методики натурных и численных экспериментов для решения задач реконструкции поля температур и течений в мелком море по данным акустического зондирования;
2. Экспериментальные и теоретические исследования влияния неоднородностей морской среды различного происхождения на формирование импульсных характеристик волновода при зондировании морской среды сложными псевдослучайными сигналами;
3. 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 входящих 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. Развита методика 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 (Буренин А.В. и др., 2013) 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 P , X , 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 и разведки биоресурсов. Практическая ценность работы подтверждается применением ее результатов при выполнении работ с участием автора по грантам ДВО 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 натуральных условиях. Использовались методы: зондирования океана тональными и сложными фазоманипулированными M -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, 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-ИТ 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-III-B-07-139, 2012 г.;

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

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

4. «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-III-D-07-035, 2010 г.; № 11-III-D-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 исследований, финансируемых из федерального бюджета РАН, НИР № 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 морских неоднородностей на формирование акустического поля. Особое 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 натуральных 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 структур поля вектора акустической интенсивности, интерференционной 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. 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 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. 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 (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 $c_n = 2r / S_n$.

При решении задач, мониторинга изменчивости и структуры вод, основной акцент сделан на использование одиночных акустических приемников и источников звука с придонным размещением.

В Разделе 2.2 приводится описание излучающих, приемных, приемно-излучающих систем, которые входили в состав разработанного в лаборатории акустико-гидрофизического комплекса в процессе проведения исследований по теме диссертации. Целью разработки комплекса является осуществление мониторинга изменчивости полей температур и течений акустическими методами в условиях шельфовой зоны Японского моря. 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 векторно-скалярной структуры звуковых полей.

Одной из особенностей разработанного акустико-гидрофизического комплекса для мониторинга изменчивости полей температур и течений 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, приемные и приемно-излучающие системы.

Во многих описанных в Главе 3 экспериментах, в качестве источника акустических сигналов использовался широкополосный пьезокерамический излучатель стационарно установленный на дно и соединенный кабельной линией с береговой лабораторией, однако в эксперименте (Глава 3, раздел 3.4.1) он был использован как трансивер (рис. 1 (№1)).

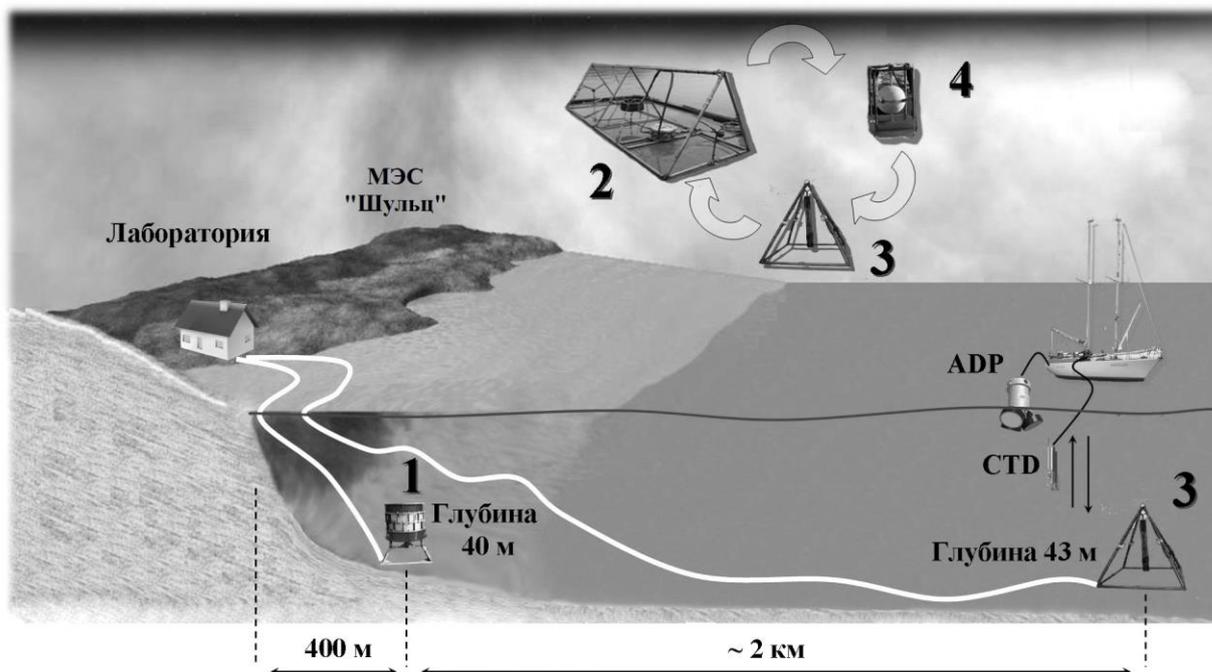


Рисунок 1 - Схема расположения приемно-передающих систем, МЭС Шульц.

Для решения задач мониторинга шельфовой зоны Японского моря применялись как мобильные, так и стационарные приемные системы. При помощи мобильных автономных гидрофонных систем на базе радиогидроакустического буй (рис. 2 (№1)) осуществлялись

оперативные постановки в области морского шельфа для проведения недолгосрочных (от часов до нескольких суток) измерений и для оценки оптимальности выбранных мест. Мобильные системы данного типа применялись для исследований влияния внутренних волн на шельфе на структуру акустических приходов (Глава 3, раздел 3.5), более поздняя модификация системы для исследований температуры и динамики вод в Корейском проливе (Глава 3, раздел 3.2). Подобная, свободно дрейфующая система, оборудованная приемником GPS, использовалась для изучения особенностей применения акустических сигналов для измерения импульсных откликов на шельфе Японского моря (Глава 3, раздел 3.2).

Стационарная приемная система (рис. 2 (№2)) была установлена на глубине 43 метра, на расстоянии около 2 километров от широкополосного пьезокерамического излучателя (рис. 1 (№1)), и соединена кабельной линией с береговой лабораторией. Она состоит из гидрофона с предварительным усилителем. Использование данной системы позволило организовать стационарную акустическую трассу (рис. 1 - схема постановки с использованием (рис. 1 (№3)) и проводить круглогодичные долговременные эксперименты в течение нескольких лет. С ее помощью были проведены исследования влияния приливо-отливных изменений уровня поверхности моря на импульсные характеристики волновода (Глава 3, раздел 3.1), исследования закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических и температурных полей (Глава 3, раздел 3.2), сезонной изменчивости температурных полей (Глава 3, раздел 3.3).

Для осуществления идеи совмещения преимуществ временной селекции акустических приходов, и так называемой «векторно-скалярной» обработки выделенных импульсов (Патент РФ № 2221261, 2004), которая позволяет измерять углы приходов применялся комбинированный (векторный) приемник (рис. 2 (№3)). Эта приемная система применялась для исследования возможностей векторно-скалярных методов для целей акустической томографии океана (Глава 4, раздел 4.1), (рис. 1 - схема постановки с использованием (рис. 1 (№4)).

Для проведения экспериментальных исследований полей течений методом встречного акустического зондирования была создана система, корреспондирующие элементы которой могут совмещать функции, 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 приема, использовался стационарно установленный обратимый пьезокерамический акустический преобразователь (рис. 1 (№1)) описанный выше. Вторая приемно-передающая система (рис. 1 (№2)) была разработана и установлена на расстоянии 2098 метров от первой системы, так же стационарно на дно и соединена кабельной линией с береговой лабораторией (рис. 1 - схема постановки с использованием (рис. 1 (№2)). Она состоит из двух разнесенных на расстояние 3 м гидрофонов и находящегося в центре пьезокерамического преобразователя с центральной частотой 2500 Гц, работающего в режиме излучения и приема. Результаты эксперимента описаны в (Глава 3, раздел 3.4.1)

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. Для проведения исследований была организована стационарная акустическая трасса в бухте Витязь протяженностью 152 м. Использовались пьезокерамические трансиверы излучавшие М-последовательности с центральной частотой 6кГц (рис. 2 (№4)), установленные стационарно вблизи дна на глубинах 4 м (трансивер № 1) и 12 м (трансивер № 2), соединенные кабельными линиями с береговой лабораторией. Результаты тестового эксперимента представлены в

(Глава 3, раздел 3.4.2) В последующем эксперименте по встречному зондированию в условиях очень мелкого моря, длина трассы была увеличена до 1220 метров, и одна из приемно-передающих систем была заменена на автономный вариант исполнения, с передачей сигнальной информации по радиоканалу, и апробирована в натуральных условиях. Синхронизация излучения и приема осуществлялась с помощью системы единого времени (СЕВ), результаты представлены в (Глава 3, раздел 3.4.3).



Рисунок 2 – Технические средства: 1 - мобильная автономная приемная система на базе радиогидроакустического буя; 2 - стационарная приемная система; 3 - комбинированный (векторный) приемник; 4 – трансивер 6 кГц; 5 - автономная приемная система с использованием комбинированного приемника; 6 - буксируемый гидроакустический излучатель.

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на изучение пространственной векторно-скалярной структуры звуковых полей и возможности наблюдения за подводными объектами в мелком море, использовался электромагнитный буксируемый гидроакустический излучатель (БГИ) (рис. 2 (№6)) и автономная приемная система (рис. 2 (№5)). БГИ предназначен для излучения акустических сигналов в диапазоне частот 140-270 Гц и позволяет работать при глубине погружения 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). Автономная приемная система (рис. 2 (№5)) с использованием комбинированного приемника (КП) представляет собой 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. Результаты экспериментов с использованием этих систем описаны в (Глава 4, раздел 4.2).

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 настоящей работе все представленные расчеты по численному моделированию 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 (Кравцов Ю.А. и др., 1986)) 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 (Глава 3, разделы 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, Глава 4, раздел 4.1), однако, стоит отметить, что и при расчетах распространения акустических сигналов методом Гауссовых пучков на бóльшие расстояния (Akulichev V.A., et. al., 2009) были получены неплохие результаты.

Предложен оригинальный метод представления приходящих импульсов в виде вейвлета Морле (Дьяконов В.П., 1986) для построения функции отклика акустического канала по данным численного моделирования - 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 принимают вид огибающей корреляционной функции соответствующей представлению результатов экспериментальных измерений функции отклика акустического канала при корреляционной обработке сложных сигналов (рис. 3, 4).

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.

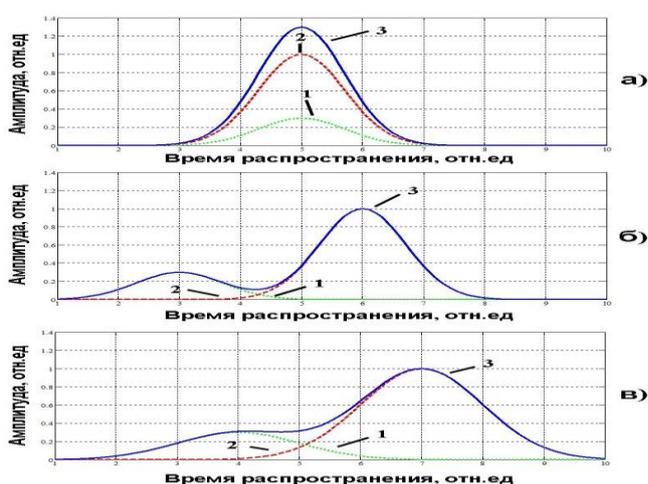


Рисунок 3 - Представление акустических приходов с использованием вейвлета Морле. а) 1 – время прихода (t) = 5, Амплитуда (A) = 0.3, ширина импульса (w) = 1; 2 – ($t=5$, $A=1$, $w=1$); 3 – результирующая. б) 1 – ($t=3$, $A=0.3$, $w=1$); 2 – ($t=6$, $A=1$, $w=1$); 3 – результирующая. в) 1 – ($t=4$, $A=0.3$,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

Модифицированное представление вейвлета Морле имеет вид:

$$W_{imp}(t) = A \cdot \exp(2 \cdot \pi \cdot i \cdot F_c \cdot t) \cdot \exp\left(-\frac{(t - F_c)^2}{w}\right)$$

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.

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 (Гончаров В.В., 1997). Использование же в численном моделировании амплитудно-временной 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 (Глава 3, разделы 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, Глава 4, раздел 4.1).

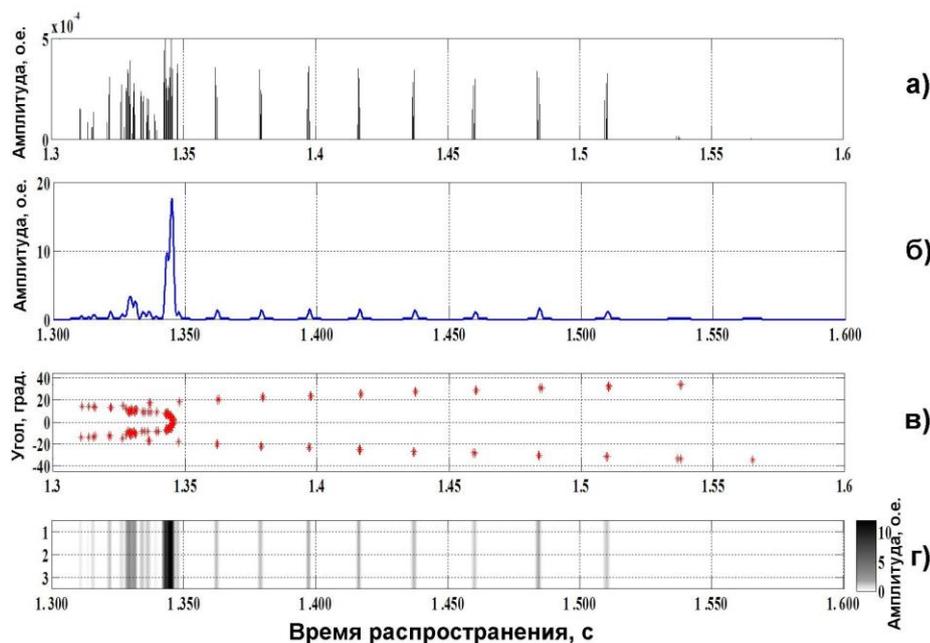


Рисунок 4 - Моделирование распространения акустических импульсов (частота излучения 2500Гц): а) – «лучевые» приходы; б) - вейвлет представление, в) – углы выхода; г) – вейвлет представление, амплитуда показана градацией серого.

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

представленные 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.

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. На основе экспериментальных данных продемонстрированы возможности методов акустического зондирования по измерению и мониторингу изменчивости температурных полей.

Экспериментальные исследования проводились на базе МЭС м. Шульца в шельфовой зоне Японского моря в августе 2005 года на акустической трассе аналогичной описанной в разделе 3.1. Излучение сложных фазоманипулированных сигналов на основе М-последовательностей (2500 Гц центральная частота, 511 символов, 4 периода частоты несущей на символ) осуществлялось раз в минуту на протяжении суток. В месте расположения приемной системы каждый час выполнялись гидрологические измерения. 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. 5а). Экспериментально полученные вариации времен приходов акустических импульсов представлены на рисунке 5в. 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. 5а)), соответствующее изменение времени распространения поздних импульсов с максимальной амплитудой, т.е. его уменьшение, на импульсной характеристике (рис. 5в) 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 времени происходит максимальное заполнение акустической 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. 5в) уменьшается время распространения ранних приходов, это соответствует опущению теплой воды в более глубокие слои (рис. 5а).

На основе данных гидрологических измерений, профиля дна (полученного путем промера глубин эхолотом в штилевую погоду), и атласных (Yurasov G.I., et. al., 2001) 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 и программ разработанных автором, что позволило более точно идентифицировать акустические приходы. На рисунке 5б приведены результаты моделирования для всего периода эксперимента.

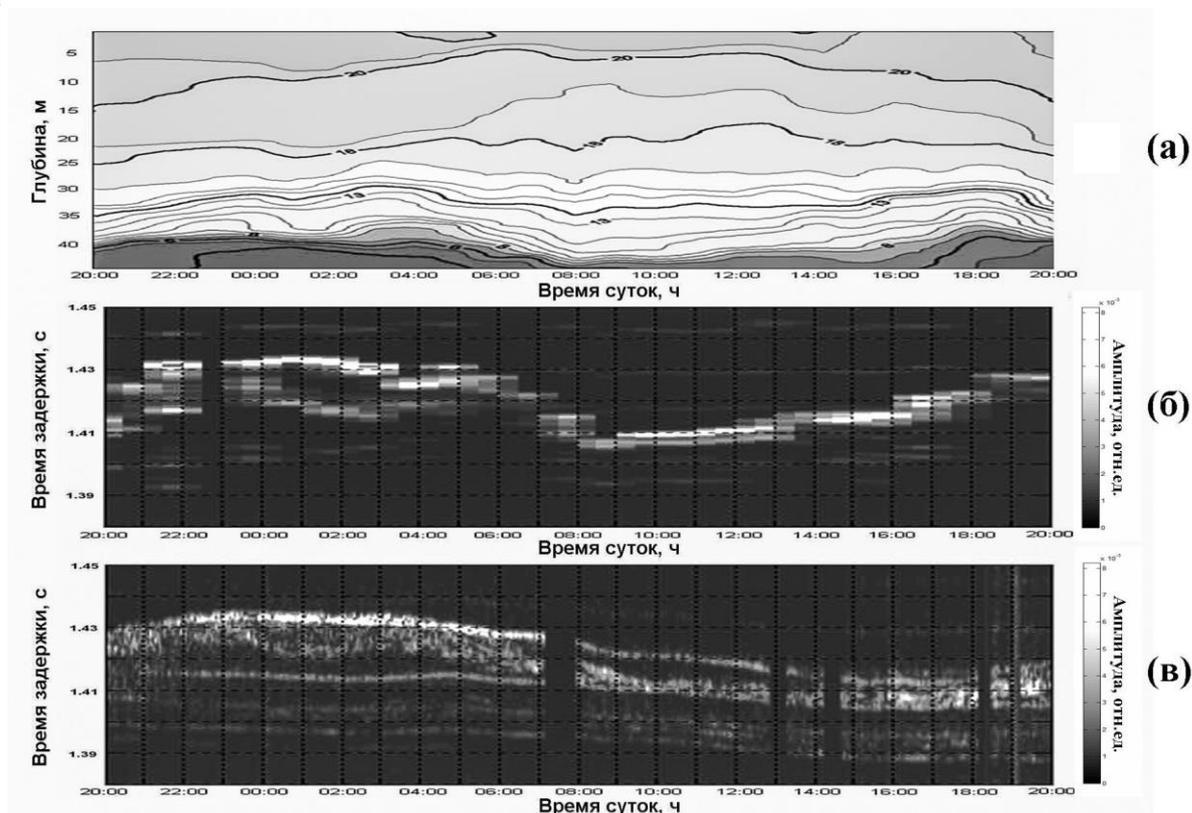


Рисунок 5 – (а) - зависимость температуры воды от времени суток и глубины; (б) – расчетные, (в) – экспериментальные, вариации импульсной характеристики акустического канала (август 2005 г.).

Стоит отметить довольно неплохое соответствие экспериментальных и рассчитанных времен и амплитуд акустических приходов с различными лучевыми траекториями распространения (рисунки рисунок 5б, 5в), 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.

В более поздних экспериментах проведенных в июне, июле и августе 2009 г. в различных гидролого-акустических условиях на трассе протяженностью 23 км, показана зависимость импульсного отклика канала распространения акустической энергии от вертикального распределения скорости звука с глубиной. В эксперименте 2010 года в Корейском проливе на трассе длиной 615 метров также продемонстрировано влияние захода приливных вод на импульсные характеристики волновода.

В разделе 3.3 представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования импульсной характеристики волновода на шельфе Японского моря в зависимости от сезонных изменений поля температур. Измерения осуществлялись на акустической трассе аналогичной описанной в разделе 3.1., практически ежемесячно в 2006 – 2007 годах. Излучались М-последовательности с центральной частотой 2500 Гц раз в минуту.

По данным многолетних исследований 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. 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.

Условия проведения эксперимента позволили выделить и идентифицировать до девяти импульсов, которые проходят путь между излучателем и приемником по различным лучевым траекториям. Типичные для каждого месяца импульсные характеристики канала приведены на рис. ба. 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 (раздел 3.1). 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 рис. бб, где приведены относительные времена приходов импульсов, полученных при сдвиге импульсных характеристик, изображенных на рис. ба, 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. ба) 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. бв 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 (Yurasov G.I., et. al., 2001).

Наличие импульсов, которые не укладываются в отмеченные выше промежутки времени (они отмечены темными кружками на рис. 6б), 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. 6в они обозначены звездочками). Синхронно с измерениями импульсных характеристик в августе проводились измерения вертикального распределения температур в точке размещения приемной системы гидрологическим зондом. На рис. 6в темными кружками обозначены значения средних температур во всем слое и температуры в придонном слое. Как видим, измерение температур гидрологическими приборами и акустическими методами дают близкие результаты и в некоторых случаях существенно отличаются от среднегодовых данных.

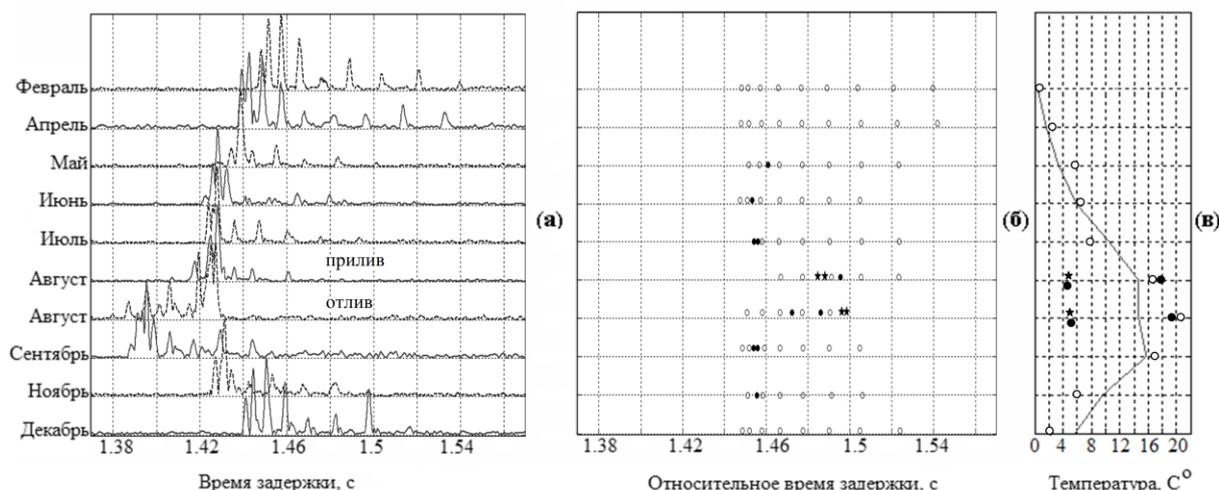
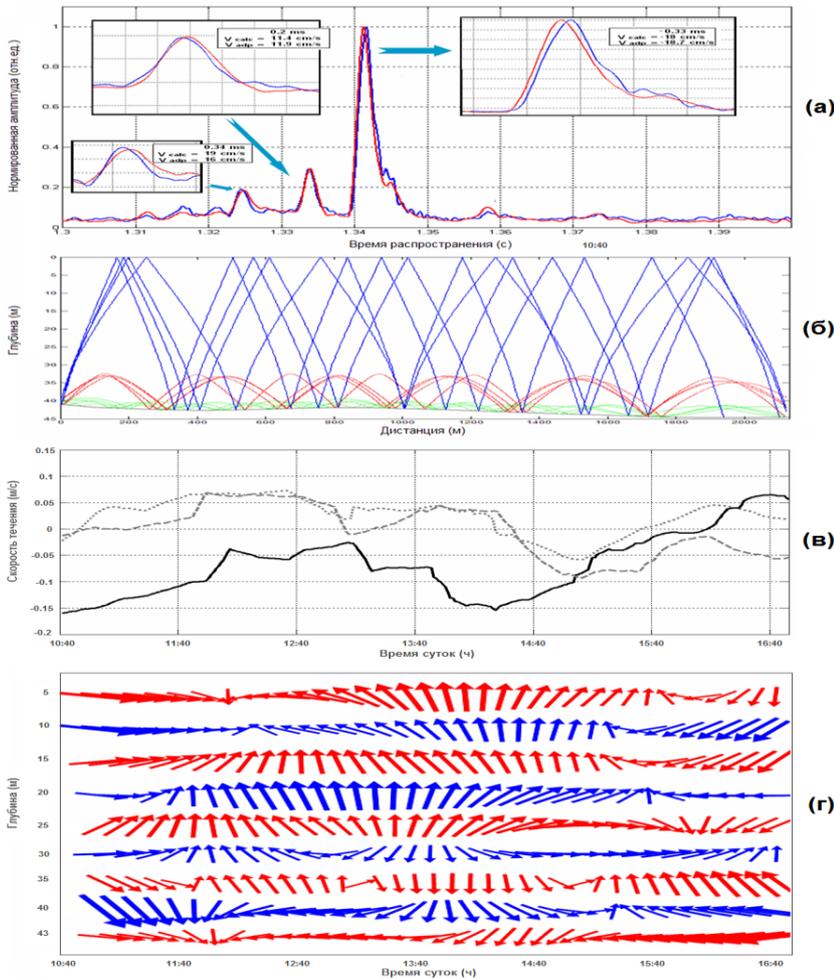


Рисунок 6 – (а) Типичные для каждого месяца импульсные характеристики канала; (б) относительные времена приходов импульсов; (в) средние температуры в водном слое: (светлые кружки) - рассчитанные по данным акустического зондирования; (сплошная линия) - полученные по данным многолетних океанологических 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.

В разделе 3.4 приведены результаты экспериментального исследования возможностей дистанционного акустического мониторинга направления и скорости течений методом встречного зондирования. Исследования проводились на акустической трассе (рис. 1), встречное излучение М-последовательностей с центральной частотой 2500 Гц осуществлялось синхронно один раз в минуту. В точке расположения дальней от берега системы был установлен ADP для измерения скоростей течений, с яхты проводились ежечасные измерения вертикальных профилей температуры и солёности СТД-зондом (рис. 1). Гидрологические условия 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. 7а).



(а) Рисунок 7 – (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; (в) – скорость течений усредненных по часовому скользящему интервалу: светлые кривые – 2й и 3й приход, темная кривая – 4й приход; (г) – направления и скорости течений по данным ADP.

На рисунках 7а и 7б 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.

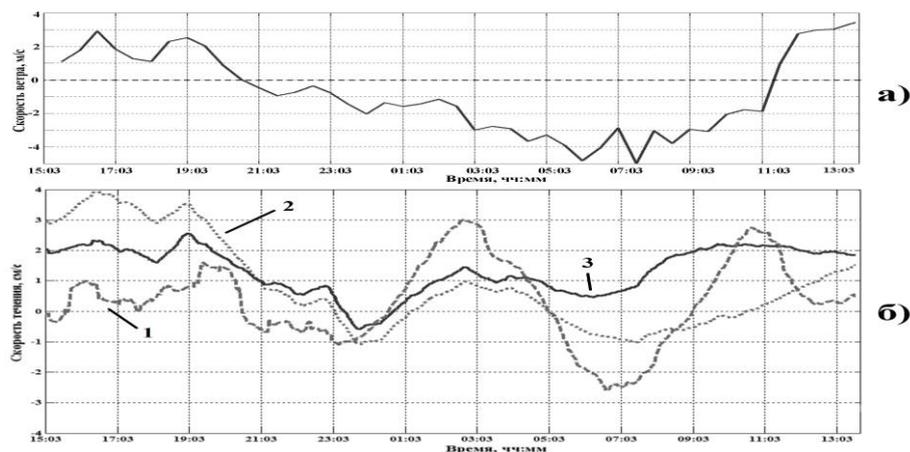


Рисунок 8 – (а) – скорость ветра, приведенная к направлению акустической трассы (по данным метеостанции); (б) – скорости течения, усредненные по скользящему четырехчасовому интервалу: 1 – расчетные значения, полученные по результатам акустических измерений; данные ADP, приведенные к направлению акустической трассы: 2 – усредненные значения по всей водной толще; 3 – усредненное значение для слоя от 4 до 16 м.

Максимальный по амплитуде четвертый импульс образован группой лучей, распространяющихся в придонном слое с более холодной водой. Расчет скорости и направления течения были проведены для второго, третьего и четвертого приходов, т.к. они выделяются с хорошим превышением над помехой, по методике описанной в разделе 2.1.

Анализ данных расчета показал, что в придонном слое течение направлено от берега, а суммарное течение во всем волноводе к берегу (рис. 7в). С этими данными хорошо согласуются результаты измерений, полученные с помощью ADP (рис. 7г).

В сентябре 2012 года были проведены тестовые эксперименты по измерению течений в условиях очень мелкого моря, на акустических трассах длиной 152 и 1220 метров, излучались М-последовательностей с частотой несущей 6 кГц. Результаты измерений показали, что основной вклад в формирование направлений и скоростей течений на исследуемой акватории вносят ветровые условия (рис. 8). По результатам эксперимента, оценки показали, что погрешность определения скоростей течений акустическим методом, при сопоставлении времени распространения соответствующих акустических приходов вдоль потока и против него, составили 1,5–3,0 см/с.

В разделе 3.5 приведены экспериментальные данные по определению влияния внутренних волн, проходящих через акустическую трассу, на характеристики распространения акустических сигналов, показана возможность реконструкции параметров (периода и скорости распространения) этих волн.

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

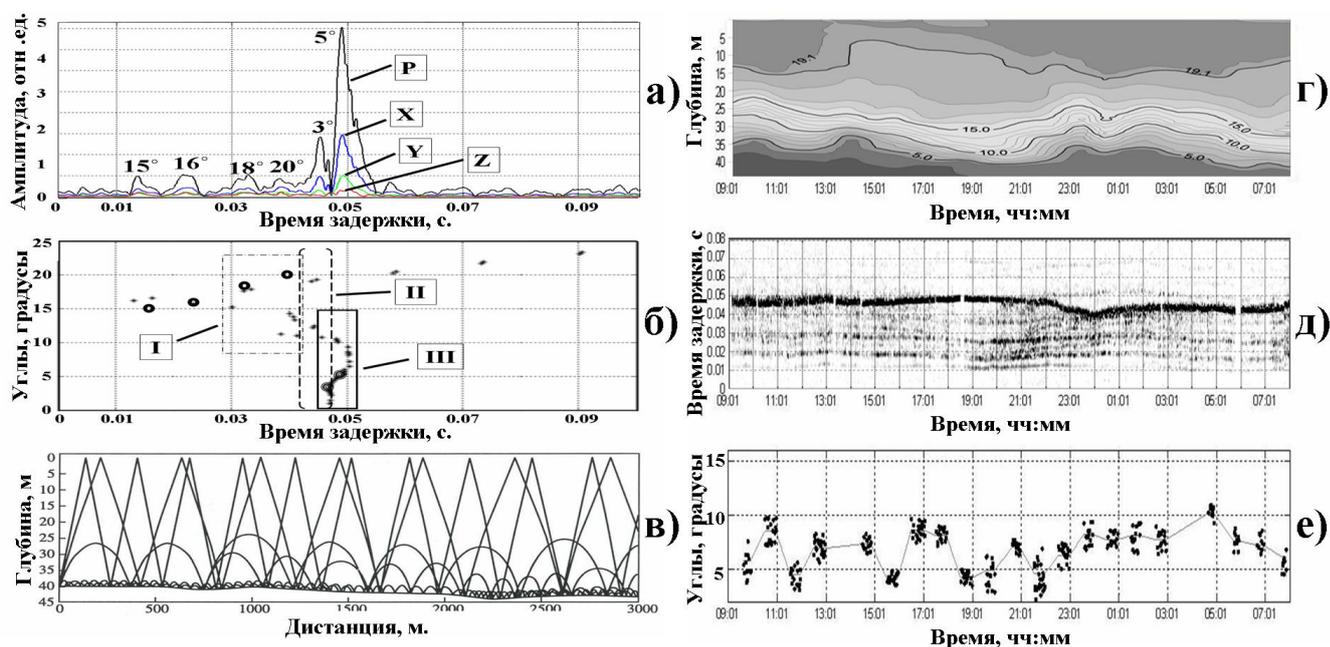


Рисунок 9 – (а) – Типичная мгновенная импульсная характеристика волновода для периода проведения эксперимента (X, Y, Z - каналы КП; P – приемник давления); (б) – зависимость углов приходов от времени: * - расчет, o – эксперимент (I, II, III – области, где идентификация, без использования данных с ВП, затруднительна); (в) – лучевая картина. Суточные изменения: (г) – температуры, (д) – времен приходов, (е) – углов максимального по энергии позднего прихода (• - мгновенные значения, линия – усредненные значения по 20-минутной выборке).

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. Эксперимент проводился в шельфовой зоне Японского моря в сентябре 2004 г. В течение суток ежеминутно излучались на частоте 2500 Гц М-последовательности, 511 символов, 4 периода несущей частоты на символ (рис. 1 схема с использованием №1 и №4).

На основании анализа импульсных характеристик, полученных в течение суток, на рис. 9а представлена типичная мгновенная импульсная характеристика волновода и отмечены углы разрешенных приходов, полученные по данным с КП. 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 и времен приходов, показана на рис. 9б. На расширенной по сравнению с работой (Буренин А.В. и др., 2013) выборке, выполненного численного моделирования, анализе угловой и временной структуры, экспериментальных данных, показано, что данные ВП позволяют провести идентификацию 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 в основном термоклине) [рис. 9б, область I], и углами 3° – 10° (канализирующиеся в придонном слое холодной воды) [рис. 9б, область II], имеют очень близкие значения. А также ВП позволяет облегчить идентификацию углов максимальных по энергии приходов 3° – 10° в придонном звуковом канале (рис. 9б, область III, рис. 9е).

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. Эксперименты по исследованию особенностей пространственной структуры векторно-скалярных полей были проведены 14 июня 2015 года вблизи мыса Шульца и 12 июля 2015 года в заливе Посьета. В первом эксперименте комбинированный приемник был стационарно установлен в бухте Витязь на глубине 27 метров при глубине моря 37 метров. Буксировка источника тональных сигналов (частота 134Гц) осуществлялась с борта яхты на глубине 20 метров со скоростью 3 узла в западном направлении на удаление (~10км) от приемной системы и на приближение. Анализ полученных зависимостей амплитуд сигналов с гидрофона и датчиков X, Y, Z векторного приемника от расстояния показал практически полное совпадение минимумов и максимумов интерференционной структуры для гидрофона и датчиков XYZ, с перепадом амплитуд до 15-20 дБ.

Во втором эксперименте КП был установлен в двух метрах от дна в точке с глубиной моря 58,5 м. Буксировка вначале осуществлялась от приемной системы на юго-восток на удаление около 10 км в сторону глубокого моря до изобаты 100 м (Галс 1). Затем в сторону берега до изобаты 35 м и удаления от приемной системы 10 км (Галс 2, 3) и, наконец, возвращение к приемной системе (Галс 4). На рисунке 10 (а - г) приведены зависимости амплитуд сигналов на канале давления и каналах XYZ от расстояния для каждого из четырех галсов.

Расчет средних значений периодов интерференционной 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.

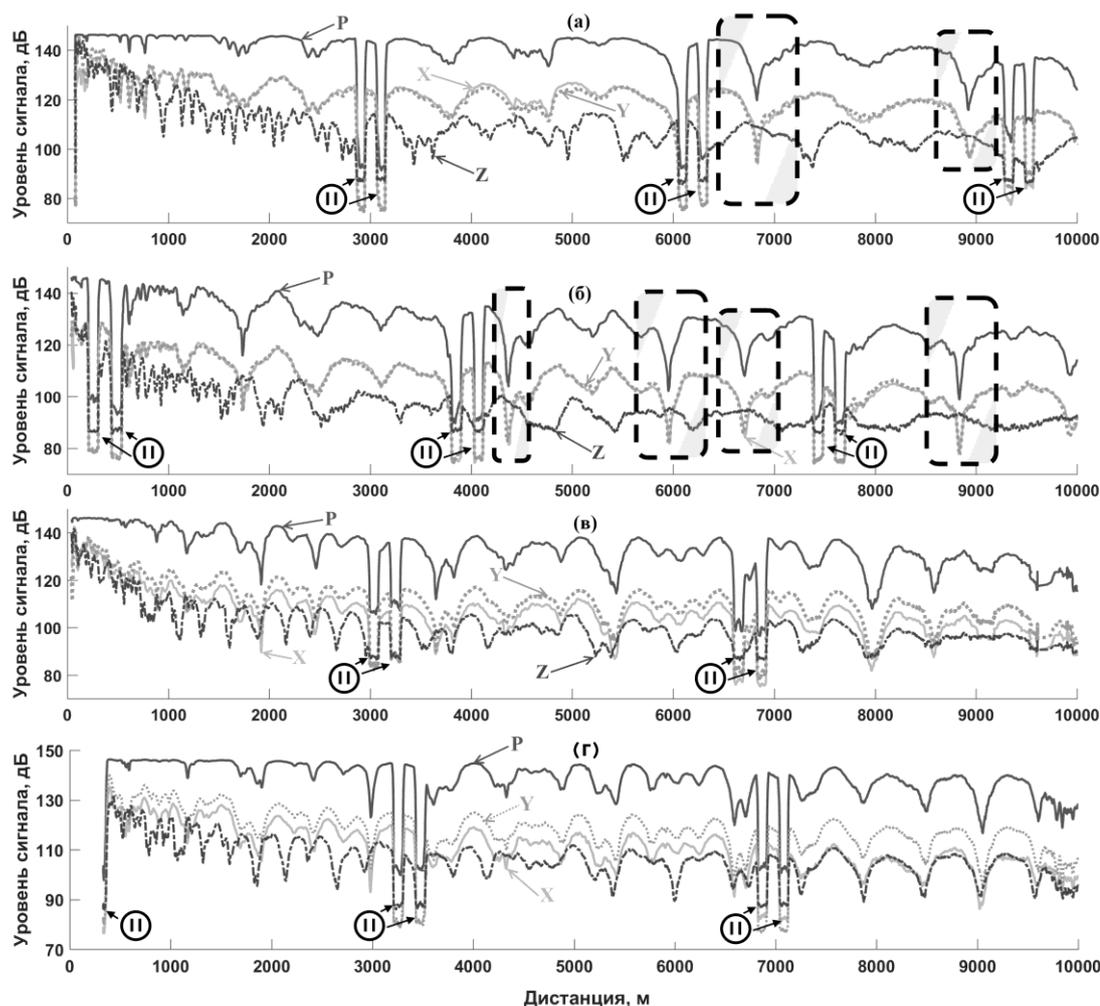


Рисунок 10 – Зависимости уровней сигналов в каналах давления (P) и колебательного ускорения (X, Y, Z) от расстояния: а) 1 галс, б) 2 галс, в) 3 галс, г) 4 галс. 2-х минутные паузы излучения сигнала отмечены символом – II. Некоторые характерные участки глубоких минимумов в каналах P, X, Y, где фиксируется максимум амплитуды в канале Z, отмечены пунктирными прямоугольниками.

Следует подчеркнуть, что обработка сигнальной информации во всех экспериментах проводилась по единой методике на идентичных приборах. Анализ зависимостей на рисунке 10а и 10б показывает, что для условий эксперимента на участках с глубокими минимумами амплитуд сигналов в каналах давления и XY, фиксируется максимум амплитуды в канале Z (некоторые характерные участки отмечены пунктирными прямоугольниками на рис. 10а и 10б). 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 в вертикальном канале КП (Касаткин Б.А. и др., 2019). Может быть обусловлено 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 R , X , Y 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, этот эффект свидетельствует о возможности использования ВП/КП для организации обнаружения, локализации и сопровождения источника тонального сигнала (дискретности 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.

В результате натурных экспериментов получены данные, характеризующие особенности формирования интерференционной структуры поля тонального источника (134 Гц) в мелководных акваториях.

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

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 исследований 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 длиной 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. На основе экспериментальных данных (зондирование 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 по всей толще воды, в термоклине, и придонном звуковом канале имеют очень близкие значения, где она затруднительна, и облегчить ее в области максимальных по амплитуде значений придонного канала.

7. На основе данных натурального 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 (дискретности подводных объектов) при любых вариантах взаимного маневрирования источника и приемника, т.к. в этом случае, в отличие от ПД, не возникнет потери акустического контакта.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. **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.

11. **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.

12. **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.

13. 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.

14. 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. - №2(24). - С. 36-41.

15. **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.

16. 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.

в других рецензируемых изданиях:

17. 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 Science Journal. – 2006. - V. 41. - № 2. - P. 105-111.

18. 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. Stroykin** // Ocean and Polar Research. – 2009. - V. 31. - № 1. - P. 1-9. - ISSN 1598-141X.

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

Специальность 01.04.06 – Акустика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ____ 2020. Формат 60x84 1/16
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № ____
Отпечатано с авторского оригинал-макета в ТОИ ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43