Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Дальневосточный федеральный университет"
(ДВФУ)

На правах рукописи

Кирьянов Алексей Валерьевич

СИСТЕМА МОРСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ РАЙОНОВ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Специальность 05.08.06 – Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор
Петухов Валерий Иванович

Владивосток – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОРСКОГО МОНИТОРИНГА 15
1.1 Технические средства мониторинга 16
1.2 Подводные сети передачи данных 27
1.3 Сенсорные системы подводных робототехнических комплексов для экологических измерений 35
1.4 Выводы 41
2 СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ, КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГО-АКУСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ 43
2.1 Структура системы мониторинга акваторий арктических морей 44
2.2 Выводы 55
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ВОДНОЙ СРЕДЕ 57
3.1 Математические модели распространения звука в океане 58
3.2 Влияние неоднородностей скорости звука на зональную структуру акустического поля в океане 65
3.3 Моделирование звуковых полей в случайно-неоднородных подводных волноводах 73
3.4 Особенности распространения звука в ледовых условиях 77
3.5 Исследование зависимости расположения границ зон конвергенции в океанических волноводах от уровня случайной компоненты поля скорости звука 85
3.6 Экспериментально-теоретический метод определения режимов стохастичности поля скорости звука 96
3.7 Выводы 104

4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕТРАНСЛЯЦИОННОЙ ЛИНИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ 106
4.1 Оценка автономности модуля ретрансляционной сети 106
4.2 Экспериментальные исследования энергопотребления модуля ретрансляционной сети 108
4.3 Модель оптимальной ретрансляционной линии связи системы мониторинга акваторий, учитывающая энергопотребление, технические параметры и стоимость узлов сети 115
4.4 Выводы 118
5 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИЙ 119
5.1 Разработка модуля ретрансляционной сети системы мониторинга акватории 119
5.2 Гидроакустический модем 125
5.3 Выводы 129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 133
ПРИЛОЖЕНИЕ А 151
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Истощение доступных месторождений полезных ископаемых вызвало повышенный интерес к ресурсам Мирового океана. Уже давно разрабатываются многочисленные морские месторождения углеводородов, появляются первые подводные комплексы по добычи золота, алмазов и цветных металлов, в перспективе ожидается разработка обширных глубоководных месторождений железно-марганцевых конкреций и кобальтоносных марганцевых корок. Можно с уверенностью говорить, что данный процесс будет нарастать и в дальнейшем.

Россия обладает значительными запасами полезных ископаемых на шельфе дальневосточных и арктических морей. Российский шельф имеет самую большую в мире площадь - свыше 6 млн. км^2, а размеры исключительной экономической зоны составляют около 8,5 млн. км^2. Крупнейшими операторами лицензионных участков являются ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «Газпром». На 01.01.2019 года ПАО «НК «Роснефть» владела 55 лицензиями на участки в акваториях морей России, а объем запасов на этих участках оценивается в 41 миллиард тонн нефтяного эквивалента [145]. При этом большинство проектов расположено в Арктике (28) и на Дальнем Востоке (20).

ПАО «Газпром» уже эксплуатирует или реализует крупные проекты по добыче углеводородов на российском шельфе [146]. В рамках проекта «Сахалин-3» «Газпром» обладает лицензиями на Киринский, Аяшский и Восточно-Одоптинский участки. В 2013 г. состоялся первый пуск на Киринском месторождении, уникальной особенностью которого является эксплуатация первого в России подводного добычного комплекса без использования платформ.

В Печорском море с 2013 г. ведется добыча нефти на Приразломном месторождении, которое пока является единственным действующим в нашей стране проектом по добыче углеводородов на арктическом шельфе. Основным объектом являются морская ледостойкая нефтедобывающая платформа «Приразломная», расположенная в 60 км от берега. В 2020 г. началось

строительство ледостойкой платформы для месторождения Каменномысское-море, расположенного в Обской губе Карского моря (планируемый срок начала добычи газа – 2025 г.) [146]. В целом, по данным геологической службы США, Арктика содержит 30% мировых неисследованных запасов газа, 13% нефти [147]. По оценке исследователей 90 миллиардов баррелей нефти и 1,669 триллионов кубических футов природного газа могут находиться в Арктике, из которых примерно 84 % приходится на морские районы.

Вместе с тем, разведка, обустройство и эксплуатация морских месторождений, сопровождающиеся строительством крупных объектов инфраструктуры (добывающих платформ, нефтяных и газовых терминалов, трубопроводов), представляют серьезную опасность для морских экосистем [56]. Значительные объемы нефти попадают в море и в процессе её транспортировки из районов добычи [19]. Половина добываемой на шельфе нефти перевозится танкерным флотом, при этом за счёт слива за борт промывочных и балластных вод, а также по другим причинам теряется около 0,03% транспортируемых нефтепродуктов, вследствие чего, на трассах морских путей наблюдается постоянное присутствие полей загрязнения. Согласно спутниковым снимкам поверхности Земли, прибрежные акватории почти на 30% покрыты нефтяной пленкой [51].

В то же время, необходимо учитывать, что углеводороды, могут быть как антропогенного, так и природного происхождения. Основный составляющей свободных газов месторождений нефти и газа является метан (около 90–95 %), в виде примесей зафиксированы также этан, пропан и бутан [53,71]. В целом мощность антропогенных источников метана в настоящее время превышает мощность естественных поступлений в биосферу [56]. Многочисленные наблюдения свидетельствуют о повсеместности очагов метанообразования и выделения природного газа на дне Мирового океана. Можно утверждать, что метан, как и нефть, относится к природным экологическим факторам морской среды. Согласно фактическим данным о фоновом содержании метана в поверхностных водах морей и океанов [57], концентрации газа колеблются обычно

в пределах от 0,01 до 1 мкл/л. Другие углеводороды метанового ряда (этан, пропан и др.), сопутствующие метану, обычно имеют концентрации на несколько порядков ниже уровня содержания метана. В дальневосточных морях России многократно фиксировались аномальные концентрации метана в придонных слоях воды и донных грунтах и прямые миграционные выходы природного газа с морского дна [50,54]. Только за период исследований с 1988 по 2011 г. было обнаружено более 500 выходов пузырей метана из донных отложений [53]. На Сахалинском шельфе в районе открытых месторождений нефти и газа – Одоптинском, Пильтун-Астохском и др. – в придонной воде наблюдаются концентрации метана порядка 2000–3000 нл/л. Исключение составляет Лунское месторождение. Здесь отмечена наибольшая аномалия метана в придонной воде – 10900 нл/л. В районе выходов потока метана концентрация его в донных осадках достигает 50–100 мл/кг осадка, что превышает фоновое количество в 100 тыс. раз [53].

Охрана окружающей среды при освоении ресурсов Мирового океана затрагивает интересы не одного государства, поэтому рассматривается на международном уровне. Например, еще с 1994 года в рамках Программы региональных морей UNEP реализуется «План действий по охране, управлению и развитию морской и прибрежной окружающей среды региона северо-западной части Тихого океана» (The Action Plan for the Protection, Management and Development of the Marine and Coastal Environment of the Northwest Pacific Region (NOWPAP)) направленный на обеспечение готовности и реагирование на чрезвычайные ситуации, вызванные аварийными разливами нефти и нефтепродуктов, мониторинг и оценку состояния морской среды и источников ее загрязнения, оценку состояния прибрежной зоны и источников ее загрязнения, создание эффективной информационной системы и базы данных о состоянии морской и прибрежной окружающей среды [148]. В ноябре 1996 г. был одобрен специальный программный документ, описывающий механизм выполнения пяти основных компонентов Плана действий, предусматривающих развитие систем мониторинга и предотвращения загрязнения среды, создание координирующих

центров, баз данных и информационных сетей, согласование вопросов политики, стратегии и нормативно-правовых основ сотрудничества.

Вопросы сохранения окружающей среды, наряду с рациональным природопользованием и устойчивым развитием, являются основными в работе Арктического совета (the Arctic Council), в который входят восемь стран (Канада, Дания, Финляндия, Исландия, Норвегия, Российская Федерация, Швеция и США), а еще 13 имеют статус наблюдателей [149]. Организацией разрабатываются международные соглашения, унифицируется правовая база стран-участниц Совета в области мониторинга окружающей среды, предотвращения и ликвидации последствий техногенных катастроф. В 2013 г. страны участницы Арктического совета подписали Соглашение о сотрудничестве в области обеспечения готовности и реагирования на загрязнение морской среды нефтью в Арктике, которое содержит нормы, регулирующие экологический мониторинг разливов нефти.

Соблюдение строгих экологических стандартов является одним из основных аргументов противников строительства подводного трубопровода «Северный поток-2» по дну Балтийского моря. В данном случае, налицо использование экологических аспектов в качестве инструмента недобросовестной конкуренции на мировом рынке углеводородов и влияния на внешнюю политику целых государств (Дания, Германия). Исходя из наметившихся тенденций, следует ожидать ужесточения международного законодательства в области охраны окружающей среды, в т.ч. требований к организации постоянного экологического мониторинга объектов морской инфраструктуры.

Удалённость районов, где уже эксплуатируются или планируется разработка морских месторождений, сложные климатические условия, отсутствие необходимой инфраструктуры, существенно затрудняют ведение хозяйственной деятельности. Одним из подходов, позволяющих повысить эффективность производства, является максимально возможная автоматизация. Примером реализации такого перспективного подхода является подводный добычный комплекс Киринского месторождения, все объекты которого расположены на дне

и функционируют без участия человека, а привычная добывающая платформа отсутствует.

Разведка, обустройство и эксплуатация морских месторождений, сопровождающиеся строительством крупных объектов инфраструктуры (добывающих платформ, нефтяных и газовых терминалов, трубопроводов), представляют серьезную опасность для окружающей среды, необходимость обеспечения сохранения которой отражены в программах развития Дальнего Востока, Северного морского пути, рассматривается на международном уровне в рамках Арктического совета. Контроль за текущим состоянием, оценка динамики параметров окружающей среды, оперативное реагирование на чрезвычайные ситуации на объектах инфраструктуры, расположенных на шельфе арктических и дальневосточных морей, должны осуществляться системами мониторинга акватории (СМА).

Существуют технические решения и серийно выпускаемые устройства и сенсоры, которые могут быть использованы в качестве элементов СМА для организации передачи данных, для мониторинга водной среды in situ и т.д. В то же время, специфика арктических районов размещения систем мониторинга предъявляет особые функциональные требования: автономность в течение продолжительного ледового периода, отказоустойчивость и/или резервирование элементов системы, минимальное время реагирования на возникновение внештатных ситуаций и возможность оперативного контроля ликвидации их последствий. Указанные требования накладывают ограничения на возможность применения существующих технических средств, предъявляют дополнительные требования к их модернизации или разработке принципиально новых устройств.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что разработка оптимальной системы морского мониторинга в физико-географических, климатических и гидролого-акустических условиях арктических морей – «Система мониторинга арктических морей» (СМА) является актуальной задачей.

Степень проработанности темы исследования

Вопросами разработки технических средств морского мониторинга занимаются как российские, так и зарубежные исследователи и научные организации. Из исследователей необходимо отметить Р. Дж. Урика, М. Стоянович, Д. Помпили, К. Кебкала. Из отечественных организаций лидерами в данном направлении являются АО «Концерн «Океанприбор», ОАО «Концерн «Моринформсистема АГАТ», Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, Институт проблем морских технологий ДВО РАН. Основы распространения звука в случайно-неоднородных подводных волноводах рассмотрены еще в работах У. Манка и К. Гаррета. У российских ученых влияния неоднородностей поля скорости звука на распространение звука рассматривается в работах Вадова Р. А., Гостева В.С. (Акустический институт им. акад. Н И. Андреева), Вировляндского А. Л. (Институт прикладной физики РАН), Моргунова Ю. Н. (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева) и др.

Вместе с тем, несмотря на накопленный на данный момент научно-технический задел в исследуемой области существуют значительный спектр частных задач, связанных как с теоретическими, и так техническими аспектами создания систем морского мониторинга, требующих дополнительных исследований и разрешения.

Цель работы – разработка и обоснование оптимальных технических решений для системы морского мониторинга в физико-географических, климатических и гидролого-акустических условиях арктических морей.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- Анализ современного уровня развития технических систем морского мониторинга применительно к условиям ледовитых морей;
- Обоснование оптимальной системы морского мониторинга в физико-географических, климатических и гидролого-акустических условиях арктических морей;

- Исследование влияния стохастичности поля скорости звука на пространственно-энергетическую структуру акустического поля для оптимизации расположения узлов сети приема-передачи данных;
- Разработка комплекса технических средств для оптимального приема-передачи гидроакустических сигналов с учетом гидрофизических характеристик арктических морей;
- Экспериментальное исследование и верификация разработанной оптимальной ретрансляционной сети (системы).

Объектом исследования являются технические средства мониторинга морских акваторий различного назначения.

Предмет исследования – особенности применения технических средств мониторинга в физико-географических, климатических и гидролого-акустических условиях арктических морей.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

1. Впервые предложен метод оптимизации структурно-функциональной системы мониторинга акваторий арктических морей, с учетом характеристик подводных волноводов, экономических параметров, энергетических и технических ограничений;

2. Впервые предложен экспериментально-теоретический метод определения количественных показателей пространственно-энергетической структуры акустических полей с учетом стохастичности поля скорости звука;

3. Впервые показаны ограничения возможностей использования комплекса технических средств системы мониторинга морских акваторий, обоснованы облик модуля ретрансляционной сети и технические параметры устройства приема/передачи информации в системе гидроакустической связи.

Теоретическая значимость работы состоит в результатах обоснования оптимальной структурно-функциональной системы мониторинга акваторий арктических морей, в создании расчетных моделей, программных средств и электронной базы данных о параметрах пространственно-энергетической структуры акустических полей с учетом стохастичности поля скорости звука, в

результатах экспериментальных исследований подледного канала гидроакустической связи.

Практическая значимость работы определяется возможностью реализации предложенной структурно-функциональной модели системы мониторинга, модуля ретрансляционной сети и устройства приема/передачи информации по гидроакустическому каналу в районах действующих и перспективных комплексов по добыче углеводородов в шельфовой зоне, на основе имеющихся отечественных технических средств с минимальной модернизацией. Разработанные методы, модели и технические средства могут быть применены для исследований и разработок в смежных областях акустики океана.

Методы исследования

В работе использовались методы математического моделирования распространения акустических сигналов в подводных стохастических волноводах с учетом неоднородностей тонкой структуры поля скорости звука. Проведены экспериментальные исследования устойчивости гидроакустических каналов передачи информации, работоспособности серийных и новых технических устройств для системы морского мониторинга. В экспериментах использовалось оборудование, соответствующее метрологическим требованиям, установленным в Российской Федерации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурно-функциональная модель системы мониторинга акваторий различного назначения для физико-географических, климатических и гидролого-акустических условий арктических морей;

2. Численная модель и электронная база данных пространственно-энергетической структуры акустических полей в стохастических подводных волноводах в лучевом приближении с заданной дискретностью по дальности и глубине;

3. Экспериментально-теоретический метод оптимизации ретрансляционной линии гидроакустической связи, учитывающий характеристики волновода, энергопотребление, технические и экономические параметры узлов сети.

4. Комплекс технических средств, включающий модуль ретрансляционной сети и устройство приема гидроакустических сигналов в узлах системы мониторинга арктических морей.

Личный вклад автора состоит:

- в разработке и обосновании структурно-функциональной модели системы мониторинга акваторий для физико-географических, климатических условий арктических и дальневосточных морей;
- в моделировании гидроакустических полей с учетом стохастичности поля скорости звука для исследования их энергетической и пространственно-временной структуры;
- участии в разработке, проектировании и натурных испытаниях комплекса технических средства системы мониторинга акваторий, включающего модуль ретрансляционной линии связи и устройство приема гидроакустических сигналов в узле подводной навигации АНПА;
- разработке методики учета энергопотребления, технических параметров и стоимость узлов сети для оптимизации расположения узлов сети ретрансляционной линии связи;
- проведении лабораторных и натурных экспериментов с модулем ретрансляционной линии связи.

Достоверность научных результатов подтверждается корректностью использованных методов математического моделирования распространения акустических сигналов в подводных волноводах, сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными, значительным объемом проведенных модельных и экспериментальных исследований, апробацией разработанных технических решений на практике. Экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования, соответствующего метрологическим требованиям, установленным в Российской Федерации.

Апробация результатов работы.

Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

— Международная научная конференция Pacific Rim Underwater Acoustic Conference (Владивосток, 2015).

— Международная мультидисциплинарная конференция Far East Con (Владивосток, 2018).

— Международная мультидисциплинарная конференция Far East Con (Владивосток, 2019).

— Международная научная конференция 26th International Conference of Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON-2019) (Владивосток, 2019).

— Расширенный научный семинар Департамента электроники, телекоммуникации и приборостроения Политехнического института ДВФУ (Владивосток, 2021).

Результаты исследования использовались при выполнении следующих НИР и НИОКР:

— Проект по Договору №2951ГС1/45273 (2019–2020 гг.) в рамках программы СТАРТ Фонда содействия инновациям на тему: «Цифровой гидроакустический модем - ключевое звено для систем подводной связи и навигации в области освоения Мирового Океана».

— Грант в рамках Договора пожертвования ПАО «НК «Роснефть»» №100019/01005Д от 30.04.2019 г. Тема работы: «Учет влияния климатических особенностей арктических и дальневосточных морей на автономность измерительного модуля системы подводного экологического мониторинга».

— Договор от 06.04.2015 г. № 100015/01474Д с ПАО «НК «Роснефть», НИР по теме: «Разработка обоснования создания и технических требований к проектированию автономного подводного контроль-измерительного комплекса для проведения контрольных замеров состояния окружающей среды в районе устьев разведочных скважин на шельфе арктических морей при глубинах моря от 20 до 100 м».

— Проект по Соглашению №14.578.21.0093 (2014-2016 гг.) в рамках ФЦПИР на тему: «Исследование и разработка высокопараллельных программно-

алгоритмических средств и методов моделирования и их реализация для высокопроизводительных программно-аппаратных платформ».

Принципиальная схема устройства приема в гидроакустической связи для подводной навигации, разработанная в рамках проекта «Цифровой гидроакустический модем - ключевое звено для систем подводной связи и навигации в области освоения Мирового Океана», выполненного при поддержке Фонда содействия инновациям по программе «СТАРТ», используется в гидроакустических модемах АТМ-28/АТМ-28OEM и АТМ-12OEM ООО "Аквателеком".

Программа для ЭВМ «Моделирование распространения звука в двумерно-неоднородных подводных волноводах в лучевом приближении» используется в учебном процессе при подготовке магистров по учебной программе «Гидроакустика», направления 12.04.01 Приборостроение.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, включая 2 стати в журналах из перечня ВАК, 9 в изданиях, индексируемых БД Scopus и Web of Science, 2 патента на изобретения, 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем – 155 с., 28 рисунков, 11 таблиц, 2 приложения. Список литературы насчитывает 176 наименований.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОРСКОГО МОНИТОРИНГА

Назначение экологического мониторинга заключается в наблюдении, контроле и прогнозировании дальнейшего развития экосистемы. Важной задачей мониторинга является отслеживание динамики изменения контролируемых показателей окружающей среды, для чего требуются периодические наблюдения. Чем выше частота наблюдений, тем точнее пространственно-временное распределение контролируемых показателей и прогноз будущих изменений. На практике выбор того или иного режима наблюдений является результатом компромисса между стремлением к достоверности результатов наблюдений, их точности, необходимостью оперативного их получения, а также ограниченностью доступных финансовых ресурсов.

Проведение мониторинга состояния окружающей среды на шельфе арктических и дальневосточных морей является сложной задачей, которая сопряжена, как с особенностями водной среды, так и климатическими условиями выбранного района. Наиболее достоверные сведения можно получить по результатам инструментальных измерении непосредственно в ходе полевых экспедиций и последующих лабораторных исследований отобранных проб различных компонентов природной среды. Наличие современного прецизионного оборудования и многочисленных методик позволяет обеспечить измерение широкого спектра вредных веществ в воде, для которых установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) [1]. Удалённость большинства районов, где разрабатываются или планируется разработка морских месторождений, неблагоприятные климатические условия, отсутствие необходимой инфраструктуры, создают проблемы организационного характера, а также сильно удорожают стоимость экспедиций. Поэтому перспективным является внедрение дистанционных методов наблюдений, например, с использованием автономных средств мониторинга.

В настоящее время, разработкой автоматизированных систем мониторинга акваторий занимаются во многих странах мира. Необходимо отметить, что подобные системы проектируются в основном для целей постоянного измерения геоэкологических и метеорологических параметров морской среды, сейсмологических исследований, а также обеспечения безопасности. В качестве примера гражданского использования можно привести системы на основе буев, разрабатываемых компанией Fugro OCEANOR [150], систему экологического мониторинга морской среды Кувейта [144], а также систему у юго-восточного побережья Испании в лагуне Мар Менор [75,129]. Конечными потребителями информации, получаемой от подобных систем, выступают правительственные организации по охране окружающей среды, нефте- и газодобывающие компании, агентства по охране водных ресурсов, управлению транспортом и предотвращению чрезвычайных ситуаций; рыболовецкие компании. Информация по охранным системам менее доступна, но направление исследований и решаемые ими задачи можно оценить [81].

1.1 Технические средства мониторинга

В качестве носителей измерительной аппаратуры в системах мониторинга акваторий могут использоваться различные технические средства: заякоренные [127,144,150] или дрейфующие буи, например, проекта Argo [151], донные [76,95,130,136] или профилирующие станции [55,152], а также автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) также могут быть использованы в мониторинговых задачах, но они управляются с судна-носителя оператором с использованием кабеля связи, т.е. не могут быть отнесены к полностью автоматизированным средствам. Поэтому ТНПА в данной работе не рассматриваются.

Заякоренные буи

Широкое распространение в качестве основных элементов систем мониторинга акваторий получили заякоренные буи, например, Seawatch разработки нидерландской компания Fugro [150]. Океанографические буи позволяют осуществлять контроль метеорологических параметров воздушной среды, направление и уровень волнения, температура воды, уровень моря, направление и скорость течения, солёность, кислотность, содержание растворённого кислорода, прозрачность. Данные с буев в режиме реального времени поступают в центр обработки, где осуществляется интеграция информации от различных элементов системы, контроль качества данных, анализ, обработка и хранение, численное моделирование и прогнозирование состояния среды. Данные передаются по радиоканалу или с использованием систем спутниковой связи. В центре обработки также интегрируются данные спутникового дистанционного зондирования Земли, метеорологическая информация и прогнозы, наблюдения с исследовательских судов и прибрежных станций.

Системы мониторинга с использование буев SEAWATCH позволяют получать огромный объем данных о параметрах морей в прибрежных зонах по всему миру от Арктики до тропиков (Эквадор, Европа, Греция, Индия, Индонезия, Норвегия, Перу, Испания, Таиланд и Вьетнам). В каждом случае системы мониторинга различаются по набору измеряемых параметров окружающей среды и конфигурации. В Эквадоре система мониторинга предназначена для исследования явления Эль-Ниньо для предотвращения и смягчения последствий стихийных бедствий. Система включает три гидрометеорологических буя, заякоренные на глубинах, достигающих 5000 метров, обеспечивающих за счет системы спутниковой связи в режиме реального времени получение данных о метеорологии, уровне волн, температуре, солености.

В Греции система мониторинга получила название «Посейдон». Сеть состоит из 15-20 буев различного размера. Некоторые буи передают данные в режиме реального времени на веб-службы для пользователей Интернета. Помимо буев

SEAWATCH в систему «Посейдон» входит глубоководная платформа (1000 м), на которой базируется блок обнаружения цунами, различные датчики, в т.ч. концентрации CO_2, растворенного кислорода, метана, солености, температура, pH, мутности. Данные с платформы передаются по гидроакустическому каналу на поверхностный буй.

Система мониторинга в Индии включает в себя 15 океанографических буев SEAWATCH, размещенных как в прибрежной зона, так и в глубоком море (более 4000 м). Буи производят измерения скорости и направления ветра, температуры и давления воздуха, высоты и направления волн, проводимости (солености) и температуры воды, концентрации растворенного кислорода, профиля температуры воды, мутности, хлорофилла, углеводородов и интенсивности освещения. Основными задачами для этой системы является сбор гидрометеорологических параметров в индийских водах, морской экологический мониторинг.

Система SEAWATCH Норвегия является частью проекта «SEAWATCH Европы», фокусируется на разработке новых технологий, специальных приложений и датчиков. Один из буев специально зарезервирован для тестирования новых технологий. Экологические данные, статистика и специальные буи из проектов «SEAWATCH Европы» и «SEAWATCH Норвегия» предназначены для государственного контроля за загрязнением морских акваторий и оценки состояния эвтрофикации в южной части Норвегии.

В качестве примера использования заякоренных буёв можно также привести систему мониторинга Кувейта [144]. Система включает несколько заякоренных буёв, установленных вдоль побережья и выполняющих регистрацию скорости и направления ветра, температуры воздуха, относительной влажности, атмосферного давление, наличия нефтепродуктов в поверхностном слое воды, концентрации растворённого кислорода, скорости и направления течения, содержания хлорофилла, температуры и солёности воды, кислотности, вертикального перемещения, прозрачности и цветения воды, содержания тяжёлых металлов, концентрации нитратов. Модуль регистрации и обработки данных буя собирает данные измерений и подготавливает их к передаче, выполняя при необходимости

простейшую обработку (усреднение, нормализация, фильтрация, сжатие). Передача данных производится по каналу сотовой связи, для энергообеспечения буев используются солнечные батареи.

Система мониторинга в заливе Мар Менор (Испания) состоит из узлов трёх типов: измерительные, передающие, координирующие [75,129]. Измерительные узлы, в зависимости от установленных датчиков, делятся на 4 типа:

- уровенный узел (регистрирует температуру и уровень моря);
- узел измерения течений;
- комплексный измерительный узел (регистрирует уровень моря, скорость и направление течения, солёность, распределение температуры по глубине);
- гидрохимический узел (измеряет уровень моря, температуру, солёность, прозрачность, концентрацию растворённого кислорода, содержание хлорофилла и нитратов).

Связь между узлами осуществляется по беспроводному каналу ZigBee (стандарт беспроводных сетей IEEE 802.15.4). Комплексные измерительные узлы собирают данные от собственных датчиков и соседних узлов, затем полученная информация ретранслируется по каналу сотовой связи в наземный центр.

Донные станции

Области применения систем мониторинга с использованием донных станций - сейсмология [92,136], экология и океанология [83,98,120]. На базе донных станций создаются целые измерительные комплексы (подводные обсерватории), которые могут быть оснащены спектром измерительной аппаратуры [76,84], соединенные кабелями с центрами сбора и обработки информации, при этом места размещения могут быть удалены от берега на сотни километров [105]. В качестве примеров, где используются кабельные сети передачи данных, можно привести Гавайскую морскую сейсмологическую обсерваторию HUGO-2 (США) [92], японский сейсмологический комплекс в районе Южно-Курильского желоба [105], программу создания и развития донных кабельных обсерваторий в Японии

POSEIDON [124]. Исключение составляют донные станции, создаваемые для выполнения краткосрочных задач на относительно небольших площадях.

В качестве примера использования донных станция в экологических целях можно привести проект, реализуемый в заливе Патры, Греция [120]. Обсерватория размещена на глубине 42 м и предназначена для непрерывных и длительных измерений концентрации метана в морской воде вблизи дна. Измерительный модуль содержит набор датчиков, контролируемых и управляемых с помощью системы сбора и управления, которая способна выполнять первичную проверку качества полученных данных. Используются датчики метана, H_2S- датчик, температуры, солености и давления. Донная обсерватория соединена с наземным пунктом наблюдения кабелем.

Другая экологическая подводная обсерватория (PLUTO - Panama LJL Underwater Tropical Observatory) была размещена на глубине в 20 м, в 1,5 км от тихоокеанского побережья Панамы [98]. Назначением обсерватории являются океанологические исследования, оценка влияния изменений параметров морской среды на развитие микроорганизмов. Используемое оборудование - датчики солености, температуры, давления, скорости и направление течения (Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP), хлорофилла, мутности, кислорода, интенсивности проникающего на дно света.

Система мониторинга акваторий на основе метеорологических буев и донных станций, связанных между собой кабелем, разрабатывается на Тайване [83]. Назначение системы – оценка метеорологических и сейсмических условий района для проектирования и эксплуатации морских ветряных электростанций, исследование влияния шумов, возникающих при работе станций, на поведение дельфинов. Данные измерений передаются по радиоканалу на пункт наблюдения. Метеорологический буй используется для измерения приливов, волнения, течения, температуры, солености и плотности морской воды. Также использованы ADCP, гидрофон для записи гидроакустических шумов и сейсмограф.

Профилирующие станции

Этот тип технических средств мониторинга имеет возможность перемещения по глубине, что позволяет производить вертикальное профилирование водной толщи с измерением контролируемых показателей. К ним могут быть отнесены дрейфующие буи Argo [151], заякоренные стационарные буи [55,117,152].

Широкое распространение получили буи Argo международной программы по собору океанологических данных [151]. Их преимуществом является автономность, возможность выполнять один цикл измерений до глубины 2000 м в течение 10 дней при продолжительности работы 4-5 лет. По состоянию на февраль 2020 г. число действующих буев составляло 3989, дрейфующих в большинстве регионов, за исключением Северного Ледовитого океана.

В России к подобным устройствам относится профилограф «Аквазонд» [55] и позиционная автономная гидрофизическая измерительная станция (ПАГИС) [152]. В обоих случаях это стационарные системы, которые перемещаются на тросе с использованием электродвигателя, что существенно сокращает их автономность по сравнению с буями Argo. Профилограф «Аквазонд» разработан Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН для мониторинга акваторий, охраны морской среды и научных исследований [55]. Первый прототип имел ADCP, зонд электропроводности, температуры и давления, датчик концентрации растворенного кислорода, флуориметр и турбидиметр. Профилограф по заданной программе мог передвигаться по тросу, натянутому вертикально между подповерхностной плавучестью и донным якорем. В дальнейшем появились индуктивные модемы для передачи данных на подповерхностный буй, с которого они передаются по радиоканалу в береговой приемный пункт.

В качестве дальнейшего развития была разработана концепция длительного (до одного года) автоматического телеуправляемого мониторинга водной среды до глубины 600 м в режиме реального времени [55]. Дальность передачи данных по радиоканалу до 12 км. Расчетная общая протяженность хода при горизонтальном течении 0,5 м/с составляет 200 км при емкости источника питания 168 А·ч.

Другим российским разработчиком заякоренных профилирующих станций является Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН). Позиционная автономная гидрофизическая измерительная станция (ПАГИС) предназначена для определения параметров (в соответствии с заданной комплектацией датчиков) водной среды на глубинах до 200 м и передачи полученных результатов по радио (в т.ч. с использованием систем спутниковой связи Globalstar, «Гонец») или гидроакустическому каналу связи [152]. Опционально возможно оснащение датчиками кислорода, радиометрического анализа (гаммаспектрометр), скорости течения, температуры, солёности, волнения, содержания нефтепродуктов. Ресурс батарей ПАГИС позволяет проведение 200 циклов на 200 метров, общее время нахождения в режиме ожидания 240 суток.

Автономные необитаемые подводные аппараты

К данному обширному классу технических средств относятся подводные аппараты, оснащенные источником энергии, бортовой системой управления, движительно-рулевой системой и средствами для ввода программы-задания и считывания результатов измерений. Бортовая система управления автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА, в англоязычной литературе - autonomous underwater vehicle (AUV)) выполняет введенную программу-задание в отличие от ТНПА, которые управляются оператором с использованием кабеля связи.

АНПА получили широкое применение в обследовании дна и подводных объектов, гидрографии, экологии, при решении специальных задач в военной сфере. Исходя из технических характеристик, в настоящее время принято разделять АНПА на четыре класса (таблица 1).

Таблица 1 - Типы АНПА

Типы АНПА	**Основные характеристики**	**Представители**
Малогабаритные АНПА	Вес в воздухе - до 60 кг; Макс/ глубина - до 200 м; Макс. скорость - 3-5 м/с; Время работы - до 24 час; Пробег - до 100 км. Для работы используются катера, небольшие суда.	REMUS-100 (HYDROID, США), GAVIA-200 (Hafmynd, Исландия), Iver-2 (OceanServer , США), МАРК (ИПМТ, ДВФУ, Россия)
Легкие АНПА (вес до 200 кг)	Вес в воздухе - до 200 кг; Макс. глубина - до 3000 м; Макс. скорость - 2-5 м/с Время работы - до 36 час; Пробег - до 150 км. Для работы используются средние суда (300-500 тонн).	REMUS-600 (HYDROID, США), GAVIA-600 (Hafmynd, Исландия), ММТ-3000 (ИПМТ, Россия).
Средние АНПА (вес до 1500 кг)	Вес в воздухе - до 1500 кг; Макс. глубина - до 6000 м; Макс. скорость - 1-4 м/с Время работы - до 48 час; Пробег - до 200 км; Для работы используются большие и средние суда (800 тонн).	HUGIN (Kongsberg, Норвегия), REMUS-6000 (HYDROID, США), МТ-серия (ИПМТ, Россия).
Тяжелые АНПА (более 1500 кг)	Вес в воздухе - более 1500 кг; Макс. глубина - до предельных; Макс. скорость - 1-3 м/с; Время работы - неск. суток; Пробег - до 500 км. Для работы используются большие суда.	Имеются единичные экземпляры. AUTOSUB 6000 (National Oceanogr. Centre, United Kingdom) [95], Urashima (Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan), Клавесин (ИПМТ, Россия).

Наибольшее распространение получили малогабаритные (переносные) АНПА. К ним относится REMUS100 [94,122,153], GAVIA-200 [154], Bluefin 9 [155], MARES [89], Taipan 300 [88], Iver2 [74,80], МАРК [18].

В качестве примера малогабаритных АНПА можно рассматривать аппарат REMUS100 (Remote Environmental Measuring UnitS), разработки Вудсхолского океанографическом институте, выпускаемый фирмой HYDROID (США) [122,153]. Компания начала производство АНПА с 2001 г. и выпустила уже более 500 аппаратов серии REMUS. Гибкость архитектуры REMUS100 позволяет его использовать в различных сферах: научных исследованиях (рыболовство и

аквакультура, изменения климата, оценка экологического состояния водной среды, морская археология), обследования подводных объектов (трубопроводов, в т.ч. с целью поиска утечек, скважин, затопленных судов, поиск), картирование морского дна.

Отдельно стоит отметить использование возможностей REMUS100 в военных целях [93]. На их основе в США была разработан аппарат Мк 18 Mod. 1, предназначенный для поиска мин, гидрографических обследований, разведки. Эти переносные аппараты широко используются не только в ВМС США, но и во флотах Великобритании, Германии, Италии, Нидерландов, Бельгии, Норвегии, Швеции, Финляндии, Эстонии, Сингапура, Австралии и Новой Зеландии [7].

АНПА REMUS100 имеет вес от 36 кг и длину от 170 см (в зависимости от конфигурации дополнительного оборудования), диаметр 19 см, максимальная рабочая глубина 100 метров. Скорость изменяется в диапазоне 0–2,6 м/с. Максимальное время непрерывной работы – от 12 часов при скорости 1,5 м/с в зависимости от используемой полезной нагрузки. Навигация АНПА осуществляется с использованием гидроакустической навигационной системы с длинной базой, а также бортовой системы счисления пути на базе доплеровского лага и компаса. Возможно использование инерциальной навигационной системы и GPS (устанавливаются в качестве дополнительного оборудования). В комплект также входят 2 гидроакустических маяка-ответчика 20-30 кГц. В состав основного оборудования аппарата входят датчики электропроводности и давления, в качестве дополнительного оборудования возможно использование датчиков растворенного кислорода, мутности, флюорометра, радио и гидроакустических систем связи, систем видео и акустического зрения, гидролокатора бокового обзора (ГБО), например, двухчастотного гидролокатора Klein 3500 455/900 кГц [153].

В качестве примера можно также привести российский малогабаритный АНПА МАРК, разработанный в 2011 году совместно Институтом проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН) и Дальневосточным федеральным университетом ДВФУ [16]. Технические характеристики аппарата: вес порядка 50 кг, диаметр 200 мм, длина 1800 мм,

предельная рабочая глубина составляет 200 м, максимальная скорость движения равна 2 м/с и продолжительность непрерывной работы - 10 часов. К его достоинствам можно отнести манёвренность за счет развитого движительного комплекса, что позволяет выполнять работы вблизи дна, а также возможность работы в составе группы. Для обеспечения работы в составе группы была разработана система программного управления и синхронная гидроакустическая навигационная система с синтезированной длинной базой, использующая один навигационный маяк, буксируемый автономным необитаемым водным аппаратом [42].

К легким АНПА относятся REMUS-600 (MK18 Mod 2 – версия для ВМС США) [138,153], GAVIA-600 [154], ММТ-3000 [156]. Предназначены для выполнения обследований на глубинах до 3 000 м, имеют повышенные прочностные характеристики и, как следствие, большие габариты и вес. Области применения: съемка рельефа дна и исследование его структуры для прокладки трубопроводов, кабелей, обследование подводной инфраструктуры, оценка запасов гидробионтов, экологические исследования, поисково-спасательные операции [156].

АНПА среднего и тяжелого класса немногочисленны и рассчитаны для проведения глубоководных работ (тяжелого класса - AUTOSUB 6000 [97], Клавесин [156], Urashima [157], среднего - HUGIN [102,158], REMUS-6000 [153], аппараты МТ-серии разработки ИПМТ ДВО РАН [156]).

В качестве примера рассмотрим АНПА серии HUGIN, разработанные при участии нескольких государственных, научно-исследовательских и коммерческих организаций и выпускаемые фирмой Kongsberg Maritime (Норвегия) [102,158]. Выпускаются три типа аппаратов - HUGIN 1000, HUGIN 3000 и HUGIN 4500, предназначенных для работы на глубинах до 1000, 3000 и 4500 метров соответственно. Основными областями использования аппарата являются: высокоточное картографирование дна, геологические и геофизические исследования, обслуживание нефтегазовых коммуникаций и экологический мониторинг, поиск и обследование затонувших объектов, а также противоминные

операции. Использование современных аккумуляторных батарей позволяет работать автономно в течение до 100 часов при скорости 4 узла. Координаты и угловая ориентация аппарата вычисляются на основе показаний линейных и угловых датчиков ускорений бортовой инерциальной навигационной системы и доплеровского лага, а также данных комбинированной гидроакустической навигационной системы (HiPAP - High Precision Acoustic Positioning system) и GPS/DGPS на поверхности [158].

В состав измерительного и поискового оборудования могут входить датчики температуры, электропроводности и давления (CTD - Conductivity, Temperature, Depth), гидролокатор бокового обзора, многолучевой эхолот, донный профилограф, ADCP, датчик измерения концентрации метана, а также всевозможные датчики для выполнения гидрологических, биологических и экологических исследований, исходя из решаемых задач [158].

Широкий спектр используемой полезной нагрузки (фото-видео камер, многолучевых эхолотов, акустических донных профилографов, гидролокаторов, различных датчиков для измерения параметров водной среды) позволяет использовать АНПА для решения многих задач экологического мониторинга:

- картирование и визуальный осмотр подводных объектов;
- обнаружение утечек нефти и газа на трубопроводах и оборудовании для обустройства скважин [115];
- измерение концентраций вредных веществ и взвешенных твердых частиц [82];
- оценка состояния гидробионтов (видовой состав, численность, состояние) [125].

Возможность проведения непрерывной съемки параметров окружающей среды позволяет с помощью АНПА решать задачу обнаружения источника загрязнения по расходящемуся от него шлейфу [94,116,128]. Одну из первых попыток предпринял Вудсхолский океанографический институт с использованием аппарата REMUS. Для моделирования загрязнения использовался родаминовый краситель, концентрация которого определялась флюорометром, также использовался ADCP [94].

Аналогичный эксперимент описан в [123], где для локализации источника шлейфа использованы одновременно три АНПА Ranger, оснащенных датчиками проводимости, температуры и глубины, нитратов/нитритов, pH и хлорофилла. В работе также описано исследование фронта солености в устье реки Нью-Порт в Северной Каролине с использованием уже четырех аналогичных аппаратов.

Положительный опыт использования АНПА в экологических задачах есть и в России [37]. Так в июне 2017 года ИПМТ ДВО РАН выполнял исследования по оценке экологического состояния в бухте Золотой Рог (г. Владивосток). Целью работ являлось получение исходных данных для построения трёхмерной картины распределения физических и гидрохимических параметров водной среды в бухте вблизи места впадения реки Объяснения, являющейся одним из основных источников загрязнения данной акватории. Для получения исходных данных АНПА выполнил несколько параллельных разрезов (трансект) поперек бухты. Оценки состояния бухты проводилась на основе анализа параметров водной среды, измеренных вдоль траектории движения АНПА и сопряженных с навигационными данными о его движении. Аппарат обеспечил измерение и запись таких параметров водной среды, как концентрация растворенных органических веществ (CDOM) и хлорофилла, проводимость, температура и мутность воды. Сопутствующая навигационная информация включала координаты, курс, крен, дифферент, глубину и скорость движения АНПА.

1.2 Подводные сети передачи данных

Необходимой компонентой систем мониторинга является канал передачи данных, обеспечивающие информационный обмен между отдельными элементами системы доставку результатов измерений конечному потребителю информации. Как уже отмечалось выше, это могут быть как беспроводные, так и кабельные сети передачи данных. При использовании последних существуют определенные трудности применения:

- для мониторинга значительных районов потребуется размещение многих километров подводных кабелей;
- существует опасность повреждения донными орудиями промышленного рыболовства;
- при организации кабельных сетей в районах с отсутствием береговой инфраструктуры требуются специальные технические решения для обеспечения вывода кабеля на берег.

Разработка, внедрение и развертывание беспроводных сетей передачи данных для морских условий также имеют свою специфику и сопряжены с решением дополнительных технических задач, по сравнению с используемыми на суше, в т.ч. [103]:

- морская среда агрессивна (влага, коррозия, проблема биообрастания), поэтому требуется более высокий уровень защиты устройства;
- необходимо учитывать движение узлов сети, вызванное приливами, волнами, судами и т.д.;
- высокое энергопотребление, обусловленное, как правило, удаленностью от берега и существующей инфраструктуры, а также дополнительным ослаблением сигнала за счет волнения моря;
- стоимость морского оборудования значительно выше, чем для наземного применения;
- существуют дополнительные проблемы развертывания и доступа к узлам сети, необходимость в плавучести, швартовых и подъемных устройствах, возможные акты вандализма.

В зависимости от решаемых задач и элементов, входящих в систему мониторинга, беспроводные сети передачи данных могут быть организованы с использованием различных стандартов радиосвязи для воздушного пространства или гидроакустической связи для водной среды. Большинство рассмотренных в разделе 1.1 систем мониторинга используют радиосвязь (спутниковая связь - системы мониторинга на базе буев SEAWATCH [150], буи Argo [151], сотовая связь - системы мониторинга Кувейта GSM [144], Республики Корея [127], ZigBee -

система мониторинга в заливе Мар Менор [75,129]). Как правило, используются готовые серийно изготавливаемые образцы, которые интегрируются во влагозащищенные корпуса буев.

Применение радиосвязи в воде ограничено из-за сильного затухания, однако в последнее время появляются отдельные разработки предназначенные в основном для организации информационного обмена через границу раздела сред вода-воздух. Например, в [139] приведены новые конструкции радиоантенн, работающих в диапазонах 2 МГц, 50 МГц и 2,4 ГГц. Антенны возбуждают электромагнитные волны, которые способны распространятся вдоль границы раздела сред. Область применения – обмен данными, например, между АНПА и беспилотным летательным аппаратом.

Аналогичную задачу решают японские исследователи, которые, начиная с 2016 г., ведут работы по созданию системы навигации для АНПА Urashima в условиях Арктики [143]. Исследователи разрабатывают ретранслятор сигналов GPS для корректировки инерциальной системы АНПА, способный передавать их через лед в водную среду на глубину несколько десятков метров и работающий на частоте 10-100 кГц. Представленные результаты позволяют говорить о перспективности выбранного технического решения. Тем не менее, в обоих приведенных примерах глубина проникновения электромагнитных волн оценивается в единицы [139] или десятки метров [143], поэтому для организации информационного обмена с подводными объектами (АНПА, профилографы, донные станции) традиционно используется гидроакустическая связь.

Гидроакустические сети передачи данных нашли широкое применение в различных мониторинговых и поисковых задачах [72,103,104]:

– океанологические и метеорологические наблюдения, в т.ч. исследования изменений климата;

– экологический мониторинг состояния окружающей среды (химический, биологический, радиационный), в т.ч. определение качества воды «in situ», например, точные химические анализы антибиотиков, инсектицидов в морях, озерах, реках;

– разведка полезных ископаемых, обустройство подводных месторождений, определение маршрутов прокладки трубопроводов и кабелей;

– исследование и предотвращение стихийных бедствий (цунами, подводных землетрясений).

– задачи подводной навигации;

– обследование акваторий, поиск объектов, в т.ч. в военных целях (например, обнаружение мин).

Для обмена информацией в подводных сетях используются гидроакустические модемы – технические средства регистрации гидроакустических сигналов в реальном масштабе времени, состоящие из устройств цифровой обработки сигналов и технических средств приема и передачи сигналов. Регистрация подразумевает цифровую обработку гидроакустических сигналов, решающую задачи обнаружения и оценивания параметров сигнала при осуществлении информационного обмена по гидроакустическому каналу. Информационный обмен может включать в себя задачи обсервации, телеметрии и управления подводными объектами.

Основными разработчиками гидроакустических модемов являются зарубежные компании, такие, как Kongsberg Maritime (Норвегия) [159], Link Quest (США) [160], Sonardyne (Великобритания) [161], Teledyne Marine (США) [162], EvoLogics (Германия) [163]. Выпускаемые модели близки по своим характеристикам и имеют дальность действия до 10 км, частотный диапазон от 10-30 кГц. Отличия заключаются в использовании алгоритмов обработки сигналов.

Помимо уже описанных проблем создания и эксплуатации беспроводных сетей передачи данных в морских условиях, существуют специфические ограничения использования гидроакустических сетей передачи данных, обусловленные средой распространения звуковых волн [72,85]:

1. Потери при распространении, представляющие собой количественную оценку ослабления звука между точкой, находящейся на удалении 1 м от источника, и точкой приема. Представляют собой сумму потерь на расширение фронта волны (убывание уровня сигнала в зависимости от расстояния по

сферическому закону для глубокого моря, по цилиндрическому – для шельфовой зоны) и потерь из-за затухания, определяемых поглощением, рассеянием и утечкой звуковой энергии [69].

В общем случае частотная зависимость затухания может быть представлена выражением:

$$\alpha = 0{,}036 \cdot f^{3/2},$$

где α –коэффициент затухания, дБ/км; f –частота сигнала, кГц.

Общие потери при распространении задаются формулой [142]:

$$A(l,f) = (l/l_r)^k \, a(f)^{l-lr},$$

где f - частота сигнала, и l - расстояние передачи, принимаемое по отношению к расстоянию l_r. Показатель k равен 1 и 2 (для цилиндрических и сферических волн, соответственно).

2. Шумы $N(f)$. В общем случае делятся на шумы искусственного и естественного происхождения. Источниками шума являются волнение, судоходство, ветер, осадки, сейсмоактивность, а также биологический шум. Спектральная плотность шумов спадает приблизительно на 18 дБ/декаду. Если определить узкую полосу частот шириной Δf вокруг некоторой частоты f_0, то отношение сигнал-шум (SNR) в этой полосе может быть выражено как

$$SNR(l, f) = S_l(f) \,/\, A(l, f)\, N(f),$$

где $S_l(f)$ является спектральная плотность передаваемого сигнала [142].

На рис. 1. представлено влияние потерь на распространение и шумов на отношение сигнал-помеха в зависимости от частоты при заданной дальности. На рисунке видно, что высокочастотные сигналы быстро затухают на больших расстояниях и для каждой дальности существует оптимальная частота излучателя.

При этом доступная полоса пропускания уменьшается с увеличением расстояния. Проектирование крупномасштабной системы начинается с определения этой частоты и выделения для нее определенной полосы пропускания [103].

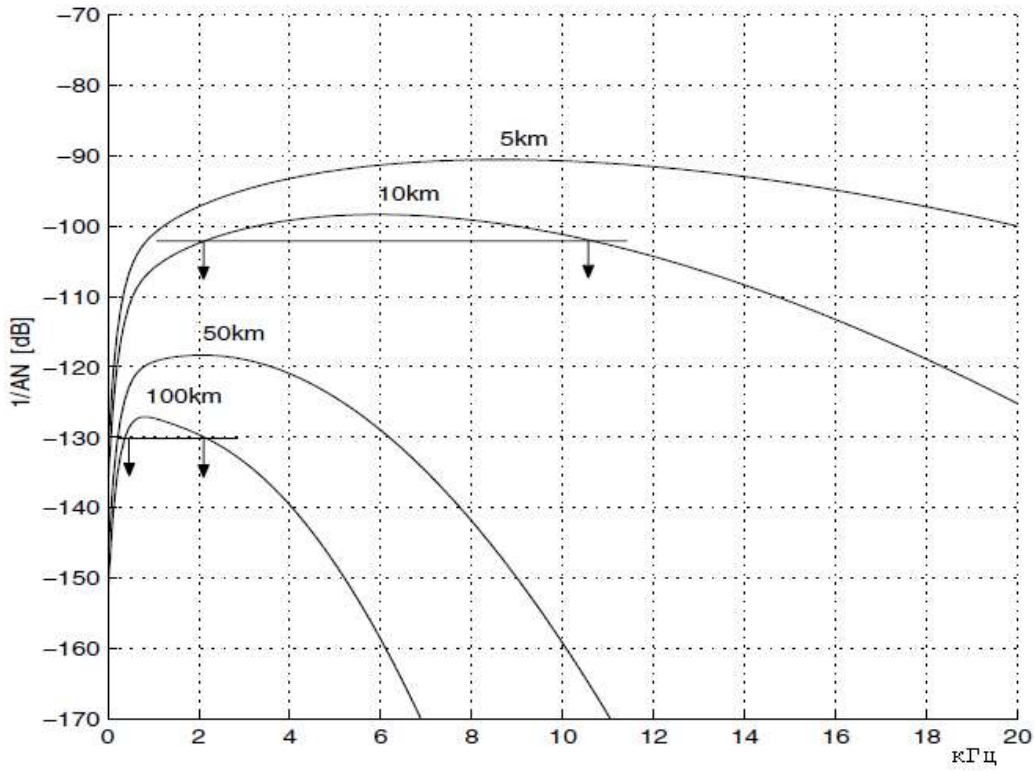


Рисунок 1 - Зависимость *1 / A*(*l, f*) *N*(*f*) от частоты для различной дальности

3. Эффект многолучевости, характеризующийся различными траекториями распространения звука на трассе за счет наличия неоднородностей полей гидрологических параметров, а также наличием границ раздела сред (воздух - вода, вода - донный грунт). Как следствие, на приемную антенну сигнал приходит в разное время, что вызывает межсимвольную интерференцию сигнала [72].

4. Временная задержка распространения звука в подводной среде на пять порядков больше, чем при передаче по радиоканалу в воздухе (0,67 с на 1 км трассы). В связи с этим требуется разработка более сложных и эффективных протоколов передачи данных, с учетом необходимости учета время пробега [72].

5. Высокая вероятность ошибок передачи из-за неоднородности среды распространения.

6. Значительное энергопотребление в режиме передачи, что особенно важно для организации автономных систем мониторинга. Выбор оптимальной частоты и дистанции между элементами, а также топологии сети передачи данных позволяет существенно повысить срок автономной работы. Для оценки эффективности могут использоваться энергозатраты на передачу одного бита информации в сети. Пример алгоритма расчета длительности работы батарей с учетом 4-х независимых параметров (расстояние между узлами сети, рабочей частоты, периода обновления данных и количества узлов сети в кластере) приведен в [110].

Топология сети является критически важным фактором для энергопотребления, емкости и надежности сети. На первый план при создании подводных сетей выступает надежность, чтобы из-за отказа одного из элементов не прекратилась работа всей сети передачи данных. Емкость подводного канала передачи ограничена, поэтому в топологии сети необходимо избежать эффекта «бутылочного горлышка», когда в определенном узле сходится большой объем информации с нескольких элементов.

В целом можно выделить следующие варианты построения гидроакустических сетей [72]:

1. Статическая двухмерная сеть. Область применения – экологический мониторинг и сейсмические наблюдения. Состоит из заякоренных статических элементов сети (буев, донных станций) связанных ГА-каналом связи с одной или несколькими подводными станциями, которые выполняют функцию передачу команд и настроек на стационарные элементы сети, а также сбор данных от них. Подводные станции обмениваются данными с поверхностной станцией, выполняющей функции межсредного шлюза (использует гидроакустические модемы в водной среде и средства радиосвязи или спутниковый канал связи для коммуникации с береговым постом или судном). При этом передача от элементов сети подводным станциям может происходить как напрямую, так и с помощью ретрансляторов, если прямая передача является энергетически неэффективной. В случае использования ретрансляторов сеть работает как сотовая сеть передачи данных на суше. Это

позволяет снизить энергозатраты и повысить емкость сети, но создает сложности в маршрутизации внутри сети.

2. Статическая трехмерная сеть. Используются при необходимости проведения мониторинга на различных глубинах. Область применения – сети наблюдения за акваторией, мониторинг океанических явлений (геохимических процессов, течений, загрязнения акваторий).

Вариантом реализации подобной сети может быть соединение датчиков с поверхностный станцией, при этом глубина заглубление самих датчиков может меняться. Недостатки решения: большое количество буев на поверхности мешает судоходству; они могут быть легко обнаружены и уничтожены (в случае их военного назначения). Также поверхностные буи подвержены погодным условиям и могут быть просто украдены. Альтернативой выступают профилирующие станции [55,117,152].

В данном случае в подводных станциях нет смысла, т.к. элементы сети меняют глубину. Т.е. они должны обмениваться данными с поверхностной станцией непосредственно или через ретрансляторы (такие же элементы сети). Таким образом, сетевые устройства должны согласовывать свои глубины таким образом, чтобы всегда существовал, по меньшей мере, один путь от каждого элемента сети до поверхностной станции [72].

3. Динамическая трехмерная сеть. Включает как заякоренные статические элементы (буи, донные станции), так и подвижные (профилирующие станции, АНПА). Для данной архитектуры построения сети актуальны:

- Адаптивная настройка сети. АНПА направляются в то место, где их присутствие наиболее необходимо. Например, плотность узлов измерительной сети может быть адаптивно увеличена в заданной области за счет АНПА, если требуется более высокая степень пространственного разрешения измеряемого параметра среды.
- Самоконфигурация сети. Контрольная процедура сети, которая автоматически определяет появление потери соединения в сети из-за неисправностей какого-либо элемента или ухудшения канала передачи, и требует

вмешательства АНПА. АНПА также могут использоваться для обслуживания оборудования сети или установки новых сенсоров. Могут использоваться как временные ретрансляторы для восстановления соединения.

1.3 Сенсорные системы подводных робототехнических комплексов для экологических измерений

Обзор существующих технических решений для мониторинга акваторий (раздел 1.1) показывает существенный прогресс в развитии методов и средств измерений параметров подводной среды. В настоящее время широко используются датчики температуры, солености, растворенного кислорода, PH, а также радиометры и флюориметры, которые выпускаются различными производителями серийно.

Вместе с тем технологии волоконно-оптических, электрохимических и биодатчиков постоянно совершенствуются и создают новые возможности для проведения оперативных *in situ* измерений. Появляются компактные решения, позволяющие проводить все более сложные исследования. Например, разработка компании Photon Systems с использованием рамановской спектроскопии, предназначена для обнаружения следов сырой нефти, буровых растворов, различных углеводородов и химических соединений непосредственно в океанской среде [164]. Для определения тяжелых металлов в донных осадках предлагается на АНПА использовать XRF-спектрометр [79].

Как уже отмечалось ранее, для арктических и дальневосточных морей России наиболее актуальной задачей является контроль загрязнения углеводородами. Нефть, её фракции и нефтепродукты являются наиболее распространёнными компонентом загрязнения акваторий, поступающим в окружающую среду при разработке морских нефтегазовых месторождений [19]. Существующие и планируемые подводные добычные комплексы ПАО «Газпром» предназначены для добычи газа на шельфе арктических морей и острова Сахалин [146]. В составе

свободных газов месторождений нефти и газа в основном присутствуют метан (около 90–95 %), в виде примесей зафиксированы также этан, пропан и бутан [53,71]. Метан входит в перечень загрязняющих веществ, образующихся при капитальном ремонте скважин, для которых установлены предельно-допустимые концентрации (для объектов рыбохозяйственного назначения - 0,01 мг/дм^3) [2]. Поэтому прежде всего для целей создания автоматизированных систем мониторинга акваторий прежде всего необходимо рассмотреть существующие технические решения, позволяющие проводить оперативное in situ измерения в воде концентраций метана и сырой нефти.

Обнаружение источников метана производится с использованием фото и видеокамер (визуально по наличию пузырьков газа), а также специальными датчиками. В основе работы серийно выпускаемых датчиков лежит использование газопроницаемых мембран, через которую CH_4 диффундируют во внутренний газовый контур, ведущий к камере детектора, где концентрация метана определяется с помощью оптического датчика [165-168]. Материал, толщина и площадь поверхности мембраны оказывают сильное влияние на коэффициент диффузии мембраны и, как следствие, на чувствительность измерительных приборов. При этом температура и гидростатическое давление оказывают сильное влияние на свойства мембран [68,78]. Модели отличаются используемым материалом мембран и типом детектора. Технические характеристики датчиков приведены в таблице 2.

Датчика CONTROS HydroC CH4, производства компании Kongsberg Maritime (Норвегия) в качестве детектора использует абсорбционный лазерный спектрометр на базе настраиваемого диода [165]. Для снижения энергопотребления возможно использование различных температурных диапазонов (-2°C÷ +30°C, -2°C ÷ +20°C, -2°C ÷ +8°C). На сайте производителя также указано наличие внутренней памяти, установочного пакета для АНПА и ТНПА, внешней помпы (SBE-5T, SBE-5M). Ранее уже отмечалось, что компания Kongsberg Maritime является одним из лидеров по разработке и производству АНПА (HUGIN), которые используются крупными морскими сервисными компаниями [102,158].

Franatech CH4 Laser – датчик измерения концентрации растворенного метана производства компании FRANATECH GMBH (Германия) [166]. Отличительной чертой является скорость реакции - время реакции составляет 5 с, что позволяет его использовать для вертикального профилирования водной толщи и на АНПА. Область применения – мониторинг и обнаружение утечек на нефтяных и газовых подводных трубопроводах. На сайте производителя содержится ссылка на его использование в северо-восточной части Черного моря на российском профилографе.

В основе работы MK5, разработки SubCtech GmbH (Германия) лежит использование мембраны и инфракрасного двухволнового оптического датчика [167]. Заявленная область применения – аквакультура, мониторинг качества воды с возможностью установки на АНПА, ТНПА, буи и профилографы. Предусмотрена защита мембраны от обрастаний, что позволяет выполнять длительные исследования. Также существует автокоррекция результатов измерений с учетом давления и температуры.

Измерительный модуль Mini CH4 ™ Submersible pCH4 Sensor, производства Pro-Oceanus (Канада) отличает существенно меньшие габаритные размеры, масса и энергопотребление по сравнению с аналогами [168]. Также прибор позволяет измерять общее давление растворенного газа (TDGP) – используемый для различных целей параметр, в т.ч. для корректировки данных. Диапазон измерения 0-2000 mbar с точностью 1 %.

Главным недостатком датчиков является наличие температурной зависимости диффузии газа через мембрану. Отмечается, что для датчиков METS и HydroC/CH4 при низких температурах морской воды в диапазоне от –2°C до +2°C резко снижается скорость диффузии метана, что ведет к существенному увеличению времени измерений и делает невозможным проведение глубинного профилирования, а также затрудняет практическое использование подобных датчиков в арктических, антарктических морях и дальневосточных морях [68].

Таблица 2 – Технические характеристики серийно выпускаемых датчиков концентрации растворенного метана

Наименование характеристики	**CONTROS HydroC CH4, Kongsberg, Норвегия**	**Franatech CH4 Laser, FRANATECH GMBH, Германия**	**MK5, SubCtech GmbH, Германия**	**Mini CH4 ™ Submersible pCH4 Sensor, Pro-Oceanus, Канада**
Тип детектора	Абсорбционный лазерный спектрометр на базе настраиваемого диода (TDLAS)	Нет данных	Высокопроизводительный не дисперсионный инфракрасный двухволновой оптический датчик	Инфракрасный
Диапазон измерения	0- 40,000 µatm	2 – 10000 ppmv	Стандартный 0…3000 ppm CH_4, опционально: 1000 ppm, 1 %, 3 %, 5 %, 10 %.	Доступны три варианта: 0-1% CH_4 по объёму, ~0-300 µg/L по массе; 0-10 % по объёму, ~0-3 mg/L по массе; 0-100 % по объему, ~0-30 mg/L по массе.
Предел обнаружения	< 1 µatm			
Вес, кг:				
в воде	5,5	8	+0,5	-0,06
в воздухе	12,5	14	4,3	0,53
Размеры, мм:				
без соединительного разъема	494 x 136	694 x 190	350 x 130 (при максимальной глубине 300 м)	280 x 53
с соединительным разъемом	528 x 136			
Максимальная глубина, м	3000	4000	стандартная 300, возможно другая по требованию заказчика	0 - 600 (пластиковый корпус), 0 - 6000 (титановый корпус)
Температурный диапазон	-2°C ÷ +35°C	-3 °C ÷ + 20 °C	0°C ÷ +45°C, опционально	-2 °C ÷ + 50 °C

Наименование характеристики	**CONTROS HydroC CH4, Kongsberg, Норвегия**	**Franatech CH4 Laser, FRANATECH GMBH, Германия**	**MK5, SubCtech GmbH, Германия**	**Mini CH4 ™ Submersible pCH4 Sensor, Pro-Oceanus, Канада**
			-20°C ÷ +55°C	
Разрешение	< 0.01 µatm		15 bit / 0,1 ppm CH_4 (для диапазона измерений 3000 ppm)	0,1% от максимального значения
Точность	±2 µatm или ±3 %		±2 % от максимального значения	± 2% от максимального значения
Напряжение питания, В	12 - 30	11-30	7-30	12
Потребляемая мощность, Вт	8,28, при использовании помпы SBE-5T дополнительно 8 Вт	5	5, пиковая при прогреве 10, доступна версия с малым энергопотреблением	0,4

Отметим, что [68] была опубликована в 2011 г., по стоянию на 2019 г. рабочие температуры датчиков уже охватывают указанный диапазон (таблица 2). Для учета зависимости диффузии мембраны от температуры и давления используются данные CTD-зондов.

Датчики измерения концентрации нефти в воде также широко представлены на рынке (таблица 3) [169-171]. В качестве примера рассмотрим SeaOWL UV-A™ (Sea Oil-in-Water Locator), разработки Sea-Bird Scientific, США [169]. Оптический датчик с источником ультрафиолетового и синего диапазона (длина волны 370 нм и 460 нм соответственно) проводит измерение концентрации сырой нефти в воде и флуоресценцию хлорофилла, чтобы позволяет различать сырую нефть от фитопланктона и других природных источников флуоресценции FDOM (Fluorescent Dissolved Organic Matter). Порог обнаружения нефти – менее 80 ppb, чувствительность при определении сырой нефти - 3 ppb [169]. SeaOWL UV-A входит в комплект сенсорного модуля АНПА Gavia [154], а его специальная версия - SeaOWL UV-A™ SLC - разработана для использования на глайдере the Teledyne Webb Research Slocum Glider [172].

Таблица 3 – Технические характеристики датчиков концентрации нефти в воде

Параметр	**SeaOWL UVA TM, Sea-Bird Scientific, США** [169]	**Cyclops-7F Sensors, Turner Designs, Inc., США** [170]	**FP 360 sc, Hach, США** [171]
Порог обнаружения (разрешение)	3 ppb	0,2 ppb	0,1 ppb (полиароматические углеводороды)
Диапазон обнаружения	3-80 ppb (сырая нефть)	0 - 1500 ppb (сырая нефть)	0,1 - 15 ppm (mg/L) нефть, 0 - 500 ppb (µg/L) – полиароматические углеводороды
Температура воды, °C	от -2 до 50 °C	От -2 до 50	от -5 до 45 °C
Максимальная глубина,	2000 м	600	300 м
Вес, г	340	142	2800
Размер, см	5,66*5,46	1,48*3,18	31,5*6,8

Альтернативным вариантом использованию отдельных датчиков концентрации растворенного метана и нефти может стать использование интегрированной системы The Mobile Early Leak Detection System (MELDS), компания Kongsberg Maritime. MELDS предназначена для быстрого и надежного обнаружения, локализации и оценки утечек нефти и газа с использованием любой движущейся платформы, такой как АНПА, ТНПА. Подобная система, в частности, используется на ТНПА COMMANDER MK II и COMMANDER MK III, разработки Mariscope, Германия [173].

В состав MELDS входят:

- датчик полициклических ароматических углеводородов (флуориметр);
- датчик метана, обнаруживающий газообразный и растворенный CH4, а также другие углеводороды в воде;
- CTD – датчики проводимости, температуры и солености для измерения базовых параметров окружающей среды, используемых в дальнейших исследованиях (например, для расчета концентраций CH4).

1.4 Выводы

1. Проведенный анализ показал, что имеется значительное количество различных современных технических средств, которые используются для создания систем мониторинга акваторий различного назначения. В их числе заякоренные буи, донные станции, профилографы, автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), измерительные устройства, оборудование для передачи информации по гидроакустическому и радиоканалу. Многие из этих устройств являются универсальными и могут быть использованы в любых районах Мирового океана.

2. Для арктических условий, характеризующихся продолжительным ледовым периодом и отсутствием развитой береговой инфраструктуры необходима

разработка специальной структурно-функциональной модели системы мониторинга акватории, методов оптимизации топологии сети передачи данных, технических устройств, обладающих высокой автономностью, отказоустойчивостью и ремонтопригодностью, способностью работать в реальном режиме времени.

Для построения системы морского мониторинга в физико-географических, климатических и гидролого-акустических условиях арктических морей актуальными задачами, требующими решения, являются:

- обоснование оптимальной системы морского мониторинга в условиях арктических морей;
- исследование влияния стохастичности поля скорости звука на энергетическую структуру акустического поля для оптимизации расположения узлов сети приема-передачи данных;
- теоретическое исследование методов построения оптимальной ретрансляционной сети (системы) и ее верификация на основе экспериментальных данных;
- разработка комплекса технических средств для оптимального приема-передачи гидроакустических сигналов с учетом гидрофизических характеристик арктических морей.

2 СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ, КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГО-АКУСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Проведенный в главе 1 обзор показал наличие технологий, позволяющих создавать системы мониторинга для арктических морей различного назначения. Существуют технические решения, которые могут быть использованы в качестве элементов систем мониторинга акваторий, организации передачи данных внутри подобных систем, серийно выпускаются сенсоров для мониторинга водной среды *in situ*. Вместе с тем, в каждом конкретном случае необходимо учитывать назначение и специфику района размещения систем мониторинга (рис. 2).

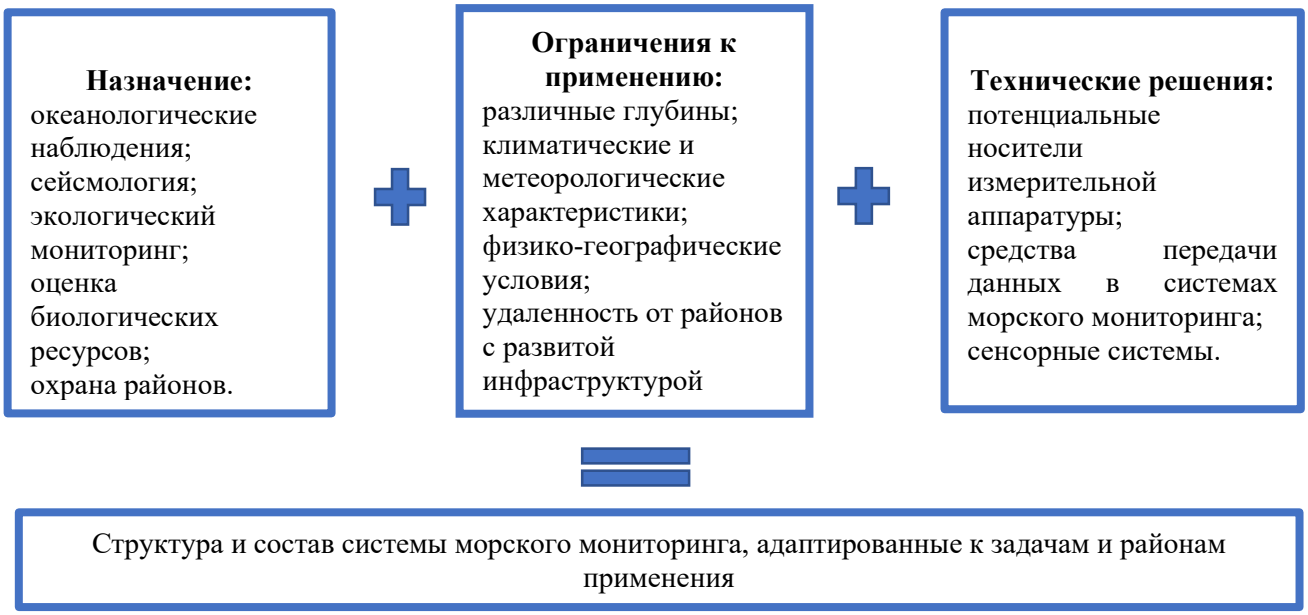


Рисунок 2 – Общий подход к разработке систем мониторинга акваторий различного назначения

2.1 Структура системы мониторинга акваторий арктических морей

Исходя из текущего состояния и перспектив ведения хозяйственной деятельности, в качестве районов, где наиболее востребовано размещение автоматизированных систем мониторинга акваторий, можно рассматривать шельфовые зоны Карского и Охотского морей [145,146]. Отличительными особенностями районов являются низкие среднегодовые температуры воздуха и воды, наличие длительного ледового периода, а также неблагоприятные для распространения звука гидрологические характеристики.

Климатические условия Карского моря по сравнению с Охотским морем более экстремальны и поэтому могут быть рассмотрены как эталонные. Большую часть года море покрыто сплошным ледяным покровом. Если в юго-западной части моря лед наблюдается в течение 7-8 месяцев, с ноября по июнь-июль, то северо-восточная часть моря даже в летний период не полностью очищается ото льда [34]. Преобладающая толщина ровного ледяного покрова осеннего образования к концу зимы в юго-западной части моря составляет около 120 см, а в северо-восточной части – около 180 см [44]. Вместе с тем, именно в Арктике наиболее заметны климатические измерения последнего времени. За период 1990-2019 гг. потепление в районах арктических морей составило от 2,31 °С (северная часть Гренландского и Норвежского морей) до 4,74 °С (Карское море). Для Сибирских арктических морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) в последние 15 лет площадь ледяного покрова в сентябре колеблется около 200-300 000 км^2, что в 4-5 раз меньше, чем в 1980-х гг. [6].

Одной из особенностей указанных районов являются небольшие глубины. В Карском море преобладают глубины до 100 м, а около 40% площади дна имеют глубины менее 50 м, при этом мелководные районы расположены в южной и восточной части моря [174]. Обширная шельфовая зона Охотского моря о. Сахалин также мелководна, например, в районе Киринского месторождения глубина составляет 91 м.

Основное назначение любой системы морского мониторинга – это постоянное измерение параметров водной среды и доставка полученных данных для их обработки, хранениях и принятия управленческих решений при возникновении внештатных ситуаций. Перечень измеряемых показателей и частота измерений определяют выбор технических решений, которые проводят измерения (как измерительных сенсоров, так и их носителей), а также требования к характеристикам канала связи (оперативность, достоверность, объем передаваемой информации).

Учитывая специфику района размещения, можно выделить следующие основные требования к эксплуатационно-техническим характеристикам систем мониторинга акваторий арктических морей различного назначения:

1. Автономность. Все элементы системы мониторинга должны обеспечивать функционирование в течение не менее чем 8 месяцев, что соответствует максимальной продолжительности ледового периода. Одновременно следует понимать, что большинство средств измерений в соответствии с требованиями метрологического контроля должны проходить поверку не реже, чем 1 раз в год.
2. Отказоустойчивость. Каждый элемент системы мониторинга должен предоставлять информацию о состоянии оборудования и заряде батарей. В случае отказа отдельных элементов, их функции должны брать на себя резервные.
3. Ремонтопригодность. Конструкции элементов системы должны предусматривать бесперебойную работу без технического обслуживания в течение всего периода функционирования. В случае выхода из строя должна быть возможность оперативной замены неисправных элементов системы.
4. Время реакции системы. Определяется частотой проведения измерений, периодичностью отправки информационных сообщений. В идеале должно быть максимально приближено к режиму реального времени.

Из рассмотренных в разделе 1.1. технических средств с учетом необходимости обеспечения требуемой автономности в качестве измерительного модуля следует рассматривать стационарные устройства, такие как заякоренные

буи, донные и профилирующие станции. Основные задачи, решаемые измерительным модулем:

1. Измерение контролируемых показателей водной среды;
2. Обработка и хранение массива данных;
3. Передача данных удаленному посту наблюдения;
4. Навигация для АНПА, задачи которого в системе мониторинга рассмотрены ниже, с помощью ГА маяка-ответчика.

Используемые измерительные датчики должны обладать стойкостью к обрастанию, обеспечивать необходимую точность измерений в течение всего периода работы, производить измерения при низких температурах воды. Архитектура измерительного модуля должна позволять производить смену состава и количество сенсоров. Должна быть реализована возможность удаленного изменения частоты измерений.

В случае возникновения аварийной ситуации (обрыва якорь-троса, затекания батарей питания), должен быть предусмотрен аварийный режим работы, в котором происходит всплытие измерительного модуля и включение маяка-ответчика. Аналогично должна происходить и плановая замена.

Информационный обмен в системе мониторинга акваторий потенциально может быть организован с использованием различных подходов, рассмотренных в разделе 1.2. Единственным способом, обеспечивающим возможность мониторинга и обмена сообщениями в режиме реального времени, является кабельные сети передачи данных. Они также могут использоваться в течение всего года и являются оперативным и гарантированным способом связи с подводными объектами. Однако кабельные линии отличает значительная стоимость и низкая ремонтопригодность, особенно в ледовый период.

Поступающая информация о результатах измерений должна обрабатываться и архивироваться, приводиться к формату (формулярное сообщение) необходимому для дальнейшей передачи. В общем случае информация должна храниться за весь период автономной работы (1 год). Организация такого хранения

и обработки на каждом измерительном модуле экономически нецелесообразна. Необходимо иметь единую систему сбора, обработки и хранения информации (СОХИ) для всей системы мониторинга. Такую систему можно располагать на стационарном устройстве – автономной донной станции (АДС). Измерительный модуль может быть связан с АДС кабельным каналом (для небольших дистанций) и/или гидроакустическим каналом (для значительных расстояний или в случае нарушения кабельной линии) для передачи информации. Для измерительных модулей имеющих кабельный канал может быть реализовано централизованное энергообеспечение от АДС.

В условиях длительного ледового периода не может обеспечить круглогодичного функционирование системы мониторинга способ связи с донными измерительными комплексами с использованием поплавковых или всплывающих радиопередатчиков. Обмен данными между подводными элементами системы мониторинга и такими поверхностными ретрансляторами может быть организован с помощью высокочастотных гидроакустических модемов. При образовании льда поверхностный ретранслятор будет сорван дрейфующими полями, что приведет к потере работоспособности всей системы. Возможно использование в условиях постоянного ледяного покрова, когда поверхностный ретранслятор будет вморожен в лед.

Другим вариантом связи с подводными элементами системы мониторинга является использование гидроакустического (ГА) канала связи. Передача статусных и экстренных аварийных сообщений на большие расстояния до сотен километров возможна с использованием средне- или низкочастотного диапазона ГА сигналов. К недостаткам можно отнести низкую пропускной способности канала (скорости передачи данных), высокие по сравнению с другими способами энергозатраты в условиях автономной работы, большие габаритные размеры и массу. Основным преимуществом способа является простота его технической реализации. Но для него также требуются межсредные шлюзы («вода-воздух» или «вода-кабель»), которые могут быть выполнены в стационарном кабельном или

автономном поплавковом/наледном варианте. Шлюзы должны устанавливаться максимально близко от береговой черты для минимизации затрат на кабель или круглогодичное обслуживание и обеспечение безопасности шлюзов.

Использованием высокочастотных (ВЧ) ГА модемов имеет ряд преимуществ, в т.ч. большую пропускную способность канала, низкий уровень шумов на входе приемника. Из-за роста затухания ГА сигналов с частотой сокращается дальность действия, поэтому при организации передачи на большие расстояния может быть использована ретрансляционная линия. ВЧ ГА модемам требуется меньшая мощность излучения, они имеют малые массу и габариты [159-163]. Оценки необходимой скорости для передачи данных управления и контроля (навигационные данные, сигналы управления и взаимодействия с подводными объектами) и телеметрических данных (сигналы состояния подводного объекта, информация от различных датчиков, например, гидрофонов, сейсмометров, датчиков течений) приводят значение до 1 кбит/с [47], которому соответствуют все серийные модели ВЧ ГА модемов.

Преимущества организации передачи данных с использованием ВЧ ГА ретрансляторов:

– снижение габаритов и массы измерительных модулей и межсредных шлюзов за счет меньших габаритов и массы ГА оборудования (килограммы вместо сотен килограмм по сравнению с средне- и низкочастотными антеннами);
– бóльшая энергетическая автономность;
– простота размещения ретрансляторов (сброс ретрансляторов с судов или самолетов), в том числе экстренных, резервных и дополнительных для увеличения пропускной способности;
– меньшие материальные затраты на восстановление линии связи (сброс или постановка со льда через майны с доставкой в точку вертолетом взамен вышедших из строя ретрансляторов) и оперативность восстановления;
– меньший уровень негативного воздействия на окружающую среду;

– возможность, за счет большей пропускной способности линии, оперативного получения больших массивов данных измерений при анализе аварийных сообщений (или периодически) без использования дополнительных средств;

– применение унифицированных устройств для передачи сообщений.

Недостатки ВЧ ГА ретрансляторов:

– требуется большее количество при организации связи на большие расстояния, необходимость периодической замены ретрансляторов;

– требует применения межсредных шлюзов.

С учетом перечисленных функциональных требований и ограничений предложена структура система мониторинга акваторий (СМА), включающая (рис. 3): стационарную и маневренную автономные системы сбора, обработки и хранения информации (СОХИ); измерительные модули различного назначения; системы передачи данных по радиоканалу (РС), в условиях открытой воды, и гидроакустическому каналу (ГС) в ледовый период; береговой пост (БП) приема и ретрансляции информации со спутниковым каналом связи.

Стационарная система СОХИ организована на базе автономной донной станции (АДС), обладающей достаточной энергообеспеченностью, кабельными и/или гидроакустическими каналами связи с системой измерительных устройств, контролирующих заданные параметры среды, устройствами для хранения и первичной обработки данных, средствами передачи данных в ретрансляционную сеть. Автономность стационарной системы СОХИ должна превышать максимально возможный ледовый период в районе применения для обеспечения возможности постоянного непрерывного контроля заданных параметров.

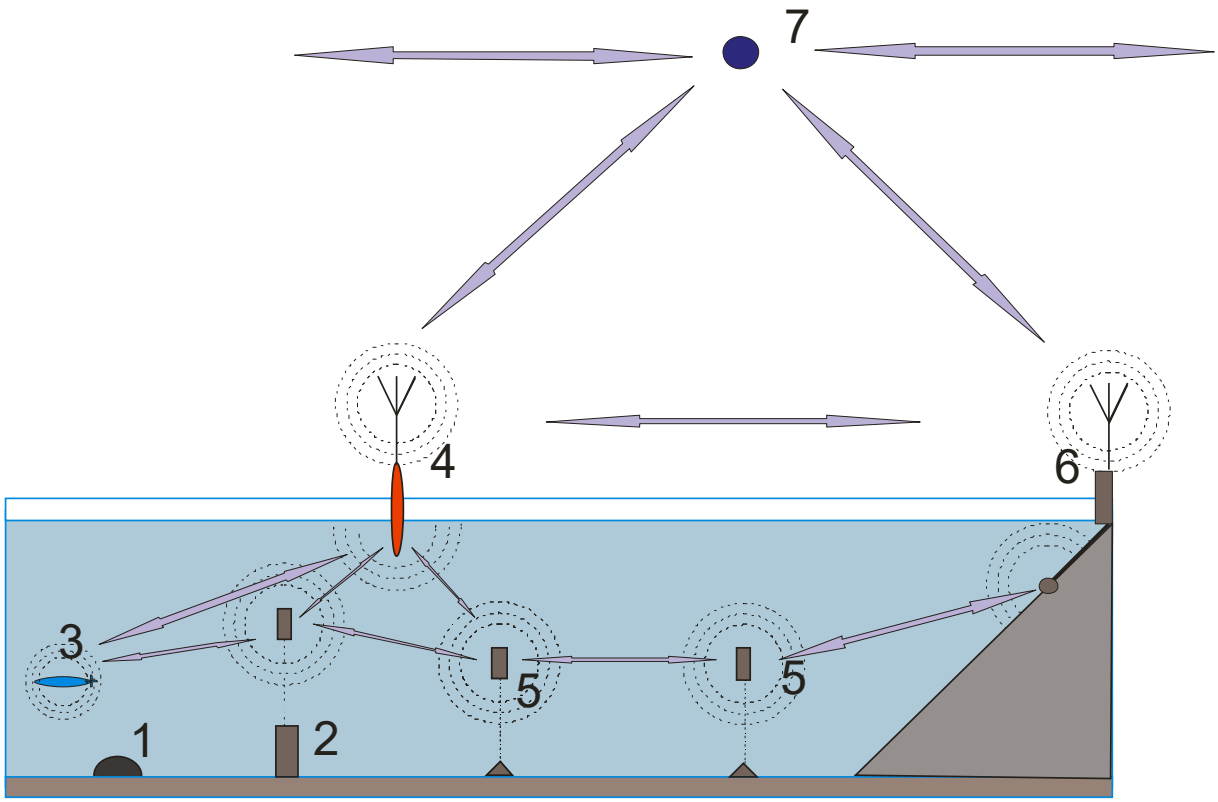


Рисунок 3 - Принципиальная схема построения системы мониторинга акваторий арктических морей. Условные обозначения: 1 – АДС; 2 – измерительный модуль; 3 - АНПА; 4 - поверхностный (заякоренный или дрейфующий) ретранслятор; 5 – гидроакустический ретранслятор; 6 – береговой пост наблюдения, 7 –спутник связи

В качестве измерительных модулей предлагается использовать стационарные устройства (заякоренные буи, донные и профилирующие станции), которые будет решать следующие задачи: измерение контролируемых показателей водной среды; обработка и хранение массива данных; передача данных удаленному посту наблюдения; навигационное обеспечение для АНПА. Архитектура измерительного модуля должна позволять менять состав и количество сенсоров. Система управления должна реализовывать возможность дистанционного изменения частоты измерений. При возникновения аварийной ситуации предусмотрен режим незамедлительной передачи постоянного специального сигнала.

Маневренная автономная СОХИ организована на базе автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Применение АНПА предусмотрено

для выполнения периодических инспекционных наблюдений и контроля обстановки при возникновении внештатных ситуаций. При этом необходимо решение следующих задач:

- точная координатная привязка измерительного модуля (модулей) и подводных ретрансляторов;
- автоматический мониторинг вблизи измерительного модуля с помощью комплекса различных датчиков, с координатной привязкой траектории движения и полученных данных, в режимах строго установленных маршрутов (инспекционные миссии);
- мониторинг вблизи измерительного модуля в режиме траекторного обследования по пороговому уровню контролируемого параметра для обнаружения источника загрязнения [106,116,128];
- автоматическое обследование состояния измерительного модуля, подводных ретрансляторов, кабельных линий связи;
- автоматический выход АНПА к измерительному модулю и прием накопленной первичной информации;
- автоматический выход АНПА к обеспечивающему судну и доставка первичной информации на борт судна;
- постобработка и комплексирование данных, полученных измерительным модулем и АНПА.

Техническое оснащение АНПА должно включать в себя: автономную и внешне корректируемую навигационные системы, измерительные датчики, систему распознавания заданных объектов, устройства для хранения и приема-передачи информации. В рамках данной работы проведено обоснование и разработка устройства гидроакустической связи для внешне корректируемой навигационной системы АНПА.

Информационный обмен в СМА в условиях длительного ледового периода предлагается организовать с использованием гидроакустического (ГА) канала связи на основе высокочастотных (ВЧ) ГА модемов. Произведенные оценки

необходимой скорости для передачи данных управления и контроля (навигационные данные, сигналы управления и взаимодействия с подводными объектами) и телеметрических данных (сигналы состояния подводного объекта, информация от различных датчиков) дают значение до 1 кбит/с, которому соответствуют все серийные модели ВЧ ГА модемов. Преимущества организации передачи данных с использованием ВЧ ГА модемов по сравнению с средне- и низкочастотными гидроакустическими средствами: меньшие масса и габариты, меньшее энергетическое потребление, простота размещения (сброс с судов или самолетов), меньшие материальные затраты на восстановление линии связи, бóльшая пропускная способность.

Таким образом, в качестве базового варианта реализации подводного канала связи предлагается использование ВЧ ГА ретрансляторов, обеспечивающих максимально возможный объем передаваемой информации. Однако в случае, если система мониторинга рассматривается в качестве аварийной сигнализации возможно использование НЧ и СЧ гидроакустических средств.

Передача информации на поверхность в ледовых условиях будет осуществляться через межсредный шлюз, представляющий собой подводный модуль с ВЧ ГА модемом, соединенный с береговым постом наблюдения кабелем. Для обеспечения безопасности перехода кабеля с берега под воду в условиях интенсивного торошения берегового припая потребуются дополнительные мероприятия. Необходимо выполнение заглубления кабеля на несколько метров на протяженном участке, что представляет сложную техническую задачу в условиях вечной мерзлоты и большой протяженности мелководья, ограничивающего зону работы кабельных судов с подводными траншеекопателями. С точки зрения надежности линии связи целесообразно делать не менее двух выходов кабельной цепи на берег. С экономической точки зрения предпочтительнее размещения межсредных шлюзов на существующих гидротехнических сооружениях.

Сеть передачи данных принято представлять в виде графа G(U, V), с чередующейся последовательностью вершин V1…n (узлов связи) и ребер Uij

(линий связи) начинающихся и оканчивающихся на вершинах, являющихся концевыми. Исходя из научно-методического аппарата теории надежности максимальная устойчивость систем связи обеспечивается при топологии сети, характеризующейся: а) равномерным распределением плотности степеней связности вершин формализованного графа на всем протяжении сети Vui € Vi= const; б) равенством протяженности отдельных линий связи в пределах соседних пространственных участков; в) наличием не менее трех линий связи для каждого узла.

Указанные принципы выполняются для топологии сети представленной на рис. 4.

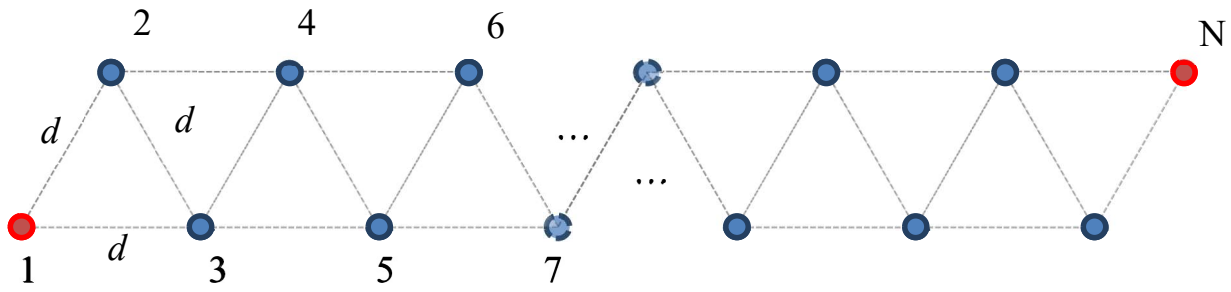


Рисунок 4 – Топология построения ретрансляционной сети. Пункт 1 – точка расположения измерительного модуля, пункт 2 – точка расположения прибрежной гидроакустической станции берегового поста наблюдения

Предлагается использовать два параллельных ретрансляционных участка, каждый из которых может быть основным, а наличие линий связи между всеми соседними узлами позволит компенсировать отказ любого из промежуточных ретрансляторов. Каждый из промежуточных ретрансляторов имеет 4 канала связи. Ретрансляторы располагаются в вершинах равносторонних треугольников с постоянной длиной сторон на протяжении всей ретрансляционной линии.

При этом для обеспечения эффективной работы сети целесообразно чтобы один путь (кратчайший) является основным, а остальные – резервными, для случаев отсутствия связи между отдельными узлами сети. При этом параллельная

ветка сохраняет работоспособность в режиме приема, сохраняя синхронно блоки информации, излученные ретрансляторами с противоположной ветки. В ситуации отказа одного из модемов или отсутствия связи на выбранной линии, ретрансляторы, работающие только в режиме приема на параллельной линии, воспроизводят сохраненный сигнал.

Например, при прохождении сигнала по ветке 1-3-5-7-..-N сигнал не переизлучается ГА модемом ретранслятора 5, ввиду его неисправности или отсутствия должного по качеству сигнала от ГА модема ретранслятора 3. В данной ситуации модем ретрансляторов 4, 6 и 7 не получают вовремя необходимый информационный пакет (на 4-ый должен снова прийти повторный подтверждающий информационный пакет от 5-го). При неопознании посылки своевременно, есть возможность с 4-го модуля осуществить переизлучение на 6-ой модемный модуль сохраненного пакета, полученного ранее от модема 3. Данная схема удобна тем, что не требуется обратных перезапросов от 6-го или 7-го модуля.

Для того чтобы межэлементные линии связи обеспечивали необходимое качество передачи информации, протяженность линий d должна выбираться исходя из условий распространения сигналов в районе и взаимного расположения источника и приемника звука. Из соображений экономической целесообразности предпочтительна как можно большая величина d, однако особенности канала распространения и геометрия расположения точек приема/передачи сигналов в канале накладывают серьезные ограничения на протяженность зоны устойчивого качества передачи информации. Далее, при описании технических устройств, разработанных для СМА, приведены расчетные оценки длины ретрансляционных участков для различных частотных диапазонов и условий распространения сигналов, позволяющие оптимизировать топологию РТГС и энергетические ресурсы для функционирования СМА.

Передача информации удаленному потребителю от поверхностного ретранслятора (4) и берегового поста наблюдения (6) осуществляется через спутниковую связь – радиоканал (7).

Существующие ограничения в пропускной способности гидроакустического канала связи не позволяют передавать весь объем информации, получаемый измерительным модулем. Поэтому в памяти АДС будет аккумулироваться значительный объем информации, которая будет доставляться курьерским способом связи через АНПА. Предполагается, что сеансы обмена данными будут происходить во время инспекционных миссий АНПА. Данная задача может быть решена с использование ВЧ ГА модема со скоростью передачи данных до 40 -100 кбит/с.

2.2 Выводы

1. В качестве оптимальной модели системы мониторинга акваторий (СМА) арктических морей предложена структура обеспечивающая выполнение заданных функций, состоящая из: стационарной автономной донной станции (АДС); автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА); измерительных модулей различного назначения; систем передачи данных на береговой пост по кабельному, радио- и/или гидроакустическому каналу.

2. АДС выполняет функции централизованного устройства энергообеспечения измерительных модулей связанных кабельными линиями, сбора, обработки и хранения информации (СОХИ); передачи информации в систему ретрансляционной сети. Автономность стационарной АДС превышает максимально возможный ледовый период в районе применения и обеспечивает возможность постоянного непрерывного контроля заданных параметров.

3. Сформулирован подход к оценке минимальных параметров источников энергии АДС, необходимых для постоянного и устойчивого функционирования системы мониторинга акваторий (СМА). Сформулированы требования к пропускной способности каналов передачи информации от сети измерительных устройств к АДС, технические требования к приемо-передающему каналу АДС.

4. Маневренная автономная СОХИ организована на базе АНПА. Применение АНПА предусмотрено для выполнения периодических инспекционных наблюдений и контроля обстановки при возникновении внештатных ситуаций. Техническое оснащение АНПА должно включать в себя: автономную и внешне корректируемую навигационные системы, измерительные датчики, систему распознавания заданных объектов, устройства для хранения и приема-передачи информации. В рамках данной работы проведено обоснование и разработка устройства гидроакустической связи для внешне корректируемой навигационной системы АНПА.

5. В качестве измерительных модулей предлагается использовать стационарные устройства (заякоренные буи, донные и профилирующие станции), которые будет решать следующие задачи: измерение контролируемых показателей водной среды; обработка и хранение массива данных; передача данных удаленному посту наблюдения; навигационное обеспечение для АНПА. Архитектура измерительного модуля должна позволять менять состав и количество сенсоров. Система управления должна реализовывать возможность дистанционного изменения частоты измерений. При возникновения аварийной ситуации предусмотрен режим незамедлительной передачи постоянного специального сигнала.

6. Предложена топология ретрансляционной системы гидроакустической связи, обеспечивающая максимальную устойчивость передачи информации, характеризующаяся: а) равномерным распределением плотности степеней связности вершин узлов связи (ретрансляторов) на всем протяжении сети; б) равенством протяженности отдельных линий связи в пределах соседних пространственных участков; в) наличием не менее трех линий связи для каждого узла. Показано, что оптимальная протяженность линий связи обусловлена особенностями канала распространения, геометрией расположения точек приема/передачи сигналов, соотношением качество принятой информации/энергозатраты для фиксированной дальности.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

В настоящее время накоплен значительный научно-технический потенциал и практический опыт создания и эксплуатации ГАС. Совокупность ГАС и морской среды, через которую передают и принимают сигналы, образуют канал распространения акустических волн. Особенности поверхности и дна моря, неоднородности морской среды являются причинами таких волновых процессов в океане как рефракции, интерференции, дифракции, отражения, рассеяния и затухания. Вследствие этого, для различных районов существенно отличается дальность действия ГАС – расстояние, на котором вероятность правильного обнаружения объекта (сигнала) равна установленному значению.

Параметры распространяющихся гидроакустических сигналов (время прохождения трассы, затягивание, фокусировка вследствие многолучевого распространения и др.) могут быть оценены при наличии сведений о структуре акустического поля и гидрофизических характеристик среды по трассе распространения. Важной особенностью распространения звука в океане является формирование зон акустической освещенности и тени, наличие которых обусловлено рефракцией звука за счет наличия вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). При этом на протяженных трассах могут находиться различные локальные неоднородности поля скорости звука различных масштабов, которые также вносят существенный вклад в пространственное распределение звука.

Учет зональной структуры акустического поля необходим для организации гидроакустического канала, включающего: количество и параметры излучающих и приемных каналов, заглубление акустических антенн, их пространственная избирательность и алгоритмы обработки информации.

При проектировании гидроакустических трасс должно быть предусмотрено предварительное геоморфологическое обследование выбранной акватории, исследование гидрологического режима, сбор и систематизация данных о

гидроакустическом канале распространения сигналов, проведение математических модельных экспериментов. Выполнение этих требований необходимо для оптимизации размещения ГАС и обеспечения функционирования системы мониторинга на протяжении времени ее использования, независимо от сезонной изменчивости параметров гидроакустического поля.

3.1 Математические модели распространения звука в океане

Математическое моделирование распространения звука в реальной морской среде является инструментом постановки вычислительных экспериментов, так как экспериментирование в реальной морской среде дорогостоящее мероприятие.

Моделирование как наука опирается в первую очередь на:

– понимание физических законов и явлений, действующих в моделируемой среде;

– математическую модель физических законов (для звука это система дифференциальных уравнений в частных производных с краевыми и начальными условиями);

– алгоритмическую и вычислительную модели – алгоритм решения системы уравнений и его программная реализация.

Основой для всех математических моделей распространения звука является волновое уравнение:

$$\Delta F = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 F}{\partial t^2}, \Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

где F - решение волнового уравнения, описывает некоторое возмущение, распространяющееся в среде со скоростью c, t – время, Δ – оператор Лапласа [108].

На основе спектрального метода описания волновых полей, позволяющего рассматривать сложные колебательные процессы на основе суперпозиции простых гармонических волн, можно перейти к уравнению Гельмгольца:

$$\Delta^2 F + \mathrm{k}^2 F = 0,$$

где $F=F(x,y,z)\cdot e^{-i\cdot\omega\cdot t}$ – звуковой потенциал, $k = \omega / c = 2\pi/\lambda$ - волновое число, λ - длина волны, $\omega = 2\cdot\pi\cdot f$ – циклическая частота.

Несмотря на относительную простоту уравнения Гельмгольца универсального метода его решения не существует. Для выбора того или иного метода решения необходимо учитывать пространственные характеристики задачи, изменчивость поля скорости звука по трассе, граничные условия, взаимное расположение источника и приемника, частоту и полосу пропускания канала. Уравнение Гельмгольца является основой для численных методов – спектрального, нормальных волн (мод) и параболического уравнения. Существующее многообразие моделей математического описания распространения звукового поля в водной среде может быть систематизировано и представлено согласно схеме на рис. 5 [108].

Методы решения используют плоскослоистую модель морской среды (плотность среды и скорость звука зависят только от глубины), либо двумерно-неоднородная модель морской среды (свойства среды зависят как от глубины, так и от дистанции). Спектральный метод и метод нормальных волн используют плоскослоистую модель, однако существуют их модификации, позволяющие учитывать изменчивость среды по горизонтали.

Спектральный метод основан на использовании быстрых преобразований Фурье (БПФ) для вычисления спектральных интегралов для горизонтально-стратифицированной среды, поэтому часто его еще называют программой быстрого поля. В данном случае предполагается, что звук распространяется в слоистой среде, где скорость звука меняется только по глубине от слоя к слою, т.к.

каждый слой характеризуется своим волновым числом. Общие принципы метода были разработаны Пекерисом для описания волновода. Решение может быть вычислено сколь угодно точно в любой точке волновода. С ростом частоты и при расчете полей в непосредственной близости от источника и на больших дистанциях объём вычислений быстро возрастает.

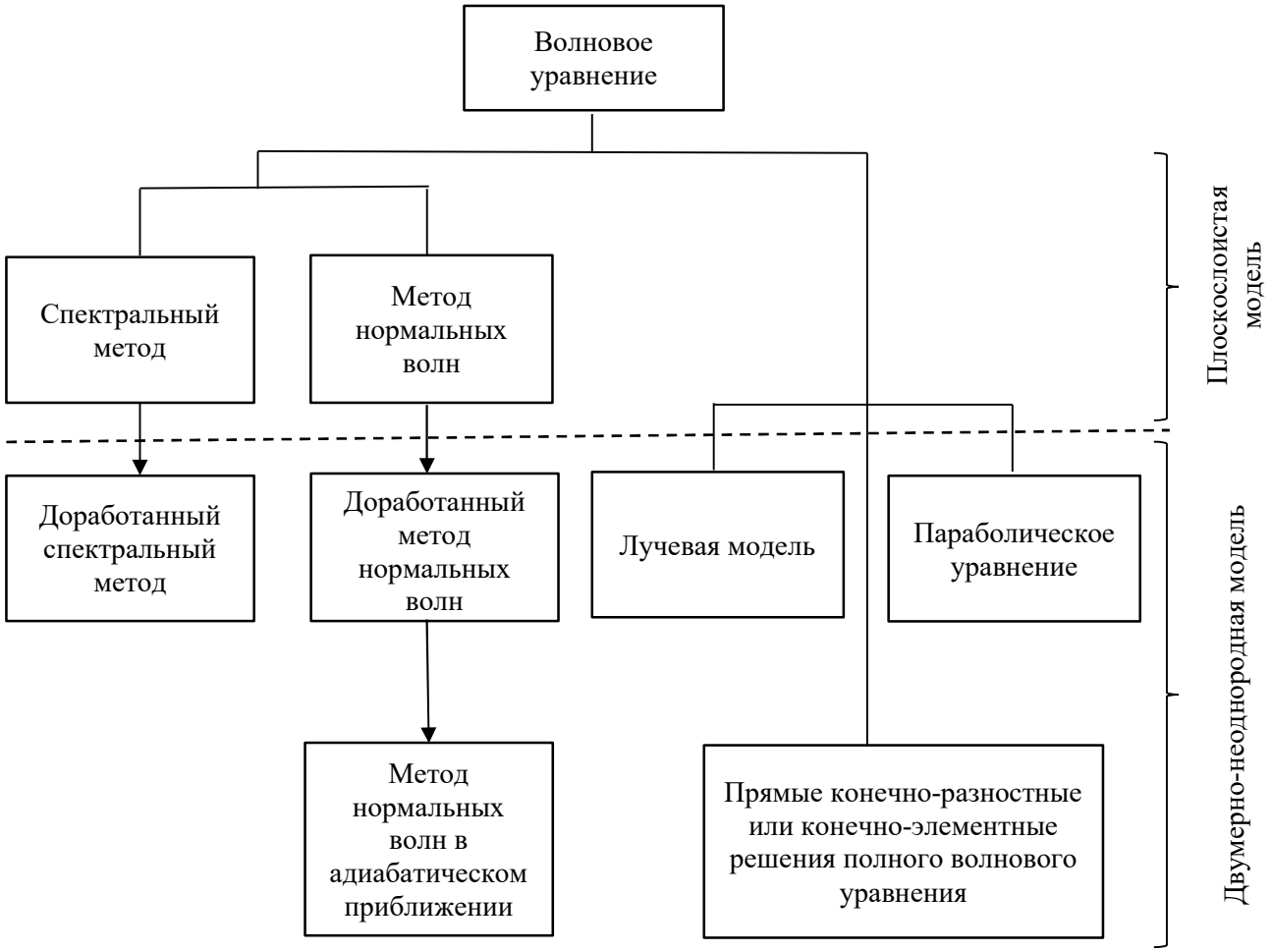


Рисунок 5 – Модели распространения звукового поля

Метод нормальных волн может быть применен к любому горизонтально-стратифицированному океану постоянной глубины. Он приводит к представлению давления в виде бесконечного числа нормальных волн, из которых только конечное число нормальных волн являются распространяющимися, тогда как остальные затухают. Таким образом, на больших расстояниях от источника основной вклад вносят только распространяющиеся нормальные волны, а звуковое давление

выражается в виде конечной суммы. Вычисления в модели нормальных мод, как правило, ограничивается частотами ниже 500 Гц [109].

Метод параболического приближения впервые был использован Леонтовичем и Фоком в середине 40-х годов XX века для описания радиоволн в атмосфере [108]. В дальнейшем параболические уравнения нашли применения в различных областях физики, в т.ч. и в гидроакустике. Геометрия сильно вытянутого по горизонтали и тонкого по вертикали волновода, в котором распространяется звук в океане, позволяет использовать параболическое приближение, основанное на слабой фокусировке и френелевской теории дифракции [24]. Современные методы на основе псевдодифференциального параболического уравнения обеспечивают точные результаты вычислений во всем слоистом волноводе, при этом вычислительные реализации этих методов часто более быстродействующие, чем реализации метода нормальных волн и спектрального [5].

Параболические приближения волнового уравнения Гельмгольца основаны на представлении решения в виде $p(r,z) = H_0^{(1)}(k_0 r)u(r,z)$, где амплитуда $u(r,z)$ удовлетворяет псевдодифференциальному уравнению [24,108]:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + ik_0 u - ik_0\left(E + n^2(r,z) - 1 + iv)E + \frac{1}{k_0^2}\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)^{1/2} u = 0,$$

где $p(r,z)$ – акустическое давление; $k_0 = \omega / c_0$ – волновое число; $n(r,z)$, – коэффициент преломления; c_0 – скорость звука в некоторой точке; $v \geq 0$ – коэффициент затухания.

Для заданного условия приближения может быть получен конкретный вид дифференциального уравнения, в том числе:

– приближение для малых углов распространения акустической энергии:

$$2ik_0\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+k_0(n^2(r,z)-1+iv(r,z))u=0;$$

– приближение для малых углов и быстроизменяющегося коэффициента преломления:

$$2ik_0\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{n(r,z)}\frac{\partial u}{\partial z}\right)+2k_0^2(n(r,z)-1+iv(r,z)+\mu(r,z))u=0,$$

$$\mu(r,z)=\mu(k_0,n,n_z,n_{zz});$$

– приближение для широких углов (аппроксимация Паде):

$$\sqrt{E+L}\approx E+\sum_{k=1}^{n}\frac{a_k\cdot L}{1+b_k\cdot L},$$

$$L=\left((n^2(r,z)-1+iv)\cdot E+\frac{1}{k_0^2}\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\cdot u.$$

Методы моделирования на основе широкоугольного параболического приближения используется многими российскими и зарубежными исследователями [3,4,140]. В качестве примера можно привести работу [4], где приведены результаты моделирования для такой сложной задачи как распространение импульсного сигнала в атмосфере, океане и земной коре от источника звука в атмосфере. В [140] решение с использованием аппроксимации Паде сопоставлялось с результатами измерений, зафиксировавшими проникновением акустической энергии в зону тени.

Методы конечных элементов и других прямых дискретных аппроксимаций полной системы уравнений акустики требуют больших вычислительных затрат и практически пригодны для вычисления полей в относительно небольших пространственных областях.

Широкое распространение получило приближение лучевой акустики, основанное на предположении, что длины волн весьма малы и дифракционными эффектами можно пренебречь [8]:

$$\frac{\lambda}{c}\left|\frac{dc}{dz}\right| \text{«} 1,$$

где z – глубина.

Также необходимо выполнения условия, чтобы точка наблюдения не находилась в зоне тени или вблизи границы, а также на каустике или вблизи её. Приближение геометрической акустики ограничивает область применения лучевой модели высокочастотной областью. В качестве критерия используются соотношение:

$$f > 10 \cdot \frac{c}{H},$$

где f – это частота, Гц; H – это глубина канала, м; c – скорость звука, м/с.

В рамках этого метода решение уравнения Гельмгольца представляют в виде суммы ряда по обратным степеням волнового числа, ограничиваясь одним или несколькими членами разложения:

$$p(\boldsymbol{x}) = exp(ik_0\Psi(\boldsymbol{x}))\sum_{m=0}^{\infty}(ik_0)^{-m}A_m(\boldsymbol{x}), \boldsymbol{x} = (x, y, z),$$

Фазовая функция Ψ(x) удовлетворяет уравнению эйконала, а амплитуда $A_m(x)$ – уравнению переноса. Если x=x(s) – уравнение луча, где s – длина дуги, то траектория луча удовлетворяет векторному лучевому уравнению

$$\frac{d}{ds}\left(n\frac{d\mathbf{x}}{ds}\right)=\nabla n.$$

Алгоритм вычисления звукового поля лучевым методом состоит из следующих этапов:

– определение всех лучей, приходящих в данную точку поля x из точки расположения источника x_0, в т.ч.: прямой луч, лучи, однократно и многократно рефрагировавшие в волноводе, и лучи, отраженные любое число раз от поверхности или дна;

– вычисление фазы $\Psi^{(j)}(x)$ вдоль j -го луча, приходящего из x_0 в x;

– вычисление амплитуды поля $A^{(j)}{}_m(x)$ на j -м луче в точке x;

– суммирование всех лучей, проходящих через x:

$$p(x)=\sum_j\left[\sum_m (ik_0)^{-m}A_m^{(j)}(x)\right]exp\left(ik_0\Psi^{(j)}(x)\right).$$

Главными достоинствами лучевой теории распространения волн являются физическая наглядность и относительная простота использования получаемых формул в практических приложениях. Численное моделирование звуковых полей в подводных акустических волноводах свидетельствует о том, что лучевая теория позволяет правильно предсказать многие важные характеристики принимаемых сигналов, в том числе, на длинных трассах протяженностью до нескольких тысяч километров.

В общем случае, рекомендации по применимости различных моделей распространения звука в зависимости от глубины океана, частоты излучателя и используемой модели среды могут быть представлены в виде таблицы 4 [108,109]. К низким принято относить частоты ниже 500 Гц, мелкое море - районы с глубинами до 200 м.

Таблица 4 – Область применения основных моделей распространения звука [108,109]

Тип модели	**Мелкое море**				**Глубокое море**			
	НЧ		**ВЧ**		**НЧ**		**ВЧ**	
	ПМ[1]	**ДНМ[2]**	**ПМ**	**ДНМ**	**ПМ**	**ДНМ**	**ПМ**	**ДНМ**
Лучевая теория	-	-	+/-	+	+/-	+/-	+	+
Метод нормальных волн	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+/-	-
Спектральный метод	+	+/-	+	+/-	+	+/-	+/-	+/-
Параболическое уравнение	+/-	+	-	-	+/-	+	+/-	+/-

[1]ПМ - Плоскослоистая модель
[2]ДНМ - Двумерно-неоднородная модель

3.2 Влияние неоднородностей скорости звука на зональную структуру акустического поля в океане

Сопоставление данных экспериментов по дальнему распространению звука в океане с результатами, полученными расчетными методами, показывает их несовпадение. В частности, в экспериментах наблюдается проникновение звука в зоны акустической тени, более ранний приход сигналов и изменения в угловом спектре по сравнению с расчетным.

В [20] приведены результаты экспериментальных исследований угловой и энергетической структуры звукового поля в первой зоне конвергенции от источника непрерывного псевдошумового излучения в диапазоне частот 0,5–4,0 кГц, полученные в тропическом районе центральной Атлантики. В экспериментах начало зоны конвергенции, определяемое по резкому возрастанию интенсивности принимаемых сигналов, находилось примерно на 1,2 км ближе к источнику, чем следует из расчетов с использованием лучевого подхода. При этом на частоте 1,25 кГц зона начиналась на 300 м раньше, чем на частоте 3,15 кГц. Отмечается также,

что за несколько километров до начала зоны принимались слабые сигналы, приходящие под теми же углами, что и сигналы, образующие начало зоны конвергенции.

Результаты исследований структуры звуковых полей при глубоководном приеме, проведенные в Гвианском районе Атлантического океана и Центральной котловине Индийского океана, также показывают наличие существенных расхождений в расположение зон конвергенции, энергетической и угловой структуры поля, полученных экспериментально от расчетных [21]. Для Атлантического океана начало первой зоны конвергенции было ближе расчетного на 2 км на глубине приема 190 м и на 2,5 - 3 км на глубине приема 880 м. Похожая ситуация наблюдалась и для Индийского океан - сдвиг начала первой зоны конвергенции для глубины приема 1100 м составлял всего 0,8 км для частоты 3,15 кГц, и 0,6 км для частоты 1,25 кГц.

В работах сотрудников Акустического института им. Н.Н. Андреева приведены результаты экспериментальных материалов исследования звуковых полей в различных регионах Мирового океана [9-13]. В обобщающей работе [13] приведены результаты наблюдений за положением ближней границы первой зоны конвергенции в пяти различных районах Мирового океана (Норвежском, Средиземном, Японском морях, в северо-восточной части Центральной Атлантики и в центральной части Индийского океана). Среднее значение расстояния до ближней к источнику границы зоны, полученное по результатам наблюдений, отличалось от расчетного на 0,5-2,5 км (таблица 5).

В таблице 5 приняты следующие обозначения: Z_0 - глубина буксировки излучателя; Z_1 - глубина расположения приемной системы; R_0 - среднее значение расстояния до ближней границы зоны конвергенции, оцененное по экспериментальным материалам; R_{01} - среднее значение расстояния до ближней границы зоны конвергенции по результатам расчета, выполненного для набора профилей c(z), зарегистрированных во время проведения опыта; S_R -

среднеквадратичное отклонение расстояния до зоны от его среднего значения в эксперименте.

Таблица 5 - Результаты 12-24-часовых наблюдений за положением ближней границы первой зоны конвергенции в различных регионах Мирового океана [13]

Район	**Z_0**	**Z_1**	**R_0**	**S_R**	**R_{01}**
Индийский океан (24 ч)	120-125	160	56.4	240	59
		470	54.6	220	56,6
Атлантический океан (24 ч)	110	200	58.7	232	59.5
		500	57.0	280	57.4
Атлантический океан (24 ч)	20	150	60.8	220	62.0
		500	59.6	200	60.0
Норвежское море (24 ч)	120-125	15	44.0	300	43.9
		60	41.4	170	40.2
		150	40.5	150	39.2
		500	36.3	100	35.6
Средиземное море (12 ч)	84-88	15	28.4	200	30.3
Японское море (24 ч)	70-85	20	42.1	700	43.1

На основании полученных результатов автор [13] делает вывод, что региональная изменчивость формирования звукового поля в районе первой зоны конвергенции обусловлена двумя факторами:

1. Глубиной оси подводного звукового канала (ПЗК). При этом расстояние до зоны будет существенно зависит от значения гидростатического градиента скорости звука на глубинах, где расположена нижняя точка заворота лучей, формирующих начало зоны конвергенции.

2. Отличием в температуре водных масс, лежащих ниже оси ПЗК. Если в Атлантике и Индийском океане эта температура находится в пределах 2-4°С, в Японском и Норвежском морях - ниже 0°С, то в Средиземном море она составляет 13-13,5° С.

В публикациях по дальнему распространению звука отмечается также проникновение акустических сигналов значительной энергии в геометрические зоны тени ниже каустик, рассчитанных с использованием баз данных с климатическими параметрами [140,141]. Сравнение экспериментов и результатов моделирования с использованием параболического уравнения без учета

внутренних волн, показало, что наблюдались ранние лучи, которые проходили на 500-800 м глубже, чем прогнозировалось.

Для решения проблемы несоответствия экспериментальных данных и результатов расчётов распространения звука в океане предлагались различные подходы, которые сводятся к попыткам тем или иным образом описать поле скорости звука в качестве исходных данных для моделирования распространения звука.

В [13] в качестве причин некорректности исходных данных называются:

- суточная изменчивость условий распространения;
- неодновременность гидрологического обследования трассы распространения акустического сигнала и проведения эксперимента;
- существенные различия соотношений, предложенных различными авторами для пересчета температуры, солености и гидростатического давления в значения скорости звука.

Отмечается, что часто профиль скорости звука измеряется до глубин 1-2 км, оставшаяся часть достраивается на основе архивных данных.

В [14] приведен анализ расхождения расчетных значений расстояния от источника излучения до начала первой зоны конвергенции и полученных экспериментально в Атлантическом океане, к юго-западу от Канарских островов. По мнению автора работы, полученные результаты следует связывать с определением начала зоны конвергенции по произвольно выбранному пороговому уровню. Также для района исследований характерна сильная изменчивость гидрологической обстановки (глубина расположения слоя температурного скачка менялась в пределах +/-10 - 15 м).

По результатам экспериментов в Норвежском море расчетные значения расстояния до ближней границы первой зоны конвергенции на 1-1,3 км отличаются от экспериментальных [15]. В качестве объяснения автором работы указана некоторая неопределенность в задании профиля скорости звука на глубинах 1000-

1500 м при проведении расчетов звукового поля, т.к. в ходе экспериментов непосредственные измерения проводились до глубин 400-600 м.

В работе [22] предлагается учитывать кривизну Земли при задании профиля скорости звука:

$$c^*(z) = c(z) + 0{,}24\ z,$$

где c (z) - профиль скорости звука, z – глубина в км.

Авторы делают вывод, что результаты расчетов по данной модели подтверждают заметное влияние кривизны Земли на тонкую структуру звукового поля, в то же время влияние неточности пересчета по существующим формулам данных о температуре, солености и давлении в значения скорости звука незначительно [22]. Введение данной поправки приводит к приближению начала зон конвергенции, а также к изменению углового и временного спектра внутри каждой зоны. Так, без поправки первая зона конвергенции начиналась с 51 км, а при введении поправки – с 50-го км. На всем протяжении зоны конвергенции изменяется и время распространения сигнала (оно уменьшилось на 10-15 мс) и факторы фокусировки приходящих лучей. Начало зон конвергенции приближается при учете кривизны Земли по-разному: в приповерхностных слоях оно сдвигается на ~ 0,8-0,9 км, вблизи оси звукового канала – на ~ 1-1,1 км. Предложение об учете влияние кривизны Земли при описании поля скорости звука на трассе распространения есть и в более поздних работах зарубежных исследователей [141].

Результаты измерений скорости звука в океане показали, что ее изменение с глубиной происходит не плавно, а имеет ступенчатую структура [25,47]. Данное явление объясняется наличием мелкомасштабных неоднородностей океанической среды (температура, соленость, скорость звука), которые можно разделить на микроструктуру и тонкую структуру. Микроструктура – неоднородности с размерами менее 1 м, обусловленные турбулентностью, поле скорости звука в этих масштабах приближается к изотропному. Неоднородности тонкой структуры более

ярко выражены и представляют собой сильно вытянутые в горизонтальном направлении резко анизотропные образования с вертикальными масштабами порядка единиц - десятков метров, горизонтальная протяженность – до десятков км, с коэффициентом анизотропии (отношением горизонтального масштаба к вертикальному) порядка 10^2 - 10^4 [25,41,64]. Данные измерений вертикального распределения температуры и солености показывают повсеместное наличие тонкой структуры, при этом с глубиной она становится менее выраженной и ниже оси ПЗК не наблюдается [25]. Учет тонкой структуры поля скорости звука в расчетных моделях расширяет зону конвергенции, смещает ближнюю границу зоны конвергенции к источнику звука и отодвигает ее дальнюю границу [47].

В работе [23] предложен подход к обоснованию значительного превышения интенсивности звукового поля в первой зоне акустической тени над расчетными значениями рассеянием звука в направлении угла зеркального отражения от горизонтально протяженных тонкоструктурных неоднородностей скорости звука. Рассеяние в зону тени звукового поля определялось вертикальным спектром неоднородностей тонкой структуры показателя преломления n, который по данным многочисленных натурных измерений имеет вид:

$$E(k) = c_n \cdot k^{-\rho},$$

где C_n – константа, характеризующая интенсивность тонкоструктурных возмущений вертикального профиля показателя преломления (расчеты проводились для $C_n = 4 \cdot 10^{-10}$), k – вертикальное волновое число неоднородностей или вертикальная пространственная частота неоднородностей, ρ – параметр, который находится в диапазоне от 2 до 3.

По результатом расчетов, был сделан вывод, что гладкий профиль c(z) скорректированный в существующей среде тонкой структурой неоднородностей, позволяет получить уровни звукового поля в зоне тени близкие к полученным экспериментально. Т.е. существует возможность подбора параметров тонкой

структуры океанической среды, в пределах реально измеренных величин, позволяющих обеспечить наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных [23]. В дальнейшем сравнивая результаты расчетов и экспериментальные данные авторы пришли к заключению, что реальные величины горизонтальных размеров неоднородностей тонкой структуры по крайней мере не меньше горизонтальной протяженности каустических зон первичного поля [26].

В [27] исследовались особенности распространения звука в океане с тонкоструктурными неоднородностями. Проводился анализ результатов эксперимента в тропической части Индийского океана. Для сравнения с экспериментальными данными проводился расчет звукового поля с использованием программы, на основе метода псевдодифференциальных параболических уравнений, позволяющей оценить рассеяние сигнала на тонкоструктурных неоднородностях скорости звука [5]. Наличие неоднородностей данного типа вызвало появление в зоне тени бликов, зеркально отразившихся от неоднородностей. При этом наблюдалась засветка не только первой, но и дальние зоны тени. Описанный механизм приводит к дополнительному снижению акустического поля в зонах освещенности.

Еще в работах [31,99] причиной возникновения неоднородностей тонкой структуры называются внутренние волны, вызывающие флуктуации поля скорости звука. Величина амплитуды относительной флуктуации скорости звука на фиксированной глубине снижается с глубиной. На поверхности она составляет $5\cdot10^{-4}$, на глубине 1 км - $1\cdot10^{-4}$, на 3-4 км - $3\cdot10^{-6}$ (данные приведены для тех флуктуаций, периоды которых лежат в диапазоне от нескольких минут до одних суток, и рассчитаны с помощью спектра внутренних волн) [31].

В настоящее время для учета флуктуации скорости звука широко используется подход с использованием спектра внутренних волн Гаррета-Манка [17,18,86,140]. При моделировании океаническое поле скорости звука рассматривается как сумма детерминированного среднего профиля и стохастическое возмущение, вызванное внутренними волнами:

$$c(r,z,t) = \overline{c}(z) + \delta c(r,z,t),$$

где невозмущенный профиль скорости звука задается аналитически [18,87]

$$\overline{c}(z) = \mathrm{c}_0 \left[1 + \varepsilon \left(e^{2(z_a - z)/z_{th}} + 2\frac{z - z_a}{z_{th}}\right)\right],$$

где c_0 =1,48 км/с, ε =0,00238, z_{th} = 0.485 км, z_0 =0,7 км [18].

Данная запись невозмущенного профиля скорости звука предложена американским исследователем W.Munk для моделирования звукового канала в различных районах Мирового океана [126]. В некоторых работах выражение носит название «канонический профиль Манка» [87].

Моделирование стохастического возмущения δc, вызванного внутренними волнами, может быть выполнено по методу представленному в [86]:

$$\delta \mathrm{c} = \left(\frac{\partial \mathrm{c}}{\partial z}\right)_{pot} \cdot \xi \cong c_0 \frac{\mu}{g} N^2 \xi,$$

где $(\partial c/\partial z)_{pot}$ – потенциальный градиент скорости звука, ξ (x,y,z,t) - смещение частицы жидкости под действием внутренних волн, g – ускорение свободного падения 9,8 м/с^2, μ=24,5 – безразмерная постоянная, N(z) – профиль частоты плавучести. В численном моделировании $\mathrm{N(z)} = N_0 \cdot \mathrm{e}^{-z/B}$, B – толщина волновода, его принимают приблизительно равным 1 км, N_0 = 0,0087 1/с [18,86].

Случайную функцию ξ представляется как суперпозицию мод внутренних волн:

$$\xi(x,y,z,t) = Re\left[\int dk_x dk_y \times \sum_j g\left(j,k_x,k_y\right) W_{jk}(z) e^{j(k_x x + k_y y - \Omega(j,k)t)}\right],$$

где $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ - модуль волнового числа, j – номер моды; W_{jk}(z) – собственные функции, структуры которых определяются профилем частотой плавучести N(z).

Выражения для $W_{jk}(z)$ и $g(j,k_x,k_y)$ (коэффициенты разложения амплитуд мод в интегралы Фурье по горизонтальным координатам) приведены в [86].

Сравнение экспериментов и результатов моделирования акустического поля с использованием параболического уравнения при учете флуктуаций скорости звука с использованием спектра внутренних волн Гаррета-Манка, показало адекватность данного подхода, расхождение результатов моделирования с измеренным уровнем энергии гидрофонами в зоне тени составляло до 3-4 дБ [140].

3.3 Моделирование звуковых полей в случайно-неоднородных подводных волноводах

Морская среда является комбинацией детерминированных и стохастических структур. Основная трудность математического описания таких комбинированных моделей состоит в необходимости совместного рассмотрения регулярных и случайных вариаций поля скорости звука по трасе распространения зондирующего излучения.

Простые теории рассеяния и распространения волн разработаны для регулярных изменений гидрофизических параметров водной среды. Вероятностные модели расчёта разработаны в меньшей степени. Как правило, такие модели заимствованы из радиофизики [63] и основаны на решении волнового уравнения в параболическом приближении и физической модели лучевых трубок [31]. Однако при использовании параболического приближения не выполняется закон Снеллиуса, хотя именно на его основе были объяснены основные закономерности влияния анизотропной случайной компоненты поля скорости звука на зональную структуру акустических полей в реальном океане [28-30]. На основе лучевого приближения показано, что проникновение звука в зоны тени, размытие зон конвергенции и предреверберация - явления одной природы и

вызваны они переотражением и рассеянием лучей на анизотропных мелкомасштабных неоднородностях поля скорости звука.

Модель лучевых трубок предполагает, что случайные флуктуации скорости звука приводят к случайному блужданию лучевых траекторий относительно невозмущенного луча, таким образом, в пространстве формируется лучевая трубка, состоящая из пучка лучей с близкими траекториями. При малых флуктуациях лучевые трубки не пересекаются, при больших – пересекаются, что предполагает различные методы расчёта структуры акустических полей в случайно-неоднородных подводных волноводах (СНПВ) [31].

Появление мощных компьютеров позволило моделировать динамику лучей в реальных моделях СНПВ. Расчёты показали, что даже при слабых флуктуациях поля скорости звука в пространстве не существует пучков лучей с близкими траекториями, объединенных в одну лучевую трубку [77].

Альтернативой аналитическим методам решения стохастического волнового уравнения является исследование зональной структуры акустических полей на основе численного решения уравнения лучевых траекторий в переменном поле скорости звука, полученное непосредственно из принципа Ферма [65]. Такой подход позволяет с единых позиций оценить искажения зональной структуры акустических полей при любых режимах стохастичности гидрофизических параметров водной среды (слабых, сильных и насыщенных флуктуациях поля скорости звука), кроме того, инструмент геометрической акустики является наиболее приемлемым в прикладных задачах акустики океана в силу простоты получения решения и интерпретации результатов, и является до сих пор единственным методом, применимым в случае неразделяющихся переменных, имеющим строгое обоснование как асимптотический метод [49].

Уравнение лучевых траекторий в переменном поле скорости звука, полученное из принципа Ферма, имеет вид

$$c(x,z)\cdot\frac{d^2z}{dx^2}-\left(1+\left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right)\cdot\left(\frac{dz}{dx}\cdot\frac{\partial\ c(x,z)}{\partial\ x}-\frac{\partial\ c(x,z)}{\partial\ z}\right)=0$$

где общая модель поля скорости звука C(x,z) описывается выражением:

$$C(x,z)=C_{дет}(x,z)+\Delta C^{\approx}(x,z)+\Delta C^{=}(x,z),$$

где C(x,z) – вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ), $C_{дет}(x,z)$ – детерминированная компонента ВРСЗ, измеренная в результате гидрологической съемки акватории или полученная на основании исторического массива гидрологических данных; $\Delta C^{\approx}(x,z)$ – случайная компонента для моделирования стохастичности поля скорости звука, $\Delta C^{=}(x,z)$ – детерминированная поправка для моделирования локальных нарушений детерминированной компоненты ВРСЗ, вызванных термоклинными линзами, донными газотермальными источниками или техногенными факторами, x, z – соответственно координаты по дальности и глубине волновода.

Для моделирования стохастичности гидрофизических параметров водной среды может использоваться метод Монте-Карло [65]. Анизотропная стохастичность моделируется путём разбиения вертикальной плоскости модельного волновода на прямоугольные ячейки, в центр которых генератором случайных чисел распределялись максимальные значения $\Delta C^{\approx}(x,z)$. Присвоенное значение $\Delta C^{\approx}(x,z)$ снижалось до нуля к границе ячейки.

Результаты численного эксперимента усреднялись «по пространству»: Метод усреднения «по пространству» заключается в усреднении результатов моделирования по дискретным интервалам глубин прихода лучевых траекторий. Такой подход позволяет оценить структуру звуковых полей подсветки в рамках единой математической модели и выявить основные закономерности влияния случайной компоненты поля скорости звука, при любом уровне стохастичности.

Дискретные по дальности x вертикальные распределения акустического поля (ВРАП) A(n,x) адекватно описывают его зональную структуру:

$$A(n,x) = \frac{L_n(x)}{L \cdot m},$$

где $L_n(x)$ – количество лучей, пришедших в n–ый интервал глубины вертикального разреза, расположенного на расстоянии x от источника за m экспериментов; L – число лучей, вышедших из источника за один эксперимент; m - число проведённых экспериментов. Данная нормировка является одной из модификаций метода согласованного поля, при этом

$$\sum_{n=1}^{N} A(n,x) = 1,$$

где $N = H/\Delta z$ количество эквидистантных дискретных отсчётов ВРАП по глубине z, H – глубина моря в месте расположения вертикального разреза, Δz - интервал усреднения акустического поля по глубине, $n = 1 \div N$ – номер дискретного отсчёта по глубине (дискретная координата глубины), $z = \Delta z \cdot n$ – текущая координата глубины. В данном случае дискретную функцию A(n,x) можно трактовать как распределение вероятности глубин прихода лучевых траекторий при фиксированной дальности x.

Предложенный алгоритм обработки результатов стохастического моделирования является развитием методов расчета акустических полей на основе построения подробной лучевой картины без вычисления амплитуды звукового поля на луче [58].

Процедура вычисления усредненного поля вертикального разреза на фиксированной дальности x в дискретных отсчетах глубины n сводится к простому суммированию лучей, пересекающих n-ый интервал глубины Δz, без вычисления их фактора фокусировки. Такой подход в отличие от классического лучевого метода позволяет корректно вычислить усредненное поле в точках заворота лучей и на каустиках.

3.4 Особенности распространения звука в ледовых условиях

В главе 2 в качестве основного ограничения при проектировании систем мониторинга для арктических морей рассматривалось наличие льда в течение длительного периода в году. Но климатические и географические особенности района оказывают также серьезное влияние и на распространение звука. Район отличается специфическими гидрологическими условиями и шумами, а отражение от ледовой поверхности существенно ослабляет уровень сигнала и снижает дальность действия ГАС.

Гидрологические условия

Данные по гидрологическим параметрам Карского моря, представленные в базе данных Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО), говорят о недостаточной изученности района. Содержится информация всего по нескольким станциям измерений за весь период наблюдений, распределения солености и температуры воды по глубине приведены только для летнего периода, для зимних условий представлены значения до глубин 20-30 м [175]. Возможным объяснением последнего является то, что в зимний период температура воды подо льдом близка к температуре замерзания (-1.7,-1.9°C) и в мелководных районах моря водные массы от поверхности до дна становятся почти однородными и имеют отрицательную температуру, положительная температура наблюдается только в желобах Св. Анны и Воронина (1.0-1.5°C), что обусловлено поступлением в эти районы теплых глубинных атлантических вод [174]. В летний период происходит прогрев неглубокого приповерхностного слоя, однако даже в августе глубже 30 м температура воды ниже нуля (рис. 6 а).

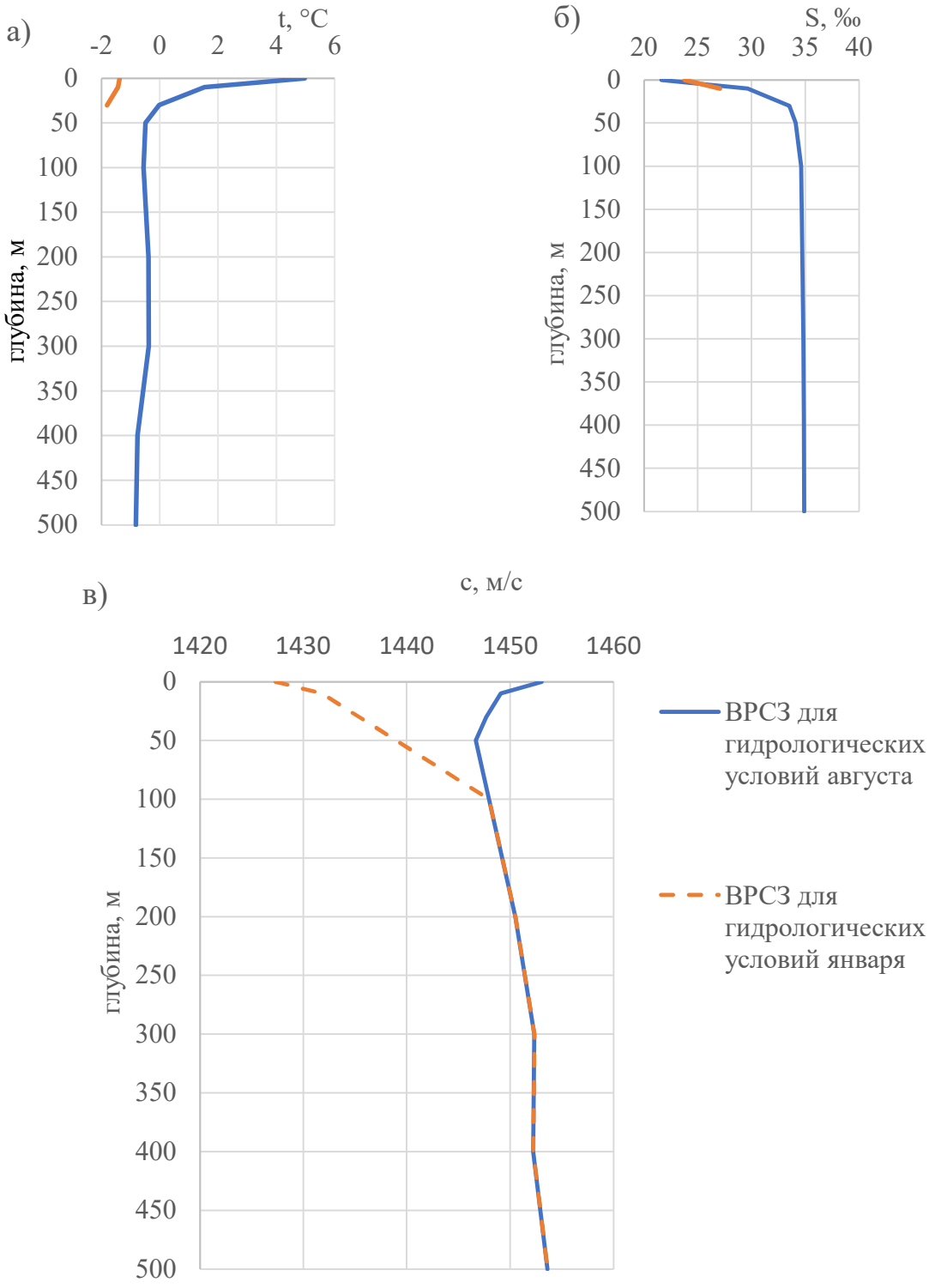


Рисунок 6 - Вертикальное распределение температуры (а), солености (б) и скорости звука в Карском море

В Карское море впадают такие крупные сибирские реки, как Обь и Енисей, что вызывает сильное распреснение в слое до 30 м. Это касается всех сезонов, но наиболее выражено в летний период (в августе среднее многолетнее значение

солености на поверхности составляет 21,6 ‰ (рис. 6, б), в январе – 23,77 ‰). Распределение температуры и солености по глубине для летнего сезона показывает, что глубже 50 м температура практически постоянная, а глубже 100 м аналогичная ситуация и с соленостью воды [175]. При построении ВРСЗ отсутствие данных для зимнего периода компенсировалось предположением о слабой сезонной изменчивости температуры и солености для глубин более 100 м.

Расчет скорости звука в воде производился по формуле Лероя, обеспечивающей точность порядка 0,1 м/с и применимой при t < 20 °C, z < 8000 м:

$$c = 1492{,}9 + 3 \cdot (t - 10) - 0{,}001 \cdot (t - 10)^2 - 0{,}04 \cdot (t - 18)^2 + 1{,}2 \cdot (s - 35) - 0{,}01 \cdot (t - 18) \cdot (s - 35) + \frac{z}{16},$$

где c – скорость звука, м/с; t – температура, °C; s – соленость, ‰; z – глубина, м.

Полученные ВРСЗ показывают, что в зимний период (в Карском море – большая часть года) в приповерхностном слое наблюдается повышение скорости звука с глубиной (слой положительного скачка скорости звука), что соответствует явлению положительной рефракции (рис.6.в).

В летний период возможно формирование ПЗК с осью на глубине порядка 50 м, обусловленное прогревом поверхностного слоя воды и уменьшением скорости звука с глубиной в верхних слоях, а также увеличениям скорости звука за счет роста гидростатического давления ниже оси ПЗК.

Гидрологические условия Охотского моря изучены существенно лучше по сравнению с Карским морем. При этом доступны данные только за месяцы июнь-ноябрь. В качестве модельного выбран квадрат 20204, расположенный вблизи северо-восточного побережья о. Сахалин, где располагаются шельфовые месторождения углеводородов, в т.ч. Киринское (рис.7) [175].

Данные по солености и температуре приведены до глубин 100-150 м, для более глубоких слоев скорость звука рассчитана, исходя из предположения о слабой изменчивости в более глубоких слоях (рис. 7). В летние месяцы

наблюдается существенный прогрев приповерхностного слоя воды на 10-20 м с образованием ПЗК с осью на глубинах 50-75 м. В зимний период от поверхности до глубины 75 м скорость звука почти постоянная с небольшим ростом (положительная рефракция), ось ПЗК на глубине 100 м.

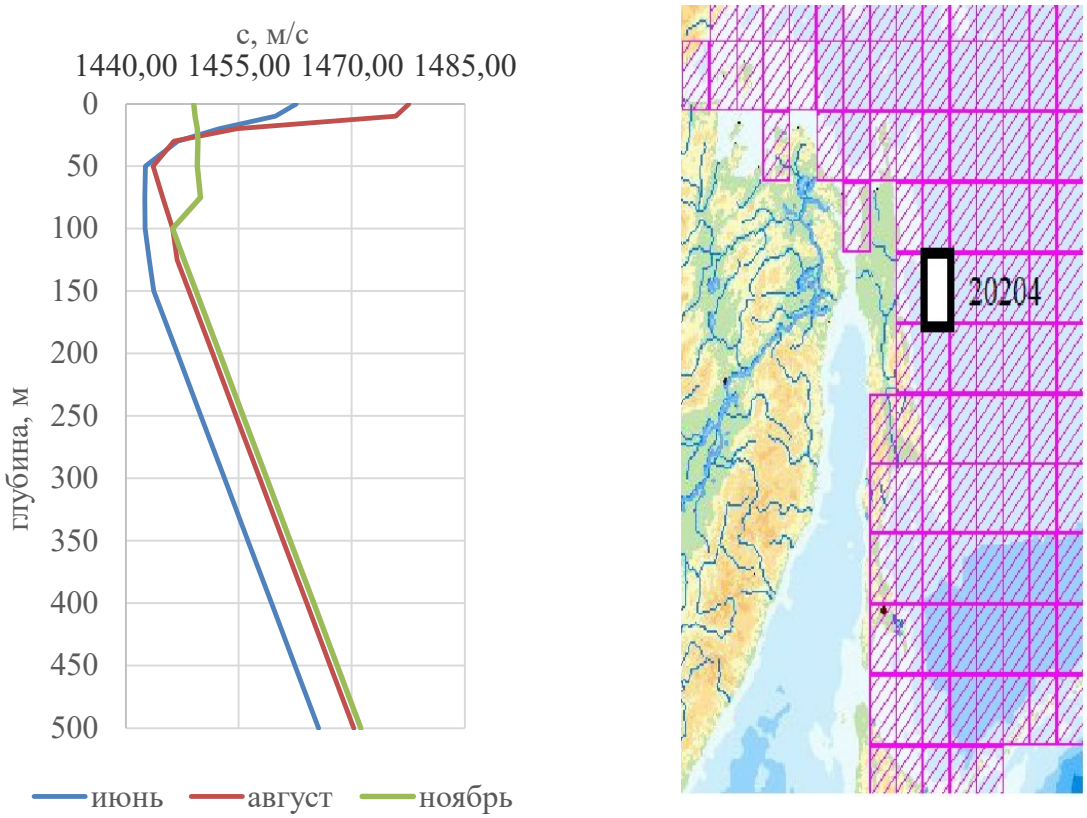


Рисунок 7 - ВРСЗ для гидрологических условий Охотского моря вблизи северо-восточного побережья о. Сахалин

Таким образом, для зимних гидрологических условий, как в Карском, так и на прилегающей к Сахалину акватории Охотского моря, при распространении звука наблюдается положительная рефракция. В данных условиях при расположении источника звука вблизи поверхности наблюдается максимальная концентрация звуковой энергии вдоль границы раздела воздух-вода и образование сплошной зоны акустической освещенности в значительном по толщине слое. В летний период условия для распространения звука более благоприятные, поскольку формируется ПЗК.

Влияние ледовой поверхности на распространение звука

Исследованием влияния ледовой поверхности на распространение звука в воде занимаются как отечественные, так и зарубежные учёные. Разрабатываются модели, позволяющие учитывать форму границы раздела лед-вода, коэффициент отражения, плотность и структуру льда. Важность учета этих параметров обусловлена тем, что под поверхностью льда вода менее соленая и имеется ярко выраженный температурный градиент по глубине. Это приводит к образованию приповерхностного звукового канала с многочисленным отражением звуковых волн от границы, т.е. дополнительным потерям на распространение.

Потери на распространение являются основным фактором, определяющим возможность работы гидроакустических средств на заданной дистанции от источника звука с известным SNR - отношением сигнала/помех на приемнике. Согласно уравнению гидролокации [69]:

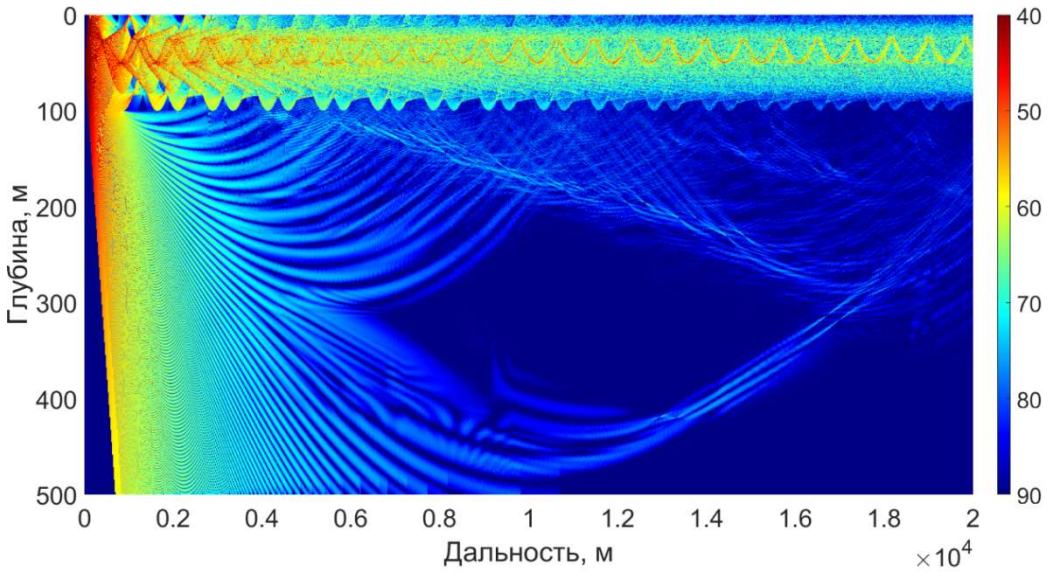
$$\mathrm{SNR} = \mathrm{SL} - \mathrm{TL} - \mathrm{NL} + \mathrm{DI},$$

где SNR - отношение сигнала/помех на приемнике, SL - уровень источника, TL - потери на распространение, NL - уровень шума, DI – коэффициент, учитывающий направленность. Все величины выражаются в децибелах.

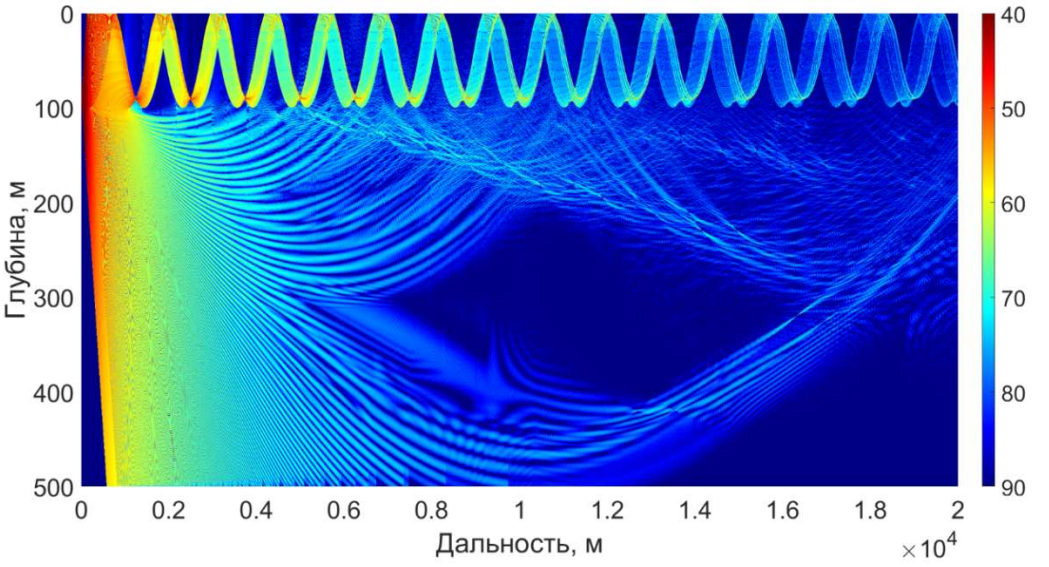
Для шельфовой зоны используется цилиндрическое приближение для расчета потерь на распространение [69]:

$$\mathrm{TL} = 10\log \mathrm{d} + \alpha \mathrm{d} \times 10^{-3},$$

где d - расстояние между источником и приемником (м), а α - коэффициент поглощения среды (дБ/км), зависящий от частоты. Уравнение показывает, что передаваемый акустический сигнал теряет энергию при прохождении через среду, главным образом из-за затухания, зависящего от расстояния, и поглощения, имеющего частотную зависимость.



а)



б)

Рисунок 8 – Потери на распространение для зимних гидрологических условий Карского моря при расположении источника на глубине 50 (а) и 90 (б) м

На рис. 8 в качестве примера приведены результаты расчета потерь на распространение для зимних гидрологических условий Карского моря для источника звука с частотой 12 кГц при расположении на глубине 50 и 90 м (рис. 8 а и рис. 8 б соответственно), полученные в процессе диссертационного исследования. На графиках видно формирование приповерхностного канала с многочисленными отражениями от границы раздела лед-вода в условиях

положительной рефракции. Расчет производился с использованием программы BELLHOP [132].

Существуют различные подходы к учету влияния льда на распространение звука. В [119], например, предлагается для трехслойной системы вода-лед-воздух найти коэффициенты отражения и прохождения, которые в дальнейшем используются при моделировании на основе лучевого приближения. Для этого рассматривается потенциал звукового поля в трех средах и задаются граничные условия на границах раздела сред вода-лед, лед-воздух. В слое льда учитывается продольные и сдвиговые волны. Полученное выражение для коэффициента отражения зависит от частоты источника звуковых волн, угла падения на границу и толщины слоя льда. Приведенные результаты моделирования показывают, что учет наличия волн сдвига в ледовом слое оказывает незначительное влияние на потери на распространение звука в водной среде [119].

Взаимодействия звука с ледяным покровом имеет выраженную частотную зависимость [43]. На низких частотах, когда длина звуковой волны больше толщины льда, слой льда может рассматриваться как тонкая пластина, лежащая на жидком полупространстве. При отражении от границы раздела сред вода-лед коэффициент отражения близок по модулю к единице и процесс аналогичен отражению от свободной поверхности моря. На частотах, когда длина волны соизмерима с толщиной льда (соответствует частотам в единицы килогерц и выше), необходимо учитывать физические свойства ледяного покрова, а лед рассматривается как слой конечной толщины. Для более высоких частот длина волны становится соизмерима с размерами неровностей нижней кромки льда, которые начинают играть решающую роль при рассеянии звука от льда [43].

Учет неровностей нижней границы льда производится с использованием статистических моделей. В [134] исследовалось влияние льда на распространение звука в мелком море на примере Балтийского моря. Неровности моделировались изменением глубины расположения нижней границы льда по нормальному распределению в пределах от 0,8 до 1,2 м со средним значением 1 м. Сравнивались

результаты расчетов потерь на распространение для лучевой и волновой модели для плоской границы раздела вода-лед и с неровной поверхностью для лучевой модели. При наличии неровной поверхности льда наблюдаются большие потери на распространение, чем при ровной.

В [46] при расчете потерь на распространение используются экспериментальные профили нижней границы льда, с дальнейшим усреднением потерь для разных профилей. Также при моделировании учитывалось наличие слоя донных газонасыщенных осадков, что актуально для арктических морей. Результаты моделирования показали увеличение потерь при распространении звука для неровной нижней границы льда на менее чем 1,5 дБ на расстоянии 10 км при частоте излучаемого сигнала 100 Гц.

Шум в ледовых условиях

В общем случае источниками шумов являются волнение, судоходство, ветер, осадки, сейсмоактивность, а также биологический шум. Уровень шумов в прибрежной шельфовой зоне может достигать существенных значений. Например, по результатам измерений усредненный спектральный уровень гидроакустических шумов вблизи океанариума г. Владивостока, о. Русский, на частоте 1 кГц в полосе 1 Гц составлял 70-80 дБ относительно 1 мкПа [101], что соответствуют максимальным уровням шумов судоходства [121].

В Арктике уровень фонового шума обычно ниже, чем в других регионах Мирового океана, т.к. за счет льда отсутствуют шумы, обусловленные волнением, ветром, осадками, ниже шумы судоходства [35]. Вместе с тем, существуют подледные шумы, источниками которых является термическое растрескивание льда, трение льдин и ледовых полей, перемещение снега по поверхности. Поверхностное растрескивание льда наблюдается при низких температурах и приводит к возникновению импульсных колебаний, максимум спектральных уровней отмечается в диапазоне частот 100-300 Гц [38]. Спектры подледных шумов

занимают диапазон от 0,06-1 кГц (растрескивание льда) до 1-10 кГц (шумы из-за взаимодействия ветра со льдом) [70].

Для расчетов уровень шума для шельфовой зоны можно принять равным 70 дБ [131]. В качестве порогового значения для современных гидроакустических приемников SNR≥15 дБ. В общем случае для ненаправленных гидрофонов DI=0. Исходя из этого, уровень источника должен быть выше уровня потерь на распространение минимум на 85 дБ.

3.5 Исследование зависимости расположения границ зон конвергенции в океанических волноводах от уровня случайной компоненты поля скорости звука

Описанный в [65] подход на основе численного решения уравнения лучевых траекторий в переменном поле скорости звука, был выбран для исследования зависимости зональной структуры акустического поля в зависимости от уровня случайной компоненты поля скорости звука ($\Delta C^{\approx}(x,z)$) [40,112-114] и разработки экспериментально-теоретического метода определения режимов стохастичности поля скорости звука.

Приведенные в [65] результаты численного эксперимента, показывают, что наибольшие изменения вида ВРАП при увеличении $\Delta C^{\approx}(x,z)$ происходят на дальностях, соответствующих координатам границ между верхними и нижними зонами конвергенции (ЗК), наименьшие – на дальностях, соответствующих координатам центров ЗК. По характеру изменения вида функций ВРАП на границах между верхними и нижними ЗК возможна косвенная классификация режимов стохастичности параметров водной среды в СНПВ. Наиболее чётко выделяются три режима – режим слабых флуктуаций, режим сильных флуктуаций и режим насыщения.

В [65] рекомендуется системы подводного мониторинга, использующие методы гидролокации на просвет, располагать на акваториях со слабым $\Delta C^{\approx}(x,z)$, причём приёмные системы должны размещаться на границах между верхними и нижними ЗК, которые являются наиболее чувствительными к природным или техногенным нарушениям детерминированной компоненты ВРСЗ $\Delta C^{=}(x,z)$.

На первом этапе работы для оценки зависимости координат максимумов функций ВРАП от $\Delta C^{\approx}(x,z)$ на дальностях, соответствующих центрам верхних и нижних зон конвергенции (ВЗК и НЗК) был проведен компьютерный эксперимент с использованием программы для расчета зональной структуры акустических полей в стохастических подводных волноводах, разработанной в ДВФУ [66]. Обработка и систематизация промежуточных результатов выполнялась с использованием специально разработанной программы [67].

Моделирование проводилось для океанического волновода с ВРСЗ, представленном на рис. 9, ось подводного звукового канала расположена на глубине 1000 м. Длина полигона составляет 145 км и позволяет рассматривать четыре зоны конвергенции, глубина - 2000 м. Источник излучения располагался на глубине 300 метров, угол раскрыва источника ±5,7°, что соответствовало водному распространению лучевых траекторий без переотражения от дна и поверхности модельного волновода для всех выбранных значений случайной компоненты поля скорости звука, дискретность выхода лучевых траекторий равна 0,1 градуса.

Полигон разбит на прямоугольные ячейки с размерами 25 м по глубине и 500 м по дальности; случайная компонента поля скорости звука $\Delta C^{\approx}(x,z)$ дискретно изменялась от 0,05 до 0,45 м/с. Для каждого значения $\Delta C^{\approx}(x,z)$ было проведено по 1000 экспериментов. Интервал усреднения поля по глубине $z = \Delta z \cdot n$, Δz=50 м.

На рис.9 представлена зональная структура акустического поля для детерминированного модельного океанического ВРСЗ, на рис. 10 приведены зависимости относительного смещения по дальности координат максимумов ВРАП для 2-4 верхних и нижних зон конвергенции от $\Delta C^{\approx}(x,z)$, полученные в результате моделирования.

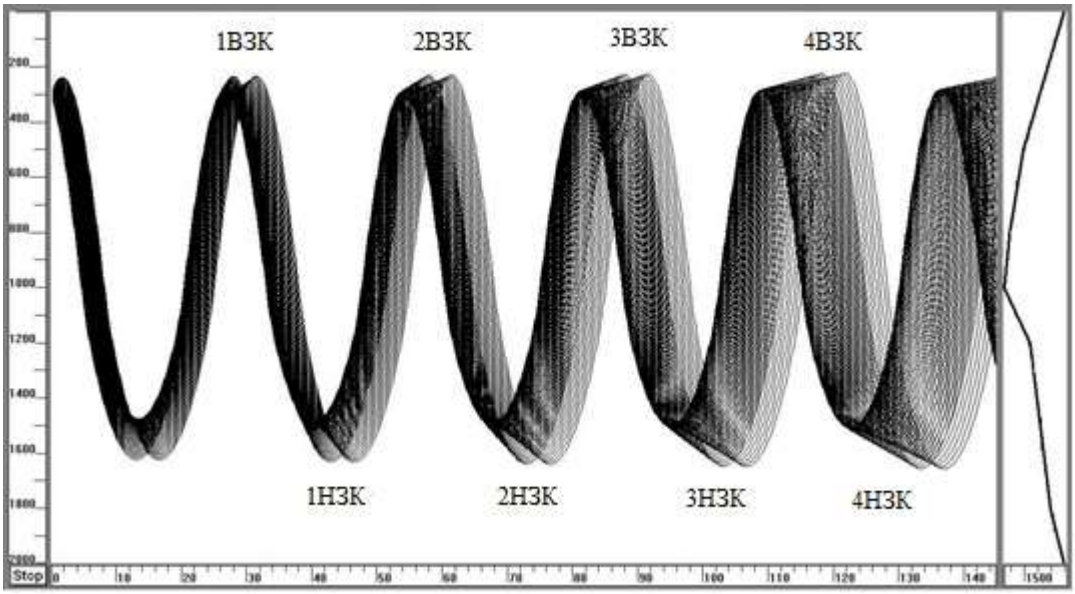


Рисунок 9 – Зональная структура акустического поля при $\Delta C(x,z) = 0$, в правой части рисунка изображена детерминированная компонента ВРСЗ по трасе распространения зондирующего излучения. Цифрами на рисунке обозначены номера верхних и нижних зон конвергенции

Максимумы ВРАП верхних зон конвергенции расположены на глубине 300 м, а нижних зон конвергенции на глубине 1550 м. Результаты компьютерного моделирования показали, что при увеличении $\Delta C^{\approx}(x,z)$ координаты максимумов ВРАП удаляются от источника звука по сравнению с детерминированной гидрологией (рис. 10) [112].

При проведении компьютерного эксперимента по определению координат максимумов ВРАП дискретность по дальности была выбрана 50 м. Зависимости, изображенные на рис. 10 были аппроксимированы по линейному закону, для третьей и четвёртой зон конвергенции величина достоверности аппроксимации не менее 0,97.

На основе полученных результатов моделирования и предложенной в [65] методики косвенной классификация режимов стохастичности, на дальности, соответствующей границе между 3В3К и 3Н3К режим слабых флуктуаций соответствует $\Delta C^{\approx}(x,z) \leq 0{,}35$м/с, 4В3К и 4Н3К – $\Delta C^{\approx}(x,z) \leq 0{,}18$м/с.

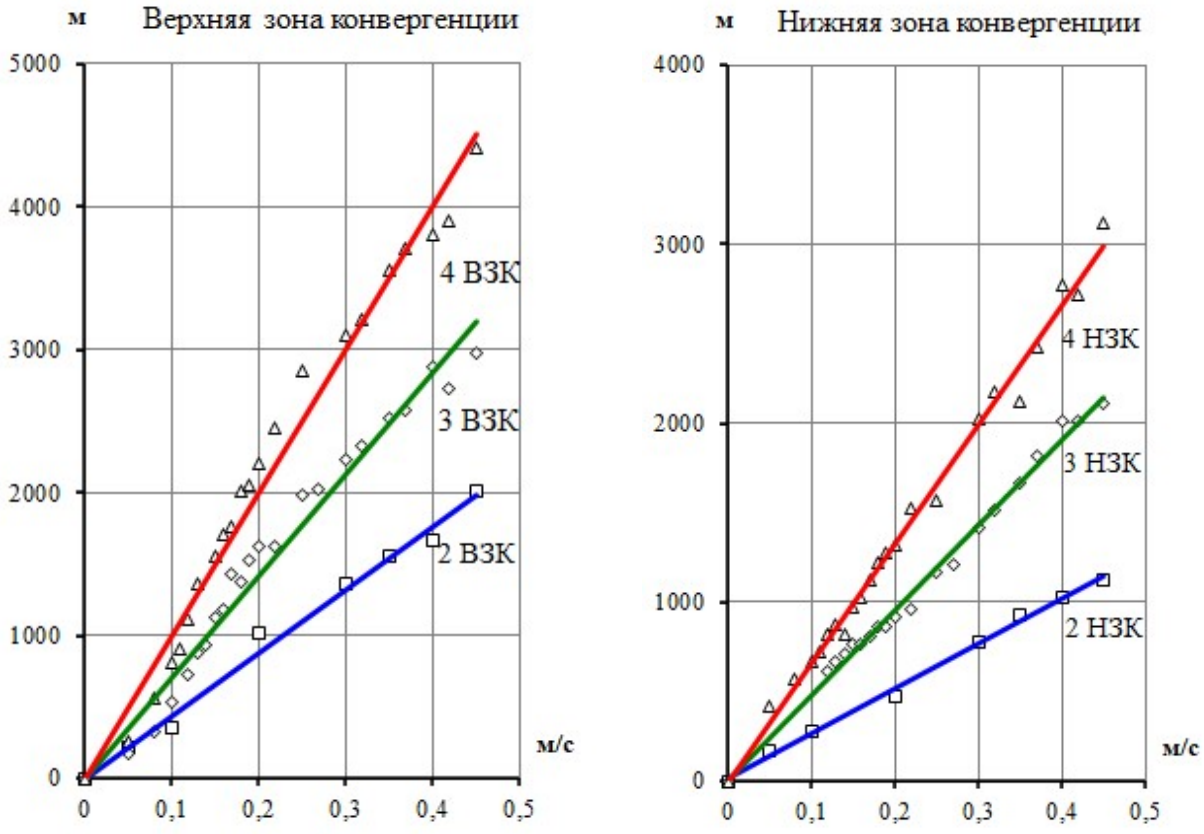


Рисунок 10 – Относительное по отношению к детерминированной гидрологии смещение координат максимумов ВРАП верхних и нижних зон конвергенции в зависимости от уровня случайной компоненты поля скорости звука

При выборе других размеров прямоугольных ячеек, моделирующих анизотропность случайной компоненты поля скорости звука, значения $\Delta C^{\sim}(x,z)$, определяющие границы режимов слабых и сильных флуктуаций, были бы иными. Кроме того, в реальных подводных волноводах масштабы стохастичности, как по глубине, так и по дальности, не остаются постоянными. В этой связи границы режимов стохастичности подводных акваторий предлагается определять по величине относительного смещения координат по дальности максимумов ВРАП. Так, например, режиму слабых флуктуаций на границе между 3ВЗК и 3НЗК соответствует $\Delta C^{\sim}(x,z)=0{,}35$м/с, при этом относительное смещение координаты максимума ВРАП 3НЗК при данной стохастичности равна 1650 м. Для 4ВЗК аналогичные значение равно 3550 м. Следовательно, если в натурном эксперименте относительное смещение координаты максимума ВРАП 3НЗК меньше 1650 м, то

на дальности, соответствующей границе между 3ВЗК и 3НЗК, можно размещать приёмную систему подводного мониторинга, что заведомо соответствует режиму слабых флуктуаций в зоне приёма.

С точки зрения технической реализации предлагаемого метода предпочтительнее проводить измерение относительного смещения координат максимумов ВРАП для верхних зон конвергенции, расположенных на меньших глубинах. В этом случае если в натурном эксперименте относительное смещение координат максимума ВРАП 4ВЗК меньше 3550 м, то на дальности, соответствующей границе между 3ВЗК и 3НЗК, уровень природной стохастичности также не превышает границ режима слабых флуктуаций. Аналогичным образом можно определить режим флуктуаций поля скорости звука на границе между 4ВЗК и 4НЗК по значениям относительного смещения координат максимума ВРАП.

Предложенный подход по определению режимов стохастичности гидрофизических параметров водной среды и методика проведения компьютерных экспериментов показывают принципиальную возможность создания экспериментально-теоретического метода районирования акваторий по уровню стохастичности поля скорости звука с целью выбора оптимальных мест расположения и конфигурации систем подводного мониторинга различного назначения. Случайную компоненту поля скорости звука по трассе распространения зондирующего излучения в системе единого времени измерить невозможно, в то время как измерение относительного смещения координат максимумов ВРАП может быть реализовано с помощью технических средств в условиях натурного эксперимента.

Как отмечалось в разделе 3.2, неоднородности тонкой структуры океанической среды наиболее ярко проявляются в несовпадении пространственного распределения акустического поля, прогнозируемого с использованием различных расчетных моделей, и полученного в результате морских экспериментов. Во многих работах приводятся данные о смещение границ

ЗК [9-13]. Поэтому для оценки значения $\Delta C^{\sim}(x,z)$ конкретного района помимо смещения координат максимумов ВРАП, целесообразно рассмотреть изменение границ ЗК. Численное моделирование проводилось для Гвианского района Атлантического океана, т.к. по нему доступны данные измерений смещения ближней границы первой зоны конвергенции и ВРСЗ, полученные сотрудниками Акустического института им. Н.Н. Андреева во время экспериментальных исследований [21].

Исходные данные для численного моделирования выбраны следующие: длина полигона – 240 км, источник излучения на глубине 200 м. Угол раскрыва источника ±8° с дискретностью выхода лучевых траекторий равной 0,05°, что соответствовало водному распространению лучевых траекторий без переотражения от дна и поверхности для всех выбранных значений $\Delta C^{\sim}(x,z)$. Для моделирования мелкомасштабных неоднородностей скорости звука полигон разбит на прямоугольные ячейки с размерами 25 м по глубине и 500 м по дальности. Случайная компонента поля скорости звука $\Delta C^{\sim}(x, z)$ дискретно изменялась от 0,05 до 0,40 м/с. Для каждого значения $\Delta C\approx(x, z)$ было проведено по 1000 экспериментов.

Зональная структура акустического поля исследовалась с дискретностью по дальности 100 м в диапазоне 44–64 км, что соответствовало расположению первой зоны конвергенции. Интервал усреднения акустического поля по глубине был выбран 10 м. Расчет производился в программе «Моделирование распространения звука в двумерно-неоднородных подводных волноводах в лучевом приближении» [36]. Программа позволяет моделировать и исследовать основные закономерностей формирования звуковых полей подсветки водной среды в условиях мелкомасштабных неоднородностей поля скорости звука. При формировании поля скорости звука могут быть заданы произвольные случайные возмущения в сочетании с регулярными изменениями по глубине и по дальности. Также в программе предусмотрена возможность создания особых локальных возмущений, моделирующих газотермальные источники и термоклинные линзы; возможность

задания глубины и рельефа дна, положения источника излучения и диапазона углов выхода лучей из источника.

Результаты моделирования показывают, что при увеличении $\Delta C^{\approx}(x,z)$ координата начала первой зоны конвергенции смещается к источнику, в то время, как координата конца первой зоны конвергенции смещается от источника (рис. 11). Таким образом, с увеличением уровня случайной компоненты поля скорости звука наблюдается расширение зоны конвергенции. Зависимости смещения границ и ширины ЗК носит линейный характер, как для глубины близкой к глубине расположения источника звука, так и на больших глубинах.

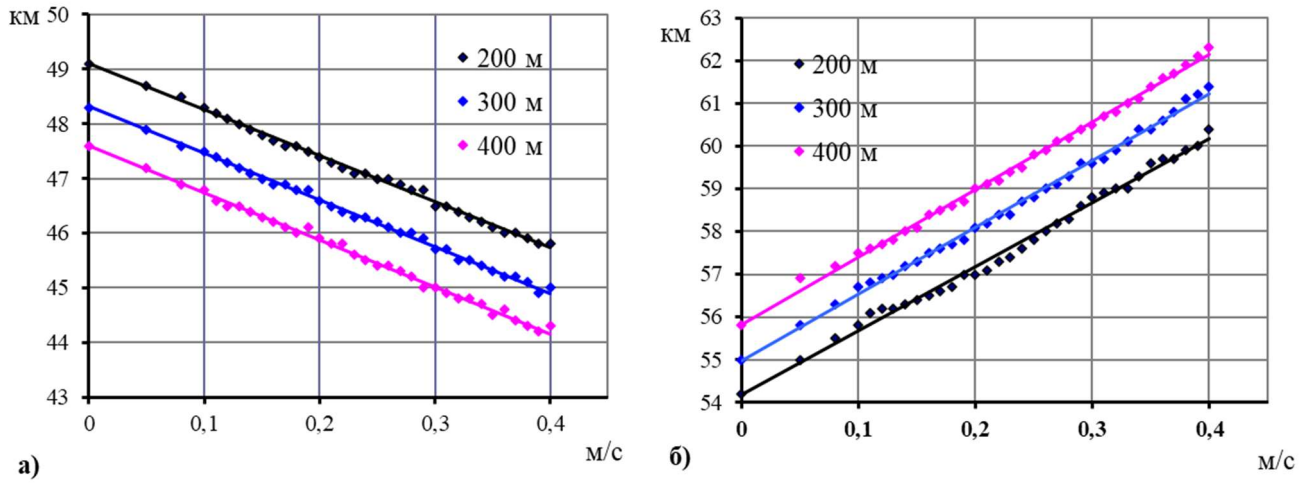


Рисунок 11 - Динамика изменения координат ближней (а) и дальней (б) границ первой зоны конвергенции от уровня случайной компоненты поля скорости звука на горизонтах 190, 300 и 400 м по результатам численного моделирования

Согласно результатам морского эксперимента, на глубине приёма 190 м начало первой зоны конвергенции ближе к источнику на $\Delta x \approx 2$ км по сравнению с рассчитанной для невозмущенной гидрологии [21]. Такому значению абсолютного смещения границ начала первой зоны конвергенции, полученному методами стохастического моделирования, соответствует уровень случайной компоненты поля скорости звука 0,23 м/с (рис. 12). Абсолютное смещение конца первой зоны конвергенции для $\Delta C(x,z)=0,23$ м/с составляет 3,6 км.

Сравнение с экспериментальными данными не было проведено, так как в работе [21] они не представлены.

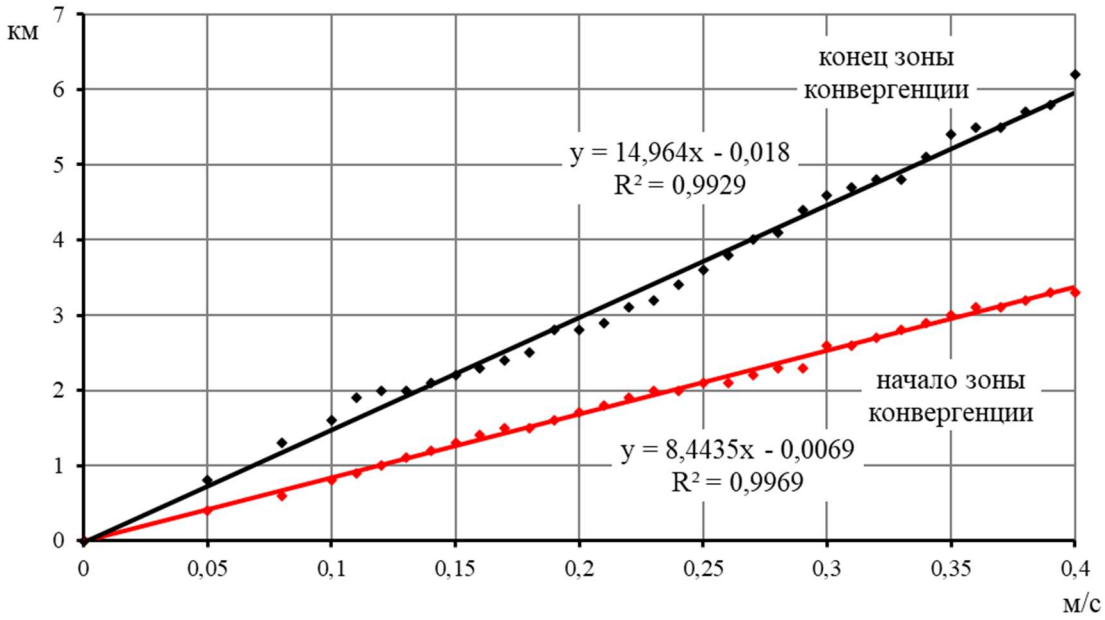


Рисунок 12 - Зависимость абсолютного смещения границ первой зоны конвергенции от уровня случайной компоненты поля скорости звука на горизонте 190 м по результатам численного моделирования

Результаты моделирования показали, что с ростом номера зоны конвергенции увеличение абсолютных значений смещения координат границ зон конвергенции для одних и тех же $\Delta C^{\approx}(x, z)$ происходит более резко (рис.13). Характер и тип изменений остается аналогичным, как и для первой ЗК. Это может быть объяснено тем, что с увеличением дальности амплитуда случайных отклонений лучевых траекторий от невозмущенного луча увеличивается, в том числе и за счёт рефракции. Лучи, формирующие ближние границы ЗК, распространяются от дна к поверхности моря, происходит засветка зон тени вверх от «разрешенного» диапазона глубин прихода лучевых траекторий гладким профилем скорости звука. Дальние границы ЗК формируются лучами, распространяющимися от поверхности моря к дну. Происходит засветка зон тени вниз и за счёт этого координаты дальних границ ЗК сдвигаются в сторону увеличения.

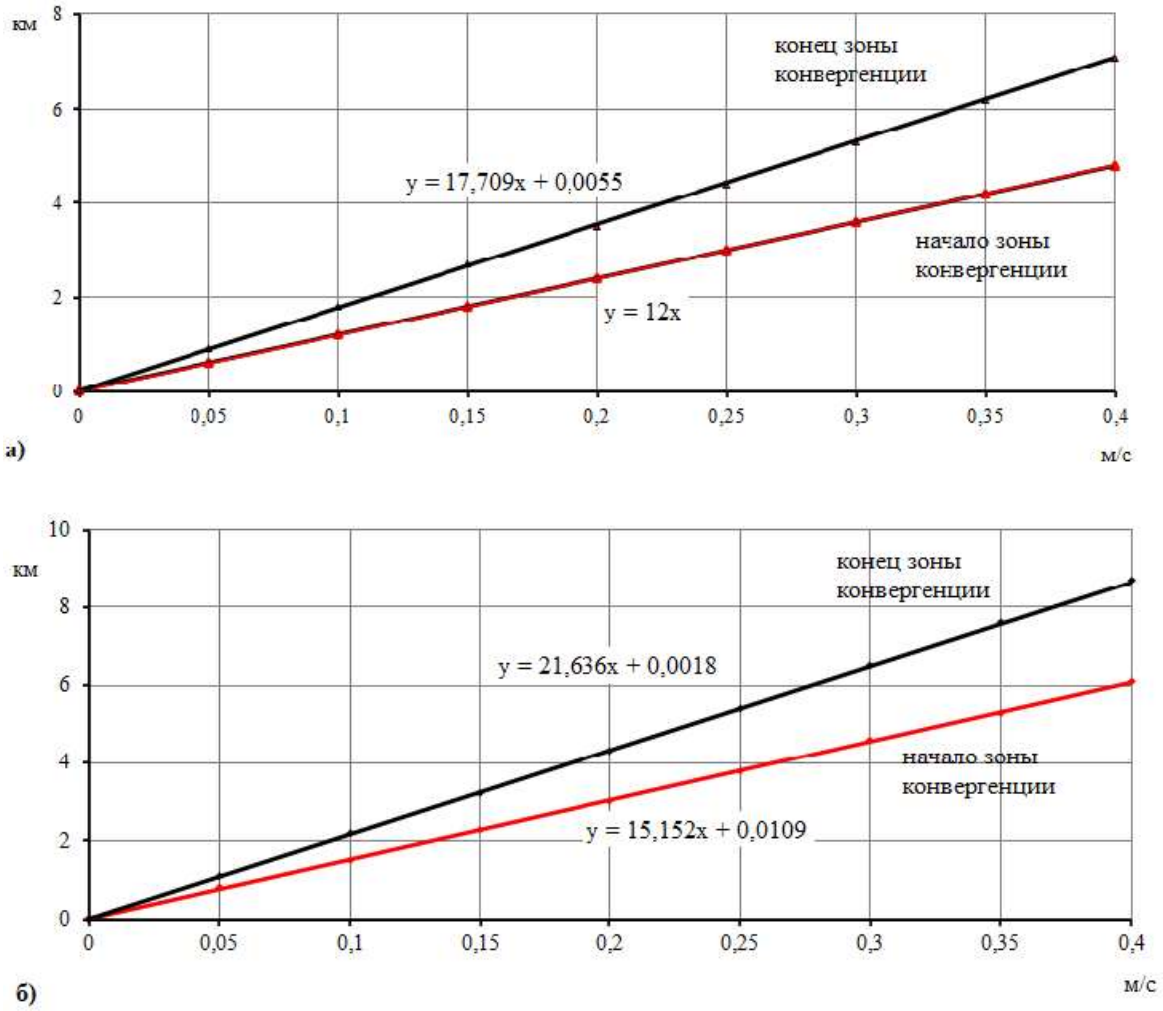


Рисунок 13 - Зависимость абсолютного смещения границ второй и третей зон конвергенции от уровня случайной компоненты поля скорости звука на горизонте 190 м по результатам численного моделирования

Приведенные результаты исследования влияния мелкомасштабных неоднородностей водной среды на структуру акустических полей получены для гидрологических условий одного из районов Атлантического океана. Характерной особенностью океанических волноводов является расположение оси подводного звукового канала на глубинах порядка 1-1,2 км. В проведённых численных экспериментах использовалось ВРСЗ, полученное на основе измерений с осью ПЗК на глубине порядка 800 м [21]. Для оценки влияния формы ВЗК было проведено моделирования для канонического профиля Манка [18,126], характерного для

условий Тихого океана [91], с осью ПЗК на глубине 1400 м (рис.14). Прочие исходные данные для численного моделирования были идентичны тем, для которых проведены расчеты для Атлантического океана.

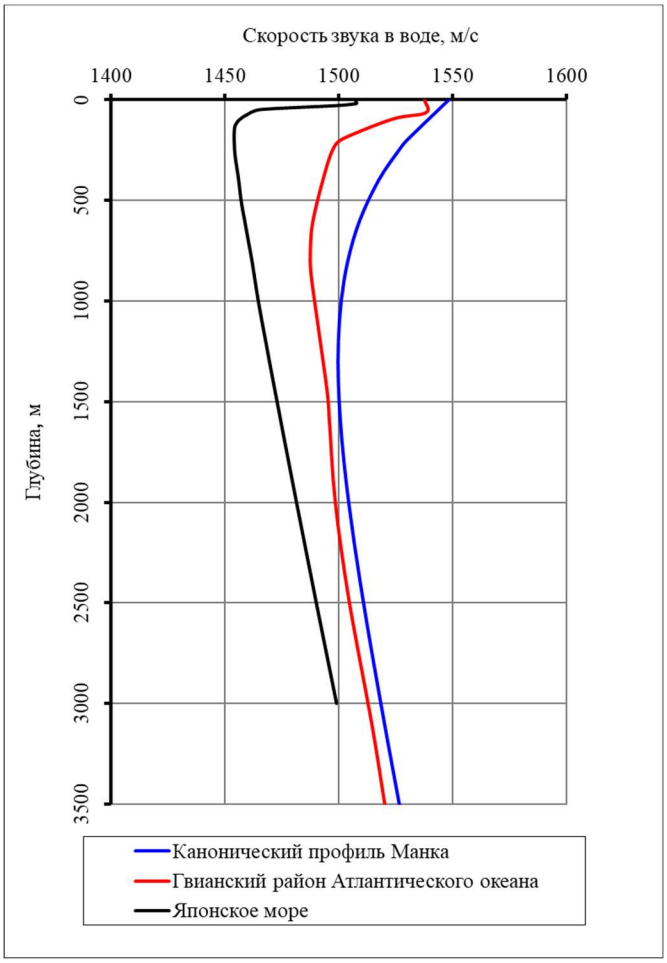


Рисунок 14 – ВРСЗ для районов Мирового океана, для которых проводились численные эксперименты

Полученные аналитические зависимости абсолютного приращения ширины верхних зон конвергенции в зависимости от уровня случайной компоненты поля скорости звука приведены на рис. 15 [113]. Абсолютное приращение ширины верхних зон конвергенции при фиксированных значениях случайной компоненты поля скорости звука в Атлантическом океане оказались больше, чем в Тихом. При этом градиент гладкого профиля скорости звука по глубине над осью подводного звукового канала больше в Атлантическом океане. Следовательно, абсолютные приращения ширины зон конвергенции зависят не только от уровня

стохастичности параметров водной среды, но и от величины градиента гладкого профиля скорости звука на глубинах выше оси подводного звукового канала.

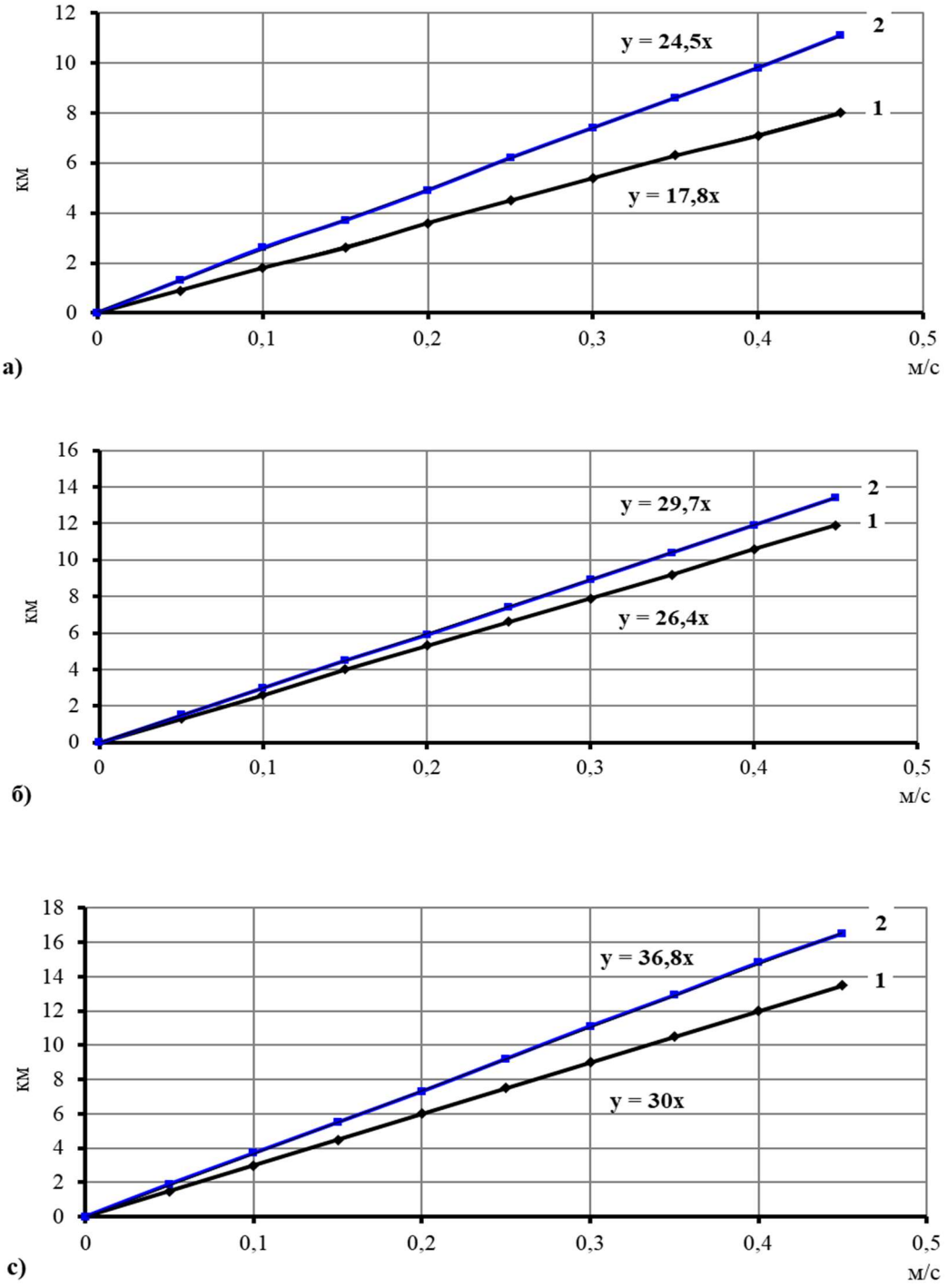


Рисунок 15 - Абсолютные приращения ширины зон конвергенции: (a) первая зона конвергенции, (b) вторая зона конвергенции, (c) третья зона конвергенции 1 – Тихий океан, 2 – Атлантический океан

3.6 Экспериментально-теоретический метод определения режимов стохастичности поля скорости звука

Возможность определения $\Delta C\tilde{}(x, z)$ путем сопоставления результатов моделирования и морского эксперимента по определению границ ЗК, а также то, что акустического поля на ближних границах ЗК формируются лучами, идущими от дна к поверхности, а на дальних границах – от поверхности ко дну, можно использовать для определения режима стохастичности поля скорости звука рассматриваемого района. В свою очередь знание режимов стохастичности поля скорости звука может быть использовано при проектировании систем мониторинга методами просветной гидролокации для обнаружения локальных нарушений поля скорости звука различной природы на фоне природной стохастичности параметров водной среды для выбора оптимальным мест расположения приемных антенн [65].

Приведенные ранее результаты моделирования акустического поля были получены для океанических волноводов. Это было обусловлено наличием необходимых для решения поставленных задач экспериментальных данных по Атлантическому океану. На практике больший интерес представляют моря, где помимо судоходства и рыболовства развивается добыча полезных ископаемых и аквакультура, на побережье расположены крупные города и сосредоточена значительная часть населения.

Из российских морей в качестве перспективного для размещения систем мониторинга акваторий, в т.ч. методами просветной гидролокации, можно рассматривать Японское море. Сложные гидродинамические процессы создают предпосылки для образования многочисленных поверхностных вихрей в Японском море, которые хорошо заметны на инфракрасных спутниковых снимках [45,52,59,60,107], а также внутритермоклинных линз [45,100]. Внутритермоклинные линзы (далее, линзы) – это мезомасштабные локальные неоднородности, характеризующиеся наличием ярко выраженного ядра, с гидрологическими параметрами (температура, соленость, плотность)

отличающимися от окружающей среды. Используя линзы, как модель, можно оценить влияние локальных неоднородностей поля скорости звука на структуру акустического поля.

Для моделирования использовались данные о вертикальном распределении скорости звука района Японского моря с глубинами порядка 3000 м, размещенные на сайте Межведомственной информационной системы для доступа к ресурсам морских информационных систем и комплексного информационного обеспечения морской деятельности (ЕСИМО) (рис. 16) [175]. Ось ПЗК расположена на глубине 200 м, на глубинах от поверхности до 20-30 метров наблюдались повышенные значения скорости звука за счет сильного прогрева приповерхностного слоя воды (осенний сезон – октябрь). Градиент скорости звука в термоклине в среднем равен 0,3 1/с.

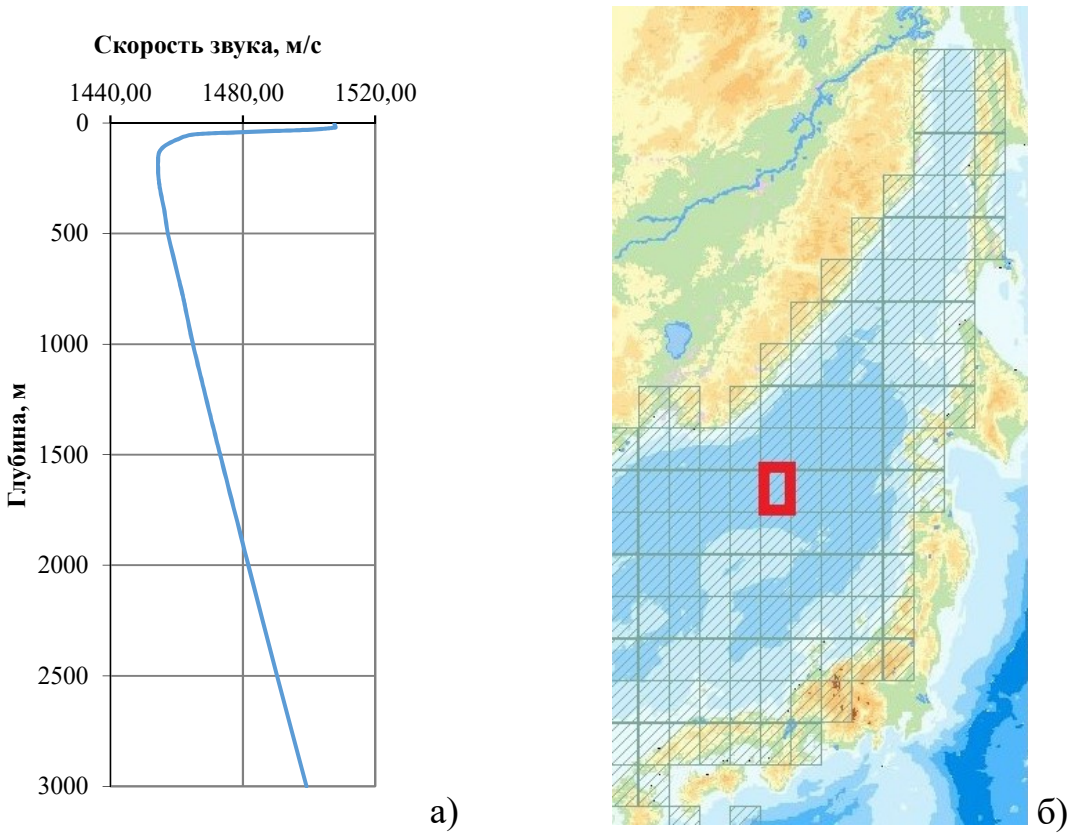


Рисунок 16 - Вертикальное распределение скорости звука – a, схема района – b [175]

Исходные данные: длина полигона – 120 км; источник излучения расположен

выше оси подводного звукового канала на глубине 50 м; угол раскрыва источника ±6° соответствует водному распространению лучевых траекторий без переотражения от дна и поверхности для всех выбранных значений случайной компоненты поля скорости звука; дискретность выхода лучевых траекторий равна 0,02°.

Случайная компонента поля скорости звука $\Delta C^{\sim}(x, z)$ изменялась от 0 до 0,3 м/с с дискретностью 0,01 м/с. Для каждого значения $\Delta C \approx (x, z)$ было проведено по 1000 экспериментов. При проведении численного моделирования использовалась программа «Моделирование распространения звука в двумерно-неоднородных подводных волноводах в лучевом приближении» [36], зональная структура акустического поля, рассчитанная с ее помощью, представлена на рис. 17.

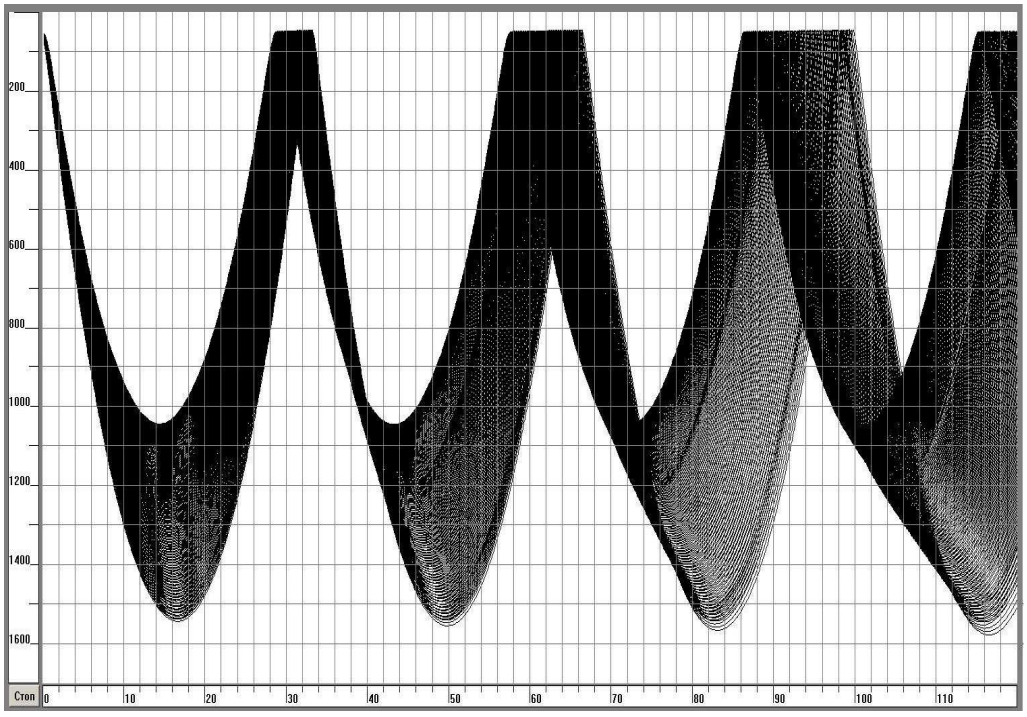


Рисунок 17 - Зональная структура акустического поля для детерминированной гидрологии Японского моря

На основании результатов моделирования были получены зависимости изменения абсолютного приращения координат ближних и дальних границ первых трех зон конвергенции относительно детерминированной гидрологии (рис. 18). По

оси ординат отложены значения уровня случайной компоненты поля скорости звука, а по оси абсцисс – абсолютное приращение координат границ зон конвергенции на глубине расположения источника. Для определения границ зон конвергенции использовано пороговое значение амплитуды акустического поля в относительных единицах (принято 0,0005).

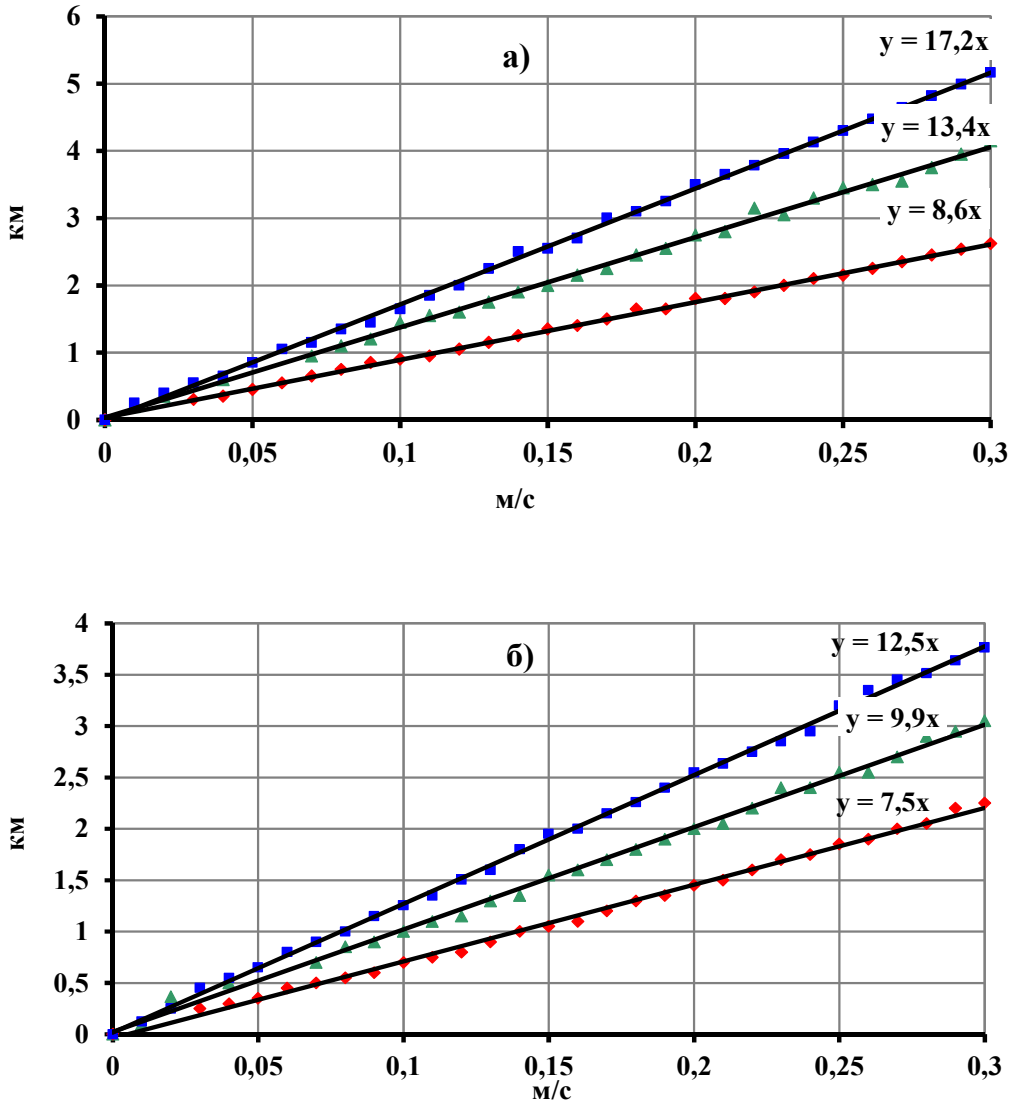


Рисунок 18 - Изменение абсолютного приращения координат ближних (а) и дальних (б) границ первых трех зон конвергенции относительно детерминированной гидрологии. Красный цвет - первая зона конвергенции, зелёный цвет - вторая зона конвергенции, синий цвет - третья зона конвергенции

Численные эксперименты по определению динамики изменения ближних и дальних границ ЗК на глубине расположения источника в зависимости от $\Delta C^{\approx}(x, z)$ дали аналогичные результаты, что и для проведенных ранее для гидрологических условий Атлантического океана: ближние границы ЗК при увеличении $\Delta C^{\approx}(x, z)$ смещаются в сторону источника, а дальние – от источника по линейному закону.

Из приведённых на рис. 18 зависимостей следует, что при фиксированных $\Delta C^{\approx}(x, z)$ координаты ближних границ ЗК смещаются в направлении к источнику на большее расстояние, чем дальние в направлении от источника. При этом, чем больше номер ЗК, тем больше смещение координат ближних и дальних границ.

Как показали результаты моделирования, вертикальные распределения акустического поля имеют ярко выраженный один максимум; с увеличением $\Delta C^{\approx}(x, z)$ от 0 до 0,3 м/с амплитуды максимумов поля уменьшаются, а их координаты по глубине смещаются в сторону дна по линейному закону (см. таблицу 6). Зависимости изменения вертикальных распределений акустического поля на ближних и дальних границах первых трёх зон конвергенции в зависимости от $\Delta C^{\approx}(x, z)$ представлены на рис. 19,20.

Таблица 6 - Аналитические зависимости смещения максимумов ВРАП по глубине на границах ЗК в зависимости от случайной компоненты поля скорости

Номер ЗК	Ближняя граница	Дальняя граница
1	z = 1258,6 bk + 57 m	z = 682,7 bk + 546,4 m
2	z = 2021,7 bk + 37,6 m	z = 411,4 bk + 921 m
3	z = 2598 bk + 29,6 m	z = 269,7 bk + 111 9m

В таблице 6 z – координата глубины максимума ВРАП, b – значение случайной компоненты поля скорости звука, k - размерный коэффициент. Как следует из представленных материалов, с увеличением номера зоны конвергенции скорость смещения координаты максимума ВРАП по глубине на ближних границах увеличивается, а на дальних уменьшается. При этом координаты глубин максимумов ВРАП на ближних границах зон конвергенции смещаются быстрее, чем на дальних. Аналитические зависимости в таблице 6 получены с

использованием стандартных функций программы MS Excel с достоверностью аппроксимации $R^2 \geq 0{,}97$.

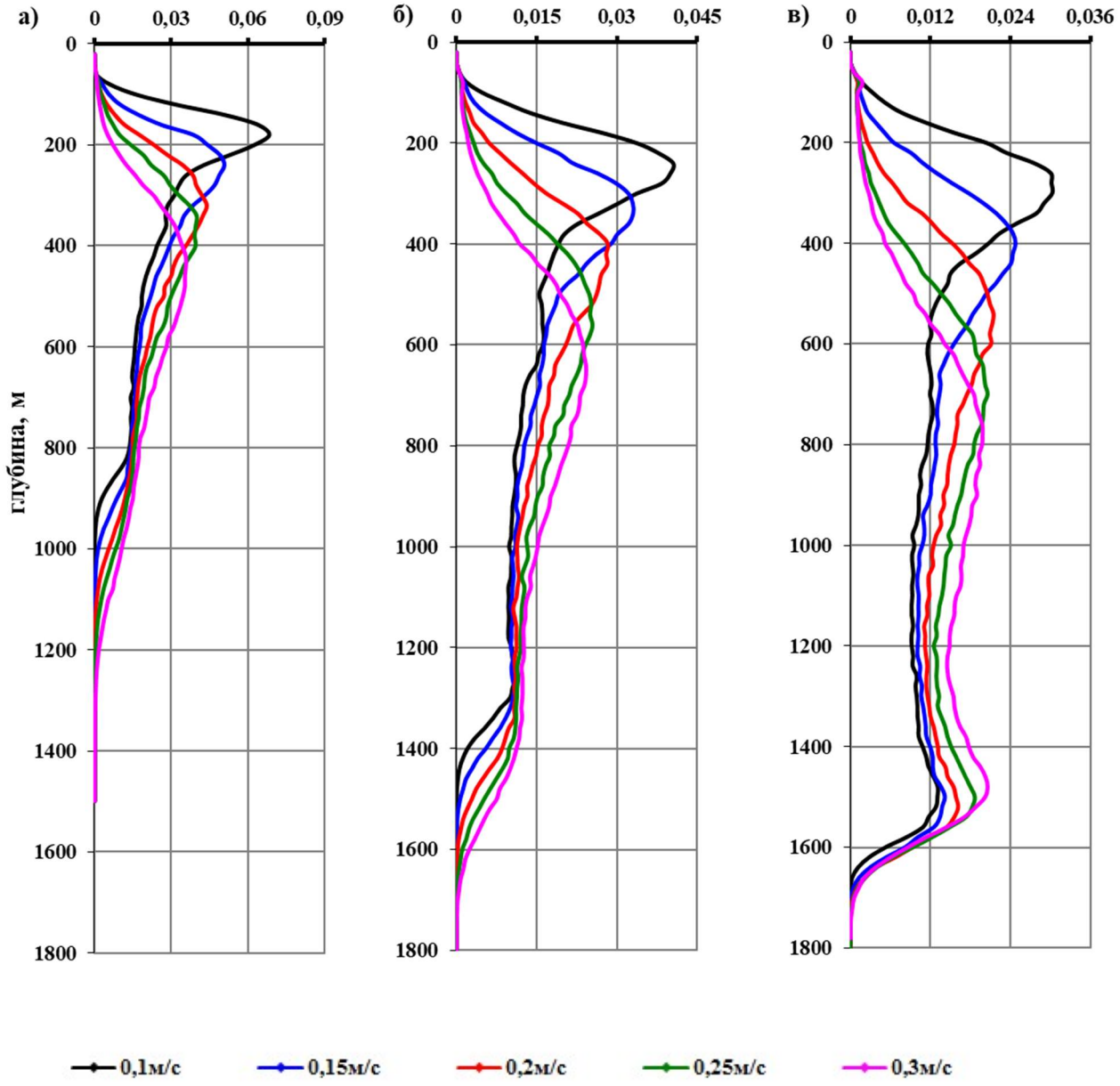


Рисунок 19 - Вертикальные распределения акустического поля на ближних границах первых трёх зон конвергенции (а – первая ЗК, б – вторая, в – третья). По оси абсцисс отложены глубины прихода лучевых траекторий, по оси ординат – амплитуда максимумов акустического поля в относительных единицах

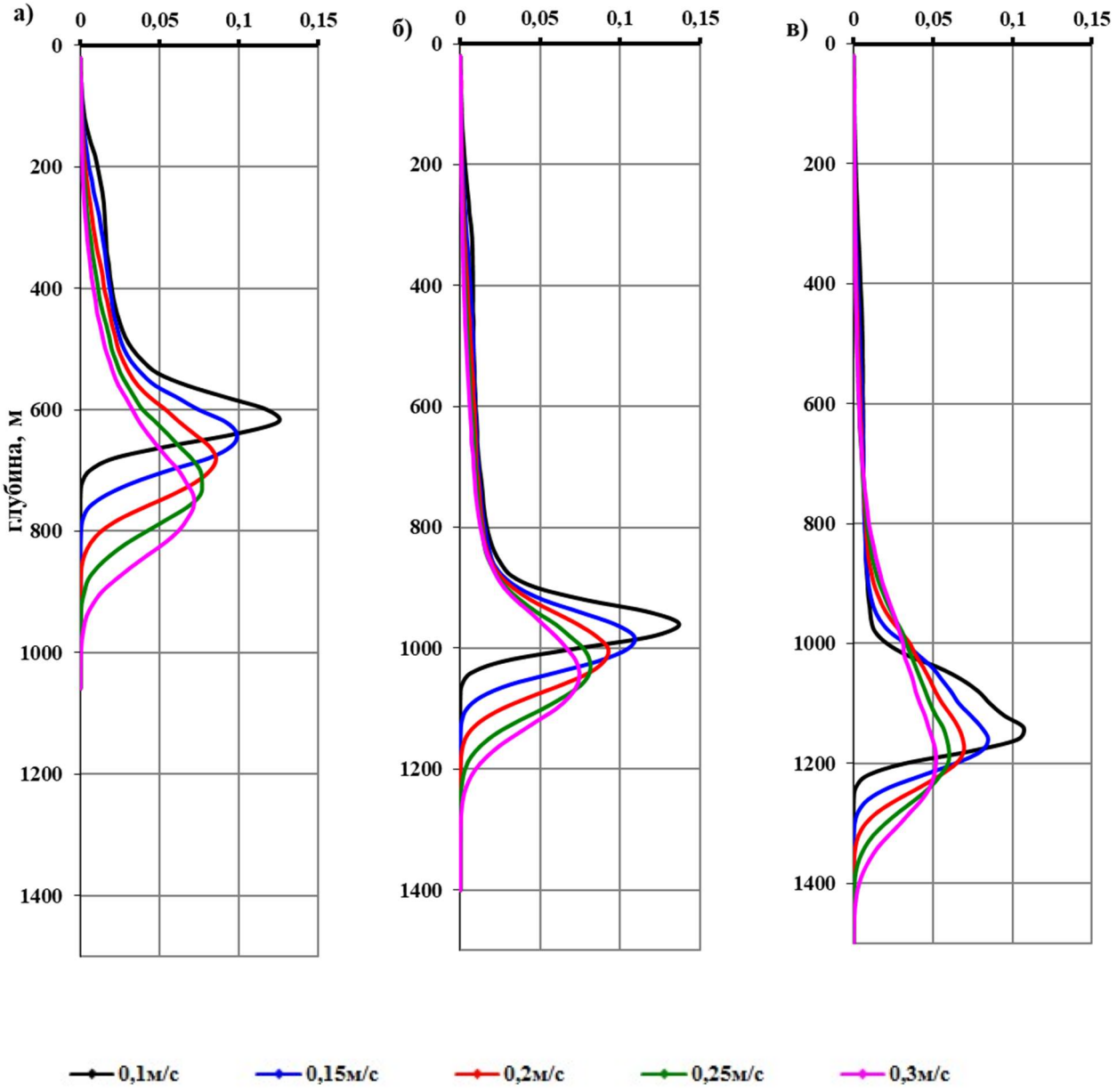


Рисунок 20 - Вертикальные распределения акустического поля на дальних границах первых трёх зон конвергенции (а – первая ЗК, б – вторая, в – третья). По оси абсцисс отложены глубины прихода лучевых траекторий, по оси ординат – амплитуда максимумов акустического поля в относительных единицах

Полученные зависимости угловых спектров лучевых траекторий, формирующих максимумы ВРАП на границах ЗК, приведены на рис. 21. На дальностях, соответствующих ближним границам всех трёх зон конвергенции и дальней границы 1ЗК, выполняется режим слабых флуктуаций. На дальней границе

2ЗК режим слабых флуктуаций наблюдается при $\Delta C^{\sim}(x, z) \leq 0{,}2$ м/с, а на дальней границе 3ЗК при $\Delta C^{\sim}(x, z) \leq 0{,}05$ м/с, при б*о*льших уровнях $\Delta C^{\sim}(x, z)$ наступает режим сильных флуктуаций.

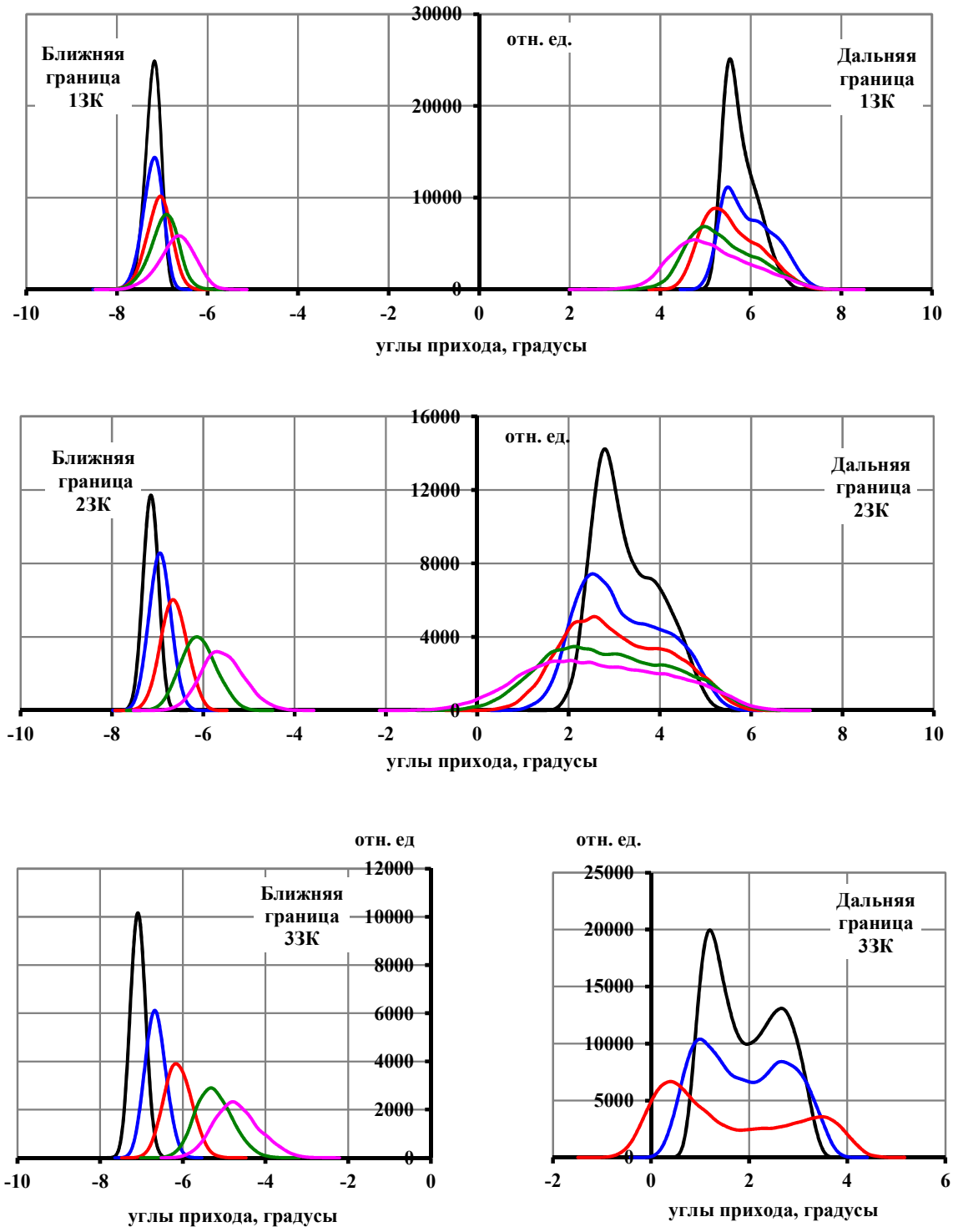


Рисунок 21 - Угловые спектры лучевых траекторий, формирующие максимумы ВРАП

3.7 Выводы

1. Рассмотрены существующие методы моделирования подводного распространения акустических волн. Показано, что для многих практических приложений широко используются модели, основанные на лучевой теории распространения звука. Предложено использование метода Монте-Карло для численного решения уравнения лучевых траекторий в переменном поле скорости звука, полученное непосредственно из принципа Ферма.

2. Для исследования пространственно-энергетической структуры акустических полей разработаны программы для ЭВМ, позволяющие в качестве исходных данных при формировании поля скорости звука задавать произвольные случайные возмущения в сочетании с регулярными изменениями по глубине и по дальности (копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ приведены в Приложении А). Результатами модельных расчетов являются массивы вертикальных разрезов акустического поля (ВРАП) на разных дистанциях в зависимости от уровня случайной компоненты поля скорости звука (ПСЗ), положение ближней и дальней границ зон конвергенции (ЗК).

3. Для апробации предложенных программных решений выполнен большой объем численных экспериментов для гидролого-акустических условий Японского моря и отдельных районов Атлантического и Тихого океанов. Модельные расчеты сравнивались с опубликованными работами, доступными результатами экспериментальных исследований. Показана высокая степень соответствия результатов моделирования основным закономерностям изменения структуры акустических полей в случайно-неоднородном океане: а) расширение области максимумов ВРАП при соответствии центральной зоны методу геометрической акустики; б) расширение ЗК, за счет смещения передней границы к источнику, а дальней – от источника звука.

4. На основании результатов численного моделирования получены аналитические зависимости максимумов ВРАП на ближних и дальних границах зон

конвергенции с достоверностью аппроксимации 0.97, обоснован экспериментально-теоретический метод определения режимов стохастичности поля скорости звука.

5. Разработанный комплекс методов и программных средств позволяет прогнозировать параметры пространственно-энергетической структуры звуковых полей на акватории для выбора оптимальных мест расположения и конфигурации систем подводного мониторинга различного назначения.

4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕТРАНСЛЯЦИОННОЙ ЛИНИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

4.1 Оценка автономности модуля ретрансляционной сети

При проектировании разрабатываемой системы мониторинга требования к автономности являются одними из важнейших. В общем случае может быть достигнута любая продолжительность автономной работы путем установки необходимого количества аккумуляторных батарей требуемой емкости. Однако это приведет к увеличению массы и габаритов модулей ретрансляционной сети, размеров автономной донной станции, что негативно скажется на их мобильности, удобстве размещения и замены, потребует привлечение вспомогательных технических средств (судов, подъемных устройств и прочее).

Современные сенсоры, применяемые для измерения параметров окружающей среды, имеют низкое энергопотребление, поэтому основные энергозатраты модуля ретрансляционной сети на основе технического решения, предложенного в разделе 5.1, будут связаны с работой лебедки для перемещения по глубине, а также работой ГА модемов. Если энергопотребление лебедки является постоянным и легко может быть оценено для всего периода автономной работы, то на энергопотребление ГА модемов сильно влияет изменчивость водной среды.

Разрабатываемый модуль должен быть типовым элементом ретрансляционной сети с линейной топологией, предложенной разделе 2.1, для передачи информации на большие расстояния или для мониторинга протяженных объектов. Вопросы энергопотребления для подобных сетей рассмотрены в [110,137]. В общем случае увеличение продолжительности автономной работы возможно путем снижения частоты обновления данных и за счет уменьшения расстояния между узлами сети (снижаются потери на распространение и

требуемый уровень источника). Но при этом первое ведет к снижению разрешения данных по времени, второе – к росту количества узлов в сети и, как следствие, ее стоимости, или уменьшению контролируемой площади акватории при заданном количестве узлов сети. Также возможно обобщение данных на промежуточных узлах сети, что позволяет снизить общий объем данных и энергозатраты на их передачу.

Для оценки энергоэффективности передачи внутри сети может быть использовано отношение потребляемой мощности к пропускной способности канала (PCTR - the power consumption to throughput ratio), позволяющее оценить продолжительность автономной работы каждого отдельного узла сети [110]. Основными исходными данными для расчета автономности сети являются: частота гидроакустического излучателя; частота обновления данных (опроса измерительных датчиков); количество узлов сети в кластере; расстояние между узлами сети в кластере.

Для линейной топологии сенсорной сети время жизни батареи зависит главным образом от узлов первого уровня. Время, в течение которого приемопередатчик узла активен в течение одного периода обновления, важно для срока службы батареи. Каждый узел сети использует механизм хранения и пересылки, чтобы пересылать последовательность пакетов по мере их получения, чтобы минимизировать время активности своего приемопередатчика.

Приведенный в [110] алгоритм расчета применим при условии, что известен размер всего пакета информации, передаваемый в течение одно периода обновления. На практике помимо самого информационного пакета узлы сети обмениваются внутри сети служебной информацией, размер которой оценить сложно, а в большинстве случаев невозможно из-за закрытости архитектуры модемов. Поэтому необходимо иметь возможность измерений энергопотребления непосредственно во время работы модулей ретрансляционной сети, что позволит корректировать при необходимости частоту обновления данных (сеансов связи) при заданной автономности.

4.2 Экспериментальные исследования энергопотребления модуля ретрансляционной сети

Для проведения экспериментальных исследований использовались серийно выпускаемые ГА модемы Evologics S2C 18/34 [39]. Модемы используют линейно-частотную модуляцию несущей частоты, имеют высокую скорость передачи данных и надёжность соединения, в том числе в сложных гидрологических условиях. В данных модемах реализован эффективный протокол доступа к среде, позволяющий объединить несколько устройств в гидроакустическую сеть; развитая система команд позволяет осуществлять контроль и управление процессом передачи данных [111].

Обмен данными между приёмником и передатчиком с использованием модемов Evologics носит комплексный характер: помимо информационного пакета, абоненты обмениваются служебной информацией, которая позволяет установить соединение, оценить параметры акустического канала связи и выбрать оптимальные параметры протокола связи физического уровня. В процессе передачи данных модемы также обмениваются служебными пакетами, для подтверждения приёма и оценки характеристик канала. В силу стохастичности свойств морской среды, а также закрытости протоколов, реализованных в модемах Evologics, затруднительно прогнозировать соотношение объёмов полезной и служебной информации, передаваемой за сеанс связи. Следовательно, затруднительно прогнозировать и энергопотребление в реальных морских условиях. Помимо этого, необходимо также принимать во внимание зависимость максимального расстояния передачи данных от уровня излучаемой мощности.

Количество модулей ретрансляционной сети, достаточное для передачи информации на некоторое произвольное расстояние, может быть определено исходя из максимальной дистанции связи для заданного уровня мощности. Для произвольных значений времени автономной работы и количества передаваемой информации оптимальное число модулей может быть различным и выбираться

исходя из минимизации стоимости, уменьшения энергопотребления системы, максимизации пропускной способности [90, 118].

Для регистрации фактически потребляемой мощности при работе акустического модема Evologics S2C 18/34 Wise использовался амперваттметр, разработанный сотрудниками ДВФУ. Точность измерения потребляемого тока составляла 0,25 мА, частота измерений – 200 Гц. Акустические модемы подключались к источнику питания 24 В через амперваттметры, обмен информацией с управляющими компьютерами осуществлялся по интерфейсу RS-232 (рис. 22). Один из модемов передавал информацию, другой принимал. Передавалось фиксированное количество информации с равными промежутками (10 раз по 10 байт, через 10 секунд). Измерения проводились для четырёх разных уровней излучаемой мощности: 166, 174, 180 и 186 дБ (относительно 1 мкПа на 1 м).

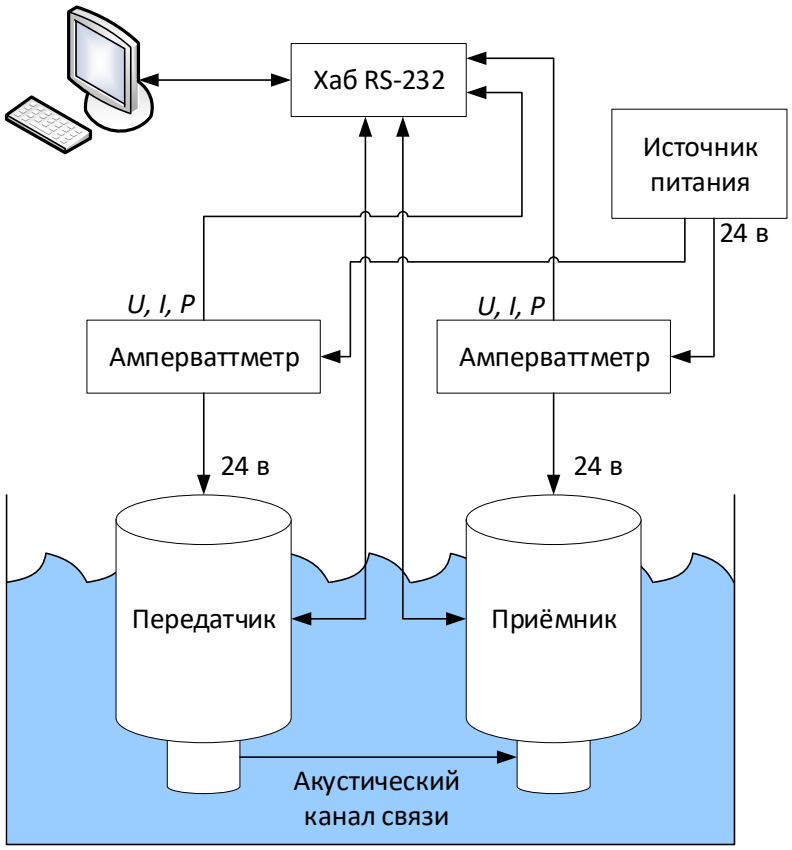


Рисунок 22 - Схема лабораторной установки

Эксперимент состоял из двух частей: лабораторной и морской. В первой измерения проводились в бассейне, модемы были жёстко закреплены на фиксированном расстоянии друг от друга, подключены к одному и тому же компьютеру, использовался лабораторный источник питания постоянного тока. Хронологически, лабораторные измерения выполнялись позже морских: это было связано с завершением навигации маломерных судов.

В лабораторных условиях наблюдалась устойчивая связь между модемами, вся передаваемая информация была принята. По мере роста мощности излучения росла и реверберация сигнала от стенок бассейна, что приводило к увеличению времени на установление соединения. С помощью амперваттметра выполнялась регистрация значений напряжения питания, потребляемого тока и накопленной мощности (в ампер-часах и ваттах) для передающего и принимающего модемов (таблица 7). Для определения количества энергозатрат на передачу одного байта полезной информации $P_{1\text{байт}}$ от общего энергопотребления за сеанс P_{Σ} вычиталась средняя мощность потребления в состоянии покоя:

$$P_{1\text{байт}} = \frac{(P_{\Sigma} - P_{\text{пок}})}{N_{\text{байт}}}, \qquad P_{\text{пок}} = \frac{P_{\text{сон}}}{t_{\text{сон}}} t_{\Sigma},$$

где $P_{\text{сон}}$ – энергопотребление в течение периода сна продолжительностью $t_{\text{сон}}$; t_{Σ} – общая продолжительность измерений (в среднем 126 с), $N_{\text{байт}}$ – число принятых байт.; $P_{\text{пер}}$ и $P_{\text{пр}}$ – затраты энергии на передачу и приём за сеанс связи, $P_{\text{изл}}$ – мощность излучения.

Энергопотребление двух модемов в состоянии покоя примерно одинаково, передающий модем потреблял в состоянии покоя на 0,5 мА·ч меньше, чем принимающий, что может быть связано с наличием у последнего wake-up модуля, отключающего часть электроники на время сна. В режиме излучения количество энергии на передачу в среднем в полтора раза больше, чем на приём. Также можно

отметить, что при малой мощности излучения затраты на излучение сопоставимы с энергопотреблением в состоянии покоя и начинают превышать их начиная с уровня 180 дБ. Для приёмного модема превышение наблюдается лишь на максимальной мощности.

Таблица 7 - Измерение энергопотребления в бассейне

$P_{изл}$, дБ	$P_{пок}$, мА·ч	P_{Σ}, мА·ч	$P_{пер}$, мА·ч	$P_{1байт}$, мА·ч
Передача				
166	2,1	2,5	0,4	0,004
174	2,0	2,8	0,8	0,008
180	2,0	4,2	2,2	0,022
186	2,1	9,7	7,6	0,076
Прием				
166	2,6	2,9	0,3	0,003
174	2,5	3,1	0,6	0,006
180	2,5	3,9	1,4	0,014
186	2,6	7,1	4,4	0,044

Морская часть эксперимента проводилась в октябре 2019 г. в Амурском заливе Японского моря, недалеко от побережья о. Русский (г. Владивосток). Надувная лодка с приёмным оборудованием стояла на якоре, маломерное судно излучало и перемещалось на удаление с шагом примерно равным 500 м. Координаты лодки и судна фиксировались GPS-приёмником (погрешность определения координат ±5 м). В начале эксперимента связь осуществлялась на минимальной мощности; по мере роста дистанции в случае невозможности соединения, уровень излучения увеличивался. Всего измерения были выполнены в 6 точках (рис. 23), максимальное расстояние связи составило 2870 м (таблица 8). Глубины в районе работ варьировались от 20 до 13 м, источник и приёмник были расположены на 5 м. Количество передаваемой информации и параметры акустических модемов были точно такими же, как лабораторных условиях.

Рисунок 23 - Карта-схема района работ. Размер треугольника пропорционален мощности излучения

Вся передаваемая информация была принята полностью, за исключением точки p2, где один из пакетов был потерян. На дистанции свыше двух километров передачу данных удалось осуществить лишь на максимальной мощности, измерения для предыдущего уровня излучения 180 дБ выполнены не были (таблица 8). Показатели энергопотребления для передающего и приёмного акустических модемов приведены в таблица 9.

Таблица 8 - Дистанция связи и мощность излучения

Точка	Расстояние, м	$P_{изл}$, дБ	$N_{байт}$
p1	516	166	100
p2	1046	166	90
p3	1530	174	100
p4	1748	174	100
p5	2043	174	100
p6	2870	186	100

Таблица 9 - Измерение энергопотребления в морской среде

Точка	$P_{\text{изл}}$, дБ	$P_{\text{пок}}$, мА·ч	P_{Σ}, мА·ч	$P_{\text{пер}}/P_{\text{пр}}$, мА·ч	$P_{\text{1байт}}$, мА·ч
Передача					
p1	166	1,8	1,9	0,1	0,001
p2	166	1,1	1,9	0,8	0,0089
p3	174	1,0	2,1	1,1	0,011
p4	174	1,0	2,0	1,0	0,01
P5	174	1,1	2,1	1,0	0,01
p6	186	3,3	9,2	5,9	0,059
Прием					
p1	166	1,9	2,1	0,2	0,002
p2	166	1,8	2,0	0,2	0,0022
p3	174	1,3	1,5	0,2	0,002
p4	174	1,3	1,6	0,4	0,004
p5	174	1,4	1,6	0,2	0,002
p6	186	3,2	6,3	3,1	0,031

В морских условиях энергопотребление системы связи отличалось от лабораторного. Напряжение источника питания (аккумуляторная батарея на лодке и бортовая сеть маломерного судна) было несколько выше, чем в первом случае и составляло 26,6-27,8 В для передатчика и 24,7 В для приёмника. Можно видеть, что в среднем оно было меньше, чем в лабораторных условиях, за исключением самой ближней и дальней точек. Как и в первом случае, наличие wake-up модуля привело к снижению энергопотребления передающего модема в состоянии покоя.

Мощность, потраченная на приём в морских условиях, оказалось меньше, чем в лабораторных и оставалась практически постоянной, за исключением самой дальней точки. Это может быть объяснено меньшим уровнем реверберационных помех в открытой среде. При росте дистанции до предельной увеличились затраты на передачу служебной информации, что привело к скачкообразному росту потреблённой мощности.

График зависимости энергопотребления от уровня излучения показан на рис. 24. При малых уровнях мощности зависимость носит линейный характер, сменяясь затем на степенную.

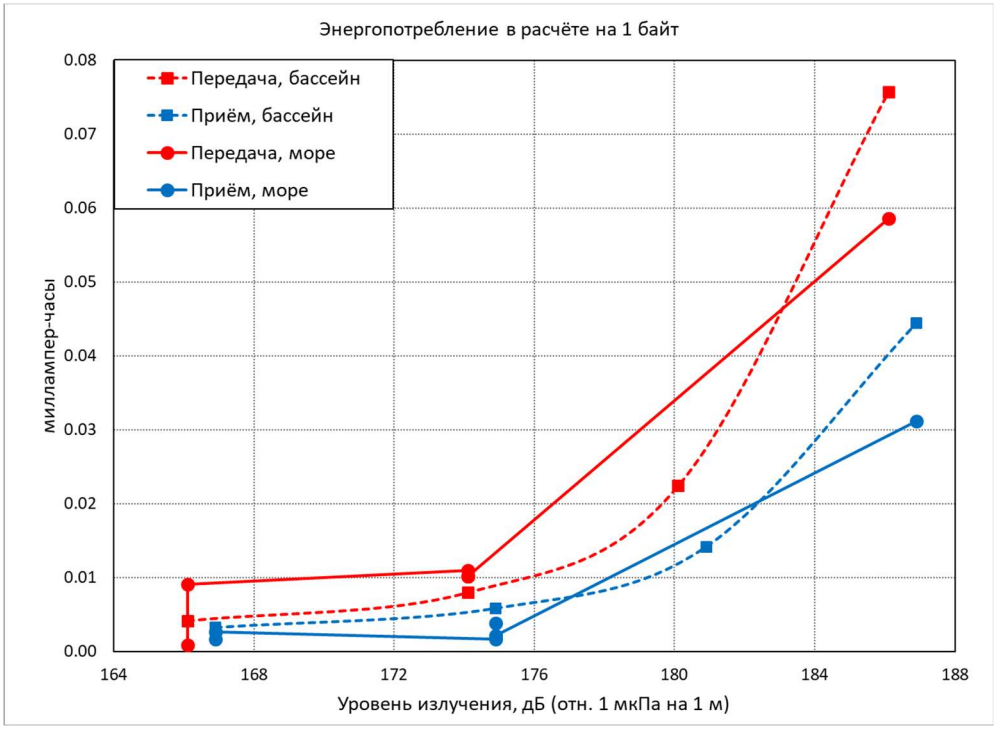


Рисунок 24 - Зависимость энергопотребления от уровня излучения

В морских условиях мощность, затрачиваемая на передачу одного байта, оказалась в среднем в 1,4 раза больше, чем в лабораторных, за исключением максимального уровня излучения. В последнем случае высокий уровень потребления в бассейне может быть объяснён реверберацией. Этим же может быть объяснено снижение уровня затрат на приём в морских условиях в 0,7 раза в сравнении с лабораторными. К сожалению, измерения в море при уровне излучения 180 дБ не были проведены, но можно оценить примерные значения энергопотребления акустического модема, воспользовавшись данными таблиц 7-9 и рис. 24.

4.3 Модель оптимальной ретрансляционной линии связи системы мониторинга акваторий, учитывающая энергопотребление, технические параметры и стоимость узлов сети

В общем случае стоимость гидроакустической системы связи определяется стоимостью ретрансляционных узлов, количество которых определяется расстоянием передачи данных и максимальным расстоянием между отдельными ретрансляторами. Стоимость отдельного модуля складывается из стоимостей акустического модема и батарей, необходимых для его работы в течение заданного времени. Количество батарей может быть рассчитано исходя из заданного времени автономной работы и энергопотребления модема за этот период. Мощность, потребляемая модемом, складывается из затрат в состоянии покоя и затрат на ретрансляцию, пропорциональных количеству передаваемой информации. Таким образом, общая стоимость линии связи может быть рассчитана как:

$$C\Sigma = \left(Cm + \frac{Ca * Tw\big(Ps + Nb * (Ptx + Prx)\big)}{Ea} \right) \frac{Rmax}{Rlink},$$

где: *Cm* – стоимость модема, руб.; *Ca* – стоимость батареи, руб.; *Ea* – ёмкость одной батареи, А·ч; *Rmax* – дистанция линии связи, км; *Rlink* – максимальная дистанция между ретрансляторами, км; *Tw* – время работы системы, часы; *Nb* – количество ретранслируемых байт в час; *Ps* – энергопотребление в режиме покоя, А·ч; *Ptx* - энергия на передачу 1 байта, А·ч; *Prx* – энергия на приём 1 байта, А·ч.

Стоимость линии связи определяется характеристиками энергопотребления модема, которые, задают максимальную дистанцию между узлами и количество батарей для их работы. Для различных соотношений потребляемой мощности, дистанции между излучателями, количество передаваемой информации, максимального расстояния связи и времени автономной работы, количество узлов

системы и их стоимость будут меняться. Задача выбора того или иного варианта системы, удовлетворяющих заданным ограничениям, может быть решена выбором целевой функции и решением задачи целочисленного программирования [133]. В данной работе будем считать оптимальной линию связи с минимальной стоимостью.

Пусть N – множество различных конфигураций линии связи для каждой из которых заданы параметры $Rlink_i$, Ptx_i, Prx_i; $i \in N$. Оптимизируемые факторы: число ретрансляторов $Nretr_i$ и количество батарей в ретрансляционном узле Na_i. Количество батарей рассчитывается как отношение ёмкости E_i, необходимой для работы отдельного узла в течении времени Tw, к ёмкости отдельной батареи: $Na_i = E_i/Ea$. Стоимость комплекта батарей $Ca_i = Na_i \cdot Ca$. Необходимый запас энергии E_i определяется энергопотреблением ретрансляционного узла:

$$E_i = Pnode_i \cdot Tw;$$
$$Pnode_i = Ps + Nb \cdot (Ptx_i + Prx_i).$$

Введём ограничения:

$$Rlink_i \cdot Nretr_i \geq Rmax; \qquad E_i/Pnode_i \geq Tw;$$
$$Na_i, Nretr_i \in \mathbb{Z},$$

где Z – множество целых чисел.

Целевая функция:

$$\text{Стоимость линии связи} = min\big((Cm + Ca_i) \cdot Nretr_i\big).$$

Выполним расчёт минимальной стоимости системы, используя в качестве основного элемента гидроакустический модем Evologics S2C 18/34, параметры энергопотребления которого были определены ранее (таблица 8 и 9). Расстояния

для различных уровней мощности от минимальной к максимальной: 1000, 2000, 2500 и 3000 м. Стоимость одного модема примем равной 1 млн. руб. Источником питания будет комплект батарей Varta 4LR25-2, использующихся в маяках, гидрографических буях, метеостанциях и т.п. Стоимость комплекта батарей с учётом двойного резервирования составит 12 тыс. руб. Ёмкость комплекта – 33 А·ч. Протяжённость линии связи – 100 км. Время автономной работы – 1 год (8760 часов). Результаты расчётов оптимального количества ретрансляционных узлов, необходимого количества батарей и общая стоимость линии связи для различного количества передаваемой информации приведены в таблица 10.

Таблица 10 - Стоимость системы связи

Кол.-во байт, передаваемых за 1 час	Кол.-во ретрансляторов	Расстояние между ретрансляторами, м	Кол.-во комплектов батарей	Стоимость линии связи, млн. руб.
100	34	3000	22	46,0
1 000	34	3000	44	58,0
2 500	40	2500	44	68,2
5 000	50	2000	37	79,6
10 000	50	2000	54	93,2

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при малых уровнях излучения, затраты на передачу и приём сопоставимы с потреблением в состоянии покоя. Использование wake-up модуля, отключающего часть электроники модема на время неактивности, для данного случая может дать существенную экономию энергии. С увеличением расстояния связи, мощность, необходимая на передачу информации, растёт по квазиэкспоненциальному закону.

При небольших объёмах передаваемой информации энергозатраты на её передачу невелики, оптимальна конфигурация с максимально удалёнными ретрансляторами. Уменьшение дистанции между ретрансляторами становится выгодным за счёт снижения их энергопотребления. Предложенная модель позволяет оптимизировать количества ретрансляторов и батарей, необходимых для обеспечения заданной дальности и времени автономной работы. В дальнейшем

разработанная модель может быть дополнена оценками энергопотребления гидроакустических модемов других марок и производителей.

4.4 Выводы

1. Критическим параметром, определяющим автономность системы мониторинга, является энергопотребление ГА модемов модуля ретрансляционной сети, зависящее от отношения потребляемой мощности к пропускной способности канала связи и времени активности приемопередатчика. Существующие алгоритмы расчета применимы при условии, что известен размер всего пакета информации, передаваемый в течение одного периода обновления. В большинстве случаев это невозможно определить из-за закрытости архитектуры модемов и значительного обмена служебной информацией внутри сети. Необходимо проводить измерения энергопотребления непосредственно во время работы модулей ретрансляционной сети.

2. Проведенные экспериментальные исследования в лабораторных и морских условиях позволили установить зависимость энергопотребления от уровня излучения для передающего и принимающего модемов, что позволяет оптимизировать режимы работы ретрансляционных модулей и параметры ретрансляционной сети в целом.

3. В качестве целевой функции при оптимизации ретрансляционной линии связи была выбрана ее общая стоимость, учитывающая энергопотребление, технические параметры и стоимость узлов сети. Задача минимизации целевой функции решалась методом целочисленного программирования. Результаты модельных расчетов оптимального количества ретрансляционных узлов, необходимого количества элементов электропитания и общая стоимость линии связи для различного количества передаваемой информации позволяют оценивать различные конфигурации системы, исходя из функциональных задач.

5 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИЙ

Особенности распространения звука в условиях северных морей, рассмотренные в разделе 3.4, наряду со стохастичностью поля скорости звука, существенно усложняет процесс создания и функционирования систем мониторинга. Разрабатываемые технические средств гидроакустической связи должны учитывать сезонную изменчивость гидрологических условий, использовать алгоритмы, устойчивые к разным видам шума, не требующие регулярной оценки канала распространения сигналов [96,135]. Помимо этого, в предложенной в главе 2 структуре системы мониторинга акваторий арктических морей, они также должны обеспечивать навигацию и устойчивый канал связи для подвижных элементов системы – АНПА.

5.1 Разработка модуля ретрансляционной сети системы мониторинга акватории

Выбор оптимального расположения по глубине с учетом изменчивости гидрологических условий является необходимым условием организации систем гидроакустической связи. Это позволит увеличить дальность передачи данных по гидроакустическому каналу между отдельными элементами системы мониторинга и уменьшить общее количество ретрансляторов, а значит и стоимость всей системы в целом.

Для решения данной задачи в диссертационной работе предложено использовать техническое решение, структурная схема которого представлена на рис. 25 [32]. В качестве модуля ретрансляционной сети (МРС) выступает заякоренный буй 1, способный перемещаться по глубине с использованием электрической лебедки 2. В общем случае буй может быть оснащен комплектом

измерительной аппаратуры 3, системой контроля и управления 4, гидроакустическим модемом 5, источником питания 6, опционально возможна установка радиопередатчика 7. Буй оснащен измерителем скорости звука 8, выход измерительного сигнала которого связан с одним из входов системы контроля и управления 4. Изменение глубины погружения буя производится сматыванием-наматыванием троса лебедкой 2, управление ее работой – системой контроля и управления, а питание – от бортового источника питания 6.

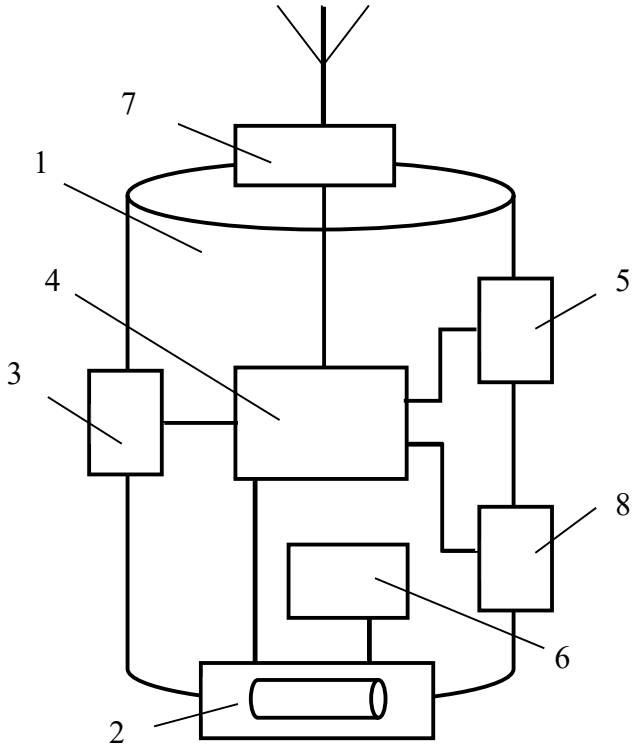


Рисунок 25 - Состав буя сети для мониторинга акваторий

Комплект измерительной аппаратуры 3, может включать различные датчики для проведения гидрологических, гидрофизических и гидрохимических измерений. Система контроля и управления 4 обеспечивает проведение замеров (фиксации контролируемых параметров водной среды) и преобразование их результатов из аналоговой в цифровую форму, а также управление работой гидроакустического модема 5 (при наличии в буе радиопередатчика 7 управление его работой также осуществляет система контроля и управления).

На рис. 26 представлена структурная схема ретрансляционной сети системы мониторинга акваторий. Ретрансляционная сеть включает гидроакустические буи 1, скрепленные тросами 2 с якорями 3. Также показан гидроакустический канал 4 между буями 1, внешний приемник информации 5. Гидроакустические буи размещены друг от друга на расстояния соответствующие максимально допустимой для данного района дальности приема-передачи по гидроакустическому каналу, исходя из наихудших гидрологических условий, возможных для данной акватории.

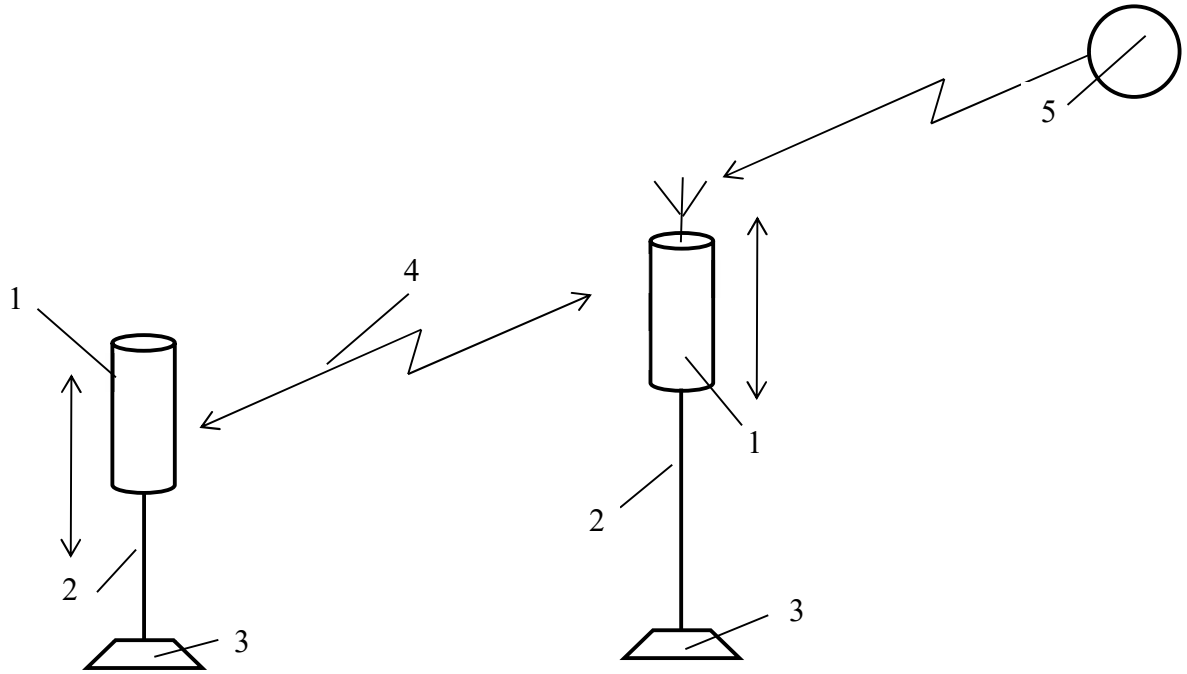


Рисунок 26 - Структурная схема ретрансляционной сети

Порядок размещения системы мониторинга.

1. Формируется вероятностно-статистическое описание ВРСЗ для различных сезонов на основании рядов измерений и/или баз данных многолетних гидрологических наблюдений в районе. При известных характеристиках гидроакустического модема с учётом наиболее вероятных параметров поля скорости звука в выбранном районе производится расчет потерь на

распространение звука, дальность действия, определяются места установки модулей ретрансляционной сети (МРС).

2. На дне акватории устанавливают якорные системы буев, задавая длину троса между якорем и приемо-передающей системой (ППС) так, чтобы диапазон перемещения ППС по глубине соответствовал оптимальным условиям приема сигналов.

3. По заранее заданной программе, отрабатываемой системой контроля и управления, проводится комплекс измерений параметров водной среды, их преобразование из аналоговой в цифровую форму.

4. Перед передачей измерительной информации по гидроакустическому каналу, в соответствии с заранее заданной программой, отрабатываемой системой контроля и управления (или по внешним управляющим сигналам) измеритель скорости звука выполняет измерение ВРСЗ в точке установки буя с перемещением буя по тросу с помощью лебедки. Полученные измерительные данные преобразуются в цифровую форму и передаются в блок обработки сигналов системы контроля и управления, где выполняются гидроакустические расчёты и определяется оптимальная глубина для приёма и передачи данных модемом по гидроакустическому каналу. Эта операция осуществляется на всех буях измерительной сети.

5. При этом если комплекс гидрофизических исследований сразу включает измерение ВРСЗ на площади участка акватории подлежащего мониторингу, измерительная операция не нужна – сразу осуществляется выбор оптимальной глубины гидроакустического канала.

6. По команде системы контроля и управления, с помощью лебедки, буй выводится на глубину от поверхности, оптимальную по дальности передачи по гидроакустическому каналу и по гидроакустическому модему связывается с соседними буями или буем, которые выводятся на эту же глубину от поверхности, и им измерительную информацию. Таким образом, достигается взаимное расположение устройств максимально компенсирующее влияние параметров

гидроакустического канала на работу гидроакустических модемов, за счёт чего достигается увеличение фактической дальности действия всей системы гидроакустической связи. Далее, информация, собранная с буев (связанных гидроакустическим каналом с буем, снабженным радиопередатчиком) передается на внешний приемник информации.

Измерение ВРСЗ, расчеты для переконфигурирования системы, изменение глубины ППС МРС могут производиться на основании превышения заданного порога ошибок при передаче пакетов или снижения скорости передачи. Комплект измерительной аппаратуры может включать вместо измерителя скорости звука датчики температуры, проводимости и глубины, по данным которых производится расчет скорости звука.

Устройства, предназначенные для измерения вертикального распределения параметров водной среды - профилирующие станции были рассмотрены в разделе 1.1. В качестве прототипа, реализующего предложенный подход, можно рассматривать профилограф «Аквазонд», способный работать автономно до одного года на глубинах до 600 м с расчетным пробегом 200 км или 167 циклов спуска и подъёма для максимальной глубины [55]. Учитывая небольшие глубины рассматриваемых районов, количество циклов измерений ВРСЗ будет гораздо выше, например, для района Киринского месторождения расчетная оценка составляет 1099 циклов. Этого вполне достаточно для обеспечения функционирования СМА в соответствие с заданными требованиями.

Модификации модуля ретрансляционной сети оформлены в виде результатов интеллектуальной деятельности [33]. В данном случае базовыми элементами являются заякоренные измерительные буи, обладающие положительной плавучестью и снабженные гирляндами измерительных датчиков, распределенных по кабель-тросу, связывающему буй с якорем (рис.27). Система контроля и управления каждого буя снабжена средствами измерения скорости звука, распределенными по длине кабель-троса и, по меньшей мере, тремя гидроакустическими модемами, нижний из которых установлен на кабель-тросе с

возможностью позиционирования в придонном слое, второй на измерительном буе или вблизи него на кабель-тросе, а третий равноудален от первого и второго гидроакустических модемов. Данное техническое решение представляется более сложным в технической реализации, по сравнению с предложенным в [32], поэтому не рассматривается как основное при проектировании модуля ретрансляционной сети.

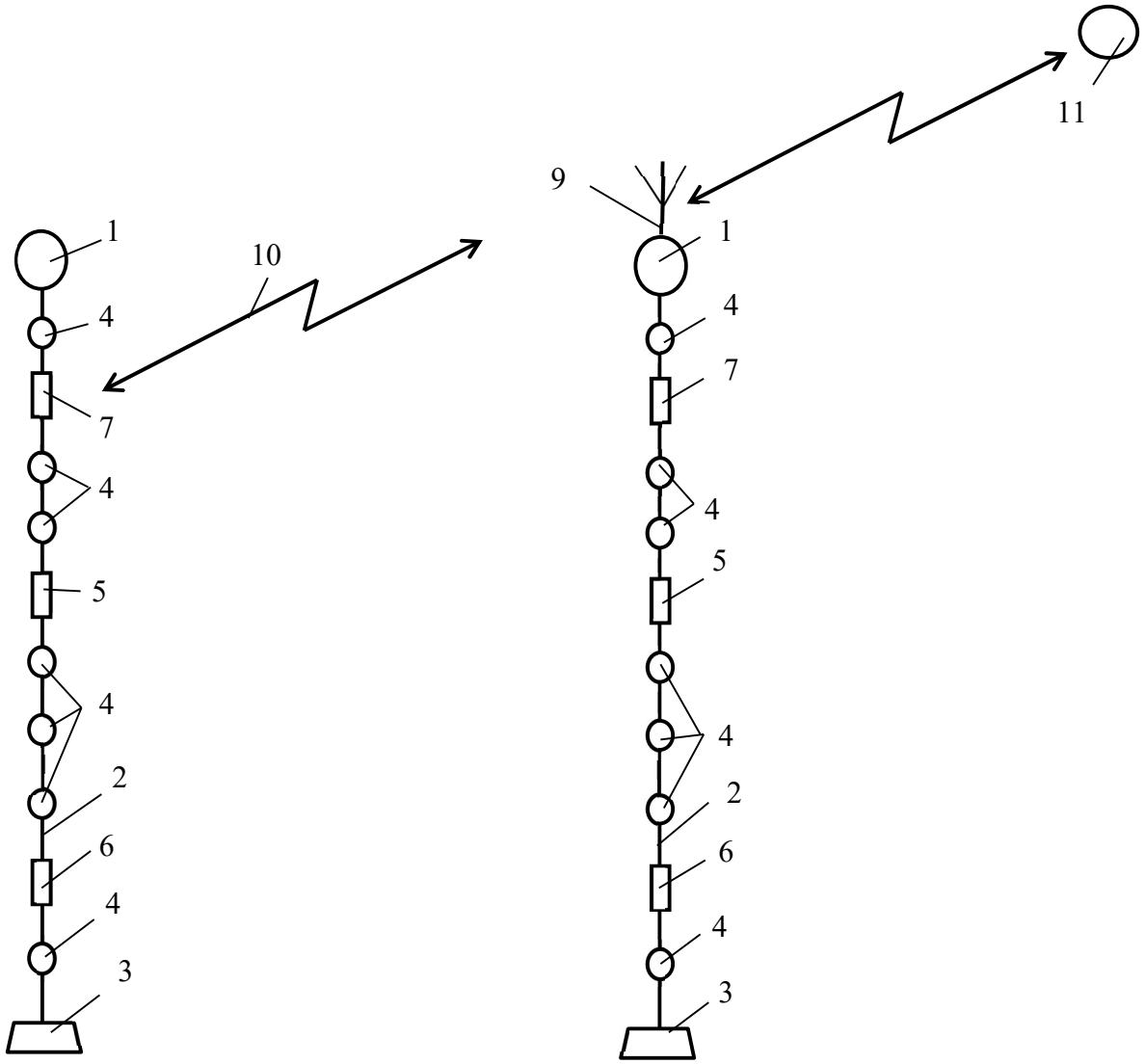


Рисунок 27 – Структурная схема ретрансляционной сети с использованием альтернативной модификации модуля ретрансляционной сети [33]. Цифрами обозначены: 1 – измерительный буй с источником питания, 2 – кабель-трос, 3 – якорь, 4 - комплект измерительной аппаратуры, 5,6,7 – гидроакустические модемы, 9 – радиопередатчик, 10 – гидроакустический канал между буями, 11 – внешний потребитель информации

5.2 Гидроакустический модем

Ключевым элементом модуля ретрансляционной сети системы мониторинга является гидроакустический модем. В настоящее время на рынке представлен широкий круг моделей в основном зарубежных производителей [159-163]. Как уже отмечалось, в условиях положительной рефракции звук многократно отражается от верхней границы раздела, что приводит не только к большим потерям при распространении, но и высокой многолучевости, росту уровня помех.

Для улучшения качества гидроакустической связи за счет повышения помехоустойчивости приемной системы предлагается использовать техническое решение, принципиальная схема которого представлена на рис. 28 [62]. Совокупность электрических блоков в тракте цифровой сигнальной обработки позволяет работать одинаково эффективно в различных частотных диапазонах. Устройство также может быть использовано для навигации АНПА при выполнении им инспекционных миссий.

Устройство приема в гидроакустической связи для подводной навигации содержит гидроакустическую антенну, входной усилитель, плату цифровой обработки сигналов (плата ЦОС) и модуль интерфейса Ethernet, которые электрически соединены между собой (рис. 28). Плата ЦОС одержит функционально соединенные между собой аналого-цифровой преобразователь (АЦП), когерентный демодулятор сигнала, банк согласованных фильтров с управлением от корректора частоты и фазы, а также дискриминатор синхронизации.

Особенностями технического решения являются:

- адаптивный корректор уровня сигнала;
- наличие блока отслеживания частоты и фазы сигнала;
- наличие банка полосовых низкочастотных фильтров и дискриминатора данных;

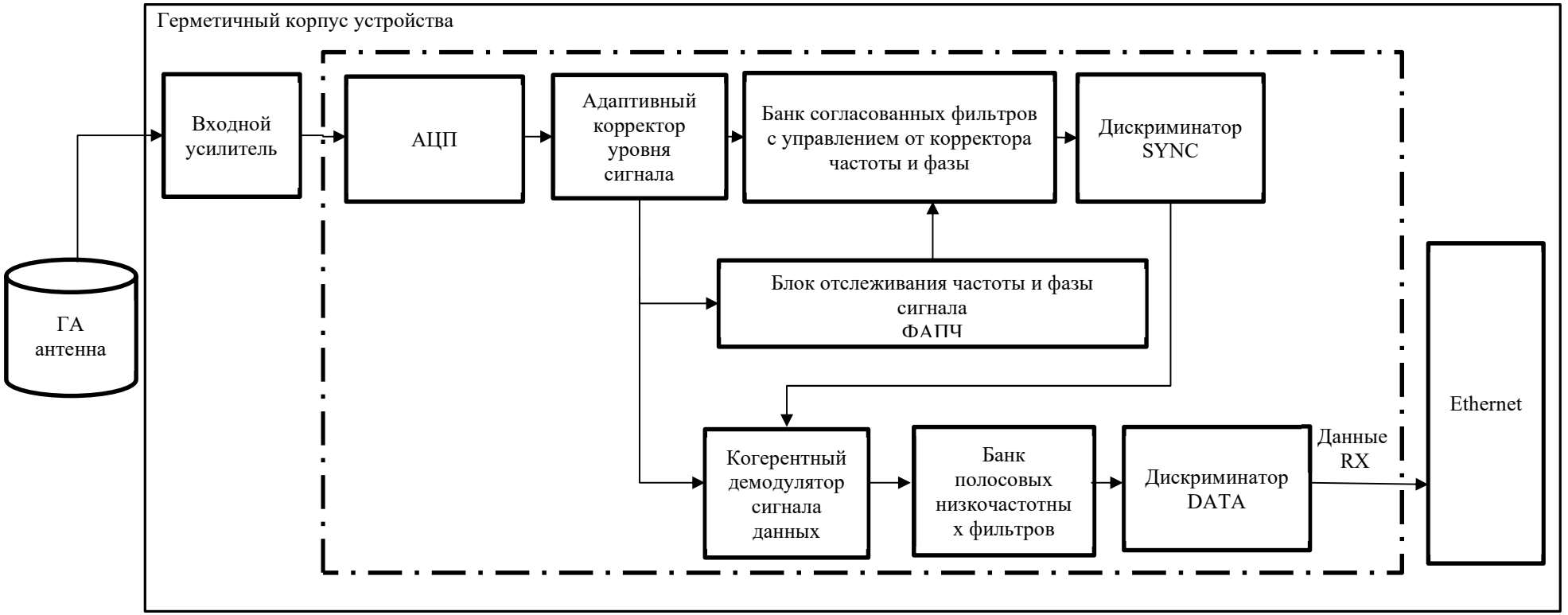


Рисунок 28- Принципиальная схема устройства приема в гидроакустической связи для подводной навигации

- перенастраиваемый блок цифровой обработки сигналов, выполненный на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), позволяющей адаптировать устройство под широкий диапазон рабочих частот посредством изменения частотных режимов и протоколов обмена для гидроакустического канала связи;
- повышение помехоустойчивости за счет совместного использования адаптивного корректора уровня сигнала, блока согласования фильтров с управлением от корректора частоты и фазы, дискриминатора синхронизации, блока отслеживания частоты и фазы сигнала.

Порядок работы в режиме приема

1. Прием сигнала производится на гидроакустическую антенну с последующими операциями полосовой фильтрации и усиления сигнала с коэффициентом до 5000.

2. Далее сигнал поступает на АЦП платы ЦОС, где выполняется оценка уровня сигнала и адаптивное управление его амплитудой.

На этом этапе с помощью блока отслеживания частоты и фазы сигнала производится также оценка набега фазы в сигнале для последующей параллельной коррекции доплеровских сдвигов при выполнении процедуры согласованной фильтрации сигналов синхронизации и данных.

3. После этапа адаптивной коррекции амплитуды и оценки фазы сигнал поступает на банк согласованных фильтров с управлением от корректора частоты и фазы, где параллельно с процедурой корреляции выполняется фазовая адаптация коэффициентов согласованного фильтра под изменения во входном сигнале.

4. Далее на выходе банка согласованных фильтров с управлением от корректора частоты и фазы с помощью дискриминатора синхронизации выполняется запуск системы синхронизации для приема сигнала данных. При поступлении сигнала данных на адаптивный корректор уровня сигнала по выработанному сигналу дискриминатора синхронизации выполняется процедура

когерентной демодуляции высокочастотного сигнала с последующей низкочастотной фильтрацией в когерентном демодуляторе сигнала данных.

Частота и фаза опорного генератора когерентного демодулятора сигнала данных с помощью фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) управляется синхронно с поступающим сигналом. После когерентной демодуляции и низкочастотной фильтрации многочастотный сигнал данных поступает в банк полосовых низкочастотных фильтров, на выходе которых формируются отклики соответствующие передаваемым данным, и обрабатываемые на дискриминаторе данных. На выходе дискриминатора данных формируется параллельный пакет данных с последующим параллельно-последовательным преобразованием и форматированием под Ethernet протокол.

Описанная принципиальная схема устройства приема в гидроакустической связи для подводной навигации была зарегистрирована в качестве патента РФ [61]. В дальнейшем на его основе были разработаны гидроакустические модемы АТМ-28/АТМ-28ОЕМ (рабочая частота 28 кГц) и АТМ-12ОЕМ (рабочая частота 12 кГц) [176]. В ходе экспериментов подтвержденная вероятность ошибки приема цифровых сообщений составляла до 10^{-5} при скорости информационного обмена до 4 кбит/с на дистанции 3 км, центральная рабочая частота 28 кГц. Технические характеристики модемов (таблица 11) удовлетворяют требуемым параметрам для передачи данных управления, контроля и телеметрии в СМА [48].

Гидроакустические модемы с рабочей частотой 12 кГц и полосой частот излучения Δf=4 кГц были использованы для определения точности определения дистанций на расстояниях до 10 км в зимних условиях при наличии льда, где показали возможность получения высокой инструментальной точности в определении дистанции [61].

Таблица 11 - Технические характеристики модемов АТМ-12ОЕМ/АТМ-28ОЕМ [176]

Технические характеристики	**АТМ-28ОЕМ**	**АТМ-12ОЕМ**
Полоса частот приема-излучения	24-32 кГц	10-14 кГц
Дальность работы	3500 м	15000 м

Технические характеристики	**АТМ-28ОЕМ**	**АТМ-12ОЕМ**
Интерфейс подключения	Ethernet/RS232/CAN	
Напряжение питания	20 – 30 В	
Мощность в режиме ожидания	1,5 мВт	
Мощность в режиме приема	3 Вт	
Мощность в режиме передачи	5; 10; 20; 35 Вт	7; 15; 45; 60 Вт
Скорость передачи	до 4 кбит/с	до 1,7 кбит/с
Вероятность ошибки	10^{-5}	
Длина антенны	50 мм	100 мм
Диаметр антенны	40 мм	90 мм
Длина модуля	120 мм	
Ширина модуля	60 мм	
Высота модуля	35 мм	

5.3 Выводы

1. Необходимым условием рациональной организации ретрансляционной сети гидроакустической связи (РТГС) является обеспечение максимальной протяженности линий связи между узлами сети, что позволяет уменьшить общее количество ретрансляторов и стоимость всей системы в целом. Для этого размещение приемо-передающих устройств ретрансляторов в водном слое должно быть адаптировано к условиям распространения гидроакустических сигналов и обеспечивать требуемое качество передачи информации на заданной дистанции.

2. В качестве типового модуля ретрансляционной сети предложено техническое решение, обеспечивающее оптимальное расположение приемо-передающего устройства ретранслятора по глубине. В состав модуля входят: заякоренный буй, способный перемещаться по глубине, комплект измерительной аппаратуры, система контроля и управления, гидроакустический модем, источник питания, измеритель скорости звука в воде. Переконфигурирование системы может производиться на основании пересчета устойчивой дальности передачи информации по результатам текущих измерений, при превышении заданного

порога ошибок при передаче пакетов или снижения скорости передачи. Копии патентов на изобретения приведены в Приложении Б.

3. В условиях положительной рефракции, характерной для подводного звукового канала в ледовый период, происходит многократное отражение звука от нижней кромки льда, что приводит к большим потерям на распространение, высокой многолучевости и росту уровня помех. Для обеспечения устойчивой передачи и требуемого качества принимаемой информации должна быть реализована многоступенчатая цифровая обработка сигнала с процедурами коррекции уровня, частоты и фазы сигнала, полосовой фильтрации, формирование пакета данных и его форматирование под Ethernet протокол.

4. Для улучшения качества гидроакустической связи за счет повышения помехоустойчивости приемной системы предложено техническое решение содержащее приемную антенну, входной усилитель, плату цифровой обработки сигналов (ЦОС) и модуль интерфейса Ethernet, которые электрически соединены между собой. Плата ЦОС одержит функционально соединенные между собой аналого-цифровой преобразователь (АЦП), когерентный демодулятор сигнала, банк согласованных фильтров с управлением от корректора частоты и фазы, а также дискриминатор синхронизации. Изготовлены модемы с рабочими частотами 14 и 28 кГц. В ходе морских экспериментов обеспечена скорость информационного обмена на частоте 28 кГц 4 кбит/с на дистанции 3 км. При этом вероятность ошибки приема цифровых сообщений составила 10^{-5}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие научно-технические результаты:

- Аналитический обзор современного уровня развития отдельных компонент технических систем морского мониторинга, показавший наличие значительного количества различных современных технических средств, которые используются для создания систем мониторинга акваторий различного назначения, а также выявивший актуальные задачи, требующие решения для построения системы морского мониторинга в физико-географических, климатических и гидролого-акустических условиях арктических морей.
- Разработана и формально обоснована оптимальная модель системы мониторинга для физико-географических, климатических и гидролого-акустических условий арктических морей. Предложена структура, обеспечивающая выполнение заданных функций, состоящая из стационарной автономной донной станции, автономного необитаемого подводного аппарата, измерительных модулей различного назначения, систем передачи данных на береговой пост по кабельному, радио- и/или гидроакустическому каналу.
- Разработаны программы для ЭВМ, позволяющие в качестве исходных данных при формировании поля скорости звука задавать произвольные случайные возмущения в сочетании с регулярными изменениями по глубине и по дальности. С использованием разработанных программ обоснован экспериментально-теоретический метод определения режимов стохастичности поля скорости звука.
- Разработанный комплекс методов и программных средств позволяет прогнозировать параметры пространственно-энергетической структуры звуковых полей на акватории для выбора оптимальных мест расположения и конфигурации систем подводного мониторинга различного назначения.
- На основе результатов экспериментальных исследований в лабораторных и морских условиях, предложен экспериментально-теоретический метод

оптимизации ретрансляционной линии гидроакустической связи, учитывающий энергопотребление, технические параметры и стоимость узлов сети.

– Предложена реализация комплекса технических средств для оптимального приема-передачи гидроакустических сигналов с учетом гидрофизических характеристик арктических морей, включающего модуль ретрансляционной сети и устройство приема гидроакустической связи. В качестве типового модуля ретрансляционной сети предложено техническое решение, обеспечивающее оптимальное расположение приемо-передающего устройства ретранслятора по глубине. На базе предложенного устройства приема гидроакустической связи, отличающегося повышенной помехоустойчивостью приемной системы, изготовлены и протестированы модемы с рабочими частотами 14 и 28 кГц.

Результаты работы нашли отражение в 2 патентах на изобретения, 1 патенте на полезную модель, 2 свидетельствах государственной регистрации программ для ЭВМ.

Полученные в диссертационной работе результаты в дальнейшем могут быть использованы для проектирования и создания систем морского мониторинга различных акваторий и вносят вклад, как в развитие методов математического моделирования, так и методов, методик, технических средства измерения, анализа и контроля характеристик источников физических полей корабля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

2. СТО Газпром 2-3.3-1063-2016. Капитальный ремонт скважин. Охрана окружающей среды. Утв. распоряжением ПАО "Газпром" от 09.02.2016 № 25

3. Авилов В.К. Современные методы практических вычислений звуковых полей в морской среде //Доклады X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. «Акустика океана». – М.: ГЕОС. – 2004. – С. 17-22.

4. Авилов К.В., Куличков С.Н., Попов О.Е. Распространение импульсного сигнала в атмосфере, океане и земной коре от источника звука в атмосфере // Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. «Акустика океана». – М.: ГЕОС. – 2018. – С. 9-12.

5. Авилов К. В. Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения звука в океане, плавно неоднородном по горизонтали, и их численное решение //Акуст. журн. – 1995. – Т. 41. – №. 1. – С. 5-12.

6. Алексеев Г.В. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. Северная полярная область / Г.В. Алексеев, Е.И. Александров, Н.Е. Иванов, В.Ф. Радионов, В.М. Смоляницкий // Москва, 2020. – 97 стр.

7. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США //Зарубежное военное обозрение. – 2013. – №. 5. – С. 79-88.

8. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. – Гидрометеоиздат, 1982. 264 с.

9. Вадов Р. А. Некоторые результаты исследований дальнего распространения звука, проведенных в Норвежском море //Акуст. журн. – 2002. – Т. 48, – № 1. – С. 28-38.

10. Вадов Р. А. Дальнее распространение звука в центральной части Баренцева моря // Акуст. журн. – 2003. – Т. 49. – №. 6. – С. 751-760.

11. Вадов Р.А. Дальнее распространение звука в Средиземном море //Акуст. журн. – 2004. – Т. 50. – № 3. – С. 311-321.

12. Вадов Р. А. Дальнее распространение звука в Северо-Западной части Тихого океана // Акуст. журн. – 2006. – Т. 52. – №. 4. – С. 448-463.

13. Вадов Р. А. О предсказуемости местоположения зон конвергенции в океане //Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – №. 3. – С. 323-329.

14. Вадов Р. А. Нестабильность звукового поля в первой зоне конвергенции //Акуст. журн. – 1995. – Т. 41. – №. 2. – С. 202-208.

15. Вадов Р. А. Суточные наблюдения за энергетической структурой звукового поля в районе первой зоны конвергенции // Акуст. журн. – 2003. – Т. 49. – №. 2. – С. 278-280.

16. Ваулин Ю. В. и др. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 6. – С. 59-65.

17. Вировлянский А. Л. Статистическое описание лучевого хаоса в подводном акустическом волноводе // Акуст. журн. – 2005. – Т. 51. – №. 1. – С. 90-100.

18. Вировлянский А. Л., Казарова А. Ю., Любавин Л. Я. Фокусировка звуковых импульсов методом обращения времени на стокилометровых трассах в глубоком море // Акуст. журн. – 2012. – Т. 58. – №. 6. – С. 723-723.

19. Воробьёв В.Л., Акимов, В.А., Соколов. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. М., 2005. 368 с.

20. Галкин О.П., Харченко Е.А. Швачко, Л.В. Структура акустического поля в океане на различных частотах звукового диапазона //Акуст. журн. – 2000. – Т. 46. – № 3. – С. 325-335.

21. Галкин О. П., Швачко Л. В. Исследование структуры звуковых полей в океане при глубоководном приеме //Акуст. журн. – 2003. – Т. 49. – №. 6. – С. 768.

22. Галкин О. П. и др. Исследование «толщины» физических лучей в океане и влияние среды на корреляционные свойства сигналов //Проблемы акустики океана. М.: Наука, – 1984 г. – С. 118-133 / отв. редакторы Л.М. Бреховских, И.Б. Андреева.

23. Галкин О. П. и др. Засветка зоны тени в двухканальном океаническом волноводе с тонкой структурой неоднородностей скорости звука // Акуст. журн. – 2006. – Т. 52. – №. 3. – С. 306-313.

24. Гладкий А.В., Сергиенко И.В., Скопецкий В.В. Численно-аналитические методы исследования волновых процессов //Киев: наук. думка, 2001. 452 с.

25. Гостев В.С., Швачко Р.Ф. Акустические характеристики тонкоструктурных образований //Проблемы акустики океана. М.: Наука, – 1984 г. – С. 153-164 / отв. редакторы Л.М. Бреховских, И.Б. Андреева.

26. Гостев В. С., Швачко Р. Ф. Компьютерное моделирование натурного эксперимента по рассеянию звука тонкоструктурными неоднородностями // Акуст. журн. – 2008. – Т. 54. – №. 2. – С. 262-266.

27. Гостев В. С., Микрюков А. В., Попов О. Е. Особенности распространения звука в океане с тонкоструктурными неоднородностями // Акуст. журн. – 2016. – Т. 62. – №. 5. – С. 540-549.

28. Гостев В. С., Носова Л. Н., Швачко Р. Ф. Исследования звукового поля взрывного сигнала в зонах геометрической тени глубокого океана //Акуст. журн. – 1998. – Т. 44. – №. 2. – С. 201-205.

29. Гостев В. С., Швачко Р. Ф. Способы расчета пространственно-временных и угловых характеристик звукового поля в зоне тени //Акуст. журн. – 1998. – Т. 44. – №. 2. – С. 274-277.

30. Гостев В.С., Швачко Р.Ф. Некоторые кинематические модели объемной предреверберации в глубоком океане // Акуст. журн. 1999. Т.45. №6. С. 857-860.

31. Дашен Р. и др. Распространение звука во флуктуирующем океане //Пер. с англ./Под ред. С. Флатте. – М.: Мир. – 1982.

32. Дмитриев И.А., Желдак Е.М., Кирьянов А.В., Петухов В.И. Патент на изобретение № 2499282. Сеть для мониторинга акваторий. Дата приоритета 13.06.2012.

33. Дмитриев И.А., Желдак Е.М., Кирьянов А.В., Петухов В.И. Патент на изобретение № 2501044. Сеть для мониторинга акваторий. Дата приоритета 13.06.2012.

34. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., 1982 г. 192 с.

35. Еняков А. М., Панин О. А. Об экологических проблемах шумового загрязнения арктических вод России //Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2020. – 2020. – С. 176-181.

36. Злобин Д.В. и др. Программа для ЭВМ «Моделирование распространения звука в двумерно-неоднородных подводных волноводах в лучевом приближении». Свидетельство о регистрации № 2018612054

37. Инзарцев А. В. и др. Опыт использования автономного необитаемого подводного аппарата типа МТ-2010 для экологических исследования в бухте Золотой Рог //Экологические системы и приборы. – 2018. – № 12. – С. 38-45.

38. Карлик Я. С., Марапулец Ю. В. Рыбопромысловая гидроакустика: учебно-методическое пособие //Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. – 2004. – Т. 2. - 260 с.

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

40. Кирьянов А. В. Влияние мелкомасштабных неоднородностей скорости звука на зональную структуру акустических полей в океанических волноводах //Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2018. – №. 2 (35). – С. 64-70.

41. Копыл Е. А., Лысанов Ю. П. Об угловой зависимости коэффициента рассеяния звука на анизотропных объемных неоднородностях океана // Акуст. журн. – 2004. – Т. 50. – №. 5. – С. 671-671.

42. Кушнерик А. А. и др. Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №. 3. – С. 67-72.

43. Лебедев Г. А., Сухоруков К. К. Распространение электромагнитных и акустических волн в морском льду // Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 2001 г.

44. Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. – 273 с.

45. Лобанов В. Б. и др. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря //Дальневосточные моря России. – 2007. – С. 450-473.

46. Луньков А. А., Петников В. Г. Распространение звука в мелководном арктическом волноводе с ледовым покровом //УЗФФ. – 2017. – №. 5. – С. 4.

47. Лысанов Ю. П., Плоткин А. М. Акустический эффект тонкой структуры поля скорости звука в океане //Акуст. журн. – 1987. – Т. 33. – №. 6. – С. 1079-1082.

48. Макаров А. И., Дворников В. Д., Конопелько В. К. Передача информации в гидроакустическом канале //Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2004. – №. 2 (6). – С. 103-118.

49. Мальцев Н.Е. Математические модели звуковых полей в океане (задачи и методы) //Акустика океанской среды. М.: Наука, – 1989. – С. 4-10 / отв. редакторы Л.М. Бреховских, И.Б. Андреева.

50. Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода-атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток, 2007. 159 с.

51. Немировская И.А. Нефть в океане. М., 2013. 432 с.

52. Никитин А. А., Юрасов Г. И., Ванин Н. С. Спутниковые наблюдения синоптических вихрей и геострофическая циркуляция вод Японского моря //Исследование Земли из космоса. – 2012. – №. 2. – С. 28-40.

53. Обжиров А. И. и др. Нефтегазоносность и газогидраты в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – №. 2. – С. 55-62.

54. Обжиров А.И., Астахова Н.В., Липкина М.И., Верещагина О.Ф., Мишукова Г.И., Сорочинская А.В., Югай И.Г. Газохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря. Владивосток, 1999. 184 с.

55. Островский А. Г. и др. Заякоренная роботизированная профилирующая океанская обсерватория для целей мониторинга критических акваторий, охраны морской среды и научных исследований //Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2009. – Т. 3. – С. 57-64.

56. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М., 2017. 326 с.

57. Патин С.А. Экологические проблемы освоения нефтегазовых ресурсов морского шельфа. М., 1997. 350 с.

58. Пискарев А. Л. О расчете усредненных распределений интенсивности звуковых полей в океане //Акуст. журн. – 1989. – Т. 35. – №. 4. – С. 724-731.

59. Пономарёв В. И. и др. Синоптические вихри над материковым склоном Японской котловины и шельфом Приморья //Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). – 2011. – Т. 167. – С. 160-175.

60. Пономарев В. И. и др. Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений) //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – №. 2. – С. 100-104.

61. Родионов А. Ю. и др. Экспериментальная оценка точности определения дистанций гидроакустическими модемами в частотном диапазоне 12 кГц //XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2020. – С. 81-83.

62. Родионов А.Ю., Кулик С.Ю., Унру П.П., Кирьянов А.В. Патент на полезную модель № 198284. Устройство гидроакустической связи для подводной навигации. Дата приоритета 26.12.2019 г.

63. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля //М.: Наука. – 1978. 464 с.

64. Сабинин К.Д., Деев М.Г. Локальный радиус Россби и параметры внутритермоклинных вихрей (линз) в океане //Океанология. – 1991. – Т.31. – № 5. – С. 714-719.

65. Сальников Б. А., Сальникова Е. Н. Моделирование и исследование зональной структуры акустических полей в случайно-неоднородных подводных волноводах //Подводные исследования и робототехника. – 2008. – №. 1. – С. 47-57.

66. Сальников Б.А. и др. Программа для ЭВМ: «Программа для расчета зональной структуры акустических полей в стохастических подводных волноводах». Свидетельство о государственной регистрации № 2013613344.

67. Сальникова Е.Н. и др. Программа для ЭВМ: «Программа для обработки и систематизации промежуточных результатов при расчете зональной структуры акустических полей в стохастических подводных волноводах». Свидетельство о государственной регистрации № 2015615848.

68. Салюк П. А. и др. Возможность дистанционного обнаружения повышенных концентраций метана в морской воде с использованием методов оптической спектроскопии на подводных телеуправляемых аппаратах //Подводные исследования и робототехника. – 2011. – №. 2. – С. 43-51.

69. Урик Р. Д. Основы гидроакустики. Л., 1978. 448 с.

70. Филиппов Б. И., Замятина Ю. В. Помехи в гидроакустических каналах с пространственной неоднородностью //Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – №. 4. – С. 83-97.

71. Шакиров Р. Б., Сырбу Н. С., Обжиров А. И. Изотопно-газогеохимические особенности распределения метана и углекислого газа на о. Сахалин и прилегающем шельфе Охотского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. – 2012.

72. Akyildiz I. F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges //Ad hoc networks. – 2005. – Т. 3. – №. 3. – С. 257-279.

73. Albaladejo C. et al. Wireless sensor networks for oceanographic monitoring: A systematic review //Sensors. – 2010. – Т. 10. – №. 7. – С. 6948-6968.

74. Anderson B., Crowell J. Workhorse AUV-a cost-sensible new autonomous underwater vehicle for surveys/soundings, search & rescue, and research. – IEEE, 2005. – С. 1-6.

75. Bahamon N. et al. The new pelagic Operational Observatory of the Catalan Sea (OOCS) for the multisensor coordinated measurement of atmospheric and oceanographic conditions //Sensors. – 2011. – Т. 11. – №. 12. – С. 11251-11272.

76. Barnes C. R. et al. Challenges, benefits and opportunities in operating cabled ocean observatories: perspectives from NEPTUNE Canada //2011 IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. – IEEE, 2011. – С. 1-7.

77. Beron-Vera F. J. et al. Ray dynamics in a long-range acoustic propagation experiment //The Journal of the Acoustical Society of America. – 2003. – Т. 114. – №. 3. – С. 1226-1242.

78. Boulart C., Connelly D. P., Mowlem M. C. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels //TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2010. – Т. 29. – №. 2. – С. 186-195.

79. Breen J. et al. Analysis of heavy metals in marine sediment using a portable X-ray fluorescence spectrometer onboard an Autonomous Underwater Vehicle //2012 Oceans-Yeosu. – IEEE, 2012. – С. 1-5.

80. Brown H., Kim A., Eustice R. M. An overview of autonomous underwater vehicle research and testbed at PeRL //Marine Technology Society Journal. – 2009. – С. 33-47.

81. Caiti A. et al. Linking acoustic communications and network performance: Integration and experimentation of an underwater acoustic network //IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2013. – Т. 38. – №. 4. – С. 758-771.

82. Camilli R. et al. Tracking hydrocarbon plume transport and biodegradation at Deepwater Horizon //Science. – 2010. – Т. 330. – №. 6001. – С. 201-204.

83. Chan H. C. et al. Preliminary plan of underwater environmental monitoring in the offshore wind farm in the western sea of Taiwan //2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen. – IEEE, 2013. – С. 1-4.

84. Chave A. D. et al. Cabled ocean observatory systems //Marine technology society journal. – 2004. – Т. 38. – №. 2. – С. 30-43.

85. Chitre M., Shahabudeen S., Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges //Marine technology society journal. – 2008. – Т. 42. – №. 1. – С. 103-116.

86. Colosi J. A., Brown M. G. Efficient numerical simulation of stochastic internal-wave-induced sound-speed perturbation fields //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1998. – Т. 103. – №. 4. – С. 2232-2235.

87. Colosi J. A., Flatte S. M. Mode coupling by internal waves for multimegameter acoustic propagation in the ocean //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1996. – Т. 100. – №. 6. – С. 3607-3620

88. Creuze V., Parodi O., Xiang X. Design, simulation and experimental results of Taipan 300, a new Autonomous Underwater Vehicle prototype //OCEANS 2009-EUROPE. – IEEE, 2009. – С. 1-6.

89. Cruz N. A., Matos A. C. The MARES AUV, a modular autonomous robot for environment sampling //OCEANS 2008. – IEEE, 2008. – С. 1-6.

90. de Souza F. A. et al. Optimizing the number of hops and retransmissions for energy efficient multi-hop underwater acoustic communications //IEEE Sensors Journal. – 2016. – Т. 16. – №. 10. – С. 3927-3938.

91. Duda T. F. et al. Measured wave-front fluctuations in 1000-km pulse propagation in the Pacific Ocean //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1992. – Т. 92. – №. 2. – С. 939-955.

92. Duennebier F. K. et al. HUGO: The Hawaii undersea geo-observatory //IEEE journal of oceanic engineering. – 2002. – Т. 27. – №. 2. – С. 218-227.

93. Ervin W. P., Madden J. P., Pollitt G. W. Unmanned underwater vehicle Independent Test and evaluation //Johns Hopkins APL Technical Digest. – 2014. – Т. 32. – №. 5. – С. 752-761.

94. Farrell J. A. et al. Chemical plume tracing experimental results with a REMUS AUV //Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492). – IEEE, 2003. – Т. 2. – С. 962-968.

95. Favali P. et al. Seafloor observatory science //Proc. OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society. – ESA Publication, 2010, – С. 306.

96. Freitag L. et al. Acoustic communications under shallow shore-fast Arctic ice //OCEANS 2017-Anchorage. – IEEE, 2017. – С. 1-5.

97. Furlong M. E. et al. Autosub long range: a long range deep diving auv for ocean monitoring. IEEE-OES Auton Underw Veh. – 2012.

98. Gallager S. M. et al. Design, installation, and operation of the PLUTO observatory, Isla de Canales de Tierra, Panama //OCEANS 2008. – IEEE, 2008. – С. 1-10.

99. Garrett C., Munk W. Internal waves in the ocean //Annual review of fluid mechanics. – 1979. – Т. 11. – №. 1. – С. 339-369.

100. Gordon A. L. et al. Japan/East Sea intrathermocline eddies //Journal of Physical Oceanography. – 2002. – Т. 32. – №. 6. – С. 1960-1974.

101. Gorovoy S., Kiryanov A., Zheldac E. Characteristics of underwater noise near the west roadstead of the port of Vladivostok //Proceedings of Meetings on Acoustics PRUAC2015. – Acoustical Society of America, 2015. – Т. 24. – №. 1. Article number 070016.

102. Hagen P. E., Kristensen J. The HUGIN AUV" plug and play" payload system //OCEANS'02 MTS/IEEE. – IEEE, 2002. – Т. 1. – С. 156-161.

103. Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2012. – Т. 370. – №. 1958. – С. 158-175.

104. Heidemann J. et al. Research challenges and applications for underwater sensor networking //IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. – IEEE, 2006. – T. 1. – C. 228-235.

105. Hirata K. et al. Real-time geophysical measurements on the deep seafloor using submarine cable in the southern Kurile subduction zone //IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2002. – T. 27. – №. 2. – C. 170-181.

106. Howe J. A. et al. Autonomous underwater vehicle (AUV) observations of recent tidewater glacier retreat, western Svalbard //Marine Geology. – 2019. – T. 417. – C. 106009.

107. Jacobs G. A., Hogan P. J., Whitmer K. R. Effects of eddy variability on the circulation of the Japan/East Sea //Journal of oceanography. – 1999. – T. 55. – №. 2. – C. 247-256.

108. Jensen F. B. et al. Computational ocean acoustics. – New York : Springer, 2011. – T. 794.

109. Jensen F. Numerical models of sound propagation in real oceans //OCEANS 82. – IEEE, 1982. – C. 147-154.

110. Jurdak R., Lopes C. V., Baldi P. Battery lifetime estimation and optimization for underwater sensor networks //IEEE Sensor Network Operations. – 2004. – T. 2006. – C. 397-420.

111. Kebkal O. et al. D-MAC: Media access control architecture for underwater acoustic sensor networks //OCEANS 2011 IEEE-Spain. – IEEE, 2011. – C. 1-8.

112. Kiryanov A. V. et al. Modeling and study of main regularities of the formation of sound fields in randomly inhomogeneous underwater waveguides //Proceedings of Meetings on Acoustics PRUAC2015. – Acoustical Society of America, 2015. – T. 24. – №. 1. Article number 070008.

113. Kiryanov A. V. et al. Regional Variability of Influence of Small-Scale Sound-Speed Fluctuation Levels on the Acoustic Fields Formation in the Ocean //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – T. 272. – №. 2. – C. 022144.

114. Kiryanov A. V., Salnikov B. A., Salnikova E. N. Formation Characteristics of the Zonal Structure of Acoustic Fields in the Deep Part of the Sea of Japan //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – Т. 272. – №. 3. – С. 032029.

115. Kukulya A. L. et al. Development of a propeller driven long range autonomous underwater vehicle (LRAUV) for under-ice mapping of oil spills and environmental hazards: An Arctic Domain Center of Awareness project (ADAC) //2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). – IEEE, 2016. – С. 95-100.

116. Kumar S. V., Jayaparvathy R., Priyanka B. N. Efficient path planning of AUVs for container ship oil spill detection in coastal areas //Ocean Engineering. – 2020. – Т. 217. – С. 107932.

117. Langebrake L. C. et al. Design and initial results of a bottom stationing ocean profiler //OCEANS'02 MTS/IEEE. – IEEE, 2002. – Т. 1. – С. 98-103.

118. Li Y. et al. To relay or not to relay: Open distance and optimal deployment for linear underwater acoustic networks //IEEE Transactions on Communications. – 2018. – Т. 66. – №. 9. – С. 3797-3808.

119. Liu S., Song A., Shen C. Acoustic communication channel model in the under-ice environment //OCEANS 2016-Shanghai. – IEEE, 2016. – С. 1-5.

120. Marinaro G. et al. A cabled monitoring module for gas seepage: the first experiment in a pockmark (Patras Gulf, Greece) //2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. – IEEE, 2007. – С. 343-348.

121. McCarthy E. Policy Development //International Regulation of Underwater Sound: Establishing Rules and Standards to Address Ocean Noise Pollution. – 2004. – С. 121-168.

122. McCarthy K. Cover Story: REMUS--A role model for AUV technology transfer //International Ocean Systems. – 2003. – Т. 7. – №. 6. – С. 22-23.

123. Moody R. Development of a biological sensor bay for the Ranger AUV //Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492). – IEEE, 2003. – Т. 4. – С. 2184-2188.

124. Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A. Tidal correction of altimetric data in the Japan Sea //Journal of oceanography. – 2000. – Т. 56. – №. 1. – С. 31-41.

125. Morris K. J. et al. Landscape-scale spatial heterogeneity in phytodetrital cover and megafauna biomass in the abyss links to modest topographic variation //Scientific Reports. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-10.

126. Munk W. H. Sound channel in an exponentially stratified ocean, with application to SOFAR //The journal of the acoustical society of America. – 1974. – Т. 55. – №. 2. – С. 220-226.

127. Nam S. H. et al. Application of Real-Time Monitoring Buoy Systems for Physical and Biochemical Parameters in the Coastal Ocean around the Korean Peninsula //Marine Technology Society Journal. – 2005. – Т. 39. – №. 2.

128. Pedersen O. P. et al. On the use of the HUGIN 1000 HUS Autonomous Underwater Vehicle for high resolution zooplankton measurements //Journal of Operational Oceanography. – 2010. – Т. 3. – №. 1. – С. 17-25.

129. Pérez C. A. et al. A system for monitoring marine environments based on wireless sensor networks //OCEANS 2011 IEEE-Spain. – IEEE, 2011. – С. 1-6.

130. Phibbs P., Lentz S. Cabled ocean science observatories as test beds for underwater technology //OCEANS 2007-Europe. – IEEE, 2007. – С. 1-5.

131. Pirie R. L. A study of ambient noise in shallow water. – Florida Atlantic University, 1999.

132. Porter M. B. The bellhop manual and user's guide: Preliminary draft //Heat, Light, and Sound Research, Inc., La Jolla, CA, USA, Tech. Rep. – 2011. – Т. 260. - С. 57.

133. Sacile R., Bersani C., Zheldak E. M. Optimal placement of underwater buoys for oil spill monitoring //Современные технологии и развитие политехнического образования. – 2016. – С. 754-758.

134. Sangfelt E., Ivansson S., Karasalo I. Under-ice shallow-water sound propagation and communication in the Baltic Sea //Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013. – Acoustical Society of America, 2013. – Т. 19. – №. 1. – С. 1-8.

135. Shengyu T. et al. Under-ice underwater acoustic communication based on direct sequence spread spectrum system with parametric emission //2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). – IEEE, 2016. – С. 1-4.

136. Shinohara M., Kanazawa T., Shiobara H. Recent progress in ocean bottom seismic observation and new results of marine seismology //2011 IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. – IEEE, 2011. – С. 1-7.

137. Stojanovic M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel //ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. – 2007. – Т. 11. – №. 4. – С. 34-43.

138. Stokey R. P. et al. Development of the REMUS 600 autonomous underwater vehicle //Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. – IEEE, 2005. – С. 1301-1304.

139. Smolyaninov I., Balzano Q., Young D. Development of broadband underwater radio communication for application in unmanned underwater vehicles //Journal of Marine Science and Engineering. – 2020. – Т. 8. – №. 5. – С. 370.

140. Van Uffelen L. J. et al. The vertical structure of shadow-zone arrivals at long range in the ocean //The Journal of the Acoustical Society of America. – 2009. – Т. 125. – №. 6. – С. 3569-3588.

141. Van Uffelen L. J. et al. Effects of upper ocean sound-speed structure on deep acoustic shadow-zone arrivals at 500-and 1000-km range //The Journal of the Acoustical Society of America. – 2010. – Т. 127. – №. 4. – С. 2169-2181.

142. Van Walree P., Sangfelt E., Leus G. Multicarrier spread spectrum for covert acoustic communications. – IEEE, 2008. – С. 1-8.

143. Yoshida H. et al. Underwater LF wave propagation study for positioning //OCEANS 2017-Aberdeen. – IEEE, 2017. – С. 1-5.

144. Zaeri N. Marine environment monitoring system for Kuwaiti water territories //2006 IEEE GCC Conference (GCC). – IEEE, 2006. – С. 1-5.

145. ПАО «НК «Роснефть». Шельфовые проекты [электронный ресурс] URL: https://www.rosneft.ru/business/Upstream/offshore/ (дата обращения 18.12.2020 г.)

146. ПАО «Газпром». Проекты [электронный ресурс] URL: https://www.gazprom.ru/projects/ (дата обращения 18.12.2020 г.)

147. Kenneth J. Bird, Ronald R. Charpentier, Donald L. Gautier (CARA Project Chief), David W. Houseknecht, Timothy R. Klett, Janet K. Pitman, Thomas E. Moore, Christopher J. Schenk, Marilyn E. Tennyson, and Craig J. Wandrey. Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2008-3049 [электронный ресурс] URL: http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/ (дата обращения 25.12.2020 г.)

148. План действий по охране, управлению и развитию морской и прибрежной окружающей среды региона северо-западной части Тихого океана [электронный ресурс] URL: https://www.unenvironment.org/nowpap/ru (дата обращения 18.12.2020 г.)

149. Арктический совет [электронный ресурс] URL: https://arctic-council.org/ru/ (дата обращения 18.12.2020 г.)

150. Seawatch [электронный ресурс] URL: https://www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/monitoring-and-forecasting/seawatch (дата обращения 18.12.2020 г.)

151. Международная программа по собору океанологических данных Argo [электронный ресурс] URL: http://www.argo.ucsd.edu/ (дата обращения 15.02.2020 г.)

152. Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук. Позиционная автономная гидрофизическая измерительная станция (ПАГИС) [электронный ресурс] URL: https://skbsami.ru/const/2021/04/27/pagis.html (дата обращения 20.12.2020 г.)

153. Продукция компании Hydroid [электронный ресурс] URL: https://www.hydroid.com/products (дата обращения 07.01.2021 г.)

154. Gavia AUV [электронный ресурс] URL: http://www.teledynemarine.com/gavia-auv (дата обращения 07.01.2021 г.)

155. Bluefin Robotics Unmanned Underwater Vehicles [электронный ресурс] URL: www.bluefinrobotics.com (дата обращения 07.01.2021 г.)

156. Института проблем морских технологий ДВО РАН. Инновационные разработки [электронный ресурс] URL: http://www.imtp.febras.ru/razrabotki/ (дата обращения 12.01.2021 г.)

157. Агентство морских исследований и технологии Японии. Глубоководный АНПА Urashima [электронный ресурс] URL: https://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/urashima.html (дата обращения 12.01.2021 г.)

158. Autonomous Underwater Vehicle HUGIN [электронный ресурс] URL: https://www.kongsberg.com/ru/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/AUV-hugin/ (дата обращения 12.01.2021 г.)

159. Kongsberg Maritime. Modems for underwater communication [электронный ресурс] URL: https://www.kongsberg.com/ru/maritime/products/Acoustics-Positioning-and-Communication/modems/ (дата обращения 07.05.2021 г.)

160. LinkQuest Inc. Underwater Acoustic Modem Models [электронный ресурс] URL: http://www.link-quest.com/html/models1.htm (дата обращения 07.05.2021 г.)

161. Sonardyne. Acoustic and Optical Communications Family [электронный ресурс] URL: https://www.sonardyne.com/product/acoustic-and-optical-communications-family/ (дата обращения 07.05.2021 г.)

162. Teledyne Marine. Acoustic communication [электронный ресурс] URL: http://www.teledynemarine.com/acoustic-modems (дата обращения 07.05.2021 г.)

163. EvoLogics. Underwater Acoustic Modems [электронный ресурс] URL: https://evologics.de/acoustic-modems (дата обращения 07.05.2021 г.)

164. Photon Systems, Inc. Deep ocean AUV sensor for trace chemical/biological material [электронный ресурс] URL: https://photonsystems.com/deep-ocean-auv-sensor/ (дата обращения 20.06.2021 г.)

165. Kongsberg Maritime. CONTROS-HydroC-CH4 [электронный ресурс] URL: www.kongsberg.com/maritime/products/mapping-systems/Chemical-Sensors-and-Analyzers/CONTROS-HydroC-CH4/ (дата обращения 15.05.2019 г)

166. Franatech. Laser methane sensor [электронный ресурс] URL: https://www.franatech.com/laser-methane-sensor.html (дата обращения 15.05.2019 г)

167. Subctech [электронный ресурс] URL: http://www.subctech.com (дата обращения 17.05.2019 г).

168. Pro-oceanus [электронный ресурс] URL: https://pro-oceanus.com (дата обращения 17.05.2019 г)

169. Sea-Bird Scientific. SeaOWL UV-A™ (Sea Oil-in-Water Locator) [электронный ресурс] URL: https://www.seabird.com/fluorometers/seaowl-uv-a-sea-oil-in-water-locator/family?productCategoryId=54627869907 (дата обращения 20.05.2019 г)

170. Turner Designs. Cyclops-7F Submersible Sensors [электронный ресурс] URL: https://www.turnerdesigns.com/cyclops-7f-submersible-fluorometer (дата обращения 20.05.2019 г)

171. Hach. Датчик нефтепродуктов FP360 sc [электронный ресурс] URL: https://ru.hach.com/-/fp360-sc/family?productCategoryId=22216202805 (дата обращения 07.05.2019 г)

172. Teledyne Marine. Autonomous underwater gliders [электронный ресурс] URL: http://www.teledynemarine.com/autonomous-underwater-gliders (дата обращения 20.05.2019 г.)

173. Mariscope. Commander MKII [электронный ресурс] URL: https://www.mariscope.de/product/commander-mk2/ (дата обращения 20.05.2019 г)

174. ФГБУ «ААНИИ» [электронный ресурс] URL: http://www.aari.ru (дата обращения 08.07.2021 г.)

175. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [электронный ресурс] URL: http://www.esimo.ru/atlas/ (дата обращения 26.09.2021)

176. ООО «Аквателеком» [электронный ресурс] URL: https://aquatele.com/ (дата обращения 03.12.2021 г.)

Приложение А

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018612054

Моделирование распространения звука в двумерно-неоднородных подводных волноводах в лучевом приближении

Правообладатель: ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ) (RU)***

Авторы: ***Злобин Дмитрий Владимирович (RU), Кирьянов Алексей Валерьевич (RU), Сальников Борис Александрович (RU)***

Заявка № **2017662764**

Дата поступления **11 декабря 2017 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***09 февраля 2018 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015615848

Программа для обработки и систематизации промежуточных результатов при расчете зональной структуры акустических полей в стохастических подводных волноводах

Правообладатель: ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ) (RU)***

Авторы: ***см. на обороте***

Заявка № **2015612656**
Дата поступления **06 апреля 2015 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***26 мая 2015 г.***

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

Приложение Б

Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2499282

СЕТЬ ДЛЯ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИИ

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2012124390**

Приоритет изобретения **13 июня 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***20 ноября 2013 г.***

Срок действия патента истекает **13 июня 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 499 282** (13) **C1**

(51) МПК
G01V 1/38 (2006.01)
H04B 11/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2012124390/28, 13.06.2012**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
13.06.2012

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **13.06.2012**

(45) Опубликовано: **20.11.2013** Бюл. № **32**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2029708 C1, 27.02.1995. RU 2192655 C2, 10.11.2002. RU 2297940 C2, 27.04.2007. RU 2325674 C1, 27.05.2008. RU 2344962 C1, 27.01.2009. US 2010246331 A1, 30.09.2010. US 2012063262 A1, 15.03.2012.**

Адрес для переписки:
690950, Приморский край, г.Владивосток, ГСП, ул. Суханова, 8, ДВФУ, отдел интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
Дмитриев Игорь Александрович (RU),
Желдак Евгений Михайлович (RU),
Кирьянов Алексей Валерьевич (RU),
Петухов Валерий Иванович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)

RU 2499282 C1

(54) СЕТЬ ДЛЯ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИИ

(57) Реферат:

Использование: изобретение относится к области приборостроения и может быть использовано в системах мониторинга акваторий для обеспечения сбора и передачи данных. Сущность: сеть для мониторинга акватории выполнена с возможностью обмена информацией с внешним ее приемником, образована заякоренными гидроакустическими буями, обладающими положительной плавучестью, снабженными системой контроля и управления, средствами фиксации контролируемых параметров водной среды и гидроакустическими модемами.

Гидроакустические буи удалены друг от друга на расстояния, соответствующие максимально допустимой для данного района дальности приема-передачи по гидроакустическому каналу, при этом система контроля и управления каждого буя снабжена средствами измерения скорости звука на различной глубине участка акватории, подвергающегося мониторингу, с возможностью управления глубиной погружения буя, который снабжен средствами изменения его местоположения по глубине акватории, при этом каждый гидроакустический буй установлен с возможностью информационного обмена по гидроакустическому каналу, по меньшей мере, с одним из буев сети, причем, по меньшей мере, один из заякоренных гидроакустических буев сети выполнен с возможностью обмена по радиоканалу с внешним приемником информации. Технический результат: увеличение фактической дальности передачи данных по гидроакустическому каналу связи. 2 ил.

RU 2499282 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2501044

СЕТЬ ДЛЯ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИИ

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2012124385**

Приоритет изобретения **13 июня 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***10 декабря 2013 г.***

Срок действия патента истекает **13 июня 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов