Министерство науки и высшего образования
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук



На правах рукописи
УДК 534.2

Горовой Сергей Владимирович

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ МЕЛКОВОДНЫХ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ И ШУМОВ ЛЕГКОВОДОЛАЗОВ

Специальность: 1.3.7 – Акустика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Кандидат технических наук, доцент
Тагильцев Александр Анатольевич

Владивосток – 2026

Оглавление

Введение ……..……..…….…….. 4

Глава 1 Модели спектральных и статистических характеристик гидроакустических шумов ……..……..……..……... 14

1.1 Модели характеристик гидроакустических шумов, используемые при решении задач прикладной гидроакустики ……..…….……...……. 14

1.2 Модели спектральной плотности гидроакустического шума и его огибающей .. 17

1.3. Модели плотности распределения вероятностей мгновенных значений гидроакустического шума и его огибающей …….……..…. 19

1.4 Использование векторных и векторно-скалярных приемников для уточнения моделей характеристик гидроакустических шумов и шумовых полей …….. 23

1.5 Выводы по первой главе ……..…….……... 28

Глава 2 Разработанные технические средства экспериментальных исследований …..… 31

2.1 Трехкомпонентный приемник градиента давления инерционного типа ……. 32

2.2 Двухкомпонентный приемник градиента давления силового типа …….…… 37

2.3 Гибкая реконфигурируемая 12-элементная антенна с блоком усиления и полосовой фильтрации сигналов …….....……..……..…… 43

2.4 Выводы по второй главе …… 45

Глава 3 Спектральные и статистические характеристики гидроакустических шумов мелководных прибрежных акваторий и уточнение их моделей ……..……. 46

3.1 Статистические характеристики мгновенных значений звукового давления и градиента звукового давления гидроакустических шумов ……..……. 46

3.2 Интервалы квазистационарности спектральных характеристик гидроакустических шумов ……..……..…….. 61

3.3 Спектральные характеристики огибающих гидроакустических шумов ……. 67

3.4 Выводы по третьей главе ……..…….…….. 75

Глава 4 Спектральные и статистические характеристики шумов легководолазов …..... 78

4.1 Особенности процесса шумоизлучения легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла ……..……..… 80

4.2 Характеристики шумов неподвижного легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла в мелководной прибрежной акватории …… 85

4.3 Характеристики шумов неподвижного легководолаза с дыхательным аппаратом замкнутого цикла в мелководной прибрежной акватории …… 98

4.4 Определение местоположения и скорости движения легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла по его гидроакустическим шумам …… 106
4.5 Выводы по четвертой главе …….…… 117
Заключение ……..…….. 119
Список сокращений ……..…… 122
Список литературы ……..……. 123

Введение

Под гидроакустическим (ГА) шумом (подводным шумом, ГА шумовым фоном) далее подразумевается совокупность шумов природного, биологического и техногенного происхождения, наблюдаемых в водной среде с помощью гидроакустических приемников независимо от наличия гидроакустических сигналов и источников излучения, подлежащих обнаружению, приему, измерению параметров или классификации [1, 2]. В качестве основных физических величин, используемых для описания, в линейном приближении, зависимости от времени свойств ГА шума в заданной точке водной среды используются звуковое давление и колебательная скорость (или градиент звукового давления). В общем случае свойства ГА шума зависят не только от времени, но и от пространственных координат точки, в которой они исследуются. Под ГА шумовым полем в заданной области пространства подразумевается совокупность зависящих от времени и координат значений звукового давления, колебательной скорости или градиента звукового давления в точках этой области пространства.

Актуальность темы исследования. Знание зависимостей от времени и координат спектральных и статистических характеристик звукового давления и колебательной скорости ГА шумов (и в более общей постановке – пространственно–временны́х ГА шумовых полей) позволяет улучшить и более точно прогнозировать не только усредненные, но и достижимые «здесь и сейчас», т.е. в заданной точке Мирового океана в реальном масштабе времени характеристики приемных ГА средств. Изучение ГА шумов в различных районах Мирового океана продолжается в России и за рубежом на протяжении более 70 лет [1], но опубликованных о них сведений не всегда достаточно для прогнозирования практически достижимых характеристик ГА средств в реальном масштабе времени [2]. Кроме того, наблюдается отставание возможностей аппаратуры, используемой для приема и регистрации ГА шумов, от потребностей практики. Все это предопределяет актуальность продолжения углубленного изучения временно́й изменчивости пространственных, спектральных и статистических характеристик ГА шумов, а также разработки и совершенствования ГА приемников, пригодных для работы на уровне ГА шумов [2, 3].

Наименее изученной и наиболее трудно прогнозируемой является пространственно–временна́я структура низкочастотных (НЧ), на частотах ниже 3000 Гц, ГА шумов и шумовых полей в мелководных, с глубинами менее 30 м, прибрежных акваториях (бухтах, заливах, проливах) с интенсивным судоходством, развитой береговой инфраструктурой, вблизи морских портов и др. В таких акваториях спектральные и статистические характеристики ГА НЧ шумов могут непредсказуемо изменяться на интервалах времени порядка десятых долей секунд и более.

Это затрудняет работу ГА средств, особенно в автономном режиме, без участия человека–оператора.

В ГА шумах мелководных акваторий, в отличии от глубоководных, могут присутствовать и составляющие, обусловленные дыханием, движением и деятельностью легководолазов, выполняющих учебные и спортивные погружения, а также различные работы под водой (в том числе с использованием технических средств). Нахождение человека под водой связано с риском для жизни [4, 5], поэтому исследование характеристик шумов легководолазов важно для создания систем дистанционного, в пассивном режиме, мониторинга их дыхания, физиологического и психоэмоционального состояния, а также контроля перемещений под водой. Необходимо отметить, что в настоящее время к «традиционным» техногенным шумам добавляются новые, связанные с освоением шельфа и расширяющимися областями использования средств подводной робототехники. Создаваемые легководолазами ГА шумы характеризуются относительно низкими, по сравнению с шумами моря, уровнями звукового давления. Знание временно́й изменчивости спектральных и статистических характеристик этих шумов необходимо для разработки средств выявления их в акватории, контроля перемещений легководолазов, а также изучения особенностей дыхания человека под водой, и в перспективе – построения систем дистанционного контроля фактического функционального и психоэмоционального состояния легководолазов непосредственно во время погружений.

В результате исследований временно́й изменчивости спектральных и статистических характеристик ГА шумов глубоководных и мелководных акваторий [6–9] установлено наличие в них интервалов квазистационарности и перемежающихся с ними интервалов нестационарности. На первых, длительностью от десятых долей до десятков секунд и более, изменениями характеристик, описывающих шумовой процесс, пренебречь можно, на вторых – нельзя, это приведет к повышению частоты ошибочных решений прикладных задач, таких как обнаружение, измерение параметров и классификация источников подводного шума и ГА сигналов, оценка помехо–сигнальной обстановки и др. Используя методы обработки сигналов, основанные на теории стационарных случайных процессов [10–17], на интервалах квазистационарности в ряде случаев удается получать более высокие и стабильные фактические и точнее прогнозировать достижимые результаты решения вышеназванных прикладных задач. Это определяет актуальность контроля, особенно в реальном масштабе времени в мелководных акваториях, временно́й изменчивости спектральных и статистических характеристик подводных шумов, выявления их интервалов квазистационарности и нестационарности а также уточнения моделей, описывающих характеристики ГА шумов на этих интервалах для улучшения адаптации разрабатываемых и уже эксплуатируемых ГА средств, в том числе работающих без участия человека–оператора, к изменениям характеристик данных шумов.

Аналогичные задачи являются актуальными и в других областях науки и техники: непрерывное, в автоматическом режиме оценивание параметров проводных и радио– каналов в сетях передачи данных, радиосвязи, радиолокации и др. и адаптации к их изменениям [15–18]).

Для решения вышеуказанных прикладных задач гидроакустики, а также акустической томографии океана и др. первоочередный практический интерес представляют интервалы квазистационарности одномерных спектральных характеристик, в пределах которых можно пренебречь, применительно к решаемым задачам, изменениями со временем в некоторых пределах (например $\pm$3 дБ) спектральных плотностей, а также интервалы квазистационарности одномерных статистических характеристик, на которых можно пренебречь изменениями со временем одномерных плотностей распределения вероятностей (ПРВ) последовательных мгновенных значений звукового давления, компонент его градиента или колебательной скорости и их огибающих [2, 3, 19]. Для описания ГА шумов на интервалах квазистационарности, применительно к техническим задачам, используются подробно разработанные и неоднократно апробированные методы корреляционной теории стационарных эргодических случайных процессов [10–12, 15–17, 19–23]. Это существенно упрощает интерпретацию результатов исследования характеристик ГА шумов и построение (уточнение) их моделей, пригодных для использования в системах адаптации ГА аппаратуры к изменениям шумового фона и помехо–сигнальных ситуаций в реальном масштабе времени.

Спектральные и статистические характеристики ГА шумов связаны друг с другом, но условия, при которых допустимо пренебрегать их изменениями при решении вышеперечисленных задач могут отличаться. Поэтому интервалы квазистационарности спектральных и статистических характеристик, применительно к разным задачам, могут определяться по-разному, иметь различные длительности и не совпадать друг с другом, что привносит дополнительные сложности в интерпретацию помеховых и помехо–сигнальных ситуаций и др.

Спектральные и статистические характеристики природных и техногенных подводных шумов, структуры их когерентных и диффузных составляющих [24–28] даже в смежных акваториях могут существенно различаться. Это затрудняет обобщение результатов исследования ГА шумов и их распространение на другие акватории и географические районы. Тем не менее, результаты изучения ГА шумов и построения моделей их характеристик в нескольких отдельно взятых акваториях позволяют сформировать базовые и оценочные данные для других.

Ввиду сложности создания теоретических моделей, описывающих изменчивость характеристик ГА шумов даже отдельно взятых мелководных акваторий [25–32], актуальной задачей является разработка и уточнение эмпирических моделей, описывающих, в реальном

масштабе времени, помеховые и помехо–сигнальные ситуации на временны́х интервалах, представляющих интерес для ГА средств обнаружения, измерения параметров и классификации сигналов и источников шумоизлучения в этих акваториях. Длительности таких интервалов составляют, в большинстве случаев, десятые доли – единицы секунд. Последующим этапом, как представляется, становится формирование и систематизация наборов (библиотек) таких моделей, с переходом в дальнейшем к описанию изменчивости ГА пространственно–временны́х шумовых полей [3, 14, 26–28, 31–33 в том числе с использованием методов искусственного интеллекта (ИИ).

Наличие интервалов квазистационарности характерно и для ряда процессов, которые могут рассматриваться не только как источники ГА помех, но и как объекты научных исследований, а также как объекты обнаружения и классификации: шумы кораблей, судов, легководолазов, рыбных скоплений, неоднородностей водной среды и др. Выявление и оценка длительностей таких интервалов представляет самостоятельный интерес. Так, в ГА шумах легководолазов интервалами квазистационарности являются фрагменты фаз вдоха, выдоха и задержки дыхания.

В мелком море наблюдаются акустические эффекты, которые обуславливают необходимость использования векторно–скалярного описания характеристик подводных шумов [26–28, 32, 33]. Для получения информации о характеристиках векторных параметров подводных шумов (колебательная скорость и градиент давления) нужны специализированные исследовательские средства – векторные приемники (ВП), которые принято разделять на приемники колебательной скорости (ПКС) и приемники градиента давления (ПГД). Для получения информации одновременно о характеристиках скалярных и векторных параметров подводных шумов необходимы векторно–скалярные (комбинированные) приемники (ВСП и КП соответственно). Требования к этим приемникам, обоснованные возрастающими практическими потребностями в части повышения чувствительности, расширения частотного и динамического диапазонов, улучшения направленных свойств, уменьшения размеров и др. постоянно возрастают. Поэтому разработка и совершенствование конструкций и технологии изготовления ВП и ВСП для улучшения их характеристик остается актуальной научно–технической задачей [2, 26–28, 33].

Степень разработанности темы исследования. Спектральные, статистические и направленные свойства ГА шумов зависят от ряда трудно поддающихся учету и описанию факторов [1, 24, 25, 29, 31]. Накопление и систематизация экспериментальных данных, позволяющих уточнять модели ГА шумов продолжаются как в России, так и за рубежом более 70 лет. Исследованию ГА шумов в глубоководных и мелководных акваториях Мирового океана, посвящены работы [1, 24 – 43]. Исследованию и построению моделей спектральных и статистических характеристик ГА шумов в морях, омывающих Дальневосточное побережье

России, посвящены работы [36, 44–50]. Для удовлетворения потребностей практики эти исследования необходимо продолжать.

Исследованию и построению моделей, описывающих временну́ю изменчивость усредненных на интервалах порядка десятых долей – единиц секунд характеристик низкочастотных ГА шумов мелководных прибрежных акваторий посвящено крайне малое количество опубликованных работ. В то же время, такие исследования и модели особенно важны для построения и улучшения характеристик систем обнаружения, измерения параметров и классификации ГА сигналов, шумов и источников шумоизлучения, работающих в этих акваториях в реальном масштабе времени.

Весьма важной, особенно для обнаружения и классификации источников подводного шумоизлучения, является информация об огибающих векторных и скалярных характеристик ГА шумов. Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик модуляции огибающих звукового давления ГА шумов моря и судоходства представлены в работах [51–57]. Исследованию огибающих векторных составляющих ГА шумов посвящено очень мало публикаций.

Продолжаются исследования, а также накопление и систематизация экспериментальных данных о ГА шумоизлучении, обусловленном дыханием и движением легководолазов с дыхательными аппаратами открытого и замкнутого циклов. Некоторые результаты экспериментального оценивания спектральной плотности мощности (СПМ) и исследования механизмов образования шумов легководолазов опубликованы в [58–67]. Анализ и сравнение этих результатов затруднены из-за недостаточно подробного описания условий выполнения исследований. Характеристики ГА шумов акваторий, в которых выполнялись исследования шумов легководолазов, в указанных публикациях в большинстве случаев не приводятся. Конкретные сведения об огибающих и статистических характеристиках шумов легководолазов практически отсутствуют.

Для изучения векторных и скалярных характеристик НЧ ГА шумов как мелководных, так и глубоководных акваторий необходимы векторные и векторно–скалярные (комбинированные) приемники (ВП, ВСП и КП). Современное состояние, нерешенные проблемы и результаты разработки конструкций ВП, ВСП, ПГД, ПКС и КП, а также методы и средства экспериментального определения их параметров рассмотрены в [2, 68–81].

Объект исследования. Низкочастотные ГА шумы в мелководных прибрежных акваториях.

Предмет исследования. Временна́я изменчивость спектральных и статистических характеристик низкочастотных ГА шумов в мелководных прибрежных акваториях (на примере залива Петра Великого, Японское море), в том числе шумов, создаваемых легководолазами.

Цель работы. Уточнение эмпирических моделей, описывающих в мелководных, с глубинами менее 30 м прибрежных акваториях, в диапазоне частот 5–3300 Гц временну́ю изменчивость усредненных на интервалах времени длительностью 0.1–1 с спектральных и статистических характеристик ГА шумов различного происхождения, в том числе шумов легководолазов, в интересах повышения эффективности ГА приемных систем за счет совершенствования их адаптации к изменениям характеристик подводных шумов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. В мелководных прибрежных акваториях залива Петра Великого, в диапазоне частот 5–3300 Гц, с использованием разработанных технических средств, выполнить регистрацию ГА шумов, содержащих составляющие природного, биологического и техногенного происхождения в типичных помехо–сигнальных ситуациях. Подготовить и выполнить эксперименты по регистрации в указанном диапазоне частот шумов легководолазов, выполняющих заданные действия.

2. Исследовать возможность применения моделей авторегрессии–скользящего среднего (АРСС) для описания временно́й изменчивости и выявления интервалов квазистационарности усредненных на интервалах 0.1–1 с спектральных характеристик звукового давления зарегистрированных ГА шумов.

3. Исследовать возможность применения гауссовского закона распределения вероятностей для описания временно́й изменчивости и выявления интервалов квазистационарности усредненных на интервалах 0.1–1 с статистических характеристик последовательных мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента зарегистрированных ГА шумов.

4. Для уточнения особенностей шумового фона исследовать временну́ю изменчивость спектральных характеристик огибающих зарегистрированных ГА шумов акваторий.

5. Исследовать временну́ю изменчивость спектральных и статистических характеристик зарегистрированных ГА шумов легководолазов, экипированных дыхательными аппаратами открытого и замкнутого циклов и уточнить описывающие их модели. Применительно к задачам создания систем дистанционного контроля особенностей дыхания легководолазов исследовать характеристики огибающих создаваемых ими ГА шумов.

6. Подготовить и выполнить эксперимент по дистанционному определению, в мелководной акватории, координат и скорости движения легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла по создаваемым им ГА шумам.

7. Разработать технические и программные средства для приема и исследования ГА шумов.

Научная новизна. В результате исследований характеристик зарегистрированных ГА шумов получены результаты, обладающие научной новизной и соответствующие требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

1. Уточнена применимость случайных процессов АРСС в качестве моделей, описывающих зависимость от частоты усредненных спектральных плотностей звукового давления ГА шума на фрагментах длительностью 0.1–1 с. Показано наличие нерегулярно следующих интервалов квазистационарности спектральных характеристик звукового давления ГА шумов длительностью 1–10 с и более в декадных и более узких полосах частот. На всех входящих в них фрагментах длительностью 0.1–1 с параметры моделей АРСС отклоняются от средних для интервалов квазистационарности значений не более, чем на $\pm$10%.

2. Уточнена возможность применения гауссовского закона распределения вероятностей в качестве модели плотности распределения вероятностей (ПРВ) последовательных мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента. Показано, что для произвольно выбранных фрагментов НЧ ГА шума длительностью 0.1–1 с использование гауссовского закона в качестве модели ПРВ мгновенных значений в общем случае неприменимо. В то же время наблюдаются нерегулярно следующие «интервалы гауссовости» ГА шумов длительностью 1–10 с и более. На всех входящих в них фрагментах длительностью 0.1–1 с в качестве моделей ПРВ мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента допустимо использовать гауссовское распределение вероятностей, возможно с зависящей от времени дисперсией.

3. В результате специально выполненных натурных экспериментов оценены спектральные плотности и ПРВ последовательных мгновенных значений звукового давления и градиента звукового давления НЧ ГА шумов, создаваемых легководолазом с дыхательным аппаратом открытого цикла, а также звукового давления шумов легководолаза с дыхательным аппаратом замкнутого цикла.

4. Продемонстрирована возможность дистанционного, в реальном масштабе времени, контроля особенностей дыхания легководолазов по результатам спектрального анализа огибающих создаваемых ими ГА шумов. Показано, что в огибающих ГА шумов мелководных акваторий время от времени наблюдаются составляющие, которые могут быть ошибочно классифицированы как шумы дыхания легководолазов или как признаки присутствия водоизмещающих объектов, подверженных качке.

5. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность определения координат и скорости движения под водой легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла в мелководной акватории по создаваемым им в диапазоне частот 30–1500 Гц ГА шумам на дистанциях от единиц до 250 м и более с использованием двух пар лежащих на дне акватории гидрофонов давления.

6. Разработана и физически обоснована новая конструктивная схема приемника градиента давления (ПГД) силового типа с двумя ортогонально ориентированными векторными приемными каналами и единым фазовым центром, имеющая преимущества для исследования ГА шумов в мелководных акваториях.

Новизна полученных результатов подтверждена их сравнением с результатами ранее опубликованных работ, получением патентов РФ на технические решения, разработанные в ходе исследования, публикацией основных положений диссертации в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и международные базы цитирования Scopus и Web of Science, представлением докладов и обсуждением результатов работы на авторитетных российских и международных научных конференциях.

Научная и практическая значимость работы. Использование в реальном масштабе времени результатов одновременного контроля временно́й изменчивости параметров АРСС моделей и ПРВ мгновенных значений подводных шумов с целью выявления их интервалов квазистационарности и нестационарности открывает возможность уточнения прогноза достижимых в данной помехо–сигнальной обстановке вероятностных характеристик решения задач обнаружения, измерения параметров и классификации сигналов, шумов и источников подводного шумоизлучения ГА средствами, в том числе автономными.

Экспериментально продемонстрированный метод дистанционного определения координат и скорости движения легководолазов по создаваемым ими ГА шумам пригоден для использования в системах контроля перемещений легководолазов на удалениях от единиц до несколько сотен метров.

Использование апробированного в диссертации подхода к оцениванию особенностей дыхательного ритма находящихся под водой легководолазов расширяет возможности дистанционного мониторинга их функционального состояния.

На разработанных и апробированных в натурных условиях технических средствах: трехкомпонентном ПГД инерционного типа, двухкомпонентном ПГД силового типа и реконфигурируемой гибкой 12-элементной антенне проверены технические решения, представляющие интерес для исследований ГА шумов.

Методы и методология исследования. Для исследования характеристик шумов моря и легководолазов использованы методы корреляционной теории стационарных эргодических случайных процессов. Для построения эмпирических ПРВ использован метод гистограмм, для оценивания их соответствия гауссовскому закону распределения использован критерий Хи-квадрат К. Пирсона. Регистрация ГА шумов акваторий, а также шумов легководолазов выполнены с использованием разработанных с участием автора технических средств. Обработка

зарегистрированных ГА шумов выполнена с применением разработанных автором и общедоступных программных средств.

Личный вклад. Все результаты исследований, представленные в диссертации, получены лично автором. Из совместных работ и публикаций в диссертацию включен лишь материал, непосредственно полученный автором. Разработка концепции построения приемников градиента давления и анализ результатов обработки шумов легководолазов выполнены в соавторстве с научным руководителем и В. И. Коренбаумом. Часть экспериментов по регистрации ГА шумов выполнена автором совместно с сотрудниками Дальневосточного федерального университета А.В. Кирьяновым и Е.М. Желдаком. Эксперименты по исследованию шумов легководолазов с дыхательным аппаратами FROGS и АВМ-12-К [82, 83] были поставлены и проведены с личным участием автора и сотрудников ТОИ ДВО РАН на технической базе ТОИ ДВО РАН. Эксперименты по исследованию шумов легководолаза с дыхательным аппаратом Aeris были выполнены с личным участием автора, научного руководителя и В.Г. Сиренко.

Основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

1. Анализ временно́й изменчивости параметров АРСС моделей НЧ ГА шумов, у которых порядок составляющих авторегрессии (АР) и скользящего среднего (СС) не превышает семи, позволяет выявлять в ГА шумах мелководных прибрежных акваторий залива Петра Великого интервалы стационарности и нестационарности спектральных характеристик в декадных и более узких полосах частот.

2. В НЧ ГА шумах мелководных прибрежных акваторий залива Петра Великого эмпирические ПРВ последовательных мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента, оцениваемые на произвольно выбранных интервалах времени длительностью порядка одной секунды и менее, в общем случае не соответствуют гауссовскому закону распределения вероятностей. При этом наблюдаются нерегулярно следующие интервалы подобной длительности (интервалы гауссовости), в том числе образующие непрерывные последовательности длительностью 1–10 с и более, на каждом из которых допустимо, в прикладных задачах, использование гауссовского закона распределения вероятностей (в общем случае с зависящей от времени дисперсией), в качестве модели ПРВ мгновенных значений.

3. С помощью разработанных технических и программных средств экспериментально продемонстрирована возможность дистанционного контроля особенностей дыхательного ритма, оценивания местоположения и скорости перемещения легководолазов под водой по создаваемым ими шумам в мелководных акваториях.

4. Новая конструктивная схема двухкомпонентного ПГД силового типа перспективна для применения в задачах исследования характеристик гидроакустических шумов и шумовых полей в мелководных акваториях.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обеспечивается их непротиворечием положениям акустики и теории случайных процессов, проверкой разработанных автором технических и программных средств с помощью тестовых сигналов, использованием проверенных методов обработки сигналов, а также согласованностью полученных результатов с результатами других исследователей.

Апробация результатов работы. Результаты работы прошли всестороннюю апробацию. Ключевые положения опубликованы в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и обсуждались на акустических семинарах ТОИ ДВО РАН и в Департаменте электроники, телекоммуникаций и приборостроения ДВФУ. Диссертационные материалы также представлены на Всероссийских конференциях «Прикладная гидроакустика и гидрофизика» в 2016 – 2024 гг., Сессиях Российского акустического общества в 2016 – 2026 гг., на международных конференциях POMA в 2014 г., PRUAK в 2019 г.

Внедрение результатов работы. Результаты исследования внедрены и нашли практическое применение в процессе выполнения государственных заданий ТОИ ДВО РАН: Рег. № 01201363046, 2017 г., Тема 0271-2019-0010, 2019 г. Рег. № НИОКТР АААА-А20-120031890011-8, 2022 г.

Публикации. По теме диссертации опубликована 42 работы, включая: 15 публикаций в рецензируемых отечественных научных журналах из перечня ВАК; 12 публикаций в иностранных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science; 10 публикаций в материалах научных конференций и совещаний; получено 5 патентов РФ на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 4-х глав, заключения, списка литературы из 247 наименований. Содержание диссертации изложено на 142 листах, содержит 50 рисунков.

Глава 1
Модели спектральных и статистических характеристик низкочастотных гидроакустических шумов

В данной главе рассмотрены результаты изучения НЧ ГА шумов, полученные отечественными и зарубежными исследователями, а также модели, описывающие спектральные и статистические характеристики этих шумов. Применительно к задачам прикладной гидроакустики, таким как обнаружение, прием, измерение параметров и классификация ГА сигналов и шумов, а также интерпретация помехо–сигнальных ситуаций в мелководных прибрежных акваториях, обоснована необходимость продолжения и углубления исследований временно́й изменчивости этих характеристик на интервалах порядка десятых долей – единиц секунд, а также уточнения описывающих их моделей.

Аргументирована важность продолжения разработок и совершенствования векторно–скалярных приемников, предназначенных для исследования характеристик ГА шумов в мелководных акваториях.

Вопросы исследования и описания характеристик ГА шумовых полей [3, 14, 28, 31, 49] остаются за рамками настоящей работы.

1.1 Модели характеристик гидроакустических шумов, используемые при решении задач прикладной гидроакустики

Методы регистрации и анализа звукового давления ГА шумов моря и судоходства, используемые зарубежными исследователями, описаны в [25, 29, 84–88]. Некоторые экспериментальные средства исследования ГА шумов, в том числе содержащие векторно–скалярные приемники, рассмотрены в [26, 27, 44–50, 89, 90].

Весьма важно, чтобы во всем исследуемом диапазоне частот геометрические размеры используемых для исследования ГА шумов приемников были малы по сравнению с длиной звуковой волны в воде, а их выходные сигналы были либо пропорциональны звуковому давлению (приемники звукового давления, ПД), либо пропорциональны компонентам градиента звукового давления (приемники градиента звукового давления, ПГД) или колебательного смещения, колебательной скорости или колебательного ускорения в точке их установки [74, 91, 92].

В качестве общей модели ГА шумов, содержащих составляющие, обусловленные как динамическими процессами в океанской среде, так и судоходством и другими факторами антропогенного происхождения используется одномерный нестационарный случайный процесс

[1, 10–14, 17]. Важной для практических применений особенностью этого случайного процесса является то, что как в глубоководных, так и в мелководных и прибрежных районах Мирового океана наблюдаются интервалы времени, на которых изменениями его характеристик можно в ряде задач пренебречь и считать их постоянными (т.н. интервалы квазистационарности 2-го порядка). Длительности таких интервалов составляют от десятых долей до сотен секунд и более. Интервалы квазистационарности перемежаются с интервалами нестационарности, на которых пренебрегать изменениями характеристик этого случайного процесса нельзя [1]. Исследование характеристик ГА шумов на интервалах квазистационарности выполняется с помощью методов теории стационарных эргодических случайных процессов второго порядка [10–14], используется не статистическое усреднение, а усреднение по времени. Исследования характеристик ГА шумов на интервалах нестационарности могут быть выполнены с помощью методов теории случайных процессов со стационарными приращениями [93, 94].

Как отмечалось во Введении, для решения задач прикладной статистической гидроакустики, таких как оценивание и прогнозирование в реальном масштабе времени достижимой дальности действия и вероятностных характеристик средств активной и пассивной гидролокации, ГА навигации, связи и др. в первую очередь необходимы сведения, на интервалах квазистационарности, об усредненной спектральной плотности (по которой оценивается корреляционная функция) и усредненной одномерной плотности распределения вероятностей (ПРВ) последовательных мгновенных значений звукового давления и компонент колебательной скорости (или градиента давления) ГА шума [2, 17, 20–23, 81] в полосах частот, представляющих наибольший интерес. Время усреднения при этом должно соответствовать длительностям подлежащих приему, обнаружению, измерению параметров или классификации шумов и сигналов (или их фрагментов). При работе на низких частотах (10 Гц – 4 кГц) эти длительности в большинстве случаев составляют десятые доли – единицы секунд [2, 81].

Для уточнения зависимости от времени направленных свойств ГА шумов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, важным является знание усредненных спектральных плотностей и одномерных ПРВ мгновенных значений ортогональных компонент колебательной скорости (или градиента звукового давления) [2, 26, 27, 33].

Для построения и оценивания эффективности алгоритмов обнаружения и классификации источников подводного шума с использованием вторичной (последетекторной) обработки сигналов, таких как Detection of Envelope Modulation of Noise (DEMON) [51–57] необходимы сведения о временно́й изменчивости спектральной плотности и ПРВ мгновенных значений огибающих звукового давления и ортогональных компонент его градиента или колебательной скорости.

Более детальные сведения о ГА шумах, содержащиеся во взаимных спектральных плотностях, кумулянтах, корреляционных функциях 3-го и более высоких порядков, многомерных ПРВ мгновенных значений и др. [95–108], несмотря на их важность, для решения прикладных задач используются реже.

Желательно, чтобы сведения о ГА шумах были представлены не только в виде наборов цифровых или графических данных (таблиц, осциллограмм, спектрограмм, гистограмм и т.д.), но в виде математических соотношений (моделей), описывающих зависимости характеристик шумов от относительно небольшого числа наиболее важных параметров (желательно не более 10), таких как время, координаты, скорости и параметры шумности проходящих вблизи судов, гидрометеорологические условия и др.

Как отмечалось ранее, создание теоретических моделей, пригодных для описания и прогнозирования временно́й изменчивости спектральных плотностей, а также ПРВ мгновенных значений и огибающих ГА шумов, затруднено из-за сложности учета факторов, влияющих как на образование (возбуждение), так и на распространение звуковых колебаний от источника шума до приемника, особенно в мелководных акваториях [31, 32].

Создание феноменологических моделей [109] ГА шумов и шумовых полей также связано со значительными трудностями [26–32, 110–114]. До настоящего времени ни для глубоководных, ни для мелководных акваторий не создано феноменологических моделей, удовлетворительно описывающих (предсказывающих) с достаточной для практических применений точностью совокупность наблюдаемых в различных помехо–сигнальных ситуациях на разных глубинах спектральных и статистических характеристик ГА шумов моря и судоходства [2].

В то же время, для реализации преимуществ ряда используемых на практике алгоритмов обнаружения и классификации источников подводного шума достаточно иметь, по крайней мере для представляющих первоочередный интерес районов, таких как мелководные прибрежные акватории залива Петра Великого Японского моря, экспериментальные оценки названных характеристик в виде относительно простых соотношений, вид которых возможно зависит от времени. Важно, чтобы эти оценки были применимы на временны́х интервалах порядка длительностей ожидаемых сигналов (зачастую десятые доли – единицы секунд [2]) и могли быть получены (уточнены) в близком к реальному масштабе времени. Тогда они будут пригодны для использования в системах непрерывной адаптации ГА средств к изменениям помехо–сигнальной обстановки. Такие экспериментальные оценки далее рассматриваются как эмпирические (или упрощенные феноменологические) модели, описывающие зависимость характеристик ГА шума от времени. Целесообразность их построения и использования подтверждается на практике.

1.2 Модели спектральной плотности гидроакустического шума и его огибающей

В качестве оценок спектральной плотности звукового давления ГА шума и компонент его градиента обычно используют сглаженные зависимости от частоты полученных экспериментально усредненных спектральных уровней в смежных полосах частот (полосах анализа) Δf шириной 1 – 100 Гц или 1/12 – 1/3 октавы [83–88, 96], пересчитанные к полосе 1 Гц, а в качестве эмпирических моделей – гладкие функции (часто степенные или дробно–рациональные), с помощью которых их можно описать. При уменьшении Δf возрастает разрешающая способность по частоте, но увеличивается погрешность оценивания спектральных уровней, при увеличении Δf разрешающая способность по частоте и погрешность оценивания спектральных уровней уменьшаются [94–96, 115].

В [24, 25, 29, 116–129] приведены результаты экспериментального оценивания и построения экспериментальных моделей усредненных спектральных плотностей скалярных и векторных характеристик ГА шумов моря и судоходства в различных районах мирового океана и описаны методики их получения. Отмечается, что даже в районах, где выполнялись исследования, эти результаты должны рассматриваться только как ориентировочные, ввиду практической невозможности указания всех факторов, влияющих на образование и распространение шума.

В качестве моделей, описывающих, в глубоком море, частотную зависимость усредненной спектральной плотности звукового давления $S_p(f)$ на частоте f, Гц, в частотных полосах шириной порядка одной – двух декад, лежащих в диапазоне 5 – 4000 Гц, при отсутствии шумов проходящих на удалении менее 10 миль судов, в ряде работ предлагается использовать функции вида

$$S_p(f) = S_p(f_0)*f^{-n}, \qquad (1.1)$$

где f_0, Гц – выбранная из соображений удобства фиксированная частота, n – показатель степени, характеризующий уменьшение спектральной плотности при повышении частоты, обычно равный или близкий к 0.5, 1, 2, в разных частотных полосах значения величины n различаются [122–128]. Величина $S_p(f_0)$ (т.н. приведенный спектральный уровень шумов на частоте f_0) определяется исходя из состояния поверхности моря, гидрометеорологических условий и уровня шумов судоходства.

В мелководных, с глубинами менее 30 м, прибрежных акваториях с развитой береговой инфраструктурой и интенсивным судоходством, а также вблизи морских портов данная модель неприменима. Там наблюдаются: плавный максимум спектральной плотности в области 100–500 Гц, обусловленный работой установленных на судах и на берегу механизмов, минимум в области 20–40 Гц, обусловленный затуханием на частотах ниже критической частоты волновода,

образованного водным слоем, ограниченным дном и границей раздела вода – воздух [32, 110–112], и дополнительные экстремумы в области 100–2000 Гц, обусловленные дискретными составляющими шумоизлучения судов и волноводными эффектами [121–129]. Положения и уровни указанных экстремумов не остаются постоянными во времени, они зависят от надводной обстановки, метеорологических условий и состояния моря. Если модель частотной зависимости спектральной плотности предполагается использовать для выявления интервалов квазистационарности, формирования пороговых уровней или выбеливания спектра [17, 20–23] в системах обнаружения сигналов в реальном или близком к реальному масштабе времени при малых отношениях сигнал/помеха, она должна учитывать названные особенности и их изменчивость. При этом длительности интервалов времени, используемых для спектрального оценивания, не должны превышать длительностей ожидаемых сигналов и интервалов квазистационарности. В качестве таких моделей используют дробно–рациональные функции [128], в главе 3 будет рассмотрена модель авторегрессии – скользящего среднего (АРСС) [115, 130–133].

В [128] обсуждается возможность использования данных о движении судов в реальном масштабе времени, которые могут быть получены при использовании приемников сигналов международной морской информационной системы AIS (Automatев Identification System), для оценивания уровней подводного шума.

Доступные сведения о спектральных плотностях огибающих ГА шумов различного происхождения неполны и в ряде случаев противоречивы. Для формирования огибающих сигналов могут быть использованы различные подходы [20, 51–57, 134, 135]. Использование для формирования огибающих широкополосных сигналов математических методов, основанных на преобразованиях Гильберта [20, 94, 135] не всегда приводит к получению требуемых на практике результатов, особенно при наличии импульсных помех, таких как импульсы, создаваемые «щелкающими» морскими обитателями, см п. 3.3.

В разных частотных диапазонах огибающие по-разному зависят от поверхностного волнения, наличия неподвижных и движущихся водоизмещающих объектов, подверженных качке на волнении, характеристик гребных винтов проходящих судов и др. [51–57]. Для построения моделей огибающих ГА шумов возможно использование подходов, применяемых для описания быстрых и медленных замираний в радиосвязи [18]. В качестве эмпирических моделей спектральных плотностей огибающих целесообразно использовать дробно–рациональные функции. Некоторые результаты оценивания спектральных плотностей огибающих приведены в главах 3 и 4.

1.3 Модели плотности распределения вероятностей мгновенных значений гидроакустического шума и его огибающей

Результаты экспериментального исследования статистических характеристик подводных шумов, в том числе одномерной плотности распределения вероятностей (ПРВ) мгновенных значений звукового давления на интервалах квазистационарности приведены в [34, 99, 100, 136–144]. При этом в большинстве случаев зависимость исследуемых статистических характеристик ГА шумов от времени не рассматривается, что сужает область применимости на практике полученных результатов.

Исследованиям временно́й изменчивости статистических характеристик подводных шумов и ПРВ мгновенных значений [2, 17], посвящено весьма малое количество публикаций как отечественных, так и зарубежных авторов.

Теоретические вопросы, связанные с оцениванием одномерных ПРВ мгновенных значений реализаций случайных процессов и шумов различного происхождения рассмотрены в [10, 12, 145–152].

В качестве экспериментальных оценок ПРВ мгновенных значений используются гистограммы, ядерные оценки плотности и др. [146, 150, 151]. В прикладных исследованиях ГА шумов наиболее часто используются гистограммные оценки ПРВ. Оценивание ПРВ производится на интервалах времени, представляющих научный или практический интерес для исследователей, таких как временны́е масштабы изучаемых явлений, длительности ожидаемых сигналов и др.

В задачах обнаружения, измерения параметров и классификации ГА сигналов актуальным является вопрос о применимости гауссовского закона распределения вероятностей в качестве моделей эмпирических ПРВ мгновенных значений шумов на произвольно выбранных интервалах времени, соответствующих длительностям ожидаемых сигналов, время прихода которых неизвестно. Как отмечалось ранее, в диапазоне частот 5 – 4000 Гц они составляют десятые доли – единицы секунд [2]. Важность данного вопроса вызвана тем, что для гауссовского закона распределения получен ряд успешно применяемых на практике алгоритмов решения задач обнаружения, измерения параметров и классификации как гидроакустических, так и радиолокационных, сейсмических и др. сигналов и источников шумоизлучения, а также соотношений, определяющих вероятностные характеристики правильных и ошибочных решений вышеуказанных задач [15, 17, 20–23].

В то же время, неправомерное использование гауссовского закона распределения в качестве модели ПРВ шума на произвольно выбранных интервалах времени может привести к

увеличению частоты ошибочных решений, таких как ложные тревоги и пропуски целей в задачах их обнаружения [2].

ПРВ $w_\xi(x)$ гауссовской случайной величины ξ с математическим ожиданием m_ξ и среднеквадратическим отклонением σ_ξ описывается следующим соотношением (гауссовский закон распределения вероятностей) [10, 12]:

$$w_\xi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\xi^2}} e^{-\frac{(x-m_\xi)^2}{2\sigma_\xi^2}}, \tag{1.2}$$

Для нормированного к (0, 1) гауссовского распределения (у которого $m_\xi = 0$ и $\sigma_\xi = 1$) формула (1.2) принимает вид (индекс ξ опускаем):

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}. \tag{1.3}$$

Вопрос о применимости того или иного (в том числе гауссовского) закона распределения вероятностей в качестве модели ПРВ мгновенных значений решается с использованием методов проверки статистических гипотез и оценки параметров распределений [145–152]. При этом обычно проверяется простая статистическая гипотеза о том, что экспериментальные данные соответствуют выбранному закону распределения в смысле одного или нескольких критериев согласия, при необходимости выполняется оценивание параметров распределения [151]. В теоретических исследованиях часто используется более точная формулировка: выбранная модель закона распределения не противоречит результатам экспериментов.

Наиболее мощным, в части отклонения альтернативных гипотез, считается критерий согласия Шапиро–Уилка [150], в прикладных исследованиях наиболее часто используется критерий Хи-квадрат К. Пирсона [12, 151].

Если применение гауссовского распределения представляется неправомерным или излишне упрощенным, в качестве моделей ПРВ экспериментальных данных, таких как ГА шумы, используются:

1. Аналитические представления Пирсона, Джонсона, Корниша–Фишера, с помощью рядов Грама–Шарлье, Эджворта и др. [12, 150, 151].

2. Модели в виде «смеси» (конечной или бесконечной суммы или интеграла) распределений [153], такие как канонические и квазиканонические модели помех (Canonical and Quasi–Canonical Probability Models) классов A, B, C, предложенные Д. Миддлтоном [154–156] и модели в виде гауссовской смеси (Gaussian–Gaussian Mixture Models, GGM) [157, 158].

В прикладных исследованиях, когда нормированные эмпирические ПРВ мгновенных значений близки к гауссовскому распределению, часто используется их приближенное

аналитическое представление с помощью ряда Грама–Шарлье типа А (Gram–Charlier A-series) [12, 151]:

$$f(x) = w(x)\left[1 + \frac{1}{6}\mu_3 H_3(x) + \frac{1}{24}(\mu_4 - 3)H_4(x) + \cdots\right], \tag{1.4}$$

где

$f(x)$ – модель ПРВ,

$w(x)$ – плотность нормированного гауссовского распределения (1.3),

$\mu_3,\ \mu_4$ – 3-й и 4-й центральные моменты распределения $f(x)$,

$H_3(x) = x^3 - 3x,\ H(x)_4 = x^4 - 6x^2 + 3$ – полиномы Чебышёва–Эрмита 3-го и 4-го порядков.

На практике значения μ_3, и μ_4 обычно неизвестны, вместо них используют их экспериментальные оценки M_3 и M_4, способы получения которых описаны в [11, 12, 145].

Достоинством представления (1.4) является его наглядность, простота интерпретации и возможность выполнения расчета зависимости от времени параметров модели ПРВ практически в реальном масштабе времени с помощью простых вычислительных средств. Общим недостаткам как этого, так и др. приближенных выражений является малая точность описания ПРВ в области хвостов распределения, а в ряде случаев – получения в них отрицательных значений $f(x)$, т.к. полиномы Чебышёва–Эрмита могут принимать отрицательные значения [151].

Модель ПРВ в виде суммы гауссовских распределений имеет вид соотношения [157, 158]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{M} K_i w(x, \sigma_i), \tag{1.5}$$

где

$f(x)$ – модель ПРВ,

$w(x, \sigma_i)$ – плотность ненормированного гауссовского распределения (1.2),

σ_i – средние квадратические отклонения ненормированных гауссовских распределений, образующих смесь,

M – количество учитываемых компонент,

K_i – численные коэффициенты, определяющие «веса» отдельных компонент, $\sum_{i=1}^{M} K_i = 1$.

Примеры использования соотношений (1.2–1.5) приведены в главах 3 и 4.

Вопрос о целесообразности использования на интервалах времени порядка десятых долей – единиц секунд более сложных моделей ПРВ мгновенных значений является спорным. Основной интерес в задачах обнаружения, измерения параметров и классификации сигналов и шумов при малых отношениях сигнал/помеха представляют хвосты распределения, в которые попадает слишком малое количество независимых значений, чтобы можно было делать содержательные выводы [148, 151], см. далее п. 3.1.

В [34, 137–144] приведены результаты экспериментального оценивания усредненных ПРВ мгновенных значений и других статистических характеристик звукового давления в глубоководных и мелководных акваториях на интервалах квазистационарности. Отмечается, что в большинстве случаев при времени накопления, превышающем 10–30 с в качестве модели ПРВ мгновенных значений может быть использован гауссовский закон распределения (1.2). В ряде случаев, особенно при наличии импульсных помех, наблюдается близкое к гауссовскому распределение мгновенных значений с положительным коэффициентом эксцесса. При этом в качестве модели ПРВ предлагается использовать логнормальное распределение [31], сумму первых трех членов ряда Грама–Шарлье типа А (1.4) и гауссовскую смесь (1.5).

Для времен накопления порядка десятых долей – единиц секунд, соответствующих длительностям часто используемых сигналов, применительно к условиям мелкого моря с учетом помех судоходства, информация о ПРВ мгновенных значений звукового давления, компонент колебательной скорости и градиента давления в большинстве случаев отсутствует или недоступна.

В [99–101] приведены некоторые результаты исследования нелинейности и негауссовости шумов моря, зависимость от времени параметров, характеризующих нелинейность и негауссовость не описывается. В [102–105] приведены результаты исследования двумерных и трехмерных ПРВ мгновенных значений, одномерных и двумерных ПРВ флуктуаций средней мощности ГА шумов и др. в мелководных акваториях. В [106–108] приведены результаты оценивания трехмерных корреляционных функций ГА шумов в мелководных акваториях. Исследование данных вопросов представляется весьма важным для углубления понимания структуры ГА шумов и прогнозирования динамики их изменений, но не входит в задачи диссертационной работы.

Сведения о ПРВ мгновенных значений огибающих ГА шумов различного происхождения неполны и в ряде случаев противоречивы. Теоретические сведения о статистических характеристиках огибающих узкополосных случайных процессов, применительно к задачам статистической радиотехники, приведены в [152]. Для ГА шумов ПРВ мгновенных значений огибающих в разных частотных диапазонах по-разному зависят от поверхностного волнения, наличия неподвижных и движущихся водоизмещающих объектов, подверженных качке на волнении, характеристик гребных винтов проходящих судов и др. [51–57]. В качестве модели ПРВ мгновенных значений огибающих, по аналогии с задачами обеспечения радиосвязи в условиях импульсных помех и замираний, рядом исследователей предлагается использовать модели, предложенные Д. Миддлтоном [154–156] и распределение Накагами [159], параметры которых оцениваются экспериментально.

1.4 Использование векторных и векторно–скалярных приемников для уточнения моделей характеристик гидроакустических шумов и шумовых полей

Как в глубоководных районах Мирового океана, так и в мелководных прибрежных акваториях ГА шумовые поля не являются однородными и изотропными [1, 25, 29]. Учет неоднородности и анизотропии ГА шумовых полей позволяет улучшить характеристики ГА приемных средств. В связи с этим для глубоководных районов Мирового океана по результатам проводящихся в течении более 70 лет экспериментов разработаны и постоянно уточняются теоретические и эмпирические модели, позволяющие описать зависимость направленных свойств ГА шумов в вертикальной и горизонтальной плоскостях от количества и параметров движения судов, пространственного распределения скорости звука, метеоусловий и др. факторов [25–27, 40–43, 118–120]. Для построения теоретических моделей анизотропии подводных шумов, в зависимости от диапазона частот, используются лучевое и модовое представления, а также метод параболического уравнения [26–32, 111–114]. Построение моделей, описывающих направленные свойства ГА шумов в мелководных прибрежных акваториях и их зависимость от количества и параметров движения судов, пространственного распределения скорости звука, метеоусловий и др. факторов является более сложной и менее изученной задачей [33, 81, 160, 161].

Для исследования направленных свойств низкочастотных ГА шумов используются многоэлементные антенны из приемников звукового давления (ПД), а также векторные и векторно-скалярные (или комбинированные) приемники (ВП, ВСП и КП соответственно) [26–28, 33, 162–168].

ВП и ВСП представляют собой особый класс приемников звука. С помощью ВП можно регистрировать компоненты векторных компоненты звуковых полей: градиента звукового давления, колебательного смещения, колебательной скорости или колебательного ускорения. ВСП отличается от ВП наличием либо конструктивно совмещенным, либо близко (в волновом смысле) расположенным от него приемника звукового давления (принцип одновременности и одноместности в метрологии [92]). Поэтому с помощью ВСП можно практически в одной точке одновременно регистрировать как скалярную (звуковое давление), так и векторные компоненты звуковых полей [68, 70–72], что расширяет возможности исследования направленных свойств ГА шумов и шумовых полей по сравнению с антеннами из приемников звукового давления, особенно в мелководных акваториях. Кроме того, применение векторно–скалярных приемников позволяет обеспечивать пространственную избирательность и повышение помехоустойчивости приема сигналов, а также регистрировать направления потоков энергии [2, 26, 27, 33, 161–168].

Нормированная амплитудная характеристика направленности идеального одноканального ВП описывается, в предположении ее осесимметричности, выражением [71, 72]

$$R(\gamma) = \cos(\gamma), \tag{1.6}$$

где γ – угол между направлением максимальной чувствительности выбранного канала и направлением на источник излучения. Нормированная амплитудная характеристика направленности реального одноканального ВП, в предположении ее осесимметричности, описывается выражениями

$$R(\gamma) = A*\cos(\gamma) + B, \tag{1.7}$$

$$A + B = 1, \tag{1.8}$$

$$K = 20\lg\left(\left|\frac{A}{B}\right|\right), \tag{1.9}$$

где A – коэффициент, учитывающий чувствительность к векторной составляющей ГА поля,

B – коэффициент, учитывающий «паразитную» чувствительность к скалярной составляющей (звуковому давлению) ГА поля и несовершенство конструкции ВП,

K – коэффициент деления характеристики направленности [71, 72], определяющий «глубину провалов» характеристики направленности в направлениях, перпендикулярных к направлению максимальной чувствительности.

Когда $\gamma = 90°$, чувствительность идеального ВП (у которого $B = 0$) должна быть равна нулю. В реальных конструкциях и условиях применения величина K составляет порядка – 20 дБ в силу неточностей изготовления, балансировки и влияния элементов крепления, что недостаточно для ряда практических применений. При этом в контролируемых условиях гидроакустических бассейнов и измерительных установок на этих же конструкциях наблюдаются значения $K \approx$ – 30 дБ и менее.

Наибольшее распространение получили конструкции ВП и ВСП т.н. инерционного (соколеблющегося со средой) и силового (неподвижного относительно среды) типов [71, 72].

Конструкция ВП инерционного типа состоит из подвешенного на упругих растяжках жесткого корпуса, внутри которого установлен либо один, либо два или три чувствительных элемента таким образом, чтобы их направления максимальной чувствительности были ортогональны.

В поле звуковой волны в жидкой или газообразной сплошной среде корпус такого ВП совершает вынужденные колебания, которые воспринимаются установленными в нем чувствительными элементами. В зависимости от принципа действия и внутреннего устройства чувствительных элементов ВП их выходные сигналы, в поле плоской волны, могут быть пропорциональны, в некоторой полосе частот, компонентам смещения, скорости или ускорения корпуса. При этом, если жесткость корпуса ВП достаточно высока, масса по порядку величины

сравнима с массой вытесненной им среды, а размеры много меньше длины волны во всем исследуемом диапазоне частот, его колебания «повторяют», возможно со сдвигом по фазе, колебания частиц окружающей среды. При этом сигналы с чувствительных элементов пропорциональны (также возможно со сдвигом по фазе) соответствующим результирующим компонентам колебательного смещения, колебательной скорости, или колебательного ускорения частиц области жидкости, вытесненной корпусом приемника соответственно [69, 71, 72].

В настоящее время, в большинстве случаев, в ВП инерционного типа в качестве чувствительных элементов применяют высокочувствительные пьезоэлектрические акселерометры, выходные сигналы которых пропорциональны соответствующим компонентам колебательного ускорения, и в силу уравнения Эйлера – компонентам градиента давления [71, 72]. Поэтому такие ВП называют приемниками колебательного ускорения или, что более распространено, приемниками градиента давления (ПГД) инерционного типа [71]. Колебательную скорость и колебательное смещение при использовании таких приемников получают путем однократного и двухкратного интегрирования по времени с помощью аналоговых, или после преобразования в цифровую форму, с помощью вычислительных средств.

Необходимость обязательного использования упругих растяжек для крепления векторных приемников инерционного типа определяет допустимые условия их эксплуатации в морских условиях. Влияние системы растяжек на характеристики ВП инерционного типа рассмотрено в [169].

В отличие от ВП инерционного типа, корпус которого совершает колебания вместе с частицами окружающей среды, принцип работы ВП силового типа заключается в формировании сигнала, пропорционального разности давлений звуковой волны, воздействующей на прикрепленные к корпусу чувствительные элементы. При этом корпус должен оставаться неподвижным в поле звуковой волны, или, по крайней мере, амплитуда его колебаний должна быть на порядок меньше амплитуд колебаний чувствительных элементов. Анализ показывает, что ВП силового типа малых волновых размеров можно рассматривать как приемник одной или нескольких компонент градиента давления [71, 72]. Разработанный вариант конструкции ВП силового типа описан далее, в п. 2.2.

Для того, чтобы уменьшить движение ВП силового типа как целого под действием звуковой волны, масса его корпуса должна быть больше массы вытесненной им воды.

Основным достоинством приемников силового типа является возможность их жесткого крепления к элементам несущих конструкций, использования в составе буксируемых систем и погружения в рыхлые донные осадки типа ил и ил–песок.

Чувствительность по звуковому давлению ПГД как инерционного, так и силового типов с пьезоэлектрическими чувствительными элементами (если отсутствуют или подавлены

резонансы в области рабочих частот) при понижении частоты уменьшается по линейному закону, со скоростью 6 дБ/октава [71, 72]. Чувствительность по звуковому давлению ПГД определяется параметрами используемых чувствительных элементов и не всегда достаточна для приема в малошумных акваториях, особенно на частотах ниже 100 Гц. Проблема обеспечения достаточной чувствительности низкочастотных ПГД при приемлемых максимальных габаритных размерах (желательно не более 100*100*100 мм) остается актуальной [2, 33].

Достигнутые в настоящее время значения чувствительности ВП силового типа как правило ниже, чем у ВП инерционного типа.

Конструкции ВП и ВСП, в которых в качестве чувствительных элементов используются электродинамические, электромагнитные [74], электрокинетические преобразователи [75–78], волоконно–оптические и лазерные устройства [79, 80] обладают рядом преимуществ по сравнению с конструкциями, в которых в качестве чувствительных элементов используются пьезокерамические элементы, но имеют ряд особенностей, препятствующих их широкому использованию в настоящее время. Наиболее высокую чувствительность имеют волоконно–оптические ВСП, их конструкции постоянно улучшаются [80].

При использовании ВП и ВСП удается оценивать направления движения и взаимную компенсацию потоков энергии ГА шума на частотах ниже 100 Гц, оценивать взаимные спектральные плотности, фазовые сдвиги и корреляции между давлением и компонентами колебательной скорости, а также выделять диффузные и когерентные компоненты шумового поля [26, 27]. Использование информации об этих величинах открывает ряд путей увеличения дальности и улучшения вероятностных характеристик обнаружения, оценивания параметров и классификации ГА сигналов, шумов и источников подводного шумоизлучения [28, 33], а также определения расстояния до источников шумоизлучения в пассивном режиме [2, 33, 57] и углубления понимания гидрофизических процессов в морских акваториях [47–50].

Ввиду важности информации о ГА шумах и шумовых полях, которая становится доступной при использовании ВП и ВСП и которая практически недоступна при использовании только приемников звукового давления, более 60 лет продолжаются разработки их новых и модификации известных конструкций. Параметры этих приемников постоянно улучшаются, а технологии изготовления – совершенствуются.

В России серийно выпускаются ВП и ВСП, предназначенные для выполнения акустических исследований и измерений в водной среде [170, 171]. Некоторые из них имеют гарантированные метрологические характеристики. С целью выполнения высокоточных измерений характеристик ВП и ВСП разработаны специализированные измерительные установки [74, 172] и Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55–2017 [173].

Параметры серийно выпускаемых ВП и ВСП, в первую очередь чувствительность и уровень собственных шумов, не всегда достаточны для исследования ГА шумов на частотах ниже 100 Гц в малошумных акваториях (см. также п. 2.1). Поэтому создание высокочувствительных малогабаритных ВСП остается актуальной научно–технической задачей.

1.5 Выводы по первой главе

1. В качестве общей математической модели временно́й изменчивости ГА шумов как глубоководных, так и мелководных акваторий Мирового океана в настоящее время используется одномерный нестационарный случайный процесс, на реализациях которого наблюдаются интервалы времени, где изменениями его спектральных и/или статистических характеристик можно в ряде задач пренебречь и считать их постоянными (интервалы квазистационарности). Эти интервалы перемежаются с интервалами нестационарности, на которых пренебрегать изменениями указанных характеристик нельзя.

На интервалах квазистационарности достижимы более высокие и стабильные характеристики обнаружения, измерения параметров и классификации ГА сигналов и источников подводного шумоизлучения, чем на интервалах нестационарности. Поэтому задача выявления интервалов квазистационарности и нестационарности, оценивания их длительностей, желательно в реальном масштабе времени, является очень важной для практических применений.

Для исследования и прогнозирования характеристик ГА шумов на интервалах квазистационарности используется аппарат теории стационарных эргодических случайных процессов, статистическое усреднение заменяется на усреднение по времени. Это позволяет разрабатывать и использовать на интервалах квазистационарности достаточно простые эмпирические модели характеристик ГА шумов. Необходимая степень точности описания характеристик ГА шумов на интервалах квазистационарности с помощью эмпирических моделей определяется решаемыми задачами и чувствительностью используемых алгоритмов обработки сигналов к изменениям характеристик ГА шумов (робастностью).

Исследование характеристик ГА шумов на интервалах нестационарности связано со значительными трудностями. В некоторых случаях для исследования характеристик ГА шумов на интервалах нестационарности может быть использован аппарат корреляционной теории процессов со случайными стационарными n–ми приращениями.

2. Подводные шумы в ряде глубоководных районов Мирового океана изучены достаточно подробно, но задача построения моделей, пригодных для прогнозирования их спектрально–энергетических и статистических характеристик, зависимостей от глубины и направления в горизонтальной и вертикальной плоскостях остается открытой.

Длительности интервалов квазистационарности ГА шумов в глубоководных акваториях составляют десятки секунд. На интервалах квазистационарности в качестве моделей, описывающих частотную зависимость спектральной плотности звукового давления в глубоком море на частотах 50–2000 Гц, при отсутствии шумов проходящих на удалении менее 10 миль судов, допустимо использовать функции вида (1.1). В качестве модели, описывающей ПРВ

мгновенных значений звукового давления при времени накопления, превышающем несколько десятков секунд, в большинстве случаев может быть использован гауссовский закон распределения вероятностей (1.2).

3. В мелководных прибрежных акваториях с интенсивным судоходством и развитой береговой инфраструктурой длительности интервалов квазистационарности меньше, чем в глубоководных акваториях, применение соотношения (1.1) для представления спектральной плотности и гауссовского распределения (1.2) для описания ПРВ мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента на произвольно выбранных интервалах времени представляется слишком упрощенным. Модели спектральной плотности и ПРВ мгновенных значений, предназначенные для использования при решении задач обнаружения, измерения параметров и классификации сигналов и источников шумоизлучения, должны учитывать особенности временно́й изменчивости характеристик ГА шумов таких акваторий.

4. Как в глубоководных районах Мирового океана, так и в мелководных прибрежных акваториях ГА шумовые поля не являются однородными и изотропными. Учет анизотропии (направленности) ГА шумовых полей позволяет улучшить характеристики ГА приемных систем. Для уточнения сведений о направленных свойствах ГА шумов, а в дальнейшем – анизотропии пространственно–временных шумовых полей представляется важным более широкое использование векторных и векторно–скалярных приемников.

5. Наиболее распространенными типами векторно–скалярных приемников являются приемники градиента звукового давления (ПГД) силового и инерционного типов, в которых в качестве чувствительных элементов используются пьезоэлектрические преобразователи. В связи с тем, что у таких приемников при понижении частоты чувствительность по звуковому давлению уменьшается со скоростью 6 дБ/октава, проблема разработки ПГД, обладающих достаточно высокой чувствительностью в области низких частот и минимальными габаритными размерами, остается актуальной.

Повышение чувствительности таких приемников в области низких частот достигается за счет применения в них, в качестве чувствительных элементов, пьезоэлектрических преобразователей на основе новых высокоэффективных пьезоэлектрических материалов, а также конструктивных решений, позволяющих концентрировать энергию воздействующего на приемник звукового поля.

Достигнутые в настоящее время значения чувствительности ПГД силового типа как правило ниже, чем у ПГД инерционного типа, но они допускают жесткое крепление к несущим конструкциям, что является их важнейшим преимуществом.

6. Конструкции векторных и векторно–скалярных приемников, в которых в качестве чувствительных элементов используются электромагнитные, электродинамические

электрокинетические преобразователи, волоконно–оптические и лазерные устройства обладают рядом преимуществ по сравнению с конструкциями, в которых в качестве чувствительных элементов используются пьезоэлектрические преобразователи, но имеют ряд особенностей, препятствующих их широкому использованию на практике в настоящее время. Конструкции таких приемников постоянно улучшаются. Наиболее высокую чувствительность имеют волоконно–оптические векторно–скалярные приемники.

Глава 2
Разработанные технические средства экспериментальных исследований

В данной главе описаны технические средства, разработанные и изготовленные, с участием автора, для выполнения широкого круга экспериментальных исследований: конструкции приемников градиента давления (ПГД) силового и инерционного типов (ПГДС и ПГДИ соответственно), а также гибкой реконфигурируемой 12-элементной антенны с приемниками звукового давления и блоком усиления и полосовой фильтрации сигналов, которая была использована при исследовании шумов легководолазов.

В качестве чувствительных элементов в конструкции ПГДИ применены серийно выпускаемые высокочувствительные пьезоэлектрические акселерометры с гарантированными метрологическими характеристиками. Чувствительности этих акселерометров достаточны для применения в ПГДИ на частотах ниже 100 Гц, в том числе в акваториях с относительно низкими уровнями подводных шумов.

Конструкция ПГДС допускает использование данного приемника в составе буксируемых антенн, жесткое крепление к несущим конструкциям, установку в водном слое, на дне, а также погружение в донные осадки типа ил или ил–песок.

В разработанных ПГДИ и ПГДС предусмотрены конструктивные элементы, предназначенные для крепления к ним приемников звукового давления и реализации, таким образом, комбинированных приемников (КП), а также установку их в звукопрозрачные чехлы и обтекаемые корпуса для уменьшения влияния гидродинамических помех.

Конструкция гибкой реконфигурируемой 12-элементной антенны допускает изменение межэлементных расстояний, укладывание на дне вдоль заданной линии, погружение в донные осадки или подвешивание в водном слое за счет запаса длины соединительных кабелей.

Разработано и изготовлено несколько макетов вышеуказанных технических средств, отличающихся габаритными размерами, количеством и конструктивными особенностями чувствительных элементов. В процессе выполнения исследований составные части разработанных технических средств перенастраивались в соответствии с задачами, условиями и требованиями проводимых экспериментов.

2.1 Трехкомпонентный приемник градиента давления инерционного типа

В приемниках градиента давления инерционного типа (соколеблющихся со средой) жесткий корпус совершает вынужденные колебания, как целого, при воздействии на него звуковых волн. Установленные в корпусе чувствительные элементы воспринимают эти

колебания и преобразуют их в электрические сигналы. Теоретические и технические вопросы, связанные с построением, функционированием и оптимизацией характеристик ПГДИ рассмотрены в [71, 72].

Чувствительность правильно сконструированного ПГДИ, как приемного устройства, определяется в основном характеристиками входящих в него чувствительных элементов. Достаточно высокую и стабильную чувствительность ПГДИ, при прочих равных условиях, удается получить при использовании в качестве чувствительных элементов пьезоэлектрических преобразователей, построенных по принципу акселерометра («масса на пружинке», возбуждаемая силой, приложенной к свободному концу пружинки, в качестве которой выступает гибкость пьезоэлемента) [71, 72].

В настоящее время рядом отечественных и иностранных предприятий серийно выпускаются как однокомпонентные, так и двух– и трехкомпонентные, с ортогонально ориентированными чувствительными элементами акселерометры. Чувствительность по ускорению некоторых из них достаточна для восприятия, на уровне их собственных шумов, колебательного ускорения ГА шумов, в том числе в малошумных мелководных акваториях.

Для создания трехкомпонентных ПГДИ с ортогонально ориентированными чувствительными элементами более перспективным представляется использование трех однокомпонентных акселерометров вместо одного трехкомпонентного, поскольку они обладают более высокой чувствительностью по ускорению ν_a по сравнению с трехкомпонентными (в последних достижимая чувствительность по ускорению, как правило, снижается из-за механических связей отдельных компонент на общей инерционной массе). На основе данного подхода разработана и реализована конструкция трехкомпонентного ПГДИ, показанная на рисунке 2.1 [174].

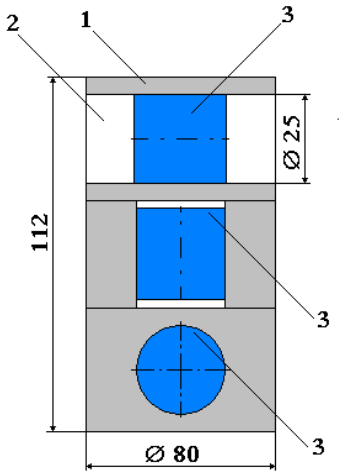


Рисунок 2.1 – Схема 3-компонентного ПГДИ:
1 – цилиндрические шайбы корпуса, 2 – цилиндрические каналы,
3 – акселерометры PCB 393B05

Конструкция ПГДИ состоит из корпуса, выполненного из эпоксидного композита, наполненного полыми стеклянными микросферами (сферопластик ЭДС-6АП) в виде трех жестко скрепленных цилиндрических шайб 1. Внутри цилиндрических шайб взаимно ортогонально (в верхней и нижней шайбах параллельно, в центральной шайбе – перпендикулярно торцевым плоскостям) выполнены круглые каналы 2 диаметром 25 мм. В каналах 2 жестко установлены серийно выпускаемые акселерометры 3 типа PCB 393B05 производства компании Piezotronics, США [175], обладающие достаточно высокой чувствительностью. Акселерометры в каналах загерметизированы крышками, через которые выведены соединительные кабели (крышки и кабели на рисунке 2.1 не показаны). Все акселерометры установлены так, чтобы в каждой из шайб была обеспечена зеркальная симметрия относительно срединной плоскости и продольной оси конструкции. Разнесение акселерометров вдоль корпуса приемника позволило обеспечить значение средней плотности всей конструкции, близкое к плотности воды и положение центра тяжести, близкое к геометрическому центру конструкции. Для реализации векторно–скалярного приемника на основе данного ПГДИ предусмотрены конструктивные элементы – резьбовые отверстия для симметричного крепления пары гидрофонов давления на его торцевых поверхностях.

Внешний вид макета данной конструкции ПГДИ показан на рисунке 2.2. ПГДИ крепится на упругих растяжках внутри металлического ограждения, на которое перед установкой в море надевается звукопрозрачный чехол из ворсистой ткани с целью защиты от воздействия гидродинамических помех.



Рисунок 2.2 – Внешний вид трехкомпонентного ПГДИ (слева) и его крепление на растяжках перед постановкой в море (справа)

В состав акселерометров PCB 393B05 входят пьезоэлектрический преобразователь и электронная схема – истоковый повторитель, предназначенный для снижения выходного сопротивления. Согласно [175], чувствительность по ускорению данного типа акселерометров составляет $\nu_a = 1.02 \pm 10\%$ В/мс$^{-2}$, диапазон частот 0.2 – 1700 Гц при неравномерности амплитудно–частотной характеристики (АЧХ) ± 3 дБ, резонансная частота ≥ 2500 Гц,

чувствительность в поперечном направлении $\leq$ 5% от максимальной, коэффициент нелинейных искажений $\leq$ 1%, спектральная плотность приведенных ко входу собственных шумов на частотах 1 Гц, 10 Гц, 100 Гц и 1000 Гц составляет 4.9 мкм*с$^{-2}$*Гц$^{-0.5}$, 1.0 мкм*с$^{-2}$*Гц$^{-0.5}$, 0.7 мкм*с$^{-2}$*Гц$^{-0.5}$, 0.5 мкм*с$^{-2}$*Гц$^{-0.5}$ соответственно. Масса акселерометра составляет 50 г.

Указанное значение чувствительности в поперечном направлении, при использовании данных акселерометров в качестве чувствительных элементов ПГДИ, позволяет получить коэффициент деления характеристики направленности (1.9) более 26 дБ, что достаточно для многих применений. Реально достижимое значение коэффициента деления будет зависеть от частоты и определяться точностью балансировки, отклонением центра тяжести от центра плавучести и неидентичностью характеристик растяжек, поддерживающих корпус ПГДИ в ограждении.

Для приближенной оценки чувствительности одной компоненты ПГДИ к звуковому давлению в плоской гармонической волне, предполагая, что он обладает нейтральной плавучестью (т.е. его средняя плотность равна плотности воды), его размеры много меньше длины волны в воде во всем диапазоне частот, а ускорение его корпуса равно колебательному ускорению волны, воспользуемся известным соотношением между чувствительностями к звуковому давлению и колебательному ускорению [74, 91]:

$$\nu_p = \nu_a k/\rho = \nu_a 2\pi f/(\rho c), \qquad (2.1)$$

где

ν_p – чувствительность ПГДИ к звуковому давлению в гармонической плоской волне,

ν_a – чувствительность по ускорению установленного в ПГДИ акселерометра,

$k = 2\pi f/c$ – волновое число,

ρ – плотность воды,

c – скорость звука в воде.

Из (2.1) видно, что чувствительность такого приемника к звуковому давлению в плоской гармонической волне понижается по линейному закону при уменьшении частоты при постоянной чувствительности ν_a по ускорению. На частоте f = 100 Гц, согласно (2.1), для достижения чувствительности по звуковому давлению ν_p = 100 мкВ/Па, достаточной для многих применений, чувствительность акселерометра по ускорению ν_a должна составлять $\nu_a = \nu_p \cdot \rho c/(2\pi f) = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5 \cdot 10^6/(2\pi \cdot 100) \approx 0.24$ В/мс$^{-2}$.

Заметим, что в связи с тем, что технологический разброс чувствительностей акселерометров PCB 393B05 к ускорению не превышает $\pm$10% (т.е. ~ $\pm$0.9 дБ), а фактически, по результатам измерений в диапазоне температур 5°C – 20°C, он не превышает первые единицы процентов, проблема обеспечения идентичности каналов ПГД по чувствительности к звуковому давлению согласно (2.1) решается автоматически.

Амплитудно–частотные характеристики чувствительности и характеристики направленности каналов изготовленного ПГДИ оценивались в лабораторных и морских условиях. В процессе лабораторных измерений в бассейне в импульсном режиме для каждого канала определялась чувствительность ПГДИ к звуковому давлению в бегущей плоской волне методом сравнения с образцовым гидрофоном типа ГИ-53 [92] с известной чувствительностью. Глубина провала дипольной характеристики направленности ПГДИ (коэффициент деления) оценивалась в морских условиях, с использованием широкополосных сигналов в полосе частот при стационарной установке макета в придонной области прибрежных акваторий.

Для изготовленного ПГДИ результаты измерения АЧХ чувствительности одного из каналов к звуковому давлению в направлении максимума дипольной характеристики направленности в диапазоне частот 200 — 900 Гц показаны на рисунке 2.3. Полученная зависимость чувствительности от частоты, с учетом результирующей погрешности измерений ~ 3 дБ [71, 72, 92], близка по виду к теоретически прогнозируемому наклону АЧХ ПГДИ, составляющему 6 дБ/октава и значениям теоретически рассчитанной чувствительности. Экстраполяция данной зависимости в низкочастотную область с учетом наклона 6 дБ/октава дает на частоте 100 Гц чувствительность порядка 500 мкВ/Па, что достаточно близко к приближенной оценке по формуле (2.1): $v_p \approx 420$ мкВ/Па. Более высокое, по сравнению с расчетным значение чувствительности получилось из-за того, что данный приемник обладал некоторой положительной плавучестью и его средняя плотность была меньше плотности воды [69]. АЧХ чувствительности остальных каналов также были оценены, они отличались от показанной на рисунке 2.3 зависимости не более, чем на +/-10%. Для оценивания коэффициента деления характеристики направленности (1.9) ПГДИ в прибрежной акватории был развернут на 90^o по отношению к излучателю. В диапазоне частот от 300 Гц до 1000 Гц дипольные характеристики направленности всех каналов ПГД имели коэффициент деления не менее 20 дБ.

Поскольку в состав акселерометра входит электронная схема, кроме чувствительности ПГДИ, необходимо учитывать влияние привносимых ею шумов. Для оценивания спектральной плотности собственных шумов акселерометра с учетом электронной схемы, приведенных к звуковому давлению в плоской волне (расчетное значение), воспользуемся известной формулой, связывающей звуковое давление и нормальную к фронту волны составляющую колебательное ускорение в гармонической плоской волне [91]

$$|p| = \rho c|v| = \rho c|a|/\omega = \rho c|a|/(2\pi f), \qquad (2.2)$$

где

p – звуковое давление,

v – колебательная скорость,

a – колебательное ускорение.

Это же соотношение справедливо и для спектральных плотностей. Подставив в (2.2) вместо a вышеуказанные значения спектральных плотностей собственных шумов колебательного ускорения, получаем эквивалентные спектральные плотности звукового давления: 1.17 Па·Гц$^{-0.5}$, $24 \cdot 10^{-3}$ Па·Гц$^{-0.5}$, $1.7 \cdot 10^{-3}$ Па·Гц$^{-0.5}$, $0.12 \cdot 10^{-3}$ Па·Гц$^{-0.5}$, на частотах 1 Гц, 10 Гц, 100 Гц, 1000 Гц соответственно.

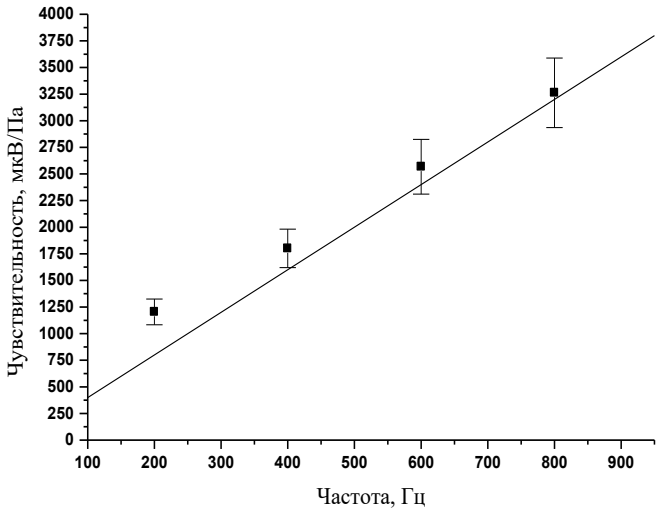


Рисунок 2.3 – АЧХ чувствительности одного из каналов ПГДИ по звуковому давлению в плоской волне: квадраты – экспериментальные значения с указанием отклонений +/–10%, сплошная линия – расчетные значения согласно (2.1)

Сравнив данные значения со спектральными уровнями звукового давления подводных шумов, приведенными в [24, 25, 42, 43], можно сделать вывод, что данный ПГДИ как по чувствительности, таки по своим шумовым характеристикам пригоден для использования в малошумных мелководных прибрежных акваториях, в том числе на частотах ниже 100 Гц.

2.2 Двухкомпонентный приемник градиента давления силового типа

Среди используемых на практике конструкций ПГДС наибольшее распространение получили варианты конструкций, содержащие пластинчатые изгибные пьезопреобразователи, установленные по краям тяжелого сердечника [71, 72] или в центре тяжелого круглого кольца [74]. Однако недостатком этих конструкций является низкая чувствительность из-за короткого набега звуковой волны между двумя сторонами пластинчатого изгибного преобразователя. Для повышения чувствительности ПГДС за счет увеличения длины волнового набега круглые

пластинчатые преобразователи помещали в жесткую трубку, в том числе переменного сечения [71, 72, 74, 176, 177]. Однако, увеличивая таким путем длину волнового набега, конструкторы сталкиваются с проблемой увеличения размеров и соответственно ухудшения обтекаемости ПГД. Для реализации двухкомпонентного ПГД используют два таких приемника, закрепленных крестообразно, но при этом нарушается требование единства фазового центра двух каналов ПГД, необходимое для многих вариантов обработки сигналов [71, 72].

На рисунке 2.4 показана разработанная конструкция ПГДС [178–184] с двумя ортогональными каналами, в которой круглые изгибные чувствительные элементы установлены ортогонально друг за другом вдоль оси массивного цилиндрического корпуса и соединены с его поверхностью патрубками, выполненными в теле корпуса в виде полых каналов, причем сечение каналов плавно меняется от круглого, у чувствительного элемента, к прямоугольному, у поверхности корпуса, без уменьшения площади поперечного сечения, а оси каналов изогнуты во встречном направлении, так что выходы каналов на боковую поверхность цилиндра лежат в ортогональных плоскостях симметрично относительно оси цилиндра и точки на его оси, лежащей посредине между центрами обоих круглых чувствительных элементов [178].

Такое конструктивное решение обеспечивает вместе с увеличением набега звуковой волны единство фазового центра обоих ортогональных каналов ПГДС в направлении, перпендикулярном оси корпуса. Другим преимуществом является обтекаемость корпуса ПГДС в осевом направлении, что снижает потенциальный уровень помех обтекания при применении такой конструкции в составе линейных буксируемых антенн. Еще одним достоинством, по сравнению с [71, 72], является размещение круглых чувствительных элементов в диаметральных сечениях корпуса, что позволяет выполнить чувствительные элементы с наибольшим возможным диаметром при заданном диаметре корпуса и, следовательно, с максимальной возможной чувствительностью.

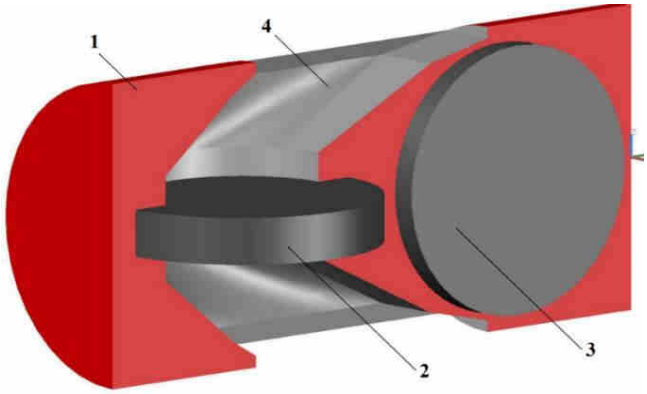
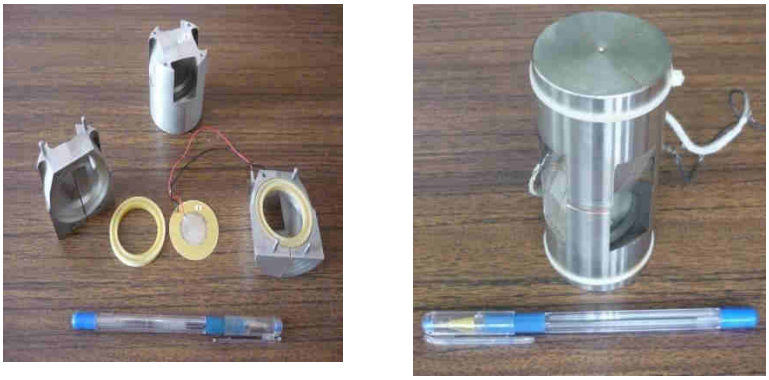


Рисунок 2.4 – Устройство ПГД силового типа (изометрия в разрезе): 1 – цилиндрический корпус, 2, 3 – круглые чувствительные элементы вертикальной и горизонтальной ориентации соответственно, 4 – вертикальные каналы в корпусе

В данной конструкции чувствительность ПГДС повышается не только за счет расположенных внутри корпуса каналов, которые увеличивают длину набега звуковой волны, но и возможности трансформации давления звуковой волны за счет постепенного увеличения поперечного сечения каналов при продвижении от чувствительного элемента к поверхности цилиндрического корпуса. Кроме того, за счет удаления чувствительных элементов от поверхности цилиндра уменьшает уровень воздействия помех обтекания на чувствительные элементы при размещении ПГДС в составе линейной буксируемой антенны.

На рисунке 2.5 показан изготовленный макет ПГДС вышеописанного типа и его составные части. Корпус 1, имеющий размеры ∅52х111 мм, изготовлен электроэрозионным методом из коррозионно–стойкой стали 12Х18Н10Т и состоит из 8 собираемых на штифтах одинаковых секций. Круглые чувствительные элементы 2 собраны из односторонних биморфных преобразователей, состоящих из бронзовой подложки ∅40 мм, на которую наклеен круглый пьезопреобразователь толщиной 0.25 мм и диаметром 20 мм. Бронзовая подложка по контуру диаметром 34 мм закреплена между двумя кольцевыми обоймами, имеющими внешний диаметр 46 мм, выполненными из стеклотекстолита. Каждый собранный чувствительный элемент 2 заливается звукопрозрачным компаундом в форме круглой пластины.



а) б)

Рисунок 2.5 – Внешний вид макета ПГД силового типа:
а) детали макета, б) макет в сборе

Для приближенного оценивания параметров предлагаемой конструкции ПГДС рассмотрим упрощенную схему одного канала, показанную на рисунке 2.6, в которой внутри цилиндрического корпуса 1 установлен только один круглый изгибный преобразователь 2.

Тяжелый металлический корпус 1 может в первом приближении считаться неподвижным при воздействии звуковой волны. Внутри корпуса выполнен канал сложного сечения с внешним размером $L*h$ (рисунок 2.6). В диаметральной плоскости сечения корпуса в канале установлен круглый пластинчатый изгибный пьезопреобразователь биморфного типа диаметром a. В

длинноволновом приближении разность давлений на противоположных сторонах пьезопреобразователя запишем в виде [70, 71, 74]:

$$\Delta p \approx p\, kl/2,$$

где p – звуковое давление на уровне диаметральной плоскости корпуса ПГД, k – волновое число, l – набег плоской волны, определяемый соотношением [71, 72, 74]

$$l = D'/2 + L/2 + D'/2. \qquad (2.3)$$

Электрический сигнал на выходе ПГД силового типа можно представить в виде [71]:

$$U_{pgrf} = v_{p0}\, \Delta p\, 4Lh/\pi a^2 \approx v_{p0} kl/2\, 4Lh/\pi a^2\, p = v_{pgrfp}\, p, \qquad (2.4)$$

где

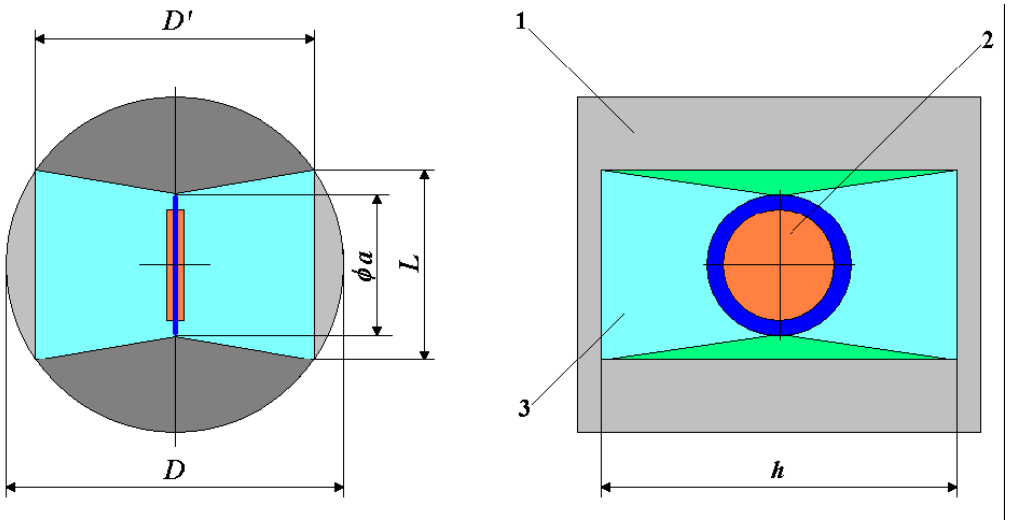
v_{p0} – односторонняя чувствительность круглого пластинчатого изгибного пьезопреобразователя к давлению,

v_{pgrfp} – чувствительность ПГД силового типа к звуковому давлению в плоской волне, а сомножитель $4Lh/\pi a^2$ характеризует трансформацию звукового давления в канале цилиндрического корпуса с изменяющимся сечением.

Комбинируя соотношения (2.3) и (2.4), получим выражение

$$v_{pgrfp} \approx 2v_{p0} klLh/(\pi a^2), \qquad (2.5)$$

которое позволяет рассчитать чувствительность предложенного ПГДС к звуковому давлению в плоской волне.



а) б)

Рисунок 2.6 – Схематическая модель одного канала ПГДС:

а) диаметральное сечение, б) вид сбоку

Изготовленный макет ПГДС имеет следующие размеры: D = 52 мм, D' = 46 мм, L = 20 мм, h = 50 мм, a = 34 мм. Односторонняя чувствительность изгибного преобразователя

v_{p0} = 4.5 мВ/Па измерена в воздухе с помощью пистонфона на частоте 250 Гц методом сравнения с образцовым микрофоном с известной чувствительностью.

Акустические характеристики: зависимость чувствительности к звуковому давлению в плоской гармонической волне от частоты и пространственная избирательность ПГДС оценивались в лабораторных условиях, в вертикальном колеблющемся столбе жидкости по методике, описанной в [172]. При этом определялась чувствительность ПГД к звуковому давлению по сравнению с гидрофоном типа 8103 Брюль и Къер, Дания. Характеристика направленности и поперечная чувствительность ПГД (коэффициент деления) также оценивались в колеблющемся столбе жидкости.

Для изготовленного макета ПГДС АЧХ чувствительности одного из каналов к звуковому давлению в направлении максимума дипольной характеристики направленности в диапазоне частот 63 – 140 Гц показана на рисунке 2.7. Она близка по виду, с учетом погрешности измерений, к характерному для ПГД наклону АЧХ 6 дБ/октава и значениям теоретически рассчитанной чувствительности. Интерполяция данной зависимости дает на частоте 100 Гц чувствительность примерно 70 мкВ/Па, что сопоставимо с результатом приближенной теоретической оценки по формуле (2.5) $v_{pgrfp} \approx 58$ мкВ/Па. Достигнутое значение чувствительности ПГД по звуковому давлению оказывается достаточно высоким при столь малом поперечном размере.

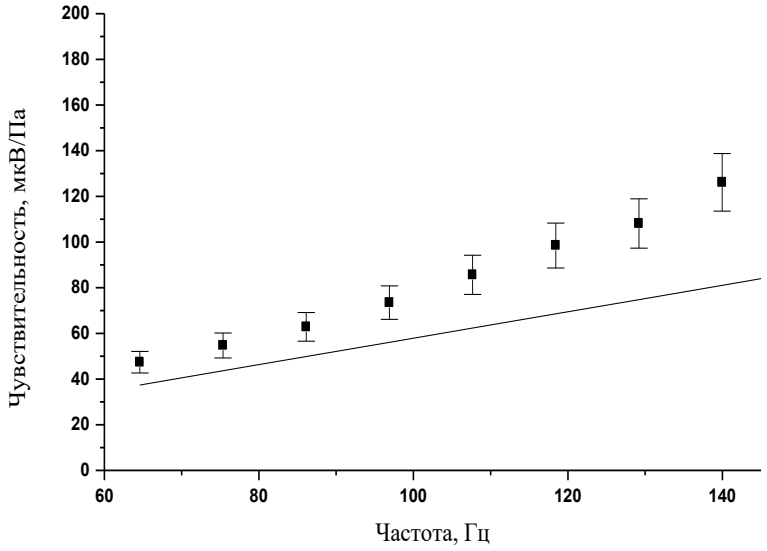


Рисунок 2.7 – АЧХ чувствительности одного из каналов макета ПГД силового типа в колеблющемся столбе жидкости: квадраты – экспериментальные значения с указанием отклонений ±10%, линия – теоретически предсказанные значения согласно выражению (2.4)

Чувствительность в поперечном направлении, определяющая глубину провалов дипольной

характеристики направленности ПГД (коэффициент деления), составила минус 20 дБ в диапазоне частот 60 – 200 Гц. Для второго канала были получены близкие к вышеуказанным данные.

Заметим, что на итоговую чувствительность ПГД оказывают влияние односторонняя чувствительность круглого пластинчатого изгибного пьезопреобразователя к давлению (v_{p0}), которая повышается при выполнении изгибного преобразователя достаточно тонким. Условия всестороннего гидростатического сжатия, в которых работает ПГД, выполненный по предлагаемой схеме, обеспечивают такую возможность. При уменьшении толщины преобразователя снижается частота нулевой моды (без узловых окружностей и узловых диаметров) его изгибных колебаний, которая во избежание искажений АЧХ должна превышать верхнюю границу рабочего диапазона частот ПГД в 1.25 – 1.5 раз. В этих условиях достигнутое в макете значение односторонней чувствительности $v_{p0} = 4.5$ мВ/Па не представляется предельным. Согласно [185] резонансная частота f_{00} нулевой (без узловых окружностей и узловых диаметров) моды изгибного преобразователя, рассматриваемого как тонкая круговая пластинка, определяется соотношением

$$f_{00} = \frac{\chi^2}{2\pi R^2}\sqrt{D_{\text{изг}}/\rho h_{\text{пл}}} \ ,$$

где $D_{\text{изг}}$ — изгибная жесткость пластины:

$$D_{\text{изг}} = \frac{E h_{\text{пл}}^3}{12(1-\sigma^2)}.$$

Здесь E — модуль Юнга, σ — коэффициент Пуассона, ρ — плотность, $h_{\text{пл}}$ — толщина пластины, R — радиус пластины, χ — числовой коэффициент, зависящий от граничных условий (3.196 и 2.231 для пластин с зажатыми и опертыми краями соответственно).

Подставив в данные выражения значения для пластины с размерами $R = 20$ мм и $h_{\text{пл}} = 1.2$ мм из латуни Л62: E = 11*10^{10} Н/м^2, σ = 0.35, ρ = 8216 кг/м^3, получим:

– для зажатой по краям пластины $f_{00} = 5499$ Гц,

– для опертой по краям пластины $f_{00} = 2680$ Гц.

Если пластина тонкая и нагружена на воду, то на резонансную частоту будет влиять присоединенная масса воды. Для зажатой пластины в [186] получена уточненная формула для расчета f_{00}:

$$f_{00} = \frac{\chi^2}{2\pi R^2(1+\beta)}\sqrt{D_{\text{изг}}/\rho h_{\text{пл}}} \ ,$$

где β = 0,6689*$\rho_{\text{воды}}$/ρ*R/$h_{\text{пл}}$, $\rho_{\text{воды}} = 1000$ кг/м^3 — плотность воды.

Поэтому для вышеуказанной зажатой пластины $f_{00} = 3582$ Гц, т.е. резонансная частота в воде в 1,53 раза ниже резонансной частоты в воздухе.

Другим фактором, определяющим чувствительность ПГД, является величина волнового набега, которая для изготовленного макета составляет согласно (2.3) $l = 56$ мм $= 1.08D$.

Рассмотрим задачу максимизации набега волны l в конструкции, показанной на рисунке 2.6. Из геометрических соображений видно, что $D' = (1 - (L/D)^2)^{1/2}$. Соотношение (2.2) можно преобразовать, поделив обе его части на D:

$$l/D = (1 - (L/D)^2)^{1/2} + L/2D.$$

Вводя вспомогательные переменные $x = L/D$, $y = l/D$, получаем уравнение:

$$y = (1 - x^2)^{1/2} + x/2.$$

Для нахождения максимума функции y вычислим ее первую производную и приравняем ее нулю.

$$y' = -1/2\ (1 - x^2)^{-1/2}\ 2x + 1/2 = 0, \text{ или } 1/2 = x/(1-x^2)^{1/2}.$$

Умножая левую и правую части последнего уравнения на знаменатели, получаем

$$2x = (1-x^2)^{1/2}.$$

Действительный корень данного уравнения

$$x_{opt} = (L/D)_{opt} = 0.447, \text{ а } y_{max} = (l/D)_{max} \approx 1.118.$$

Таким образом, максимально достижимое значение $l_{max} \approx 1.118D$ при $L_{opt} = 0.447D$. Следовательно, даже в рамках разработанного макета чувствительность к звуковому давлению может быть повышена в 1.04 раза, только за счет увеличения размера L до оптимального – 23.24 мм.

Интересно сравнить максимальную для предложенной конструкции величину волнового набега $l_{max} \approx 1{,}118D$ с достижимыми при использовании традиционных решений, когда круглый изгибный преобразователь установлен в тяжелом круглом кольце того же диаметра D [74] или прямоугольный изгибный преобразователь прикреплен к центральному тяжелому сердечнику [71, 72] с тем же общим поперечным диаметром D. Из геометрических соображений следует, что в первом случае достижимо $l = 0{,}5D$, тогда как во втором – $l \leq 0.25D$. Таким образом, положительный эффект предлагаемого технического решения в этой части очевиден.

Однако у предлагаемой конструкции ПГД имеется еще один резерв повышения итоговой чувствительности к звуковому давлению за счет трансформации звукового давления на переменном сечении внутренних каналов корпуса [178–182]. Этот коэффициент трансформации, как уже говорилось, определяется отношением $4Lh/\pi a^2$, которое для выполненного макета составляет 1.1. Заметим, что увеличение h от 50 мм до 75 мм, что в пределах габаритной длины 111 мм вполне осуществимо, позволит увеличить итоговую чувствительность макета к звуковому давлению еще в 1.5 раза.

Что касается корпуса ПГД, имеющего сложную конфигурацию (рисунок 2.5), то он может быть выполнен не из 8, а из 4 одинаковых неразборных сегментов, которые для упрощения технологии могут быть изготовлены с помощью 3D-печати или литьем по модели.

Таким образом, изготовленный макет ПГДС, несмотря на свои малые размеры вполне пригоден, по своим характеристикам, для использования в мелководных акваториях.
Был изготовлен и более крупный макет, диаметр его корпуса составляет 100 мм. У этого макета чувствительность по звуковому давлению на частоте 100 Гц составила более100 мкВ/Па.

2.3 Гибкая реконфигурируемая 12-элементная приемная антенна и блок усиления и полосовой фильтрации

Для регистрации шумов легководолазов на разных расстояниях от него (глава 4) была разработана и изготовлена гибкая реконфигурируемая 12-элементная приемная антенна [187] и многоканальный блок усиления и полосовой фильтрации. Входящие в состав антенны 12 ненаправленных гидрофонов давления подключены к индивидуальным предварительным усилителям с коэффициентом усиления 12, размещенным в герметичных контейнерах, соединенных тонкими кабелями длиной 3 м с 12-жильным магистральным кабелем общей длиной 100 м с помощью муфт, расстояния между которыми составляют 4 м. На конце магистрального кабеля установлен герметичный разъем, предназначенный для подключения удлинительного кабеля при необходимости. Гидрофоны антенны могут быть уложены на дно, либо подвешены в водном слое или погружены в донные осадки: ил, ил-песок или песок. Выводимый на береговой пост конец магистрального кабеля подключается ко входу многоканального блока усиления и полосовой фильтрации, с выхода которого сигналы поступают на многоканальные устройства оцифровки и регистрации данных.

Гидрофоны имеют равномерную АЧХ на частотах ниже 10 кГц, расстояния между гидрофонами могут быть изменены от 0.05 м до 4 м путем сматывания/разматывания или укладывания «змейкой» как соединительных кабелей, так и магистрального кабеля. В блоке усиления и полосовой фильтрации установлены идентичные полосовые фильтры с полосой пропускания 5–4500 Гц на операционных усилителях для ослабления влияния микросейсм и гидродинамических помех на частотах менее 5 Гц и ограничения полосы частот сверху, а также регулируемые усилители, предназначенные для выравнивания чувствительностей гидрофонов и усиления поступающих с них сигналов до уровней, необходимых для работы устройств оцифровки и регистрации данных.

Спектральная плотность собственных шумов всех каналов антенны с предварительными усилителями в полосе частот 5–4500 Гц, достаточна для работы в условиях прибрежных акваторий [24, 25,42, 43].

Результаты использования одного из макетов этой антенны для регистрации подводных шумов описаны в [188], они подтверждают пригодность ее в качестве многоканального приемного устройства в малошумных мелководных акваториях.

2.4 Выводы по второй главе

1. Разработанный трехкомпонентный приемник градиента давления инерционного типа на основе высокочувствительных акселерометров со стабильными метрологическими характеристиками пригоден для использования в малошумных прибрежных акваториях, его чувствительность по звуковому давлению на частоте 100 Гц составляет порядка 500 мкВ/Па и возрастает по линейному закону при увеличении частоты. Применение акселерометров с гарантированными стабильными метрологическими характеристиками позволяет использовать данный приемник для выполнения не только качественных исследований, но и количественных измерений характеристик ГА шумов.

2. Разработанный двухкомпонентный приемник градиента давления силового типа обладает новизной, подтвержденной патентом на изобретение и пригоден для жесткого крепления к несущим конструкциям, использования в составе буксируемых антенн, установки на дно и погружения в донные осадки. Его чувствительность по звуковому давлению на частоте 100 Гц составляет порядка 70 мкВ/Па и возрастает по линейному закону при увеличении частоты. Имеющиеся ресурсы повышения чувствительности конструкции данного приемника позволяют рассчитывать на возможность его эффективного использования на частотах ниже 100 Гц.

3. Разработанная 12-элементная реконфигурируемая гибкая приемная антенна с береговым блоком усиления и фильтрации обладает характеристиками, достаточными для обеспечения возможности выполнения натурных экспериментов в прибрежных акваториях. Гидрофоны антенны могут быть уложены на дно, либо подвешены в водном слое или погружены в донные осадки: ил, ил–песок или песок, расстояния между гидрофонами могут быть изменены от 0.05 м до 4 м за счет запаса длин соединяющих их кабелей.

4. Разработанные технические средства: трехкомпонентный приемник градиента давления инерционного типа, двухкомпонентный приемник градиента давления силового типа и реконфигурируемая гибкая 12-элементная антенна с береговым блоком усиления и полосовой фильтрации пригодны для решения задач диссертационной работы, а также представляют интерес и для использования при выполнении натурных исследований в области акустики мелкого моря и акустической томографии.

Глава 3
Спектральные и статистические характеристики гидроакустических шумов мелководных прибрежных акваторий и уточнение их моделей

В данной главе описаны результаты исследования временно́й изменчивости усредненных на последовательных интервалах длительностью 0.1–10 с спектральных и статистических характеристик фрагментов записей ГА шумов, зарегистрированных с помощью ПД и ПГД в мелководных акваториях с интенсивным судоходством (залив Петра Великого Японского моря) на частотах ниже 4 кГц, а также результаты уточнения описывающих их моделей. Использованные фрагменты записей характеризуют типичные для районов выполнения работ помехо–сигнальные ситуации (когда наблюдаются как динамические и биологические шумы акватории, так и шумы, создаваемые береговыми предприятиями и плавсредствами). Длительности указанных интервалов усреднения соответствуют длительностям интервалов наблюдения, используемых в мелководных акваториях для принятия решений об обнаружении, измерении параметров и классификации НЧ ГА сигналов, шумов и источников подводного шумоизлучения, а также для оценивания помеховой и помехо–сигнальной обстановки.

3.1 Статистические характеристики мгновенных значений звукового давления и градиента звукового давления гидроакустических шумов

В п. 3.1 описаны результаты анализа применимости гауссовского закона распределения вероятностей (1.2, 1.3) в качестве модели эмпирических ПРВ мгновенных значений звукового давления и градиента звукового давления НЧ ГА шумов, зарегистрированных вблизи акватории порта Владивосток, на последовательных частично–перекрывающихся интервалах времени длительностью 0.1–10 с [189–198].

На рисунке 3.1 показаны: а) – осциллограмма, б) – осциллограмма в увеличенном по вертикали масштабе, в) – спектрограмма звукового давления (масштабы уровней условные) 20–минутного фрагмента записи звукового давления ГА шума в заливе Петра Великого Японского моря. В качестве приемного устройства использовался прикрепленный на гибкой подвеске к дрейфующему бую ненаправленный гидрофон, погруженный на глубину 10 м и соединенный кабелем с аппаратурой регистрации, размещенной на дрейфующем вместе с буем катере. Для защиты от гидродинамических помех гидрофон был помещен в чехол из ворсистой ткани.

Глубина места в районе работ 30 м, дно – песок, камни, состояние моря во время регистрации ГА шума 3 балла. Здесь и далее состояние моря оценивается по шкале Бофорта.

Частота дискретизации f_s = 8 кГц, использовался 16-разрядный АЦП. Этот же фрагмент записи звукового давления ГА шума используется в качестве источника данных далее в разделе 3.2.

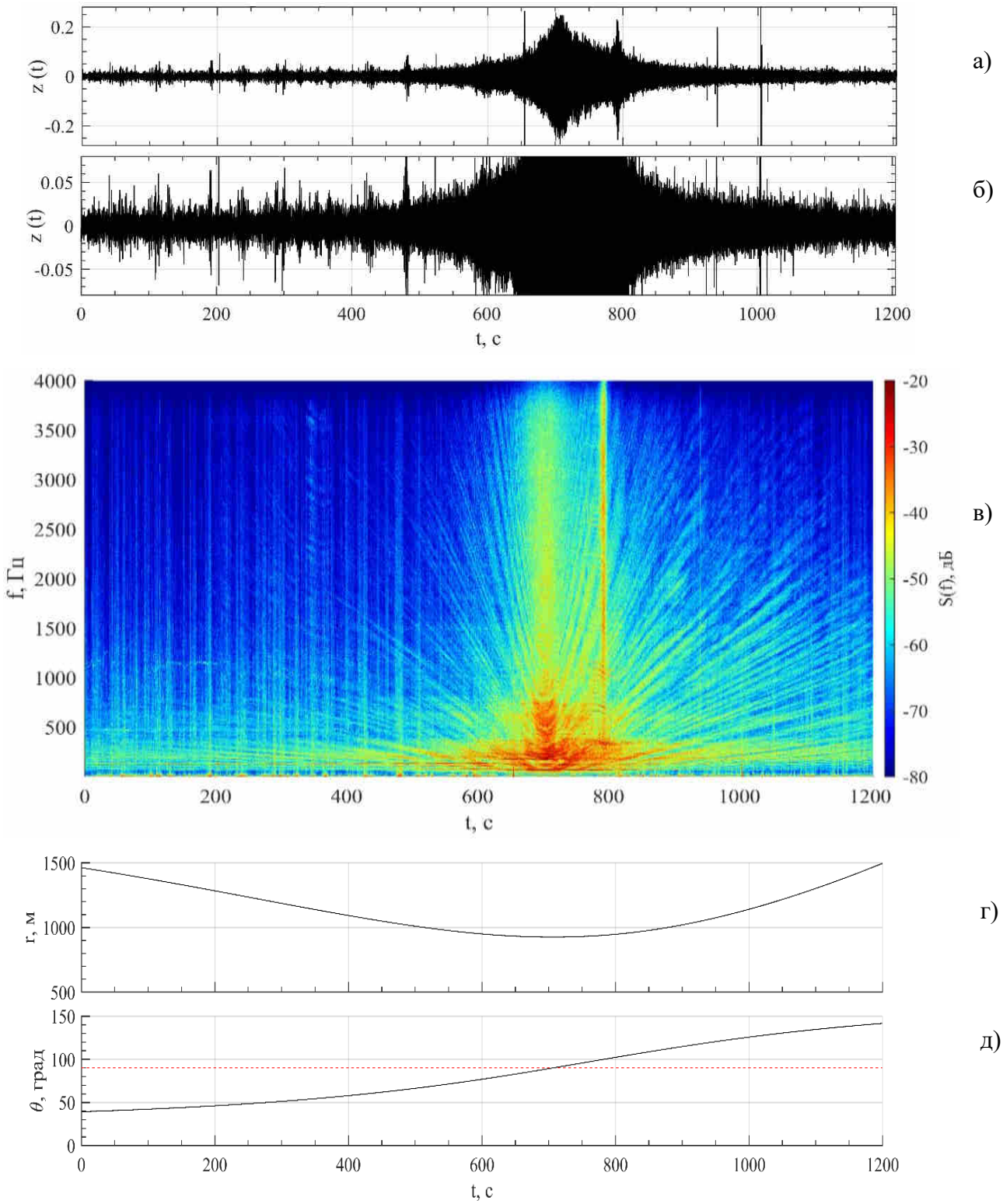


Рисунок 3.1 – Сверху вниз: осциллограмма, осциллограмма в увеличенном по вертикали масштабе, спектрограмма звукового давления при проходе судна и моторной лодки, зависимость от времени расстояния между судном и гидрофоном, зависимость угла между диаметральной плоскостью судна и направлением на буй с гидрофоном

На осциллограммах повышение уровня огибающей начиная от 400 с, максимум в области 710 с и дальнейшее понижение вызвано приближением–удалением идущего постоянным курсом рыбопромыслового судна водоизмещением порядка 800 т и осадкой более 2 м со скоростью ≈ 5 узлов (2.57 м/с).

В нижней части рисунка 3.1 показаны: г) – зависимости от времени ориентировочного расстояния r между данным судном и гидрофоном, д) – зависимость угла θ между диаметральной плоскостью судна и направлением с судна на буй с гидрофоном (курсовой угол левого борта). Минимальное расстояние от судна до буя с гидрофоном во время прохождения траверза (706 с) составляло $\sim 0.3 - 0.5$ морской мили. Показанные на рисунке 3.1 зависимости от времени расстояния между судном и гидрофоном $r(t)$ и угла $\theta(t)$ между диаметральной плоскостью судна и направления на гидрофон рассчитаны в предположении, что расстояние от судна до буя с гидрофоном во время прохождения траверза составляло 0.5 морской мили (926 м). На зависимости $\theta(t)$ пунктирной линией показано значение траверза ($\theta = 90°$).

Максимум на осциллограммах и спектрограмме вблизи 790 с вызван проходом моторной лодки на расстоянии порядка 0.1 мили от буя с с гидрофоном. Максимумы в областях до 500 с и после 900 с обусловлены движением судов на удалениях более 3-х миль. Для построения спектрограммы использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) [115]: кол-во отсчетов $N = 1000$, окно Ханна, перекрытие фрагментов 50%, разрешающая способность по частоте $\Delta f = f_s/N = 8$ Гц.

На рисунке 3.2 линиями черного, зеленого, красного и синего цвета показаны усредненные на интервалах времени длительностью $T = 10$ с ненормированные спектральные уровни в полосах $\Delta f = 1$ Гц фрагментов ГА шума, рисунок 3.1, начинающихся: в 6 с (до судна ~ 1460 м, $\theta \approx 40°$) – преобладает ГА шумовой фон акватории, 650 с (до судна ~ 930 м, $\theta \approx 83°$) – приближение судна, 706 с – траверз (до судна ~ 926 м, $\theta \approx 90°$), 900 с (до судна ~ 1020 м, $\theta \approx 115°$) – удаление судна. Использовано усреднение по методу Уэлша (Welch P. D.) [115, 199]: в интервале T выделялись участки длительностью 1 с, перекрывающиеся на 50%, на каждом из них оценивались спектральные уровни, результаты усреднялись. Спектральные уровни на частотах менее 4 Гц приниматься во внимание не должны.

Наибольшее превышение шума судна над шумовым фоном акватории (с учетом заметных на спектрограмме составляющих шума приближающегося судна на частотах ниже 250 Гц) наблюдалось вблизи траверза и составляло на частотах 200 –300Гц более 30 дБ. При повышении частоты свыше 200 Гц видно спадание спектральных уровней порядка 20 дБ/декада как у шума судна, так и у шума акватории.

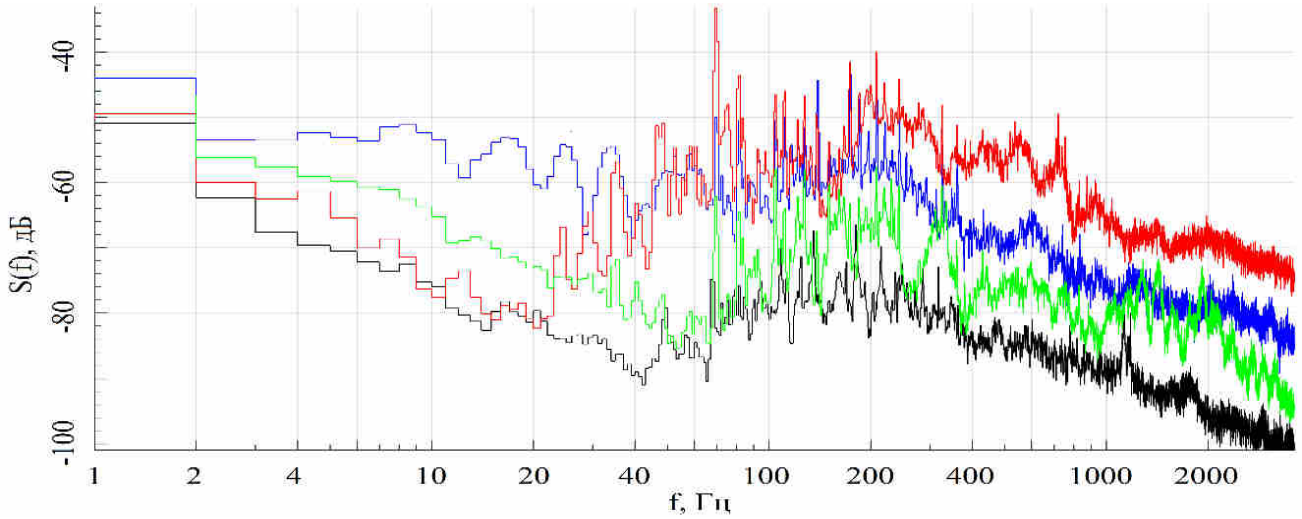


Рисунок 3.2 – Спектральные уровни в полосах $\Delta f = 1$ Гц. Пояснения в тексте

На частотах ниже 40 Гц наибольшие спектральные уровни (более высокие, чем при прохождении траверза и заметные на спектрограмме) наблюдались при удалении судна, что свидетельствует о более высокой направленности шумов данного судна в области кормовых углов на этих частотах. Так, на частотах вблизи 18 Гц спектральные уровни шума в области кормовых углов были на 26 дБ больше, чем при прохождении траверза. Бóльшая направленность подводного шумоизлучения в области кормовых углов, заметная и на спектрограмме, характерна для судов, которые должны быть способны развивать повышенную тягу, необходимую для траления рыбы, буксировки и др.

В системах ГА связи с кодовой, амплитудной и угловой модуляцией, системах анализа огибающих с использованием алгоритмов DEMON (Detection of Envelope Modulation of Noise, обнаружение модуляции огибающей шума) [16, 51–57], а также для стабилизации уровня ложных тревог и др. используется автоматическая регулировка усиления (АРУ) принимаемых сигналов, которая может быть плавной, ступенчатой по уровню и / или длительности, нелинейной / линейной, инерционной / безынерционной и др. [20]. Система АРУ может быть реализована аппаратно или программно. Показатели качества вышеуказанных ГА систем, особенно в условиях нестационарных ГА шумов мелководных акваторий, во многом зависят от выбранного алгоритма функционирования АРУ и точности его реализации.

В системах со ступенчатой по длительности АРУ, адаптированной к длительностям ожидаемых (принимаемых) сигналов на последовательных частично перекрывающихся интервалах наблюдения, длительности которых T равны длительностям этих сигналов, выполняется нормирование уровней входных сигналов $z(t)$ так, чтобы у сигнала $y(t)$ на выходе системы АРУ на каждом из таких интервалов математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение от него не более, чем на 1% отличались от заданных постоянных, например от 0 и 1 соответственно (нормирование к (0, 1) в терминах теории вероятностей) независимо от наличия

или отсутствия ожидаемых сигналов. Такая операция, если не используется дополнительная фильтрация, на каждом из интервалов длительностью T является адаптивной линейной безынерционной [20]. При этом ПРВ мгновенных значений сигналов $z(t)$ и $y(t)$ на входе и выходе системы АРУ описываются одним и тем же законом распределения и отличаются лишь дисперсией [20–23].

Для определения достижимых вероятностных характеристик обнаружения, оценивания параметров и классификации ГА сигналов и шумов при использовании такой системы АРУ нужно иметь информацию о временно́й изменчивости эмпирических ПРВ мгновенных значений $w(y, t)$ на ее выходе, оцененных на интервалах времени, соответствующих длительностям ожидаемых сигналов. При этом весьма важным является вопрос о выявлении интервалов времени, на которых допустимо и на которых не допустимо применение\ гауссовского закона распределения вероятностей (1.3) в качестве модели нормированной эмпирической ПРВ $w(y, t)$ процесса на выходе системы АРУ, в том числе при наличии импульсных ГА помех и помех от проходящих судов, как на рисунке 3.1.

В качестве оценок эмпирических ПРВ мгновенных значений в дальнейшем используются нормированные к (0, 1) гистограммы (нормирование гистограмм позволяет наносить их на те же графики, что и нормированные плотности распределения). Для оценивания временно́й изменчивости эмпирических ПРВ нормированных к (0, 1) мгновенных значений ГА шума, см. рисунок 3.1, анализируются изменения со временем нормированных гистограмм [145–147] на выходе системы АРУ с учетом соображений, рассмотренных в [145–147, 200].

На рисунке 3.3 показана последовательность нормированных гистограммных оценок ПРВ мгновенных значений для фрагментов сигнала $y(t)$ длительностью $T = 1$ с, перекрывающихся на 50%, на выходе программно–реализованного тракта обработки сигналов в составе цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтра) с полосой пропускания $\Delta f = 30$–3300 Гц и вышеуказанной системы АРУ с временем накопления T=1 с (время накопления в системе АРУ равно длительности анализируемых фрагментов).

Предполагая, на основании предварительного анализа, что эмпирические ПРВ близки к гауссовскому распределению и учитывая, что для оценивания вероятностных характеристик обнаружения и классификации сигналов важно иметь сведения о ПРВ не только в области моды, но и в областях хвостов распределения (соответствующих относительно редко встречающимся значениям и выбросам), при построении гистограмм использовались $k = 100$ интервалов группировки, ширина которых выбиралась так, чтобы вероятность попадания выборочных значений в каждый из них для гауссовского распределения составляла 0.01 [94].

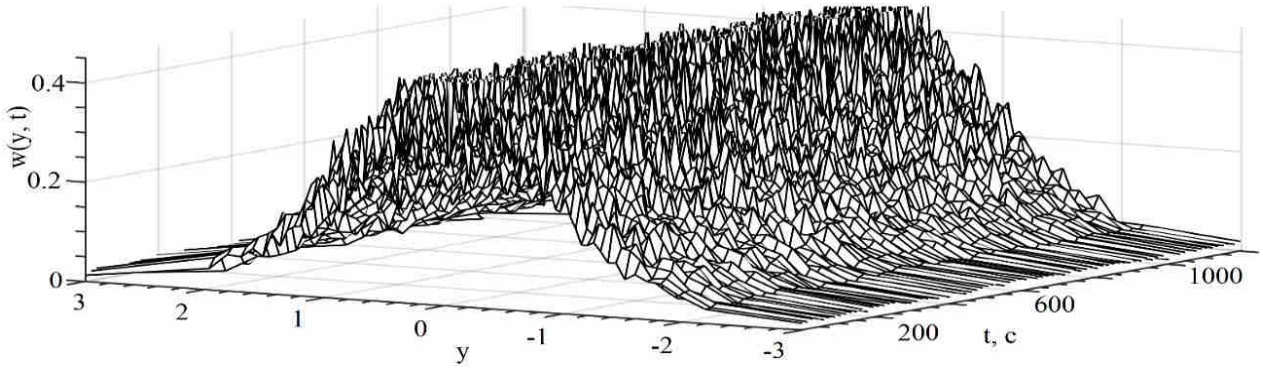


Рисунок 3.3 – Зависимость от времени гистограммных оценок ПРВ фрагментов ГА шума длительностью $T = 1$ с на выходе системы АРУ в полосе частот $\Delta f = 30 – 3300$ Гц

Таким образом, для построения каждой из гистограмм при $T = 1$ с и $f_s = 8$ кГц использовалось $n = 8000$ последовательных выборочных значений, при этом в каждый из интервалов группировки при гауссовском распределении должно попадать в среднем по 80 (зависимых) выборочных значений.

Для оценивания соответствия эмпирических ПРВ $w(y, t)$ гауссовскому закону (1.3) могут быть использованы различные критерии согласия [12, 150, 151]. В настоящей работе был использован критерий Хи–квадрат К. Пирсона [12, 151] в связи с тем, что при решении задач, обозначенных в целях работы, таких как обнаружение сложных ГА сигналов с неизвестными параметрами, в качестве основных величин, подлежащих статистическому анализу, используются суммы квадратов мгновенных значений звукового давления и суммы квадратов компонент градиента давления (пропорциональные энергии). Вероятностные свойства таких сумм приближенно описываются распределением Хи–квадрат [20, 22, 151].

Согласно данному критерию, вычисляется случайная величина χ^2:

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^{k} \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i}, \tag{3.1}$$

которая затем сравнивается с пороговым значением χ^2_{TRL} (TRL – Treshold Level – пороговый уровень), определяемым исходя из выбранного уровня значимости. Здесь, как и при построении гистограмм, n – количество выборочных значений, используемых для проверки гипотезы о соответствии эмпирической ПРВ гауссовскому закону распределения, k – количество интервалов группировки, p_i – вероятность попадания выборочных значений в i – й интервал группировки для гауссовского распределения вероятностей, p_i^* – случайная частота попадания мгновенных значений сигнала $y(t)$ в i – й интервал группировки, оцененная по экспериментальным данным.

В соответствии с критерием Хи–квадрат, если $\chi^2 \leq \chi^2_{TRL}$, принимается решение о том, что гипотеза о гауссовском распределении мгновенных значений не противоречит результатам эксперимента (результаты эксперимента согласуются с гауссовским законом). Если $\chi^2 > \chi^2_{TRL}$,

принимается решение о том, что гипотеза о гауссовском распределении мгновенных значений противоречит результатам эксперимента (результаты эксперимента не согласуются с гауссовским законом) [151]. Поскольку величина χ^2случайная, решения могут быть правильными или ошибочными. Пороговые значения χ^2_{TRL} для независимых выборочных значений и различных уровней значимости приведены в таблицах [150, 151, 201].

По поводу выбора порогового значения χ^2_{TRL}, необходимо отметить следующее. В критерии Хи-квадрат (как и в других критериях согласия) предполагается, что выборочные значения, к которым он применяется, представляют собой независимые случайные величины с одной и той же ПРВ. Последовательные выборочные значения ГА шума мелководных прибрежных акваторий в ограниченных полосах частот, взятые, как в данном случае, через интервалы времени, определяемые в соответствии с теоремой В. А. Котельникова [20, 115], (в данном случае f_s = 8 кГц) считать независимыми нельзя [10–13]. Фактическое количество независимых выборочных значений на каждом из интервалов накопления неизвестно, и его точно определить не представляется возможным. Предположение о неизменности ПРВ на всех непрерывных интервалах длительностью от десятых долей до единиц секунд требует подтверждения ввиду наличия в низкочастотных ГА шумах мелководных акваторий трендов различных временны́х масштабов (гидродинамические процессы, вызванные движением и маневрированием судов, особенно если их размеры превышают глубину места и др.), а также импульсных помех. При применении, в таких ситуациях, критерия Хи–квадрат к совокупностям зависимых случайных величин, для определения или оценивания величины χ^2_{TRL} используют различные подходы. Так, в [202], на стр. 418 описан способ оценивания числа степеней свободы (и соответственно величины χ^2_{TRL}), основанный на детальном анализе и оценивании параметров распределения, которому подчиняется величина χ^2.

В экспериментальных исследованиях, для оценивания применимости того или иного закона распределения в качестве модели эмпирической ПРВ, зачастую выполняют сравнение результатов обработки экспериментальных данных с результатами обработки модельных («эталонных», образцовых, тестовых) последовательностей случайных величин с заранее известными свойствами. При этом предполагается, что случайные последовательности, выбранные в качестве модельных, эквивалентны, в статистическом смысле, полученным в результате эксперимента.

Выявленное в результате такого сравнения совпадение (или близость в том или ином статистическом смысле) результатов обработки экспериментальных и модельных данных расценивается как соответствие (непротиворечие) свойств экспериментальных данных модельным. Такой подход не лишен недостатков, поэтому полученные при его применении

результаты должны рассматриваться как ориентировочные, но для обозначенных в целях работы практических применений этого оказывается достаточно.

Поэтому, для сопоставления результатов обработки записей ГА шумов, рисунок 3.1, с теоретическими (прогнозными), которые должны получаться для гауссовского распределения с учетом статистического разброса и ограниченности полосы частот, было выполнено компьютерное моделирование. Тестовый (модельный) сигнал, в качестве которого использована одна из реализаций программно–сформированного белого гауссовского (при уровне значимости 0.05) шума длительностью 1200 с (как и на рисунке 3.1), был пропущен через вышеуказанные программно сформированные полосовой фильтр и систему АРУ (т.е. нормирован к (0, 1)). Для полученной таким образом реализации случайного сигнала на выходе АРУ была оценена, с помощью формулы (3.1), возможная «теоретическая» зависимость от времени величины χ^2 при различных значениях Δf и T и использовании тех же, что и ранее, 100 интервалов группировки.

Для значений $\Delta f = 30 – 3300$ Гц и $T = 1$ с она показана на рисунке 3.4 а), для значений $\Delta f = 30 – 300$ Гц и $T = 1$ с – на рисунке 3.4 б). Видно, что зависимости величин χ^2 от времени в обеих полосах частот имеют вид симметричных случайных флуктуаций относительно средних значений χ^2_{mean}, показанных сплошными линиями.

Весьма важным является вопрос об уровнях отклонений от среднего, которые могут считаться «допустимыми» (границами областей незначимых и значимых отклонений в терминологии математической статистики [151]). При увеличении числа независимых выборок распределение Хи–квадрат приближается к гауссовскому. Поэтому в качестве порогового уровня χ^2_{TRL}, с которым сравниваются величины χ^2, полученные для экспериментальных данных, будем использовать сумму χ^2_{mean} с утроенным значением среднего квадратического отклонения χ^2_{RMS} от χ^2_{mean} (правило трех сигм):

$$\chi^2_{TRL} = \chi^2_{mean} + 3*\chi^2_{RMS}. \qquad (3.2)$$

Для трех реализаций модельного сигнала длительностью 1200 с были получены следующие усредненные значения:

– для полосы частот $\Delta f = 30$ — 3300 Гц и длительности интервалов накопления $T = 1$ с $\chi^2_{mean} \approx 95.7$, $\chi^2_{RMS} \approx 13.7$, $\chi^2_{TRL} = \chi^2_{mean} + 3*\chi^2_{RMS} \approx 95.7+3*13.7 \approx 137$;

– для полосы частот $\Delta f = 300$ — 3300 Гц и длительности интервалов накопления $T = 1$ с $\chi^2_{mean} \approx 95.9$, $\chi^2_{RMS} \approx 14.2$, $\chi^2_{TRL} = \chi^2_{mean} + 3*\chi^2_{RMS} \approx 95.9+3*14.2 \approx 138$;

– для полосы частот $\Delta f = 30$ — 300 Гц и длительности интервалов накопления $T = 1$ с $\chi^2_{mean} \approx 135.8$, $\chi^2_{RMS} \approx 26.1$, $\chi^2_{TRL} = \chi^2_{mean} + 3*\chi^2_{RMS} \approx 135.8+3*26.1 \approx 214$.

Указанные значения χ^2_{TRL} показаны на рисунках 3.4 а), б) пунктирными линиями. Превышение значениями величин χ^2, оцененных с использованием (3.1) для исследуемого ГА шума, рисунок 3.1, указанных значений пороговых уровней χ^2_{TRL}, расценивается далее, в соответствии

с вышеизложенным, как признак несоответствия ПРВ мгновенных значений гауссовскому закону распределения вероятностей.

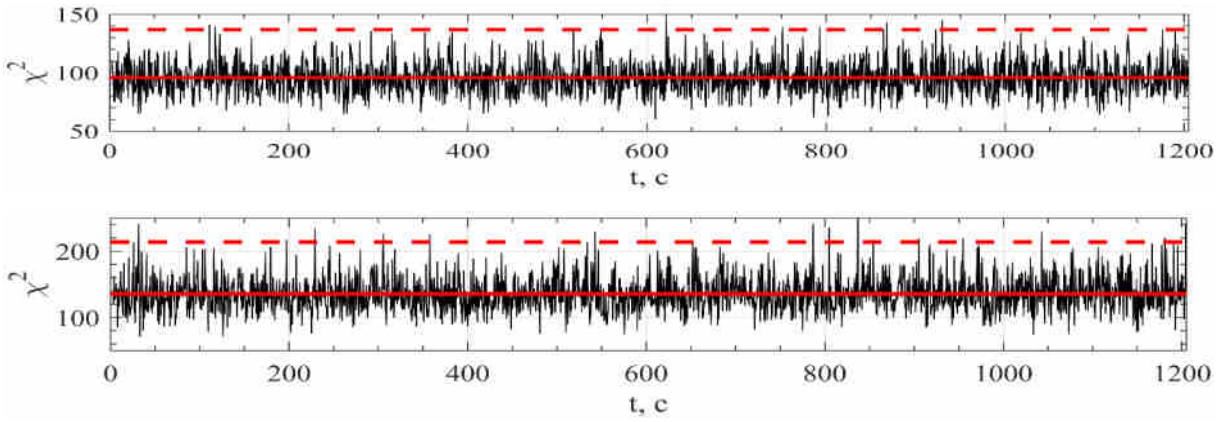


Рисунок 3.4 – Зависимости от времени величин χ^2 для модельных сигналов на выходе системы АРУ. Длительность интервалов накопления $T = 1$ с. Полосы частот: а) $\Delta f = 30 – 3300$ Гц, б) $\Delta f = 30 – 300$ Гц. Сплошными и пунктирными линиями показаны средние значения величин χ^2 и верхние границы утроенного среднего квадратического отклонения от них

Более точное описание флуктуаций использованного образца модельного шумового сигнала и более точное оценивание величин пороговых уровней в данной работе представляется нецелесообразным, т.к. при использовании других реализаций и методов формирования модельного сигнала полученные в разных частотных полосах и при разных значениях времени накопления величины χ^2_{TRL} изменялись в пределах ~ $\pm$10%.

На рисунках 3.5 – 3.7 показаны зависимости от времени величины χ^2 и оценок центральных моментов $M_3 – M_6$ для исследуемого фрагмента ГА шума, рисунок 3.1, на выходах полосовых КИХ фильтров и системы АРУ в двухдекадной полосе частот $\Delta f = 30 – 3300$ Гц и составляющих ее декадных полосах частот $\Delta f = 30 – 300$ Гц и $\Delta f = 300 – 3300$ Гц. Длительности интервалов накопления во всех случаях составляли $T = 1$ с, использовались вышеуказанные 100 интервалов группировки.

На зависимостях от времени χ^2 сплошными и пунктирными линиями показаны вышеприведенные средние и пороговые значения, на зависимостях от времени величин M_4 и M_6 пунктирными линиями показаны их значения для нормированного гауссовского распределения вероятностей (равные 3 и 15 соответственно [151]).

Из сравнения рисунков 3.5–3.7 видно, что если в качестве критерия согласия использовать критерий χ^2, то для исследуемого ГА шума наибольшие отклонения от гауссовского закона наблюдаются: в полосе частот 30–3300 Гц – на интервале 0–650 с, в полосе частот 30–300 Гц – на интервале 0–700 с, в полосе частот 300–3300 Гц – на интервале 0–550 с (приближение судна).

Суммарно, в полосах частот 30 – 3300 Гц и 300 – 3000 Гц более чем на 3/4 интервалов накопления длительностью $T = 1$ с, входящих в приведенный на рисунке 3.1 фрагмент длительностью 1200 с, значения величины χ^2 не превышают усредненный верхний предел χ^2_{TRL} для модельного сигнала, т.е. их ПРВ не отличается от гауссовского в вышеуказанном смысле. Поэтому эти интервалы могут считаться «интервалами гауссовости» в смысле обоснования применимости на них алгоритмов обнаружения, измерения параметров и классификации сигналов, основанных на суммировании квадратов мгновенных значений принимаемых сигналов, а также других алгоритмов, рассмотренных в [17, 20–23]. Правомерность такого подхода подтверждается на практике.

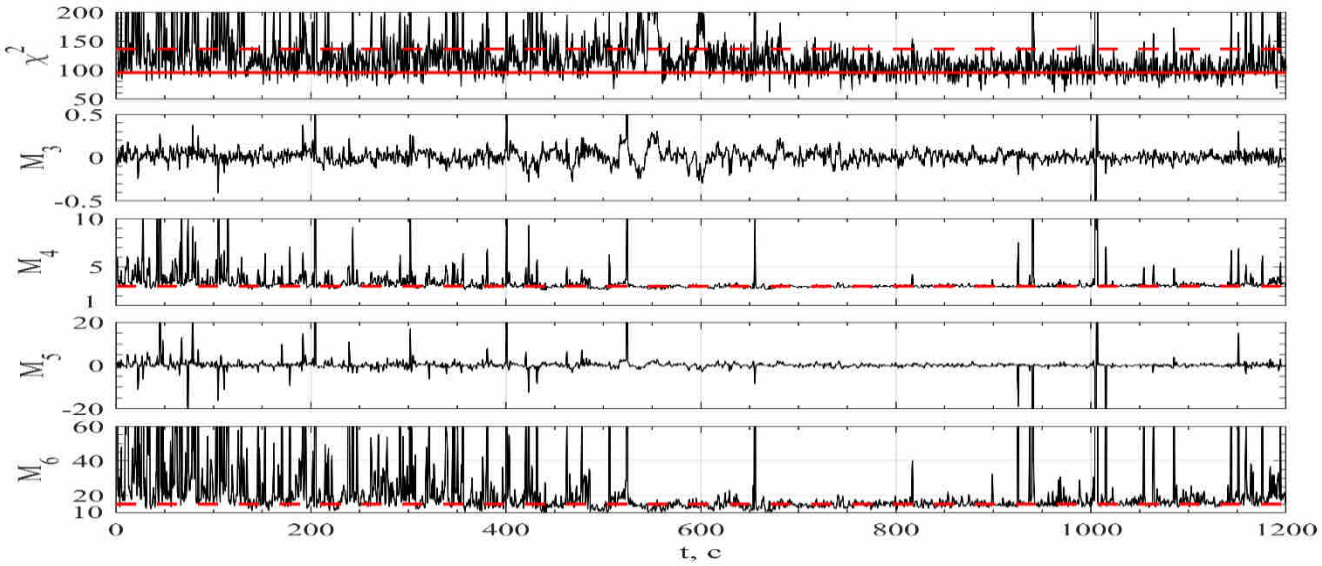


Рисунок 3.5 – Зависимости от времени величины χ^2 и оценок центральных моментов M_3–M_6 для исследуемого фрагмента ГА шума. $T = 1$ с, $\Delta f = 30 – 3300$ Гц

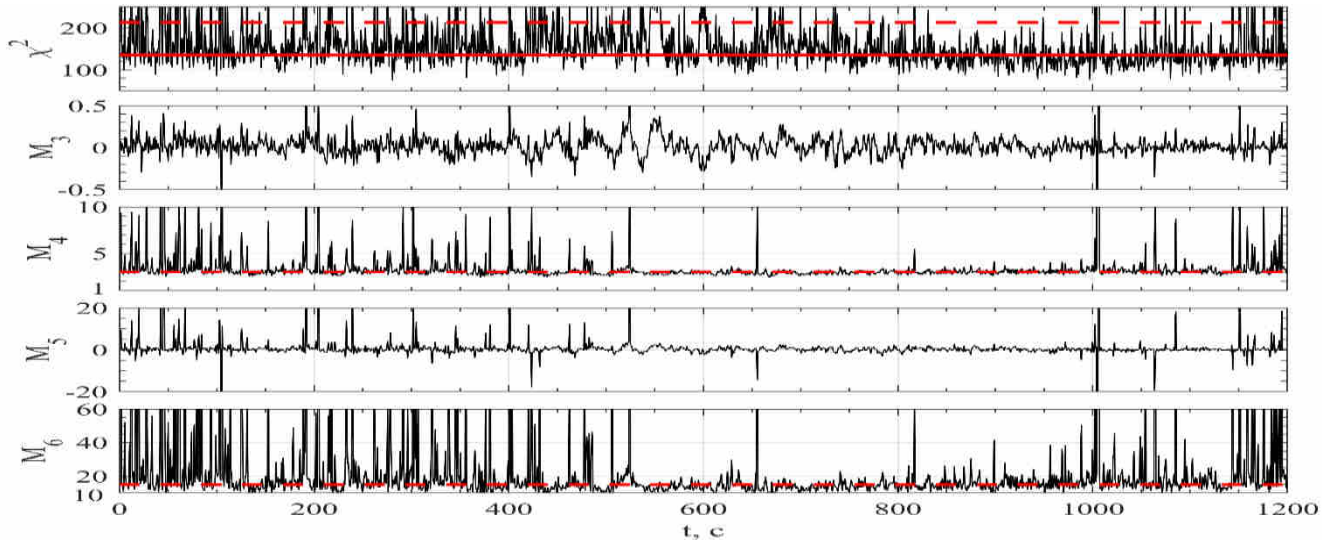


Рисунок 3.6 – Зависимости от времени величины χ^2 и оценок центральных моментов M_3 – M_6 для исследуемого фрагмента ГА шума. $T = 1$ с, $\Delta f = 30 – 300$ Гц

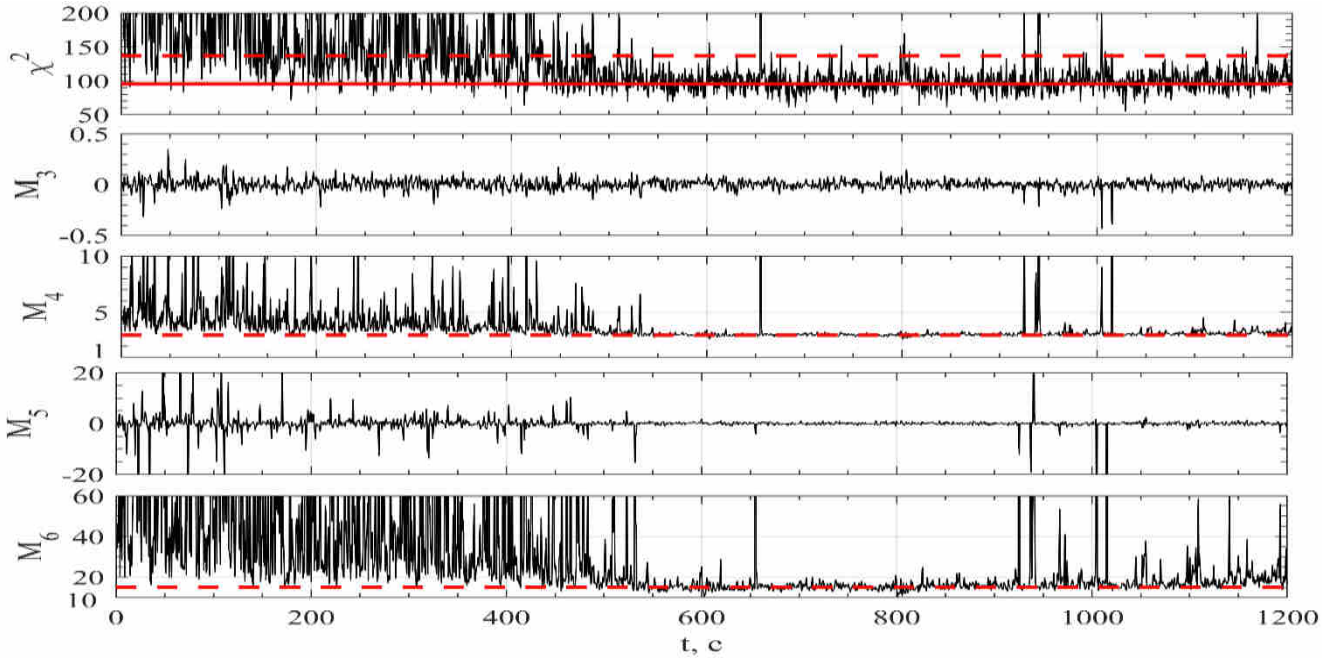


Рисунок 3.7 – Зависимости от времени величины χ^2 и оценок центральных моментов M_3 – M_6 для исследуемого фрагмента ГА шума. T = 1 с, Δf = 300 – 3300 Гц

Наименьшие отклонения от результатов, полученных для тестового сигнала с гауссовским распределением, наблюдаются на интервале 700–1150 с (длительностью 450 с) при Δf = 30 – 3300 Гц и на более протяженном интервале 450 – 1200 с (длительностью 750 с) при Δf = 300 – 3300 Гц. Всё это соответствует положениям теории стационарных случайных процессов и экспериментальным результатам статистической радиотехники о приближении ПРВ мгновенных значений к плотности гауссовского распределения вероятностей при сужении полосы частот [12, 20–23].

В полосе частот 30 – 300 Гц доля интервалов длительностью 1 с, в которых $\chi^2 \leq \chi^2_{TRL}$, составляет порядка половины от интервала 1200 с, показанного на рисунке 3.1.

По поводу зависимости ПРВ мгновенных значений от длительности интервалов накопления отметим следующее. Для процессов с гауссовским распределением вероятностей, при увеличении длительности интервала накопления, величина χ^2, если она больше $\chi^2_{пор}$, должна уменьшаться, приближаясь к $\chi^2_{пор}$ сверху. Для анализируемого ГА шума это выполняется не на всех участках показанного на рисунке 3.1 фрагмента, что обусловлено неравномерностью потока импульсных помех, особенно заметных на рисунке 3.1 б).

Для углубления понимания причин отклонения от гауссовского закона рассмотрим зависимости от времени оценок центральных моментов M_3 – M_6, показанные на рисунках 3.5 – 3.7. Видно, что в большинстве случаев превышение величинами χ^2 порогового уровня χ^2_{TRL}, связано с увеличением центральных моментов M_4 и M_6. Исключением является, например, интервал времени 550 – 650 с, на котором в полосах частот 30 – 300 Гц и 30– 3300 Гц

превышение величинами χ^2 порогового уровня χ^2_{TRL} обусловлено изменениями момента M_3 (изменяющаяся со временем асимметрия распределения), вызванные предположительно прохождением одиночной «не акустической» волны. В полосе частот 300– 3300 Гц на данном интервале времени превышение величинами χ^2 порогового уровня χ^2_{TRL}, не наблюдается.

В качестве модели ПРВ мгновенных значений на участках, где наблюдаются превышения величин χ^2 порогового уровня χ^2_{TRL} можно использовать ряд Грама–Шарлье типа А (1.4) [12, 151], в котором нужно учитывать по крайней мере первые три члена (которые зависят от моментов M_3 и M_4). Для более точного описания ПРВ в областях хвостов распределения, которые, как отмечалось ранее, наиболее важны в задачах обнаружения сигналов при малых отношениях сигнал–помеха, в качестве модели ПРВ мгновенных значений более предпочтительным является использование также последующих членов ряда Грама–Шарлье типа А, учитывающих влияние моментов M_5 и M_6.

В качестве модели ПРВ на всем показанном на рисунке 3.1 интервале, если численные значения моментов M_4 и M_6 не превышают 10 и 40 (ориентировочные значения) в общем случае целесообразно использовать ряд Грама–Шарлье, в котором учитываются члены, зависящие от всех моментов 3–6 порядков, показанных на рисунках 3.5 – 3.7. С математической точки зрения может быть более удобно использовать не ряд Грама–Шарлье, а ряд Эджворта [12], в котором учитывается влияние на ПРВ кумулянтов, а не моментов. Если численные значения моментов M_4 и M_6 превышают (ориентировочно) 10 и 40 соответственно, модель в виде ряда Грама–Шарлье (1.4) может оказаться неприменимой из-за появления на графиках ПРВ участков, на которых в результате вычислений по формуле (1.4) получаются отрицательные значения, что не имеет физического смысла. В этом случае более предпочтительным является использование моделей ПРВ в виде логнормального распределения [31], смеси гауссовских распределений (1.5) [157, 158] или моделей, предложенных Д. Миддлтоном [154–156].

Для времен накопления $T = 0.1$–10 с результаты качественно не изменяются по сравнению с вышеописанными.

Подобные закономерности наблюдаются и на других записях ГА шумов в заливе Петра Великого Японского моря [188–198].

Для обоснования выбора и адаптации к помехам пороговых уровней, используемых при решении задач обнаружения сигналов методом максимального правдоподобия [17, 20–23], кроме χ^2_{TRL} важно знать, в каких областях мгновенных значений ГА шума наблюдаются наибольшие и наименьшие отличия ПРВ мгновенных значений от гауссовского.

Результаты расчета количеств попадания мгновенных значений в разные интервалы группировки показаны на рисунке 3.8 для исследуемого ГА шума и указанного ранее модельного сигнала – белого гауссовского шума. Полоса частот 30–3300 Гц, время накопления $T = 1$ с.

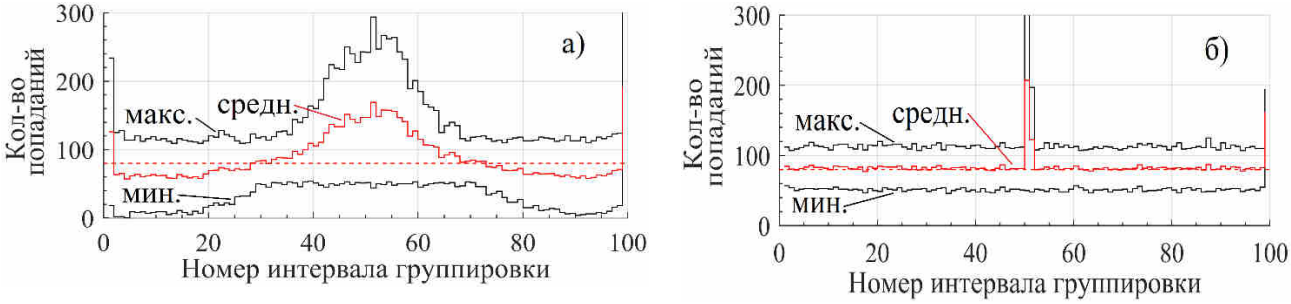


Рисунок 3.8 – Зависимости максимальных, минимальных и средних количеств попаданий мгновенных значений от номера интервала группировки для исследуемого ГА шума (а) и белого гауссовского шума (б). Полоса частот 30–3300 Гц, время накопления 1 с

Из сравнения количеств попаданий мгновенных значений в различные интервалы группировки видно, что для звукового давления ГА шума, рисунок 3.1, наибольшие отклонения от гауссовского закона распределения вероятностей наблюдаются в областях интервалов группировки 35–65, а также 0–20 и 80–100. Область интервалов группировки 35–65 – это центр распределения (область моды), вероятность попадания в нее в данном случае при гауссовском распределении приблизительно равна (65–35)*0.01=0.3. Здесь максимальное количество попаданий больше, чем для гауссовского закона (более высокое, чем у гауссовского распределения значение центральных моментов M_4 и M_6, т.е. положительный эксцесс, что согласуется с известными результатами В. И. Бардышева [34] и др.), а минимальное – соответствует гауссовскому закону. Области интервалов группировки 0–20 и 80–100 (хвосты распределения), соответствуют редким значениям и выбросам. Вероятность попадания в каждый из этих интервалов приблизительно равна 0.01*21= 0.21. В этих областях наоборот: минимальное количество попаданий меньше, а максимальное – больше, чем для гауссовского закона.

Выяснение физических причин данного явления не входило в задачи диссертационной работы, это должно быть предметом отдельного исследования. Тем не менее важно отметить, что изменения моментов M_4 и M_6 могут быть вызваны нерегулярными нарушениями стационарности из-за трендов различных временны́х масштабов, заметными на осциллограммах и спектрограмме, рисунок 3.1, а также импульсными ГА помехами различного происхождения. Такие импульсные помехи могут быть вызваны как рывками приемной системы на волнении и срывами с гидрофона вихрей, обусловленных течением, так и гидрофизическими явлениями соответствующего временно́го масштаба.

Влияние импульсных помех возрастает при уменьшении длительности интервалов накопления. Неучет этого приводит, в ГА системах, к отклонению частоты ложных тревог, пропуска цели, ложно–положительных и ложно–отрицательных и др. ошибочных решений от их

расчетных значений, полученных в предположении о применимости гауссовского распределения в качестве модели помехи. Наиболее заметно это при малых отношениях сигнал/помеха на относительно коротких интервалах наблюдения, особенно тех, на которых наблюдаются импульсные помехи. Для уменьшения количества ошибочных решений такие интервалы должны своевременно выявляться и анализироваться отдельно.

Сходные соотношения наблюдаются и для составляющих ГА шума, воспринимаемых КП. На рисунке 3.9 показаны результаты оценивания зависимостей от времени величин χ^2 и M_4 для 250 с фрагмента подводного шума, зарегистрированного в прибрежной мелководной акватории с помощью КП с ПГДИ собственной разработки, аналогичным описанному в п. 2.1, при приближении и проходе моторной лодки (траверз в 184 с) [190–192]. КП был установлен вблизи дна на удалении 100 м от береговой черты, глубина места в точке установки 6 м, песчаное дно, состояние моря 2 балла, полоса частот 150 – 1500 Гц, время накопления 1 с. Использовался один из горизонтальных каналов ПГДИ (канал x), его направление максимальной чувствительности составляло 45° к береговой черте. Этот же фрагмент записи ГА шума используется в качестве источника данных далее, в разделе 3.3, для удобства осциллограммы и спектрограммы сигналов с ПД и ПГДИ данного фрагмента показаны там же, на рисунках 3.13 и 3.14. Для сравнения, линиями черного цвета на рисунке 3.9 показаны результаты оценивания, с использовании вышеописанного подхода, в полосе частот 150–1500 Гц при времени накопления 1 с, зависимостей $\chi^2(t)$ и $M_4(t)$ для модельного сигнала – программно реализованного белого гауссовского (с уровнем значимости 0.05) шума, нормированного к (0, 1), см. п. 1.3, формула (1.3). Видно, что у данной реализации белого шума значение $M_4 \approx 3$, как и должно быть при гауссовском распределении ПРВ мгновенных значений. Для ГА шума, воспринимавшегося ПД и ПГД, значения $M_4 > 3$ (положительный эксцесс), на большинстве 1 с интервалов значения M_4 для ПД больше, чем для ПГД.

Более, чем на трети представленного на рисунке 3.9 фрагмента значения величины χ^2 для сигнала с ПГД приблизительно на порядок меньше, чем для ПД, т.е. в смысле критерия Хи-квадрат для ПГД отклонения ПРВ мгновенных значений от гауссовского закона меньше, чем для ПД. В общей сложности на одной пятой данного фрагмента в качестве модели ПРВ мгновенных значений воспринимаемого горизонтальными каналами ПГД подводного шума допустимо использовать гауссовский закон распределения вероятностей, на большинстве остальных – использовать ряд Грама–Шарлье типа А (1.4). Это согласуется с утверждением ряда авторов [26, 33, 81, 161, 165–167] о возможности достижения меньшего разброса результатов обнаружения и классификации ГА сигналов и шумов при использовании ПГД, за счет его более высокой помехоустойчивости, чем при использовании ПД.

Для построения модели зависимости от времени ПРВ в виде ряда Грама–Шарлье (1.4) для данного сигнала следует принять $\mu_3 = 0$ (асимметрией распределения можно пренебречь) и $\mu_4 = M_4$. Значения M_4 показаны на рисунке 3.9. Для более точного построения ПРВ в области хвостов распределения желательно использовать отрезок ряда Грама–Шарлье, в котором учитывается влияние моментов M_3 – M_6.

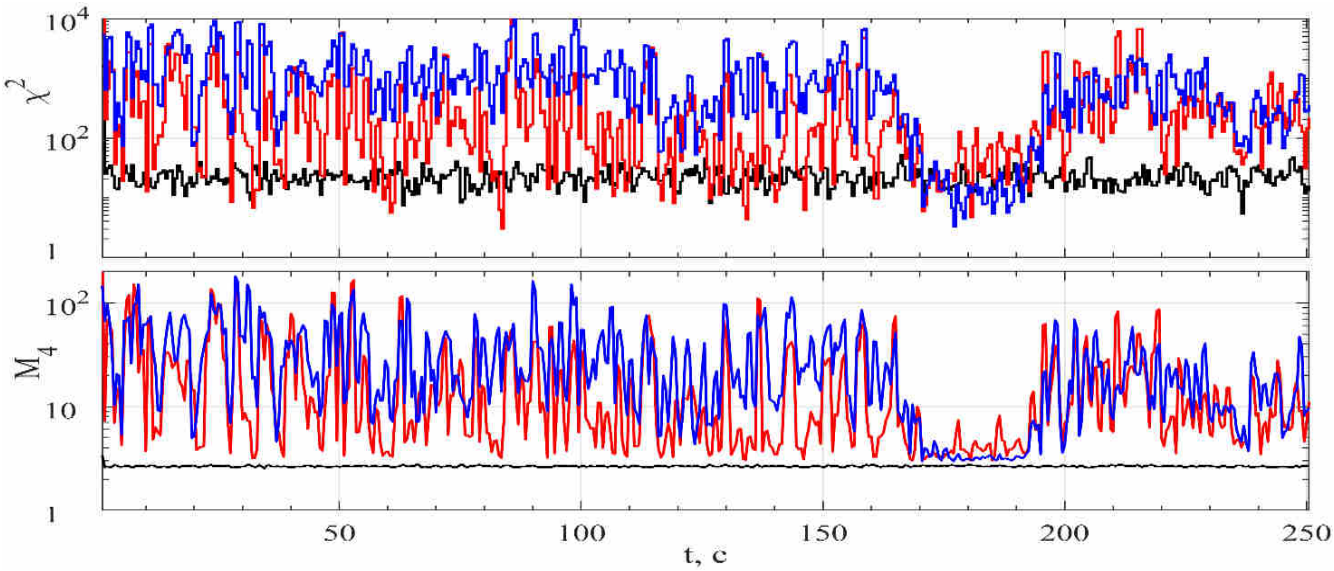


Рисунок 3.9 – Зависимости от времени величин χ^2 и M_4 для сигналов с ПД (синие линии) и ПГД (красные линии). Полоса частот 150–1500 Гц, время накопления 1 с

При этом, как отмечалось ранее, необходимо учитывать возможность появления не имеющих смысла отрицательных значений ПРВ в областях хвостов распределения. В таких случаях нужно учитывать бóльшее число членов ряда Грама–Шарлье [151] или использовать модели в виде суммы распределений [153–158]. Результаты построения модели ПРВ мгновенных значений данного сигнала в виде суммы трех гауссовских распределений рассмотрены в [198].

В большинстве случаев при уменьшении времени накопления и расширении полосы частот отличия эмпирических ПРВ от гауссовского закона возрастают, при увеличении времени накопления до 10 с и более и сужении полосы частот – уменьшаются как для ПД, так и для ПГД, что соответствует положениям теории случайных процессов (нормализация случайных процессов). Если время накопления составляет менее 0.5 с, необходимо учитывать возможность отклонения от нуля моментов M_3 и M_5, вызванные возможной асимметрией ПРВ из-за влияния импульсных помех и кратковременных трендов. Подобные закономерности наблюдаются и на других записях ГА шумов, сделанных в прибрежных акваториях залива Петра Великого.

3.2 Интервалы квазистационарности спектральных характеристик гидроакустических шумов

Под спектральными характеристиками в дальнейшем будем понимать спектральную плотность мощности (СПМ) [10, 11] и различные функции от нее, такие как производные от СПМ по частоте и др., используемые рядом исследователей для анализа нестационарных процессов. При этом основной спектральной характеристикой, через которую выражаются остальные, является СПМ.

Для выявления интервалов квазистационарности ГА шумов, на которых изменениями СПМ, а также, в соответствии с теоремой Винера–Хинчина [10–13], корреляционной функции можно пренебречь, могут быть использованы различные подходы и методы [6–10, 203].

Применительно к подсистемам адаптации к помехам автономных ГА средств, работающих в реальном масштабе времени без участия человека оператора, представляется перспективным в качестве моделей, описывающих зависимость от времени СПМ подводных шумов на интервалах времени порядка десятых долей – единиц секунд использование авторегрессионных–скользящего среднего (АРСС) моделей невысоких порядков, теория и методы построения которых описаны в [115, 132–133]. Достоинством АРСС моделей является простое, физически понятное и удобное для анализа аналитическое выражение для СПМ в виде дробно–рациональных функций (см. далее, формула (3.3)), свойства которых хорошо изучены. Дробно–рациональные функции пригодны для построения наглядных моделей сглаженных СПМ в частотных полосах шириной несколько декад, что важно для практических применений. Несомненным достоинством АРСС моделей является возможность получения более высокой разрешающей способности спектрального анализа, чем при использовании классического подхода, основанного на разложении в ряд Фурье [115]. С помощью АРСС моделей описываются в том числе зависимости вида (1.1) и их обобщения.

К недостаткам АРСС моделей следует отнести бóльшую, чем при разложении в ряд Фурье вычислительную сложность. Тем не менее, в настоящее время для расчета параметров АРСС моделей невысоких (<10) порядков достаточно десятков – сотен миллисекунд работы однопроцессорных вычислительных средств общего применения, что позволяет использовать их в ГА системах реального времени.

В данном разделе описаны результаты использования линейных АРСС моделей для выявления интервалов времени, на которых изменениями усредненной СПМ в области низких частот можно пренебречь (интервалов квазистационарности СПМ и выражаемых через нее спектральных характеристик) [194].

Линейная модель АРСС(M, N) описывается выражением [115, 132, 133]:

$$x(t) = -\sum_{m=1}^{M} a_m x(t - mT) + \sum_{n=0}^{N} b_n u(t - nT), \tag{3.3}$$

где

$x(t)$ – моделируемый сигнал,

$u(t)$ – возбуждающая последовательность, в качестве которой далее использован белый гауссовский шум,

M – порядок составляющей авторегрессии (АР),

N – порядок составляющей скользящего среднего (СС),

$T = 1/f_s$, – период дискретизации,

f_s – частота дискретизации,

a_m и b_n – параметры составляющих АР и СС соответственно.

Спектральная плотность мощности $P_{\text{АРСС}}(f)$ (Вт/Гц) для АРСС модели (3.3) определяется соотношением [115]:

$$P_{\text{АРСС}}(f) = \rho_w T \left| \frac{1 + \sum_{n=1}^{N} b_n \exp(-i2\pi f n T)}{1 + \sum_{m=1}^{M} a_m \exp(-i2\pi f m T)} \right| = \rho_w T \left| \frac{\prod_1^N (f - f_{0n})}{\prod_1^M (f - f_{pm})} \right|, \tag{3.4}$$

где

f_{0n} и f_{pm} – корни (комплексные) полиномов числителя и знаменателя, соответствующие частотам, на которых наблюдаются минимумы (f_{0n}) и максимумы (f_{pm}) СПМ,

ρ_w – мощность моделирующего белого шума,

M и N определяют количество максимумов и минимумов в спектре.

Чем меньше по абсолютной величине мнимые части (комплексных) частот f_{0n} и f_{pm}, тем более «ярко выражены» минимумы и максимумы СПМ. Для «чисто» стационарных случайных процессов параметры a_m и b_n, а следовательно определяемые ими частоты f_{0n} и f_{pm}, а также СПМ (3.3) не зависят от времени. Для нестационарных ГА шумов, имеющих интервалы квазистационарности СПМ, производных от СПМ по частоте, а также других «тонких» спектральных характеристик, удается построить АРСС модели, у которых параметры a_m и b_n зависят от времени, но на интервалах квазистационарности этими зависимостями, а следовательно также зависимостями f_{0n} и f_{pm} от времени в ряде случаев можно пренебречь.

Анализируя зависимость параметров a_m и b_n или частот f_{0n} и f_{pm} от времени, нетрудно выделить интервалы времени, на которых они относительно медленно изменяются или флуктуируют в заданных пределах, например +/– 10%, и рассматривать данные интервалы как интервалы неизменности (квазистационарности) СПМ и соответственно корреляционных функций, обосновывая, таким образом, применение на них развитых в теории стационарных случайных процессов методов обработки сигналов. Использование частот f_{0n} и f_{pm} для анализа

СПМ является более наглядным, но с точки зрения минимизации объема и повышения скорости вычислений предпочтительно анализировать параметры a_m и b_n.

Для обоснованного использования АР, СС и АРСС моделей необходимо выполнение ряда условий. На относительно коротких интервалах времени(~ 0.1 – 1 с и в ряде случаев более), если на них можно пренебречь трендами и отсутствуют относительно резкие изменения уровней анализируемого процесса (которые можно рассматривать как ограничения, накладываемые на производные по времени), такие условия можно считать выполненными [115, 132–134].

Весьма важным является вопрос о выборе порядка АР и СС составляющих АРСС модели, достаточной для выявления интервалов квазистационарности СПМ в указанном выше смысле. Воспользуемся тем, что в декадных интервалах частот усредненные СПМ подводного шума при отсутствии дискретных составляющих имеют вид плавных кривых с максимумами и минимумами, уровни и положения которых на оси частот могут изменяться со временем вследствие погодных условий, движения судов и др. [24, 25, 29, 41–43]. При отсутствии узкополосных составляющих в декадных частотных интервалах ГА шума обычно наблюдается не более 2 – 3 достаточно плавных спектральных максимумов и минимумов. Поэтому для усредненного описания сглаженной СПМ в декадных частотных интервалах или выявления интервалов ее квазистационарности в указанном выше смысле, достаточно использовать модель АРСС(M, N), в которой значения параметров M и N не превышают 5 или 7. Вне этих интервалов получаемые с использованием таких моделей оценки СПМ не всегда будут сопоставимы с результатам спектрального оценивания другими методами.

Необходимо отметить, что при этом решается задача моделирования только зависимости от времени сглаженной спектральной плотности мощности ГА шума, и не ставится задача построения моделей его реализаций или прогноза (с заданной точностью), для которых может потребоваться использовать более высокие порядки составляющих АР и СС.

На рисунке 3.10 показана зависимость от времени параметров АРСС(6, 6) модели рассмотренного в разделе 3.1, рисунок 3.1, фрагмента ГА шума в декадной полосе Δf = 200 – 2000 Гц на интервале 300 – 900 с (приближение и проход судна) при времени накопления 1 с.

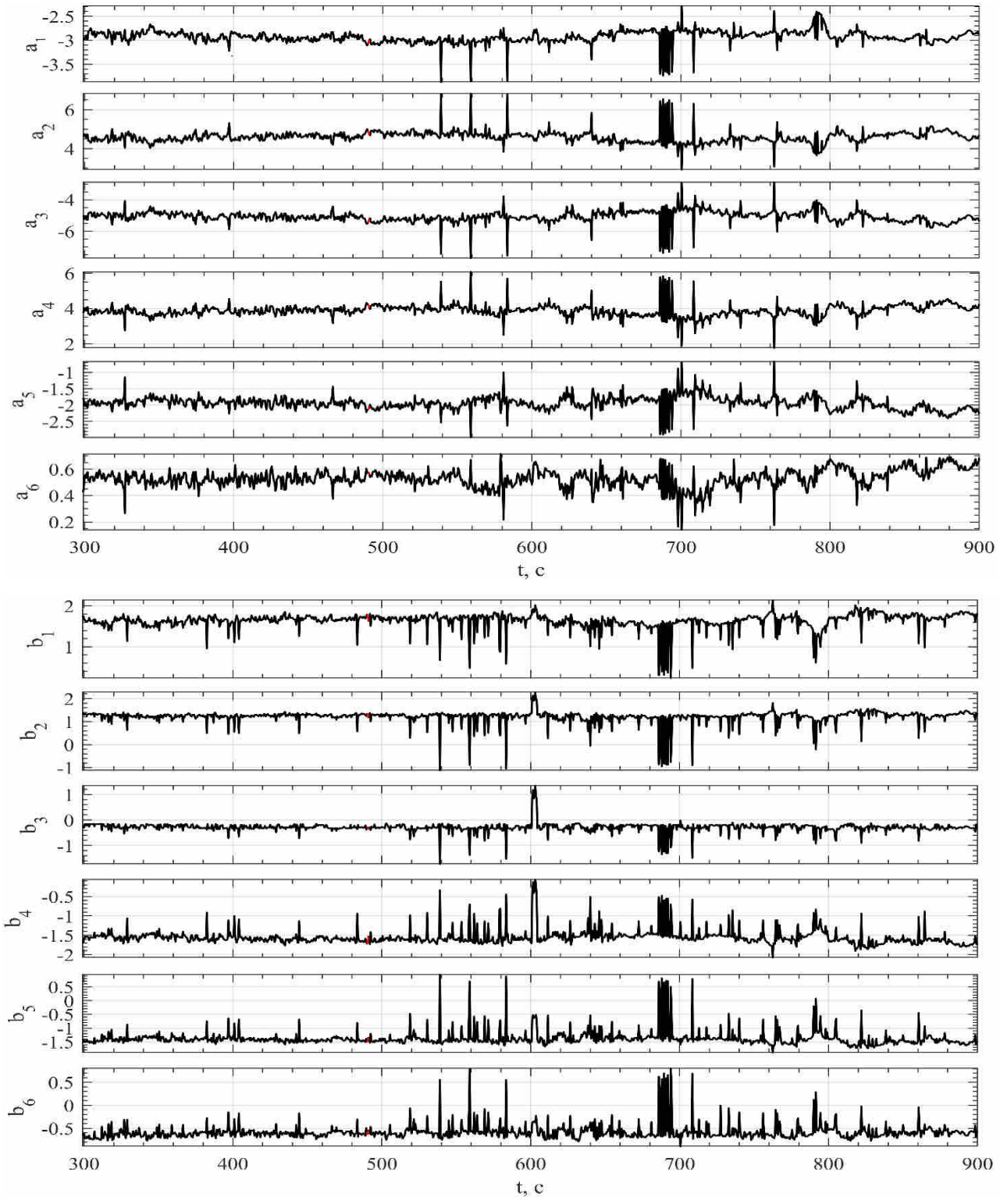


Рисунок 3.10 – Зависимость от времени параметров модели АРСС(6, 6) ГА шума, рисунок 3.1, на интервале 300 – 900 с в полосе Δf = 200 – 2000 Гц при времени накопления 1 с

На рисунке 3.11 показана зависимость от времени параметров АРСС(6, 6) модели этого фрагмента ГА шума в более широкой полосе частот Δf = 200 – 3000 Гц, также на интервале 300 – 900 с при времени накопления 1 с.

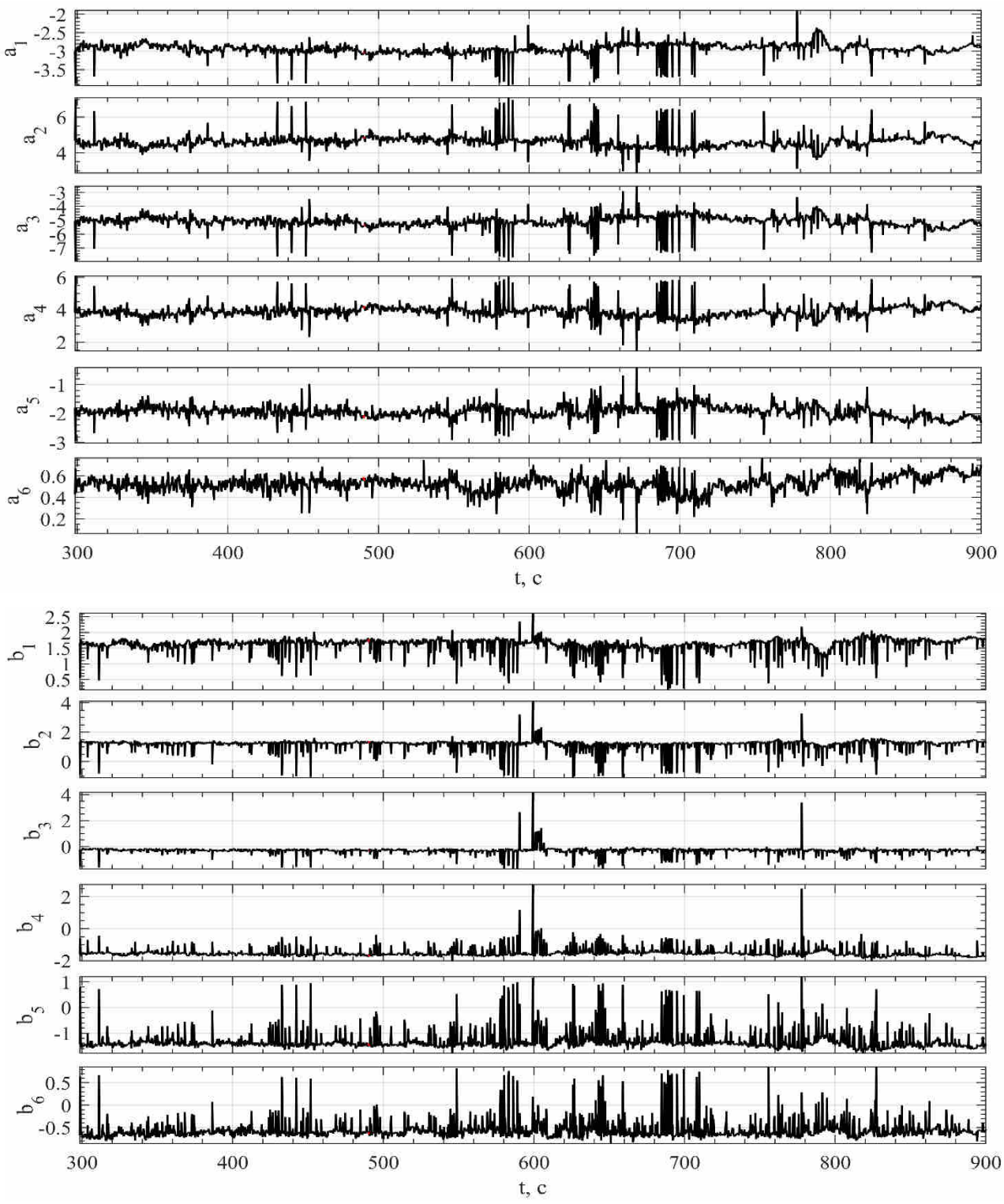


Рисунок 3.11 – Зависимость от времени параметров модели АРСС(6, 6) ГА шума, рисунок 3.1, в полосе Δf = 200 – 3000 Гц на интервале 300 – 900 с при времени накопления 1 с.

На рисунке 3.12 показана зависимость от времени параметров АРСС(6, 6) модели этого фрагмента ГА шума в полосе частот Δf = 200 – 3000 Гц на интервале 400 – 600 с (~ 1100 – 900 м до приближающегося судна) при времени накопления 1 с.

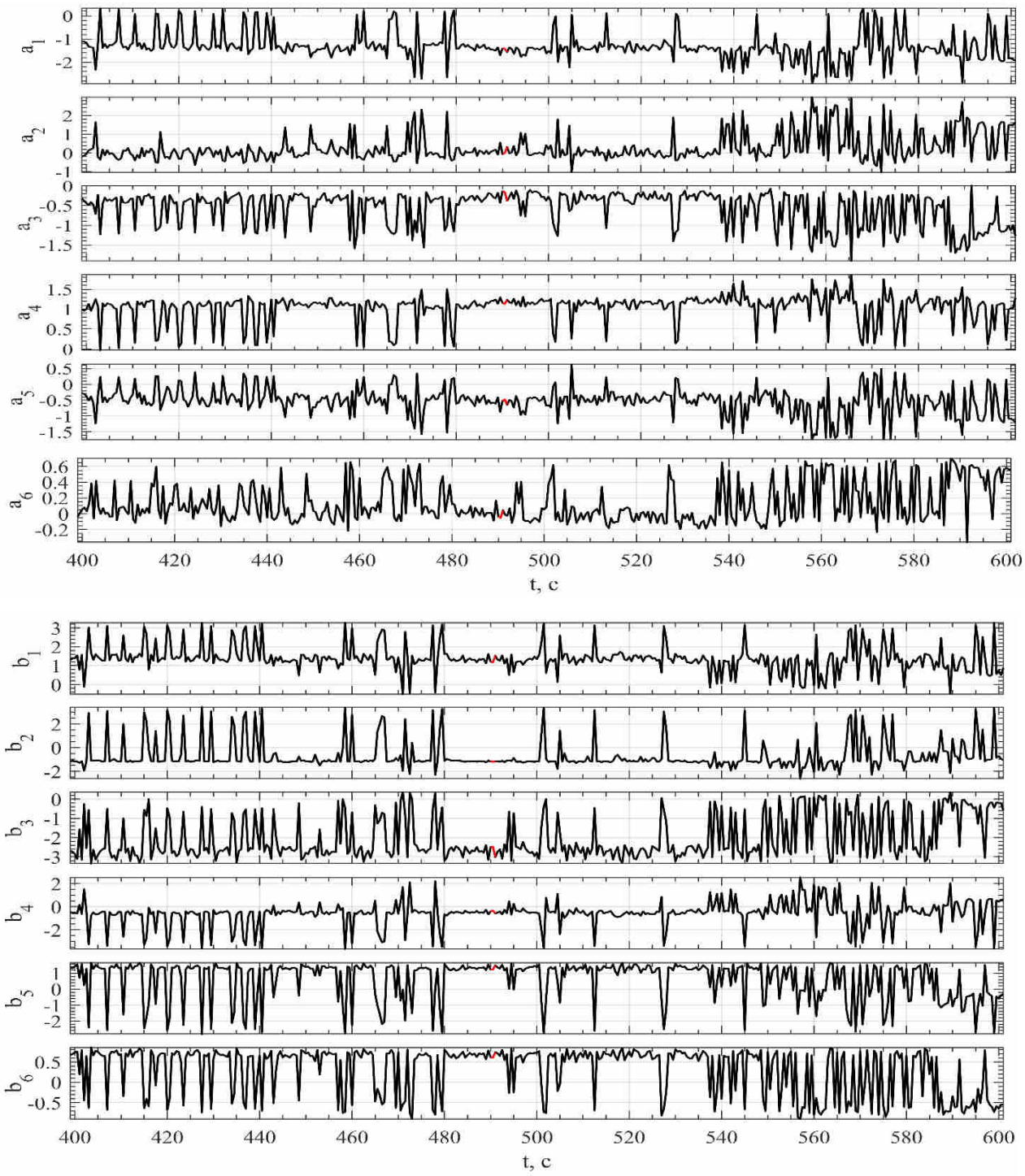


Рисунок 3.12 – Зависимость от времени параметров модели АРСС(6, 6) ГА шума, рисунок 3.1, на интервале 400 – 600 с в полосе Δf = 200 – 3000 Гц при времени накопления 1 с

На рисунках 3.10, 3.11 и особенно на рисунке 3.12 явно видны области квазистационарности параметров a_m и b_n (и соответствующих им минимумам и максимумам СПМ) (3.4) на интервалах 480 – 490 с, 515 – 518 с и др., более коротких. Кроме того, в данном случае и отклонения от квазистационарных значений параметров a_m и b_n имеют вид выбросов, максимальные уровни многих из них также составляют квазистационарные последовательности,

но более короткого временно́го масштаба (порядка 0.1–1 с), см. также спектрограмму на рисунке 3.1.

Из сравнения зависимостей от времени статистических характеристик, показанных на рисунках 3.5–3.7 и параметров модели АРСС, показанных на рисунках 3.10 – 3.12 можно заметить, что интервалы квазистационарности спектральных и статистических характеристик совпадают не всегда.

Так как для решения задач прикладной гидроакустики, связанных с обнаружением и приемом сигналов достаточно, чтобы длительности интервалов квазистационарности были по крайней мере не меньше, чем длительности данных сигналов, которые составляют, в области низких частот, десятые доли – единицы секунд [2], выявление в реальном времени и использование интервалов квазистационарности спектральных и статистических характеристик даже такой, относительно короткой длительности открывает возможности улучшения параметров ГА средств за счет совершенствования их адаптации к изменениям подводного шума. Применительно к задачам акустической томографии мелководных акваторий могут представлять интерес не только интервалы квазистационарности и нестационарности, но и причины их появления.

Области квазистационарности параметров АРСС моделей наблюдаются и в других частотных полосах, а также и на других записях ГА шумов. Типичными являются случаи, когда длительности интервалов квазистационарности не превышают 1 – 2 с, в большинстве случаев – составляют ~ 0.5 с. В этих областях удается получать более стабильные результаты обнаружения, измерения и классификации ГА сигналов. При увеличении времени накопления и сужении полосы частот размеры областей квазистационарности параметров АРСС моделей увеличиваются, см. рисунки 3.11 и 3.12. Аналогичные выводы справедливы и для ГА шумов, воспринимаемых ПГД.

3.3 Спектральные характеристики огибающих гидроакустических шумов

В п. 3.3, применительно к задачам исследования характеристик шумов дыхания легководолазов, рассматриваемых в главе 4, а также обнаружения и классификации движущихся источников ГА шума описаны результаты спектрального анализа огибающих подводных шумов, зарегистрированных в прибрежной мелководной акватории с помощью КП при приближении и удалении моторной лодки [191, 192, 195–198]. Глубина места в точке установки КП – 6 м, дно – песок, камни, наклон дна при удалении от берега не более 15º, расстояние до уреза воды 100 м. Район проведения исследований характеризуется повышенным уровнем подводного шума антропогенного происхождения и наличием широкополосных импульсных помех, создаваемых

«щелкающими» морскими обитателями (морские ракообразные и др.), помеховые импульсы которых образуют зависящую от погодных условий и времени суток нестационарную случайную последовательность. Длительности этих импульсов в большинстве случаев не превышают 0.1 с, они могут накладываться друг на друга, их амплитуды могут на два порядка и более превышают среднеквадратическое значение ГА шумового фона. В качестве приемного устройства использовался установленный вблизи дна на упругих растяжках КП собственной разработки [198], состоящий из двухкомпонентного ПГД инерционного типа (см. п. 2.1) с двумя ортогонально ориентированными в горизонтальной плоскости чувствительными элементами (каналы *x* и *y*) и расположенного рядом с ним ненаправленного приемника звукового давления (ПД, канал *p*). Характеристики данного КП близки к описанным в п. 2.1, но в нем использовались акселерометры собственной разработки. КП был ориентирован в точке установки так, чтобы направления максимальной чувствительности каналов *x* и *y* составляли углы 45º слева и справа к нормали к кромке прибоя. Во время регистрации сигналов на удалениях менее 2 миль судов и других водоизмещающих объектов не было видно. В районе исследований наблюдается придонное течение со скоростью порядка 1 см/с, для защиты от создаваемых им помех КП был помещен в экран из ворсистой ткани, натянутый на каркас Ø 0.3x0.3 м. Для дискретизации сигналов использовался 16-разрядный АЦП, частота дискретизации f_s составляла 10 кГц.

На рисунках 3.13 и 3.14 показаны осциллограммы и спектрограммы сигналов $v_x(t)$, $v_y(t)$ и $p(t)$, поступавших с ПД и чувствительных элементов каналов *x* и *y* ПГД в полосе частот 4–4000 Гц во время эксперимента по исследованию шумов моторных лодок [192, 195], масштабы уровней условные. Разрешающая способность по частоте на спектрограммах 1 Гц, использовано окно Ханна. На осциллограммах видны создаваемые «щелкающими» морскими обитателями импульсные помехи. В данном эксперименте моторная лодка с корпусом из алюминиевого сплава и подвесным мотором приблизилась к точке установки КП со стороны глубокой воды по прямой, под углом ~ 45º к кромке прибоя, в направлении, близком к направлению максимума характеристики направленности канала *x*. На расстоянии порядка 300 м от берега лодка повернула на 45º и двигаясь параллельно берегу удалилась. Наименьшее расстояние между КП и моторной лодкой наблюдалось в 175 с, оно составляло ~ 150 м. На спектрограммах сигналов $v_x(t)$ и $v_y(t)$ заметно различие времен регистрации максимумов шумов моторной лодки, вызванное ортогональной ориентацией характеристик направленности чувствительных элементов каналов *x* и *y* (моторная лодка «проходит» сначала максимум характеристики направленности канала *x*, а затем *y*.

Выполненные ранее исследования акустических характеристик района работ и ГА шумов показали, что в нем шумовое поле нельзя считать однородным и изотропным, наблюдаются частотно–зависимые переотражения от поверхности и дна, модовая структура и распространение

сигналов в донном грунте, а соотношения между когерентными и диффузными составляющими звукового поля не остаются постоянными, что затрудняет физическую интерпретацию полученных данных [195] и объясняет незначительность различий спектрограмм сигналов $v_x(t)$ и $v_y(t)$.

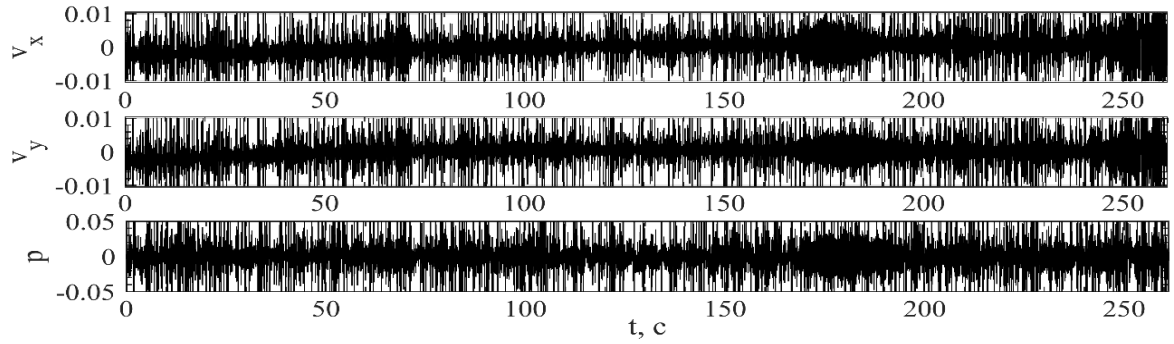


Рисунок 3.13 – Осциллограммы сигналов $v_x(t)$, $v_y(t)$ и $p(t)$ (сверху вниз)

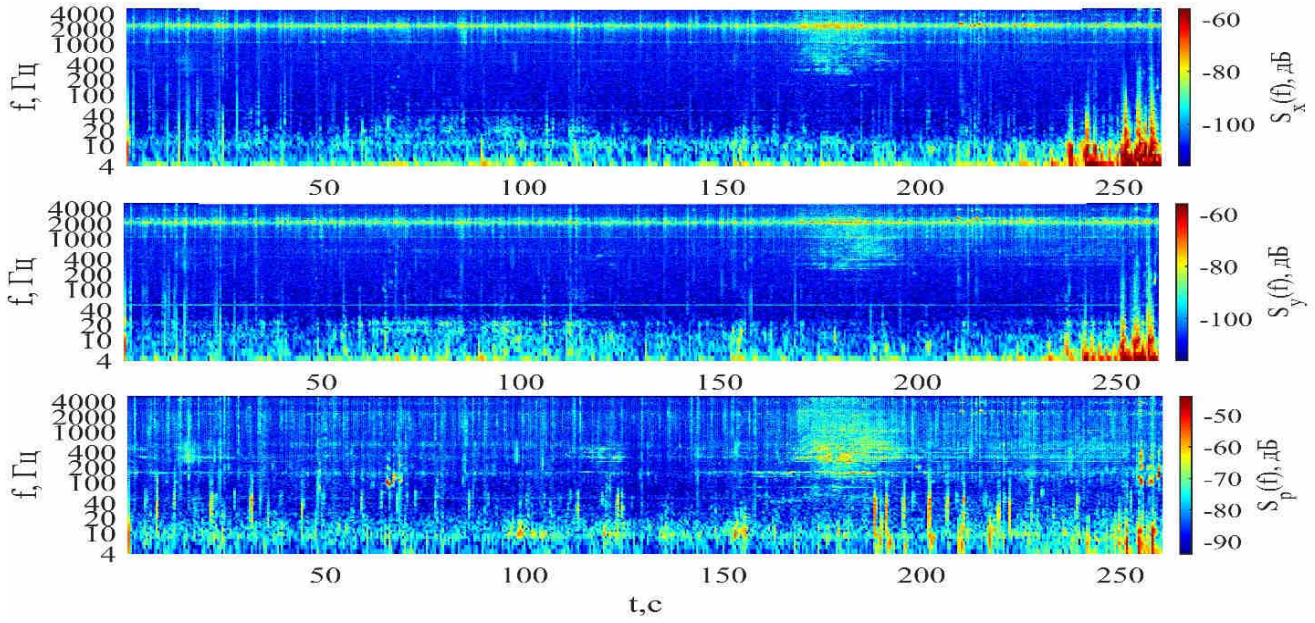


Рисунок 3.14 – Спектрограммы сигналов $v_x(t)$, $v_y(t)$ и $p(t)$ (сверху вниз)

Для построения огибающих широкополосных сигналов, таких как $v_x(t)$ $v_y(t)$ и $p(t)$, могут быть использованы различные подходы, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [94, 115, 135]. Как отмечалось ранее, формальное применение универсальных алгоритмов формирования огибающих, таких как преобразование Гильберта [94, 115] может привести, особенно при наличии интенсивных импульсных помех и выбросов различного происхождения, как на рисунке 3.13, к привнесению не относящихся к изучаемому явлению артефактов.

Здесь, как и в [51–57], для формирования огибающих сигналов $v_x(t)$ $v_y(t)$ и $p(t)$ использованы программно реализованные энергетические приемники [20, 22] (последовательно соединенные

полосовой фильтр, квадратичный детектор, интегратор). В качестве интеграторов использованы фильтры скользящего среднего. Упрощенная структурная схема энергетического приемника показана на рисунке 3.15. В качестве огибающей сигнала $p(t)$ использован сигнал $E_p(t)$ на выходе интегратора:

$$E_p(t) = \int_{t-T_{int}}^{t} (s_{p,\Delta f}(\tau))^2 \, d\tau, \qquad (3.5)$$

где

$s_{p,\Delta f}(\tau)$– сигнал на выходе полосового фильтра канала p с полосой пропускания Δf,

T_{int} – время интегрирования в энергетическом приемнике.

Выражение (3.5) можно рассматривать как зависимость от времени скользящего среднего квадрата сигнала на последовательных интервалах длительностью T_{int}. Огибающие сигналов $v_x(t)$ и $v_y(t)$ определяются аналогично.

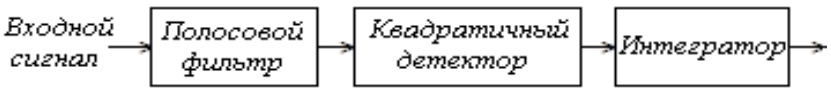


Рисунок 3.15 – Упрощенная структурная схема энергетического приемника

Для оценивания спектральных уровней огибающих использовано не быстрое преобразование Фурье, а периодограммы $S_{env}(f,t)$ [203] процессов на выходах энергетических приемников:

$$S_{env}(f,t) = 10lg\left(\left[\int_{t-T}^{t} E(\theta)w(\theta)\cos(2\pi f\theta)\,d\theta\right]^2 + \left[\int_{t-T}^{t} E(\theta)w(\theta)\sin(2\pi f\theta)\,d\theta\right]^2\right) \qquad (3.6)$$

где

$E(\theta)$ – процесс на выходе энергетического приемника канала x, y или p,

$w(\theta)$ – оконная функция Ханна,

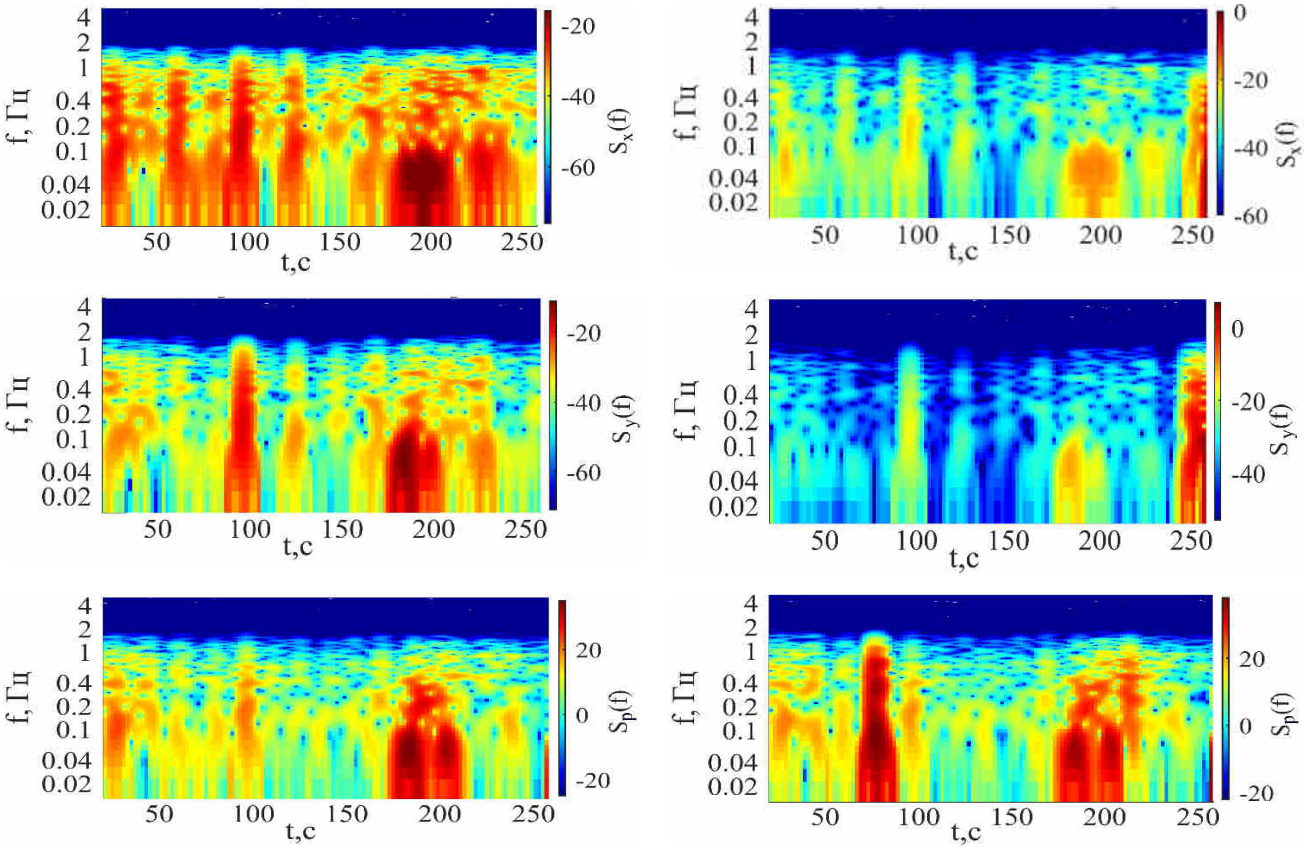
T – время интегрирования при оценивании спектральных уровней.

Подобные (3.6) выражения используются также в задачах обнаружения сигналов длительностью T с неизвестными амплитудой и начальной фазой [17, 20–23].

На рисунке 3.16 показаны спектрограммы огибающих сигналов $v_x(t)$, $v_y(t)$ и $p(t)$, в полосах частот 250–1800 Гц и 20–1800 Гц, построенные с использованием соотношений (3.5) и (3.6).

Масштабы уровней условные, использовано линейное отображение спектральных уровней в цвета RGB–палитры. Интегралы в (3.5) и (3.6) вычислялись методом трапеций. В (3.5) время интегрирования T_{int} = 0.5 с, время интегрирования в (3.6), применительно к задачам исследования шумов легководолазов, см. далее, п. 4.5, при оценивании спектральных уровней T = 20 с, что составляет один полный период частоты 0.05 Гц, поэтому результаты для частот менее 0.05 Гц

на рисунках 3.16 и 3.17, см. далее, следует рассматривать как ориентировочные. Шаг перестройки частоты составлял 0.01 Гц, сдвиг по времени при построении спектрограмм – 2 с.



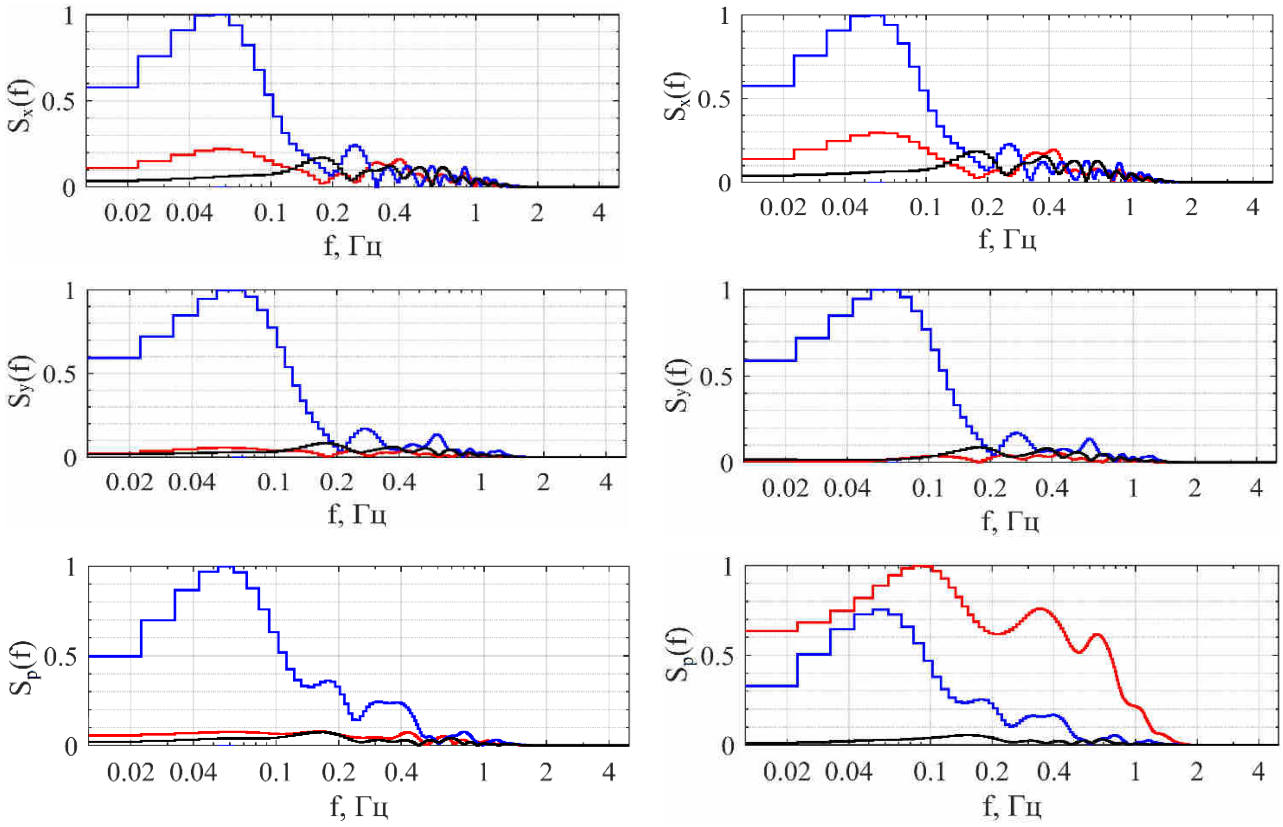
а) Δf = 250–1800 Гц б) Δf = 20–1800 Гц

Рисунок 3.16 – Спектрограммы огибающих сигналов $v_x(t)$, $v_y(t)$ и $p(t)$ (сверху вниз): а) Δf = 250–1800 Гц, б) Δf = 20–1800 Гц. Использовано линейное отображение спектральных уровней в цвета RGB–палитры

Полосы частот, в которых выполнялось формирование огибающих: 250–1800 Гц (область, где наклон АЧХ чувствительности использованного ПГД составляет 6 дБ/октава) [191], и 20 – 1800 Гц (расширенная в область низких частот). Спектральные составляющие, образующие вально–лопастные звукоряды [51–55] не видны, они находятся на более высоких частотах и подавляются на 20 дБ и более при выбранном значении времен интегрирования в (3.5).

Представляется важным отметить визуальную похожесть участков 100–180 с на спектрограммах огибающих сигнала $p(t)$ и спектрограмм огибающих шумов дыхания легководолаза, см. п. 4.5, рисунки 4.24 и 4.26 (наличие флуктуирующего по частоте в течении 40 с спектрального максимума в области 0.1–0.2 Гц). Это может послужить причиной принятия ошибочного решения об обнаружении шумов дыхания легководолаза.

На рисунке 3.17 линиями красного, черного и синего цвета показаны нормированные относительно максимального значения зависимости от частоты спектральных уровней огибающих, оцененных на трех 20 с интервалах времени: 56–76 с, 130–150 с, 164–184 с.



а) Δf = 250–1800 Гц б) Δf = 20–1800 Гц

Рисунок 3.17 – Сверху вниз: нормированные относительно максимального значения спектральные уровни огибающих сигналов $v_x(t)$, $v_y(t)$ и $p(t)$: а) Δf = 250–1800 Гц, б) Δf = 20–1800 Гц. Линии красного, черного и синего цвета соответствуют интервалам 56–76 с, 130–150 с, 164–184 с

На интервале 56–76 с моторная лодка находилась на расстоянии порядка 300 м от точки установки КП, на осциллограммах и спектрограммах, рисунки 3.13 и 3.14, ее «не видно».

На спектрограммах огибающих сигнала $v_y(t)$ в обеих указанных на рисунке 3.16 полосах частот, а также на спектрограмме огибающей сигнала $p(t)$ в полосе 250–1800 Гц на этом интервале нет «ничего особенного», но на спектрограммах огибающих сигналов $v_x(t)$ и $p(t)$, особенно в полосе частот 20–1800 Гц наблюдается общий подъем спектральных уровней. Детальный анализ спектрограмм, показанных на рисунке 3.16, позволяет сделать вывод, что данный подъем спектральных уровней обусловлен импульсными сигналами длительностью порядка единиц секунд на частотах вблизи 100Гц, пришедших с направления, близкого к направлению максимальной чувствительности канала x. Предположительное происхождение

данных импульсов – кратковременные включения/выключения создающего вибрации силового оборудования на береговых предприятиях или удаленных судах.

Интервал 130–150 с характерен тем, что на нем наблюдаются минимальные для данного эксперимента спектральные уровни сигналов $v_x(t)$, $v_y(t)$ и $p(t)$.

На интервале 164–184 с моторная лодка находилась на минимальном расстоянии от КП. В полосе частот 250–1800 Гц в это время на всех спектрограммах наблюдаются пологие экстремумы в области 0.04–0.2 Гц, продолжающиеся до 200 с и более, т. е. и после прохода моторной лодки. Это вызвано, предположительно, модуляцией огибающей подводного шумового фона затухающими поверхностными волнами, наблюдавшимися во время и после прохода моторной лодки [195–198].

Полученные результаты позволяют оценить усредненные пределы, в которых могут изменяться со временем спектральные уровни огибающих звукового давления и компонент градиента звукового давления ГА шумового фона при отсутствии вблизи крупных судов, плавучих пирсов, плавучих доков и др. водоизмещающих объектов, создающих модуляцию огибающей за счет качки на волнении [54] и использовать их в данной акватории в качестве пороговых (превышение которых следует рассматривать как значимые события, подлежащие детальному анализу) в алгоритмах обнаружения и классификации источников шумоизлучения по характеристикам огибающих подводных шумов (последетекторная обработка сигналов, алгоритмы DEMON и др.) [56, 57].

Аналогичные результаты исследования огибающих наблюдались и в других экспериментах при отсутствии на удалениях менее 2 миль движущихся судов.

Полученные в результате описанного эксперимента данные о динамике спектральных характеристик огибающих позволяют сделать следующие выводы.

1. В районе выполнения исследований, в различных частотных полосах, спектрограммы огибающих звукового давления, а также горизонтальных компонент градиента звукового давления на частотах свыше 0.02 Гц как при отсутствии, так и при наличии шумоизлучения движущейся моторной лодки существенно различаются между собой, влияние на огибающие микросейсмического фона явно не наблюдается.

Однозначно указать область частот, наиболее предпочтительную для одновременного мониторинга указанных огибающих не представляется возможным, необходимо продолжать исследования.

2. В мелководных прибрежных акваториях, при отсутствии на удалениях менее 2-х миль водоизмещающих объектов, подверженных качке на волнении, таких как суда, плавучие пирсы, плавучие доки и др., на спектрограммах огибающих ГА шумов, воспринимаемых ПД и ПГД, в разных частотных полосах время от времени наблюдаются области подъема смежных

спектральных уровней, имеющие вид относительно узкополосных и относительно широкополосных «шумовых дорожек». Длительности таких областей могут составлять десятки секунд и более.

При использовании для обнаружения подверженных качке на волнении водоизмещающих объектов с помощью методов, основанных на спектральном анализе огибающих (алгоритмы DEMON и др. [51–57]), наличие и особенности временно́й изменчивости этих «шумовых дорожек» могут быть ошибочно классифицированы как признаки присутствия таких объектов. Появление данных «шумовых дорожек», не связанное с наличием подверженных качке объектов, обусловлено, предположительно, гидрофизическими процессами, такими как колебания водных масс, для изучения которых необходимо выполнять дополнительные исследования.

3. Огибающим векторных компонент ГА шумов присуща явная зависимость от направления в горизонтальной плоскости и определенная инерционность: флуктуации огибающих, обусловленные поверхностным волнением, вызванным проходящими плавсредствами, наблюдаются в течении нескольких минут, а иногда и более после их удаления, когда созданные ими возмущения водной поверхности уже не заметны. Это может быть использовано на практике как для решения задач обнаружения и классификации плавсредств (по размерам, скорости движения) и др.), так и для построения или уточнения моделей, описывающих колебания водных масс мелководных акваторий.

4. Результаты длительных наблюдения временно́й изменчивости огибающих звукового давления и компонент его градиента ГА шума в мелководных акваториях подчеркивают необходимость углубленного изучения физики колебаний водных масс в таких акваториях (с учетом их геометрии, рельефа дна и др.).

3.4 Выводы по третьей главе

1. В низкочастотных ГА шумах мелководных прибрежных акваторий через неравномерно следующие интервалы времени порядка десятых долей – единиц секунд и более встречаются интервалы, на которых при времени наблюдения порядка 1 с и менее допустимо в качестве модели ПРВ мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента использовать гауссовское распределение вероятностей (т.н. интервалы гауссовости). Длительности интервалов гауссовости составляют единицы–десятки секунд. Эмпирические ПРВ последовательных мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента, оцениваемые на произвольно выбранных интервалах длительностью порядка одной секунды и менее, в общем случае не соответствуют гауссовскому закону распределения вероятностей. Недооценка этого может послужить причиной увеличения частоты ошибочных решений задач обнаружения, измерения параметров и классификации ГА сигналов, шумов, и источников подводного шумоизлучения особенно у автономных ГА систем, работающих без участия человека–оператора. При наличии «сильных» импульсных помех ПРВ мгновенных значений компонент градиента звукового давления имеют меньшие, по сравнению с звуковым давлением, отклонения от гауссовского закона распределения, что подтверждает целесообразность и перспективности использования КП в таких помеховых ситуациях.

2. Вне интервалов гауссовости ПРВ мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента ГА шумов мелководных прибрежных акваторий в большинстве случаев отличаются от гауссовского распределения повышенными значениями моментов M_4 и M_6. Это вызвано как трендами, обусловленными гидрофизическими явлениями, так и нерегулярно следующими импульсами различного происхождения, образующими перекрывающиеся во времени случайные потоки. В качестве модели ПРВ вне интервалов гауссовости допустимо использовать первые три члена ряда Грама–Шарлье типа А, учитывающие влияние центральных моментов распределения M_3 и M_4. Для более точного отображения ПРВ в области хвостов распределения желательно использовать первые пять членов ряда Грама–Шарлье типа А, учитывающие влияние центральных моментов распределения $M_3 – M_6$.

3. Целесообразность использования членов ряда Грама–Шарлье учитывающих влияние моментов более высоких порядков представляется спорной ввиду сложности, на практике, получения для них надежных оценок вследствие эффекта размножения ошибок. Если численные значения моментов M_4 и M_6 превышают (ориентировочно) 10 и 40 соответственно, модель в виде ряда Грама–Шарлье (1.4) может оказаться неприменимой из-за появления участков, на которых в результате вычислений по формуле (1.4) получаются отрицательные значения ПРВ, что не имеет физического смысла. В этом случае более предпочтительным является использование

моделей ПРВ в виде логнормального распределения [31], смеси гауссовских распределений (1.5) [157, 158] или моделей, предложенных Д. Миддлтоном [154–156].

4. Для выявления интервалов гауссовости с использованием критерия Хи-квадрат К. Пирсона, а также построения моделей ПРВ в виде отрезка ряда Грама–Шарлье или смеси гауссовских распределений достаточно не более одной секунды работы однопроцессорных вычислительных средств общего назначения. Поэтому интервалы гауссовости можно обнаруживать и использовать в режиме реального масштаба времени. На интервалах гауссовости зачастую достижимы более высокие и стабильные результаты обнаружения, измерения параметров и классификации источников шумоизлучения и ГА сигналов, поэтому выявление и использование в реальном масштабе времени этих интервалов открывает возможность улучшения характеристик ГА систем, работающих в прибрежных мелководных акваториях, в том числе в автономном, без участия человека–оператора режиме. Выявление причин отклонения ПРВ мгновенных значений ГА шумов от гауссовского закона распределения вероятностей способствует углублению понимания динамики гидрофизических процессов, таких как турбулентность и внутренние волны, в интересах оперативной океанографии и акустической томографии мелкого моря.

5. Как для ПД, так и для ПГД, при увеличении времени наблюдения и сужении полосы частот длительности интервалов гауссовости возрастают, и они встречаются чаще; при уменьшении времени наблюдения и расширении полосы частот длительности интервалов гауссовости уменьшаются, и они встречаются реже, что соответствует положениям теории случайных процессов. Если время накопления составляет менее 0.1 с, необходимо учитывать возможные отклонения от нуля моментов M_3 и M_5, вызванные асимметрией ПРВ из-за влияния трендов различных временны́х масштабов и импульсных помех.

6. В мелководных прибрежных акваториях с интенсивным судоходством для выявления и оценивания длительности интервалов квазистационарности и нестационарности усредненных спектральных характеристик ГА шумов в декадных частотных полосах достаточно применения моделей АРСС, у которых порядок составляющих авторегрессии и скользящего среднего не превышает семи.

7. В мелководных прибрежных акваториях на спектрограммах огибающих звукового давления и компонент его градиента, на частотах ниже 2 Гц, наблюдаются области подъема смежных спектральных уровней (сверхнизкочастотные флуктуации огибающей), длительности которых составляют десятки секунд и более. Они могут быть ошибочно классифицированы, особенно автономными ГА системами, как признаки наличия шумов дыхания легководолазов или водоизмещающих объектов, подверженных качке на волнении. Длительные наблюдения показывают, что появление данных областей не обязательно связано с наличием таких объектов,

движением плавсредств на удалениях менее 2-х миль или изменением поверхностного волнения и обусловлено, предположительно, гидрофизическими процессами. В дальнейшем, для повышения разрешающей способности по частоте при анализе огибающих на относительно коротких (менее10 с) интервалах времени представляется перспективным применение подходов, основанных на использовании параметрических моделей случайных процессов, таких как АРСС модели.

8. В мелководных акваториях огибающим векторных компонент ГА шума присущи направленность и инерционность. Флуктуации огибающих ГА шумов, вызванные рассеянием на взволнованной водной поверхности, а также колебаниями водных масс во время прохождении плавсредств, наблюдаются и после прекращения их движения или удаления. Это может быть использовано на практике как для решения задач обнаружения и классификации плавсредств (по размерам, скорости движения, частоте вращения гребных винтов и т.д.), так и для построения или уточнения моделей, описывающих колебания водных масс мелководных акваторий (с учетом их формы, состояния водной поверхности, рельефа дна и др.).

9. Описанные в данной главе результаты исследования спектральных и статистических характеристик, а также огибающих сигналов с ПД и ПГД применимы и в других мелководных акваториях в качестве ориентировочных.

Глава 4
Спектральные и статистические характеристики шумов легководолазов

В подводных работах, выполняемых легководолазами в мелководных, с глубинами менее 30 м прибрежных морских акваториях, широко используются дыхательные аппараты открытого цикла – акваланги (aqualungs), а также, на глубинах до 10–20 м – более компактные дыхательные аппараты замкнутого цикла – ребризеры (rebreathers). Известно, что во время нахождения под водой чувствительность легководолазов к изменениям своего самочувствия притупляется. Недостаточный контроль изменений самочувствия, функционального и психоэмоционального состояния влияет на качество выполняемых работ под водой, а также может стать причиной заболеваний, травм, или даже гибели легководолаза [4, 5]. Поэтому дистанционный, в реальном времени, мониторинг физических качеств (сила, ловкость и т.д.), функционального и психоэмоционального состояния находящихся под водой легководолазов является очень важным при выполнении ими работ, во время обучения, тренировок, спортивных состязаний, а также в целях профилактики профессиональных заболеваний и несчастных случаев.

ГА шумы, обусловленные дыханием, движением и деятельностью легководолазов под водой могут использоваться как для осуществления дистанционного контроля и объективной оценки состояния их здоровья [5, 204–222], так и для наблюдения за перемещениями и определения местоположения под водой [223–228]. Это представляется актуальным для обеспечения безопасности подводного спорта и выполнения легководолазами работ под водой, а также для предотвращения проникновения посторонних легководолазов в охраняемые акватории [2, 62–67]. В работах [205–208, 211, 221] описаны результаты исследования спектральных характеристик звукового давления шумов легководолазов с дыхательными аппаратами различных типов. В [215, 216, 221] приведены результаты исследования спектральных характеристик звукового давления шумов легководолаза с ребризером FROGS (США) [83], в котором применены специальные технические решения для уменьшения его шумоизлучения. Шумы легководолазов с дыхательными аппаратами различных типов отличаются как интенсивностью, так и областями частот, в которых сосредоточенна наибольшая часть излучаемой ими звуковой энергии [205, 206, 208]. Характеристики шумов, создаваемых даже одним и тем же дыхательным аппаратом при использовании в идентичных условиях разными легководолазами, могут существенно отличаться, что требует индивидуального подхода к их наблюдению и использованию статистических оценок.

В данной главе описаны результаты экспериментального исследования спектральных и статистических характеристик звукового давления ГА шумов, излучаемых легководолазом с

дыхательным аппаратом открытого цикла и шумов, излучаемых легководолазом с дыхательным аппаратом замкнутого цикла в прибрежных мелководных акваториях залива Петра Великого Японского моря на фоне шумов природного и техногенного происхождения и импульсных помех, создаваемых щелкающими морскими обитателями.

Характеристики ГА шумов акваторий, в которых выполнялись описанные в данной главе экспериментальные исследования, близки к рассмотренным в главе 3. Во время выполнения экспериментальных исследований легководолазами с дыхательными аппаратами открытого цикла для дыхания использовался воздух.

Излучение ГА шумов (шумоизлучение) легководолаза вызвано рядом одновременно действующих физических эффектов, имеющих различные пространственные, временные и энергетические масштабы [61, 63]. Модели, детально описывающей механизм шумоизлучения легководолазов, до настоящего времени не разработано.

Предполагается, что в качестве достаточно общей модели, пригодной для описания наиболее важных для прикладной гидроакустики спектральных и статистических характеристик шумов легководолаза, допустимо использовать нестационарный случайный процесс, в реализациях которого присутствуют квазистационарные и квазиэргодические, в рамках корреляционной теории, интервалы длительностью до нескольких секунд, соответствующие фрагментам фаз вдоха, выдоха и задержки дыхания. В данной главе на этих интервалах в качестве методов исследования используются, как и в главе 3, методы корреляционной теории стационарных эргодических случайных процессов [10–12, 94–96], статистическое усреднение заменяется усреднением по времени.

Наличие, рельеф и физические свойства отражающих и рассеивающих границ – водной поверхности и морского дна различных акваторий приводят к отличиям характеристик шумов легководолазов, регистрируемых в тренировочных бассейнах, мелководных акваториях с илистым, песчаным или каменистым дном, вблизи гидротехнических сооружений, водоизмещающих объектов и т.д. от условий свободного поля. Это затрудняет сравнение опубликованных экспериментальных данных и их использование для построения и уточнения моделей, описывающих зависимости спектральных и статистических характеристик излучаемых легководолазом шумов от расстояния в реальных морских условиях. Вблизи берега, даже на расстояниях порядка 100 м от уреза воды необходимо учитывать также неоднородность водной среды, повышенную концентрацию в ней пузырьков воздуха и влияние зоны прибоя.

4.1 Особенности процесса шумоизлучения легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла

В состав дыхательного аппарата открытого цикла (акваланга) входят один или несколько металлических баллонов с дыхательной смесью (для глубин до 10 м – «подготовленного» воздуха) под давлением до 30 МПа (~300 атм.), редуктора высокого давления, понижающего давление поступающего из баллона или баллонов дыхательной смеси, дыхательного (легочного) автомата, предназначенного для точного регулирования, в соответствии с глубиной погружения, давления дыхательной смеси и ее подачи при вдохе, а также выпуска в воду при выдохе и другие технические элементы [5].

В дальнейшем будем считать, что при использовании в качестве дыхательной смеси воздуха шумоизлучение легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла обусловлено в основном следующими факторами [204–209]:

1. колебаниями конструктивных элементов редуктора высокого давления во время вдохов в диапазоне частот от 10 Гц до 150 – 200 кГц;

2. колебаниями конструктивных элементов редуктора низкого давления дыхательного автомата во время вдохов и выдохов в диапазоне частот от 10 Гц до 4 кГц;

3. колебаниями выходящих из дыхательного автомата в воду пузырей выдыхаемого легководолазом воздуха в диапазоне частот от 10 Гц до 4 кГц;

4. колебаниями поднимающихся к поверхности воды и расширяющихся при этом пузырей выдыхаемого воздуха, их слипанием и дроблением при подъеме, а также лопанием на поверхности воды в диапазоне частот от 10 Гц до 4 кГц;

5. движениями ласт легководолаза.

Для описания характеристик шумоизлучения легководолаза воспользуемся нижеперечисленными наблюдаемыми на практике соотношениями и закономерностями [5, 210].

1. Длительности фаз вдоха и выдоха обычно составляют 1.5 – 2.5 с и 3 – 6 с соответственно. В ряде случаев, для экономии дыхательной смеси, легководолазом после вдоха выполняется задержка дыхания длительностью до 3 с. Полная длительность одного дыхательного акта: вдох – задержка дыхания – выдох обычно составляет 4 – 8 с (~ 8 – 15 дыхательных актов в минуту). При высокой физической нагрузке может выполняться более 20 дыхательных актов в минуту. Количество потребляемого легководолазом для дыхания воздуха зависит от ряда факторов, таких как глубина погружения, уровень его профессиональной подготовки, физическая нагрузка и характер выполняемых действий, физиологические особенности, психоэмоциональное состояние и др. В качестве ориентировочных, при относительно низкой физической нагрузке (отдых, рекреационный дайвинг), можно использовать следующие численные значения

объемного расхода воздуха: за один дыхательный акт (вдох–выдох) на поверхности воды расходуется ~ 0.5 л (при атмосферном давлении), а на глубине 10 м, где гидростатическое давление вдвое больше атмосферного ~ 1 л воздуха при атмосферном давлении (массовый расход – 0.61 г и 1.22 г соответственно). При 10 дыхательных актах в минуту это соответствует расходу 5 л/мин. и 10 л/мин. соответственно. При выполнении работы средней тяжести на глубине 10 м и 10 дыхательных актах в минуту ориентировочный расход воздуха возрастает и составляет 30 л/мин. (36.6 г/мин.).

2. Средний размер пузырей выдыхаемого воздуха и разброс их размеров относительно среднего зависят от глубины погружения, конструкции и настройки входящей в состав дыхательного автомата системы выпуска в воду выдыхаемого воздуха, особенностей дыхания конкретного легководолаза, выполняемых им под водой действий и др. При увеличении глубины погружения размеры пузырей уменьшаются. При увеличении физической нагрузки интенсивность дыхания водолаза усиливается, соответственно размеры пузырей и их количество увеличиваются.

Согласно наблюдениям, при нахождении легководолаза с дыхательным аппаратом АВМ-12-К [82] в воде на глубинах 5 – 10 м, средний радиус пузырей воздуха вблизи поверхности дыхательного автомата составляет порядка 1 см, пузыри с радиусом более 3 см встречаются относительно редко. В ряде конструкций дыхательных автоматов используются технические решения, специально предназначенные для измельчения выходящих при выдохе в воду пузырей воздуха. Для аквалангов компании Aeris (США) и др., в которых используется иная конструктивная схема дыхательного автомата, обеспечивающая «более легкое» дыхание, на тех же глубинах средний радиус воздушных пузырей выдыхаемого воздуха вблизи поверхности дыхательного автомата составляет 2–3 см, при подъеме к поверхности они делятся на более мелкие, радиусы которых составляют 0.2–1 см.

3. Информация о моделях, описывающих процесс выхода пузырьков воздуха из дыхательного автомата в воду и пригодных для решения прикладных задач отсутствует или недоступна. В качестве ориентировочных, в дальнейшем будем использовать следующие соображения:

Объем V пузырька радиусом $R = 1$ см составляет $V = 4/3\pi R^3 = 4.189$ см$^3 \approx 4$ см^3. Если объемный расход за один дыхательный акт составляет 1 л, то это соответствует 1000 см^3/4 см^3 = 250 пузырьков радиусом 1 см.

Если предположить, что во время выдоха бóльшая часть пузырьков радиусом 1 см выходит в воду по одному, равномерным потоком в течении 3 с, т.е. примерно 250/3 ≈ 83 пузырька за 1 с, получаем, что среднее время формирования и выхода в воду одного пузырька, и соответственно

временно́й масштаб процесса выдоха при объемном расходе 1 л на один дыхательный акт составляет не менее 1/83 ≈ 0.012 с = 12 мс.

Если предположить, что бо́льшая часть таких пузырьков выходит в воду по одному, равномерным потоком в течении 2 с, т.е. 250/2 = 125 пузырьков за 1 с, получаем, что среднее время формирования и выхода в воду одного пузырька, и соответственно временно́й масштаб процесса выдоха при объемном расходе 1 л составляет не менее 1/125 = 0.008 с= 8 мс.

Если предположить, что бо́льшая часть пузырьков формируется и выходит в воду одновременно по два, равномерным потоком в течении 1 с, т.е. 250/1 = 250 пузырьков за 1 с, получаем, что среднее время формирования и выхода в воду пары пузырьков, и соответственно временно́й масштаб процесса выдоха при объемном расходе 1 л составляет не менее 1/250*2 = 0.008 с= 8 мс.

Аналогичным образом могут быть оценены временны́е масштабы и для других моделей выхода пузырьков.

Указанные оценки временно́го масштаба определяют минимальное время накопления и усреднения при спектральном и статистическом анализе, при котором результаты такого анализа имеют физический смысл средних значений. При меньших значениях времен накопления и усреднения будут заметны флуктуации, обусловленные «тонкой структурой» потока пузырьков.

4. Колебания всплывающих в воде пузырьков воздуха могут быть описаны с использованием сферических функций [91, 229]. Согласно [230–232], в колебаниях пузырьков можно выделить монопольные (пульсационные), а также дипольные, квадрупольные и др. составляющие. Наибольший вклад в регистрируемые на расстояниях, превышающих радиус воздушных пузырьков в 100 и более раз (т.е. 1 м и более) вносят пульсационные составляющие их колебаний. Для оценивания резонансной частоты пульсационных колебаний одиночных воздушных пузырьков в воде может быть использована формула [229–232]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R}\sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho}}, \qquad (4.1)$$

где f_0 – резонансная частота пузырька, Гц, R – радиус пузырька, $\gamma = 1.4$ – отношение теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме, ρ – плотность воды, p_0 – гидростатическое давление в районе пузырька.

На поверхности воды, где величина p_0 равна атмосферному давлению, расчет по формуле (4.1) дает ориентировочно $f_0 = K/R$, где $K \approx 320$, если f_0 выражается в Гц, а радиус пузырька a – в см. Для пузырька радиусом $R = 1$ см и указанного значения коэффициента K резонансная частота при этом составляет ориентировочно $f_0 = 320$ Гц. При неизменном значении радиуса пузырька его резонансная частота пропорциональна корню квадратному из p_0. Результаты теоретического

и экспериментального исследования акустических характеристик «облака» воздушных пузырьков в воде описаны в [233–237].

5. При увеличении глубины на каждые 10 м гидростатическое давление увеличивается на 1 атм. Если легководолаз находится на глубине 10 м, где гидростатическое давление p_0 вдвое больше атмосферного, то при подъеме выдыхаемого им пузырька воздуха до поверхности воды его объем постепенно увеличивается: в два раза при изотермическом процессе и в $2^{1/\gamma} \approx 2^{1/1.4} = 1.64$ раза при адиабатическом процессе, где $\gamma = 1.4$ – отношение теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме. Радиус пузырька R при этом увеличивается в $2^{1/3} = 1{,}259$ раза при изотермическом и в $2^{1/\gamma/3} \approx 1.18$ раза при адиабатическом процессе. В соответствии с (4.1) при этом в $2^{1/3}*2^{1/2} \approx 1.78$ раза при изотермическом и в $2^{(1/\gamma)1/3}*2^{1/2} \approx 1.66$ раза при адиабатическом процессе уменьшается его резонансная частота. В реальных условиях процесс подъема пузырька не является ни чисто изотермическим, ни чисто адиабатическим. Поэтому численное значение коэффициента, определяющего понижение его резонансной частоты при подъеме с глубины 10 м до поверхности, находится между 1.66 и 1.78. Поэтому, например, если на глубине 10 м резонансная частота пузырька составляла 320 Гц, то на поверхности воды она будет составлять ориентировочно 320/1.66 ≈ 193 Гц и 320/1.78 ≈ 180 Гц при адиабатическом и изотермическом процессах соответственно. Более подробное описание резонансных свойств пузырьков воздуха в воде рассмотрено в [230–236].

6. Согласно [237], в первом приближении можно считать, что после формирования воздушный пузырек начинает всплывать с ускорением $a = 2g$ м/с^2 (при визуальном наблюдении – за время менее 1 с), затем скорость его всплытия за счет влияния вязкости воды стабилизируется и не превышает значения

$$V=gR^2/9\nu, \tag{4.2}$$

где $g = 9.81$ м/с^2 – ускорение свободного падения, R – радиус пузырька, $\nu = 10^{-6}$ с/м^2 – кинематическая вязкость воды. Если объем пузырька превышает 2 см^3, для оценки скорости его всплытия можно использовать формулу

$$V = 2/3(gR)^{1/2}. \tag{4.3}$$

Для пузырька радиусом 1 см расчет скорости всплытия по формулам (4.2) и (4.3) дает приблизительно 10 см/с и 20 см/с соответственно. По наблюдениям участвовавших в нижеописанных экспериментах водолазных специалистов–практиков на глубинах до 10 м скорость всплытия пузырьков на расстояниях порядка 0.5 – 1 м от лицевой маски визуально составляет ориентировочно 15 – 20 см/с, что согласуется с результатом расчета по формуле (4.3), а также с результатами экспериментов, описанных в [234, 236].

Согласно описанным в [234–236] результатам экспериментов, пузырек воздуха после образования совершает интенсивно затухающие пульсационные колебания с частотой, близкой

к f_0, обычно всего несколько периодов, затем, при всплытии с установившейся скоростью, амплитуда колебаний уменьшается.

Это подтверждается субъективными наблюдениями водолазных специалистов–практиков: основной вклад в ощущаемый под водой их собственный шум в слышимом диапазоне частот, ориентировочно не менее 75%, вносит процесс выхода пузырей выдыхаемого воздуха в воду и их колебания в непосредственной близости от выпускного клапана дыхательного автомата и соответственно головы легководолаза. Вклад в шумоизлучение потока всплывающих пузырей субъективно, по ощущениям легководолазов, значительно меньше.

Шумоизлучение на частотах ниже 40 Гц обусловлено в основном вихревыми движениями воды вследствие движения легководолаза и особенно его ласт [209].

С учетом результатов, полученных рядом исследователей и вышеизложенных соображений в дальнейшем будем предполагать пригодность нижеследующих утверждений.

1. В диапазоне частот 40 Гц – 4 кГц наибольший вклад в энергию шума легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла создается при выдохе, в процессе выхода пузырьков воздуха из выпускного клапана дыхательного автомата в воду и меньший вклад – их колебаниями при подъеме к поверхности. Это можно представить физически как действие объемного акустического источника в форме обращенного вершиной вниз усеченного конуса с вертикально ориентированной осью симметрии и углом при вершине порядка 10–20 градусов, неравномерно заполненного пульсирующими сферами диаметром 1 – 4 см [231–233]. Наибольшее количество энергии излучается из области вблизи усеченной вершины данного конуса.

В качестве упрощенной модели источника излучаемого легководолазом шума может быть использована вертикально ориентированная линейная антенна из некогерентных монопольных и дипольных излучателей, соответствующих группам всплывающих пузырьков воздуха.

2. В диапазоне частот 4 – 150 кГц основной вклад в излучаемый шум создается колебаниями корпуса редуктора высокого давления и металлических элементов акваланга, обусловленными турбулентными пульсациями потока сжатого воздуха, выходящего во время вдоха из баллона (баллонов). Необходимо отметить, что у ряда современных аквалангов излучаемый на этих частотах шум значительно ослаблен.

3. На частотах ниже 40 Гц основной вклад в излучаемый шум создается вихревыми движениями воды вследствие движения легководолаза и особенно его ласт. Его можно представить как результат совокупного действия дипольных, квадрупольных и октупольных источников малых волновых размеров, сгруппированных в области ласт и создаваемого ими спутного потока.

4. Время анализа усредненных, по крайней мере для 10 поднимающихся к поверхности воды пузырьков, характеристик шумоизлучения должно составлять, при расходе воздуха 1 л на

дыхательный цикл не менее 0.08–0.12 с. При меньших значениях времени анализа будут заметны флуктуации, обусловленные «тонкой структурой» потока пузырьков. В связи с этим в дальнейшем использовано время усреднения 0.4 с. Соответствующая ему разрешающая способность по частоте составляет 1/0.4=2.5 Гц.

4.2 Характеристики шумов неподвижного легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла в мелководной прибрежной акватории

В п. 4.2 представлены результаты экспериментального исследования спектральных и статистических характеристик подводных шумов, зарегистрированных векторно–скалярным приемником (ВСП) вблизи неподвижного легководолаза, экипированного аквалангом [217]. Для приема шумов использовался ВСП собственной разработки, в состав которого входили ненаправленный ПД и ВП инерционного типа, подобный описанному в п. 2.1. В качестве чувствительных элементов в данном ВСП использовались разработанные автором пьезоэлектрические акселерометры. Воспринимавшиеся ВСП шумы после усиления и фильтрации в общей полосе частот 10–4000 Гц подвергались дискретизации с помощью многоканального 16–разрядного АЦП и записывались в память компьютера. Частота дискретизации составляла 10 кГц. Как показано далее, ВСП в бóльшей части диапазона частот 10–1000 Гц работал как приемник компонент градиента звукового давления.

Регистрация шумов легководолаза была выполнена в летнее время года в одной из прибрежных акваторий залива Петра Великого Японского моря, в процессе специально подготовленного эксперимента. Условия эксперимента: состояние моря 2 балла, глубина места в районе работ 6 м, дно – песок, редкие водоросли, придонное течение со скоростью порядка 0.02 м/с, видимость под водой более 2 м. Во время эксперимента, кроме шумов легководолаза и ГА динамических шумов моря, наблюдались техногенные помехи, обусловленные движением судов, а также импульсные помехи, создаваемые «щелкающими» морскими обитателями (раки, мелкие крабы и др.). Результирующие уровни техногенных помех и динамических шумов моря во время эксперимента примерно соответствовали кривым Венца при состоянии моря 4 балла. Уровни импульсных помех временами на порядок и более превышали уровни остальных помех. Во время выполнения данного эксперимента на удалениях менее 2 миль не было судов, плавучих пирсов и других водоизмещающих объектов, подверженных качке на волнении или создающих корабельные волны.

Частотная зависимость ослабления шумов легководолаза при удалении от него определяется рядом факторов, одним из которых является влияние волновода, образованного горизонтальным водным слоем, ограниченным сверху свободной поверхностью воды (условно

абсолютно–мягкая граница), а снизу – морским дном (импедансная граница). В качестве модели такого волновода может быть использован горизонтальный однородный водный слой со свободной верхней поверхностью, лежащий на однородном жидком полупространстве [30, 110–112]. Критическая частота f_0 такого волновода определяется соотношением [30]

$$f_0 = \frac{c_w}{4D\sqrt{1-(c_w/c_b)^2}}, \tag{4.4}$$

где c_w – скорость звука в воде, c_b – скорость звука в донном грунте, D – глубина водного слоя. Согласно [30], при понижении частоты ниже f_0 будет наблюдаться увеличение затухания «водных» мод. Сведения о скорости звука в донном грунте в районе работ отсутствуют. Если принять в качестве ориентировочных значений D = 6 м, c_w = 1500 м/с, c_b = 1600 м/с (песок–ил), то критическая частота $f_0 \approx 180$ Гц. Если принять в качестве ориентировочных значений D = 6 м, c_w = 1500 м/с, c_b = 1800 м/с, то $f_0 \approx 113$ Гц.

ВСП был установлен на расстоянии 0.3 м от дна и ориентирован так, чтобы направление максимальной чувствительности датчика одной из его горизонтальных компонент было параллельно береговой линии, второй компоненты – перпендикулярно.

В выполнении эксперимента участвовал профессиональный легководолаз с более чем 20–летним опытом водолазных работ под водой (сварочных, монтажных, аварийно–спасательных и др.) как с дыхательными аппаратами различных типов, так и на задержке дыхания. Он использовал следующее снаряжение: «мокрый» гидрокостюм, ласты, акваланг Aeris с регулятором давления Aeris ION AT600 и компенсатор плавучести (жилет) Aeris (США). Перед проведением эксперимента, для проверки снаряжения и своего самочувствия, легководолаз выполнил обычные подготовительные упражнения: погружения – «зависания» – проходы под водой – всплытия. Физическое и психоэмоциональное состояние, а также самочувствие легководолаза после выполнения подготовительных упражнений было вполне нормальным и не вызывало беспокойства. Во время выполнения эксперимента легководолаз погрузился в воду, приблизился к ВСП и, скомпенсировав свою плавучесть, встал на дне на расстоянии 2 м от него в направлении максимума чувствительности канала ВП, ориентированного параллельно береговой линии. Затем он, стараясь не двигаться, последовательно на 2 минуты (для регистрации шумов акватории) выполнил задержку дыхания, далее 10 минут (с 20:33 до 20:43 местного времени) старался дышать в удобном для себя режиме, потом вновь на 2 минуты выполнил задержку дыхания, после чего поднялся на поверхность, где сообщил о симптомах физического недомогания, появившихся под водой: затрудненное и неравномерное дыхание, мышечная слабость. Симптомы были отнесены к последствиям перенесенной незадолго до эксперимента вирусной инфекции. После выхода из воды дыхание легководолаза нормализовалось, но общее недомогание продолжалось. При последующем обращении в

медицинское учреждение, обследовании и долечивании, его состояние здоровья и пригодность к выполнению погружений восстановились.

ГА шумы, зарегистрированные с помощью ПД – $y_1(t)$, и ВП – $y_2(t)$, максимум характеристики направленности чувствительности которого был ориентирован на легководолаза, подвергались спектральной и статистической обработке. На рисунке 4.1 показаны осциллограмма и спектрограмма шума $y_2(t)$, поступавшего во время эксперимента с выхода вышеуказанного канала ВП, масштабы уровней условные.

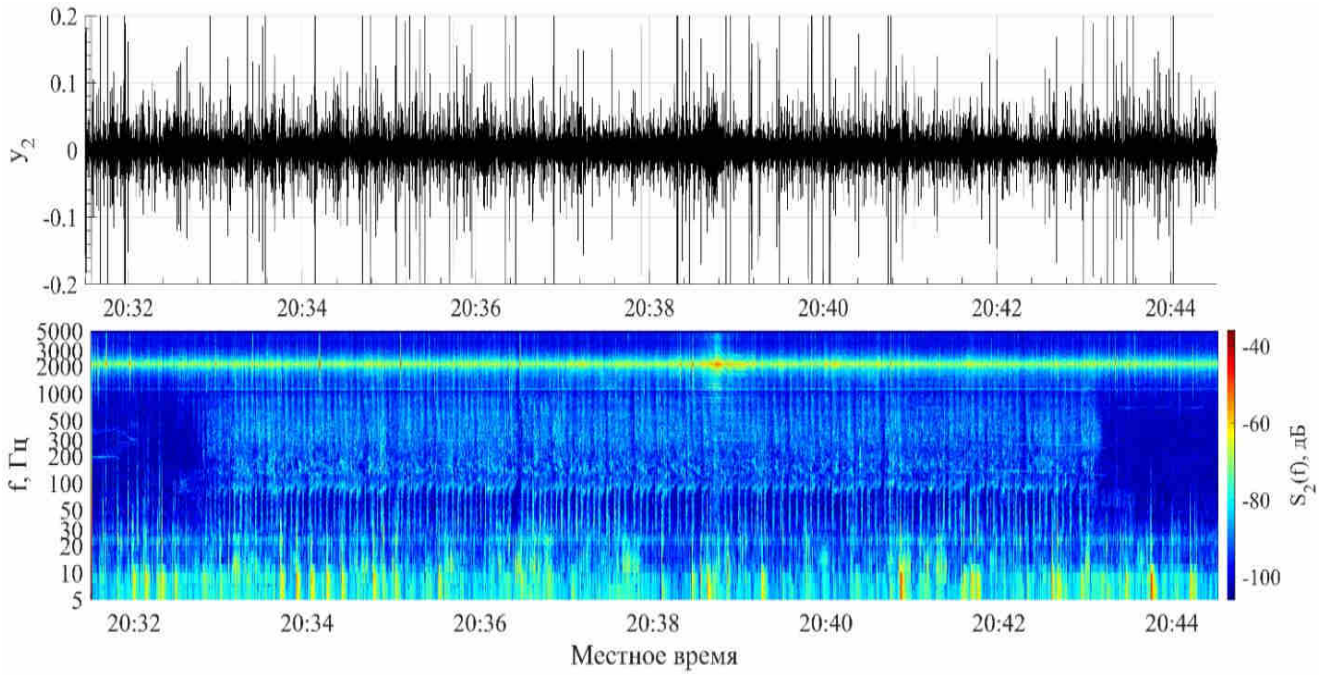


Рисунок 4.1 – Осциллограмма и спектрограмма шумов в канале ВП во время эксперимента

На рисунках 4.2 и 4.3 показаны фрагменты осциллограммы и спектрограммы, показанных на рисунке 4.1. Осциллограммы имеют вид суммы непрерывного случайного процесса (шумовой дорожки), и нестационарной последовательности импульсных помех, создаваемых щелкающими морскими обитателями. Как видно из рисунков 4.1 – 4.3, амплитуды некоторых из помеховых импульсов на порядок и более превышают среднее квадратическое значение шумовой дорожки. Разрешающая способность по частоте на всех спектрограммах составляет 2.5 Гц, см. п. 4.1. Независимо от наличия или отсутствия шумов дыхания легководолаза, на спектрограммах наблюдаются артефакты: максимум вблизи 2100 Гц, соответствующий резонансной частоте чувствительного элемента ВП, минимум (темная полоса) и максимум на частотах 1060 Гц и 1130 Гц (антирезонанс и резонанс), а также максимум вблизи 20 Гц, обусловленные резонансными свойствами конструктивных элементов системы крепления ВСП. Нерегулярные составляющие на частотах менее 20 Гц вызваны небольшими движениями легководолаза для поддержания равновесия.

Осциллограммы и спектрограммы шумов, поступавших с выхода ПД имеют подобный вид, но на них не заметны указанные артефакты.

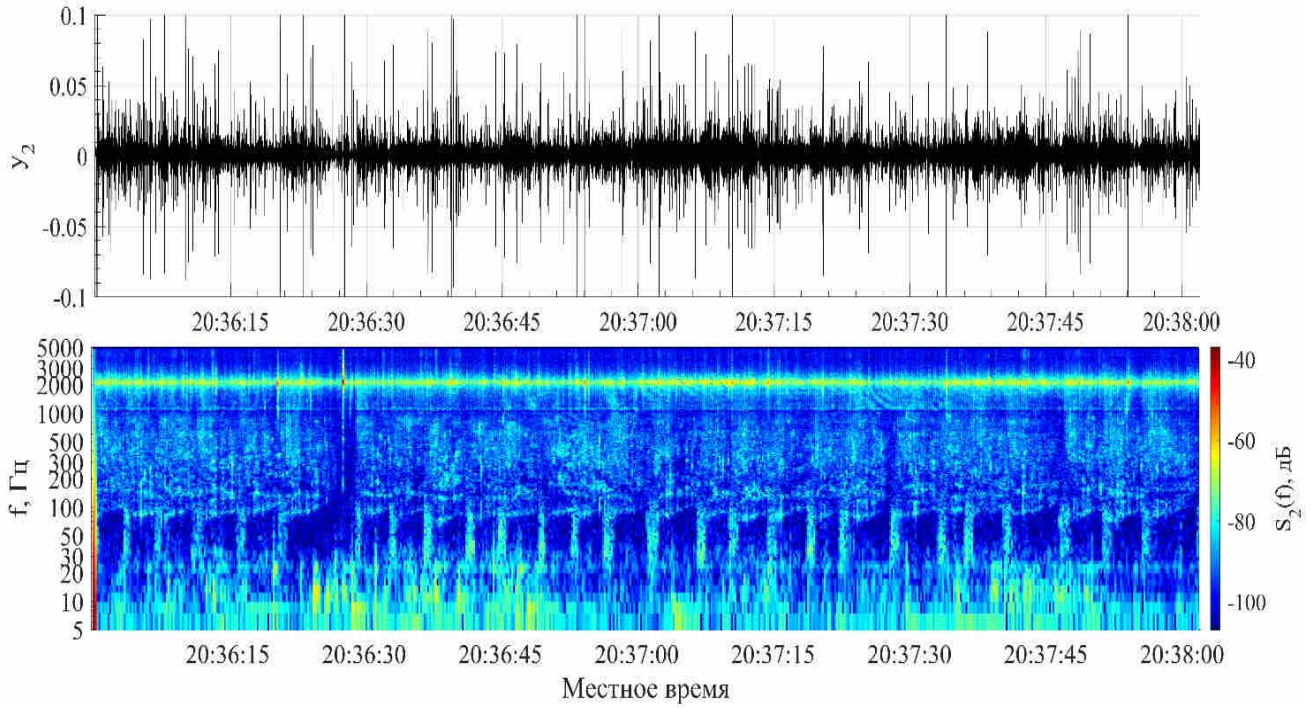


Рисунок 4.2 – Фрагменты длительностью 120 секунд из осциллограммы и спектрограммы, показанных на рисунке 4.1

На спектрограммах, рисунки 4.1 и 4.2, на интервале 20:33–20:43 явно наблюдаются составляющие, обусловленные дыхательными циклами легководолаза. Видно, что большая часть энергии шумов дыхания легководолаза с данным экземпляром акваланга, зарегистрированных на расстоянии 2 м от него, была сосредоточена в области 15–1000 Гц.

На рисунке 4.3 рамками красного и синего цвета выделены интервалы длительностью 1 с во время выдохов и вдохов легководолаза. Сигналы на данных интервалах использованы далее для оценивания усредненных спектральных характеристик и плотностей распределения вероятностей мгновенных значений шумов дыхания легководолаза.

На рисунке 4.4 красными и синими линиями показаны частотные зависимости модулей усредненных спектральных уровней шумов с ПД (график $P_{11}(f)$) и ВП (график $P_{22}(f)$) во время выдохов и вдохов, оцененные в полосах шириной 10 Гц на интервалах 1 с, выделенных рамками соответствующих цветов на рисунке 4.3, масштабы уровней условные. Линиями черного цвета показаны усредненные по трем интервалам длительностью 1 с спектральные уровни в полосах шириной 10 Гц шумов с ПД и ВП, когда легководолаз выполнял задержку дыхания после 20:43 местного времени. Поскольку легководолаз в это время не двигался, они соответствуют спектральным уровням шумов акватории.

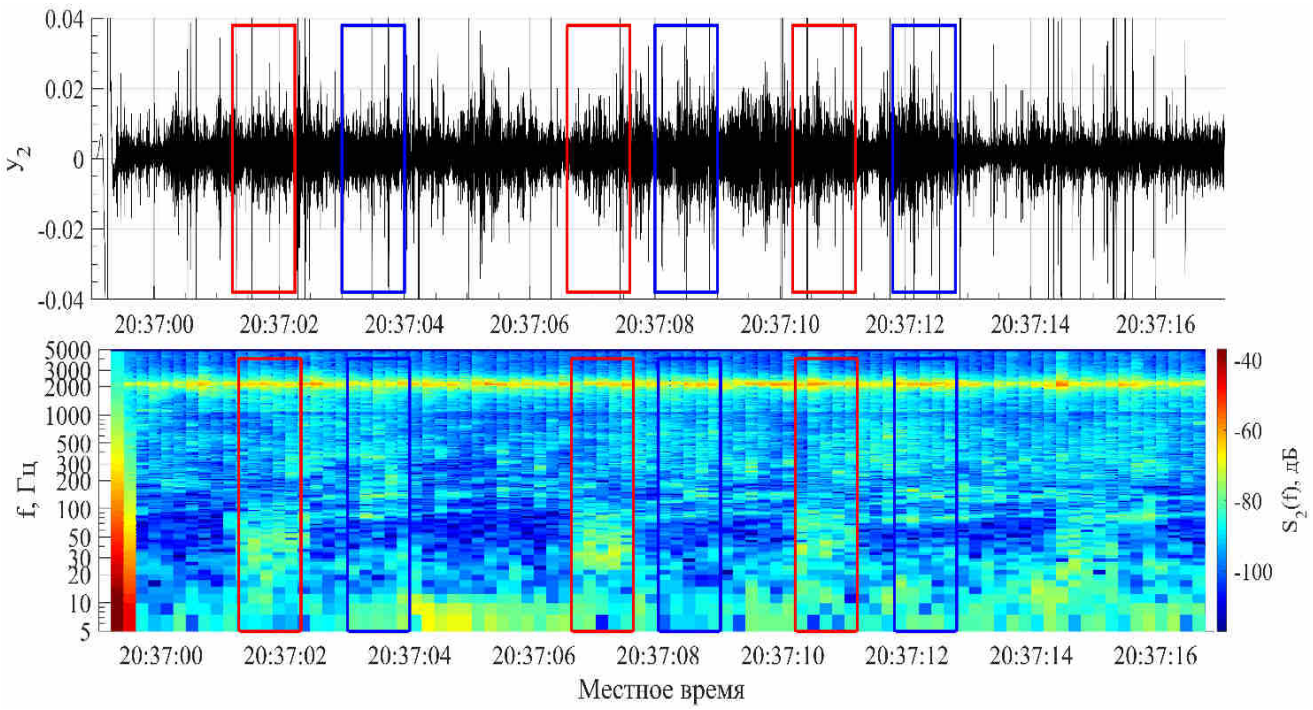


Рисунок 4.3 – Фрагменты длительностью 16 с из осциллограммы и спектрограммы, рисунок 4.2. Красными и синими рамками выделены односекундные интервалы во время выдохов и вдохов, соответственно, использованные для анализа

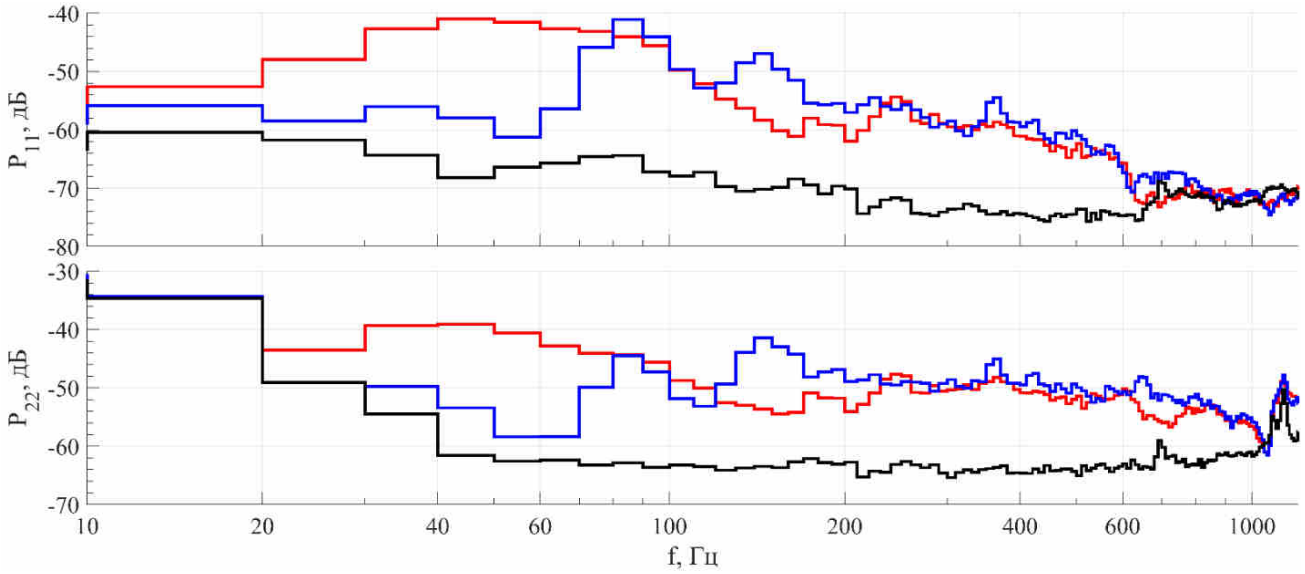


Рисунок 4.4 – Частотные зависимости модулей усредненных спектральных уровней шумов в каналах ПД (график P_{11}) и ВП (график P_{22}). Красными, синими и черными линиями показаны модули спектральных уровней шумов соответственно выдохов, вдохов, и шумов акватории в полосах шириной 10 Гц

Приведенные на рисунке 4.4 зависимости пригодны для использования в качестве оценок спектральных плотностей шумов легководолаза и акватории. Видно, что во время выдохов бóльшая часть энергии шума легководолаза была сосредоточена в полосе частот 15–600 Гц, в

которой наблюдается один плавный экстремум в области 40–50 Гц. Во время вдохов бóльшая часть энергии шума легководолаза была сосредоточена в полосе 60–600 Гц, здесь наблюдаются два плавных экстремума: в области 80–90 Гц и в области 140–150 Гц.

На частотах 250–600 Гц как для шумов с ПД, так и для шумов с ВП спектральные уровни во время выдохов и вдохов практически совпадают, хотя превышение спектральных уровней шумов с ВП над шумами акватории на 2–3 дБ больше, чем для шумов с ПД. Указанное совпадение спектральных уровней свидетельствует о том, что шум легководолаза в данной области обусловлен в основном потоком всплывающих пузырей выдыхаемого воздуха с радиусами 0.5 – 1 см (4.1). Отмеченное превышение спектральных уровней шумов с ВП над шумами акватории соответствует некоторым оценкам помехоустойчивости ВП по сравнению с ПД [26, 28, 72, 161].

На частотах 600–1000 Гц спектральные уровни шумов с ПД как во время выдохов, и во время вдохов почти совпадают с уровнями шумов акватории, которые наблюдались во время эксперимента, тогда как для шумов с ВП они на 5–10 дБ превышают уровни шумов акватории. Это подтверждает преимущество применения ВП по сравнению с ПД в области частот 250–1000 Гц, где проявляется пространственная избирательность ВП.

На частотах ниже 20 Гц наблюдается обратная ситуация: в данном эксперименте применение ПД имеет преимущество перед ВП. Так, на частотах 10–20 Гц спектральные уровни шумов с ВП и при выдохе и при вдохе становятся сравнимыми с уровнями шумов акватории, тогда как спектральные уровни шумов с ПД превышают уровень шумов акватории на 8 и 6 дБ соответственно.

Весьма важным является вопрос о том, какой характеристике звукового поля (колебательная скорость, градиент давления, интенсивность и т.д.) в реальных условиях соответствуют электрические сигналы на выходе применяемого ВП в различных областях частот [112, 191, 192, 217]. Известно, что если сигнал на выходе идеального ВП пропорционален градиенту звукового давления, то его чувствительность по звуковому давлению с повышением частоты возрастает с наклоном 20 дБ/декада, тогда как у идеального ненаправленного ПД она не зависит от частоты. Поэтому отношение модулей спектральных плотностей шумов с выходов ВП и ПД, имеющих общий фазовый центр, (или разность их логарифмов) при повышении частоты будет характеризоваться указанным наклоном 20 дБ/декада [72, 192, 217]. На рисунке 4.5 сплошными линиями красного, синего и черного цвета показаны разности (в дБ) частотных зависимостей P_{22}–P_{11}, приведенных на рисунке 4.4, для выделенных на рисунке 4.3 интервалов выдохов и вдохов, а также шумов акватории соответственно. Пунктирная линия соответствует наклону 20 дБ/декада. Видно, что на частотах 150–400 Гц все линии практически совпадают, на частотах 60–1500 Гц, отклонения от наклона 20 дБ/декада не превышают 5–10 дБ, наибольшие

по абсолютной величине отклонения наблюдаются для шумового фона. При увеличении времени накопления отклонения от указанного наклона уменьшаются. Это позволяет сделать вывод о том, что в диапазоне частот 60–1500 Гц данный ВП, с учетом использованной в эксперименте системы его крепления, следует рассматривать как приемник градиента звукового давления (ПГД) и использовать для описания его характеристик соотношения, приведенные в [71, 72, 161].

Основные преимущества ВСП по сравнению с ПД при малых отношениях сигнал/помеха реализуются путем использования известных в статистической радиотехнике алгоритмов обработки сигналов, в которых объединяется информация, поступающая от различных приемников (в данном случае ПД и ВП) так, чтобы подлежащие приему или обнаружению сигналы складывались когерентно, а помехи – некогерентно [15–17, 20–23]. Для решения вопроса о целесообразности сложения (в т.ч. взвешенного фазо– и частотно–зависимого) когерентных составляющих шумов легководолазов, воспринимаемых ПД и ВП, необходимо иметь информацию о модулях и аргументах взаимных спектров, а также о функциях когерентности [94–96] как для полезных сигналов (в данном случае шумов дыхания), так и для помех – шумов акватории.

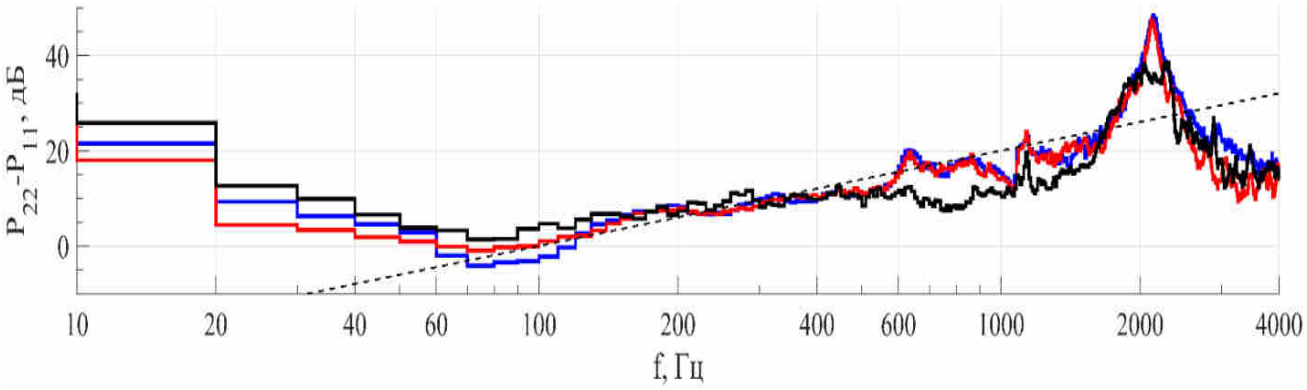


Рисунок 4.5 – Частотная характеристика разности P_{22}–P_{11}. Сплошные линии черного, красного и синего цвета – разности модулей усредненных спектральных уровней шумов моря, шумов выдохов и вдохов, на выходах ВП и ПД во время эксперимента. Пунктирная линия соответствует наклону 20 дБ/декада

На рисунке 4.6, сверху вниз, показаны частотные зависимости модулей – $P_{12}(f)$ и аргументов – $arg_{12}(f)$ взаимных спектральных уровней, а также функции когерентности – $C_{12}(f)$ шумов на выходах ПД и ВП, усредненные по трем временны́м интервалам, выделенным рамками на рисунке 4.3, в полосах частот шириной 10 Гц. Красные, синие и черные линии соответствуют выдохам, вдохам и шумам акватории. Видно, что положения на оси частот максимумов модулей взаимных спектров $P_{12}(f)$ соответствуют положениям максимумов модулей спектральных уровней $P_{11}(f)$ и $P_{22}(f)$, приведенных на рисунке 4.4. На частотах 30–600 Гц их уровни на 20 дБ и

более превышают уровни взаимного спектра шума акватории, а их аргументы ($arg_{12}(f)$) отличаются друг от друга в пределах 10°. Наибольшие значения функции когерентности шумов, воспринимаемых ПД и ВП во время выдохов, наблюдались в областях 25–100 Гц и 350–600 Гц, а во время вдохов – в областях 80–250 Гц и 350–800 Гц.

Представленные оценки позволяют рассчитывать на увеличение дальностей наблюдения и мониторинга шумов легководолаза при использовании одиночного ВСП за счет объединения информации, поступающей от ПД и ВП (формирование, с учетом отличия от нуля аргумента взаимного спектра, кардиоидных характеристик направленности в частотных полосах, где наблюдается высокая когерентность, и др.) по сравнению с одиночным ПД [72].

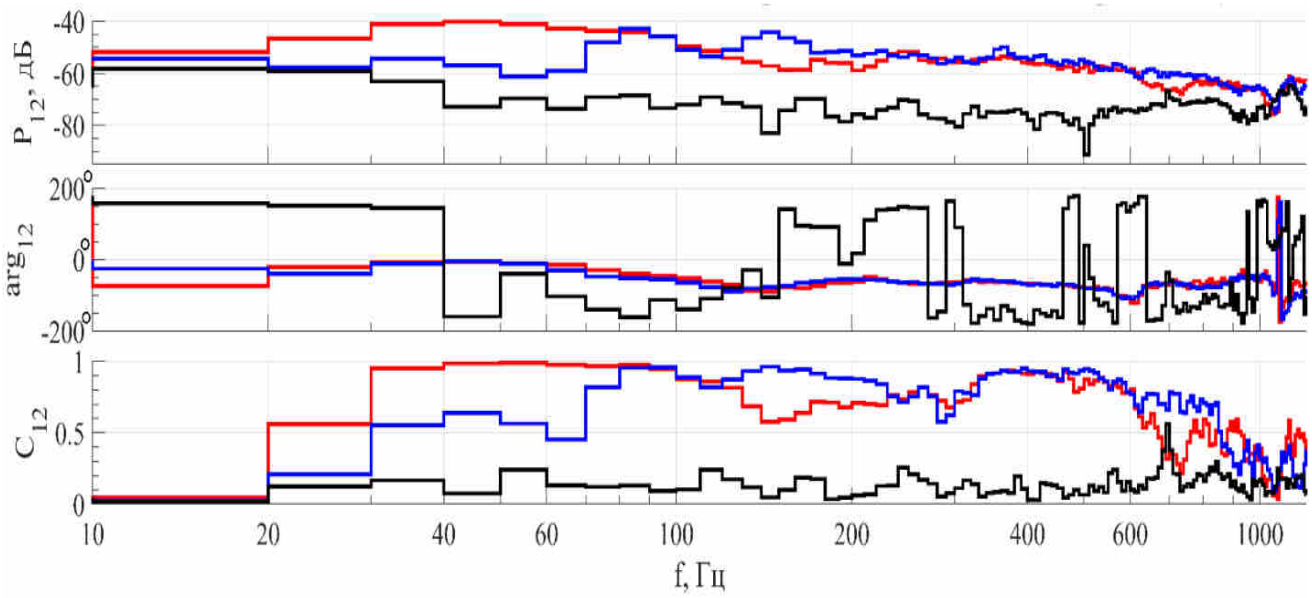


Рисунок 4.6 – Модули и аргументы взаимных спектральных уровней, функции когерентности (сверху вниз) шумов, зарегистрированных в каналах ПД и ВП. Красные, синие и черные линии соответствуют интервалам во время выдохов, вдохов и шумов моря

Для дистанционного определения физического состояния легководолаза во время нахождения под водой весьма важным является вопрос об оценивании в режиме реального времени характеристик его дыхания [210, 215–217], и в первую очередь – изменчивости частоты повторения и «интенсивности» дыхательных циклов (вдох–выдох) путем анализа огибающей шумов дыхания [215–217]. Как видно из спектрограмм, показанных на рисунках 4.1–4.3, в данном случае дыхательный ритм легководолаза наиболее заметен в полосе частот 40–90 Гц.

На рисунках 4.7 а, 4.7 б показаны осциллограммы шумов легководолаза, воспринимавшихся ПД и ВП, на выходах цифровых фильтров в полосе частот 40–90 Гц. Отдельные дыхательные циклы (выдох–вдох) определенно видны (ср. рисунок 4.1), заметны нерегулярность их следования и изменения уровней, обусловленные физическим состоянием легководолаза.

На рисунках 4.7 в, 4.7 г показаны осциллограммы огибающих шумов, воспринимавшихся ПД и ВП. В данном случае, как и в п. 3.3, для выделения огибающей предпочтительным является использование энергетического приемника, выполняющего последовательно операции полосовой фильтрации, квадратичного детектирования и скользящего интегрирования [205, 216].

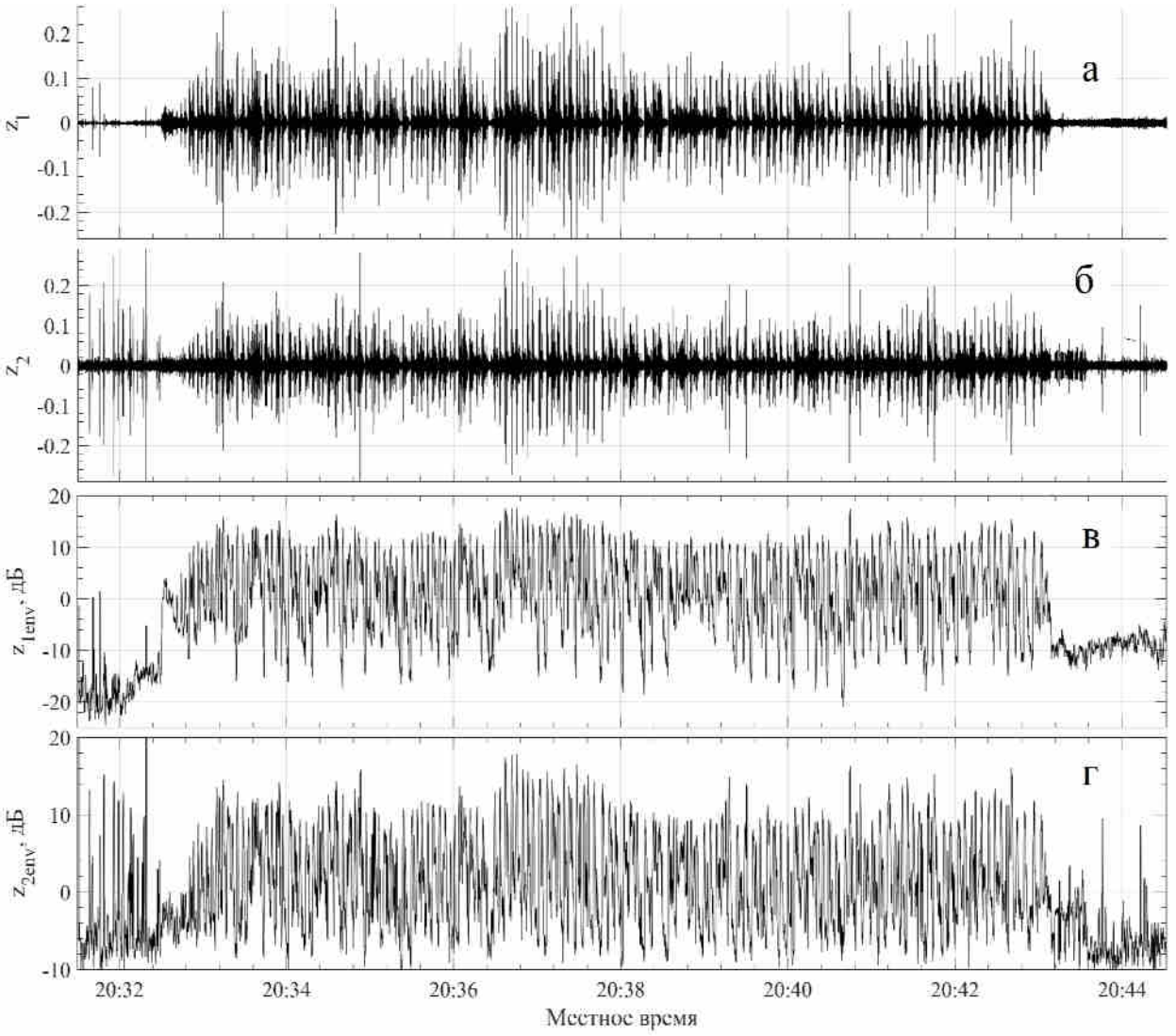


Рисунок 4.7 – Осциллограммы шумов легководолаза (а, б) от ПД и ВП в полосе частот 40–90 Гц, и их огибающих (в, г) при времени накопления 0.5 с

Показанные на рисунках 4.7 в, 4.7 г огибающие получены с помощью программно-реализованных энергетических приемников с полосой частот 40–90 Гц при времени накопления 0.5 с. Видно, что превышение шумов легководолазов над шумами акватории (отношение сигнал/помеха) как для ПД, так и для ВП составляет более 20 дБ.

Как отмечалось в п. 3.3, скользящее интегрирование (суммирование при цифровой реализации) за время T с постоянными весами эквивалентно применению фильтра скользящего среднего, амплитудно–частотная характеристика которого описывается соотношением $H(f) = \sin(2\pi fT/2)/(2\pi fT/2)$. Если время интегрирования T составляет 0.5 с, то первый нуль $H(f)$

будет наблюдаться при $f = 2$ Гц, что достаточно в данном случае, так как частота дыхания легководолаза обычно не выходит за пределы 0.1 – 1 Гц (6 – 60 дыхательных циклов в минуту).

Для построения алгоритмов, обеспечивающих увеличение дальности мониторинга легководолазов с помощью методов статистической радиотехники [15–17, 19–23], необходимы модели ПРВ мгновенных значений принимаемых ПД и ВП шумов. Очень важным является оценивание возможности применения, в качестве таких моделей, гауссовского распределения вероятностей [125, 140–144].

На рисунке 4.8 показаны нормированные (когда математическое ожидание и дисперсия равны 0 и 1 соответственно) гистограммные оценки ПРВ мгновенных значений шумов легководолаза во время выдохов и вдохов, а также шумов акватории, воспринимавшихся ПД (вверху) и ПГД (внизу) в полосе частот 40–90 Гц.

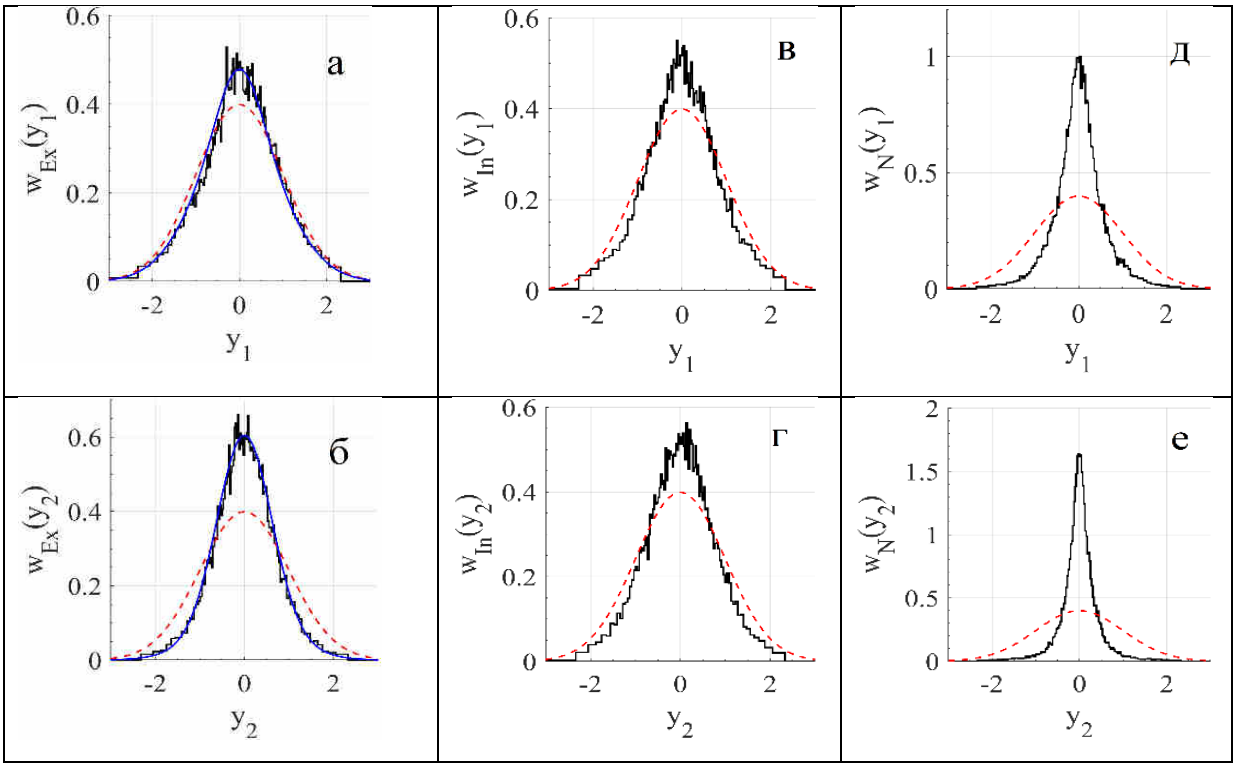


Рисунок 4.8 – Усредненные нормированные гистограммные оценки ПРВ мгновенных значений шумов от ПД (вверху) и ПГД (внизу): а) и б) – во время выдохов; в) и г) – во время вдохов; д) и е) – гистограммы шумового фона. Красные пунктирные линии – нормированные гауссовские кривые

Данные оценки ПРВ построены по трем выделенным рамками на рисунке 4.3 фрагментам шумов легководолаза во время выдохов и вдохов, а также шумов акватории, воспринимавшихся ПД и ВП [217]. Здесь (а) и (б) – гистограммы во время выдохов, (в) и (г) – гистограммы во время вдохов, (д) и (е) – гистограммы шумового фона. Красными пунктирными линиями показаны нормированные гауссовские кривые. Видно, что во всех случаях наблюдаются однотипные

отличия от гауссовского распределения – более острая вершина (положительный коэффициент эксцесса). Детальный анализ шумов легководолаза показал, что наблюдаемые отличия ПРВ мгновенных значений от гауссовского закона во время выдохов и вдохов обусловлены сложной структурой шумов легководолаза и наличием импульсных составляющих, не все из которых обусловлены щелкающими морскими обитателями. Отличия от гауссовского закона ПРВ мгновенных значений шумового фона акватории обусловлены импульсными помехами, см. рисунки 4.1–4.3, создаваемыми морскими обитателями [198].

В качестве моделей плотностей распределения (пригодных в том числе для формирования отношений правдоподобия), для выдохов, вдохов и шумов акватории удобно использовать суммы гауссовских распределений [153–158], имеющих вид

$$w(y) = A\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}e^{-\frac{y^2}{2\sigma_1^2}} + B\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}e^{-\frac{y^2}{2\sigma_2^2}}, \qquad (4.5)$$

где σ_1 и σ_2 – средние квадратические отклонения, A и B – весовые коэффициенты. Процедура определения всех этих величин по экспериментальным данным описана в [157, 158].

На рисунках 4.8 а, б сплошными линиями синего цвета показаны графики функции $w(y)$, (4.5) для случаев, когда $\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = 0.5$, $A = 0.8$, $B = 0.2$ и $\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = 0.6$, $A = 0.225$, $B = 0.775$ соответственно. Данные функции пригодны для использования в качестве моделей ПРВ мгновенных значений сигналов с ПД и ВП в полосе частот 40–90 Гц во время выдохов легководолаза. Аналогично формируются модели и для других распределений, показанных на рисунке 4.8 и других полос частот. Вопрос о построении более точных моделей, обеспечивающих заданные значения уровней значимости, применительно к практическим задачам является спорным вследствие малой длительности интервалов квазистационарности и заметной на рисунках 4.1 – 4.3 и 4.7 вариабельности шумов дыхания легководолаза.

Для оценивания динамики характеристик дыхательного ритма легководолаза воспользуемся спектральным анализом огибающих его шумов [215 – 217].

На рисунке 4.9 показаны спектрограммы огибающих, см. рисунок 4.7. Для их построения, как и в п. 3.3, использовалось не быстрое преобразование Фурье (БПФ), а способ, который применялся до появления алгоритмов БПФ для вычисления спектра мощности. Как отмечалось в п. 3.3, этот способ используется также в устройствах обнаружения тональных сигналов с неизвестными амплитудами и начальными фазами на фоне помех: для получения оценки спектра мощности на частоте f исследуемый фрагмент сигнала длительности T_{in} умножается на функции $\sin(2\pi ft)$ и $\cos(2\pi ft)$, результаты умножения интегрируются на интервале длительностью T_{in}, затем возводятся в квадрат, суммируются и извлекается квадратный корень из суммы квадратов.

В данном случае частота f изменялась от 0.06 до 2 Гц с шагом 0.005 Гц, длительности интервалов T_{in} были выбраны равными 20 с, чтобы охватить не менее трех дыхательных циклов,

см. рисунок 4.3, сдвиг по времени анализируемых интервалов составлял 1 с. Соответствующие частоте дыхания спектральные составляющие показаны стрелками. В данном эксперименте частота дыхания легководолаза не оставалась постоянной, что характеризует опытных легководолазов, а нерегулярно изменялась в основном от 0.2 до 0.3 Гц (т.е. интервалы между вдохами или выдохами составляли 3.3 – 5 с). Это свидетельствует о нарушении дыхательного ритма, вызванного отклонениями в физическом состоянии легководолаза во время эксперимента, что подтвердилось после его выхода из воды.

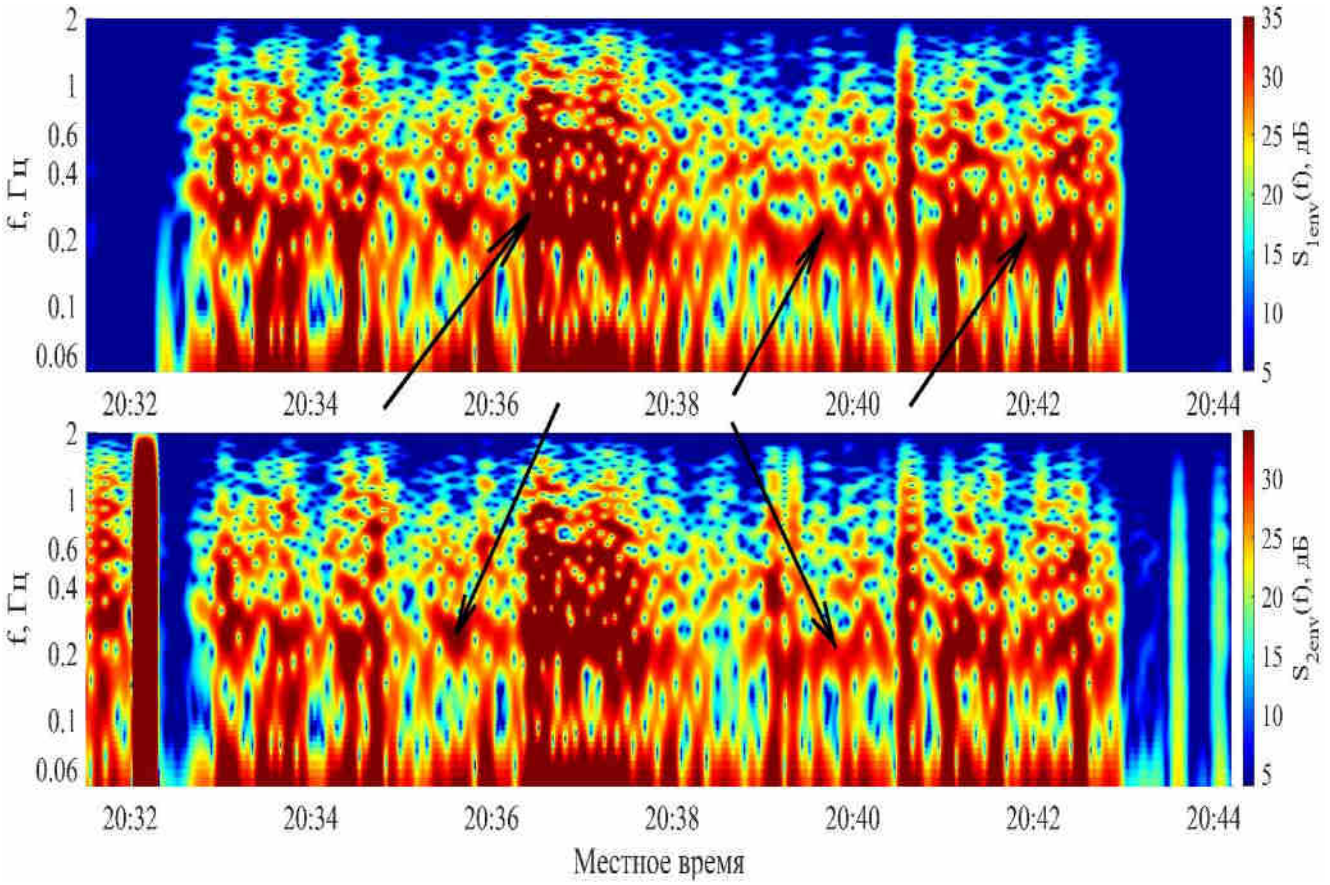


Рисунок 4.9 – Спектрограммы огибающих шумов ПД (вверху) и ВП (внизу). Соответствующие частоте дыхания спектральные составляющие показаны стрелками

Таким образом регистрация ГА шумов легководолаза одиночным векторно–скалярным приемником позволяет получить в реальном времени дополнительный объем новой информации о спектральных и статистических характеристиках, что открывает возможность увеличения дальности наблюдения создаваемых аквалангистом шумов и мониторинга его физического состояния.

Результаты описанного в п. 4.2 эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Во время пребывания под водой при выполнении эксперимента у профессионального легководолаза произошли изменения самочувствия и физического состояния, что было выявлено

в процессе анализа шумов и ритма дыхания и стало основанием для дополнительного лечения последствий ранее перенесенного респираторного заболевания.

2. Основная часть энергии шумов легководолаза с дыхательным аппаратом Aeris, зарегистрированных в описанном эксперименте на расстоянии 2 м от него, была сосредоточена в области частот 20–1000 Гц, при этом наблюдались максимумы излучения: во время выдохов – в области 30–80 Гц, во время вдохов – в областях 60–80 Гц и 140–150 Гц.

3. Представленные оценки взаимных спектров и функций когерентности позволяют рассчитывать на увеличение дальностей наблюдения и мониторинга шумов легководолаза при использовании одиночного ВСП за счет объединения информации, поступающей от ПД и ВП, в сравнении с одиночным ПД.

4. Одномерные плотности распределения последовательных мгновенных значений шумов легководолаза не описываются гауссовским законом распределения как при выдохе, так и при вдохе. В качестве моделей одномерных плотностей распределений как во время выдохов, так и вдохов а также шумового фона акватории можно использовать взвешенные суммы двух гауссовских распределений с разными дисперсиями.

5. При условии известности закона спадания интенсивности создаваемого легководолазом звукового поля при удалении от него, знание вышеприведенных величин: оценок спектральных плотностей и плотностей распределения мгновенных значений шумов акватории, шумов легководолаза во время выдохов и вдохов, отношения сигнал/помеха и функций когерентности, позволяет определить максимальные дистанции, на которых может осуществляться его наблюдение и мониторинг.

Методика эксперимента, примененный ВСП, а также измерительное оборудование и программные продукты могут быть использованы для регистрации и анализа шумов других типов дыхательных аппаратов, а также выявления индивидуальных особенностей дыхания легководолазов под водой.

4.3 Характеристики шумов неподвижного легководолаза с дыхательным аппаратом замкнутого цикла в мелководной прибрежной акватории

В п .4.4 представлены результаты экспериментального исследования характеристик звукового давления шумов неподвижного легководолаза с дыхательным аппаратом замкнутого цикла (ребризером) FROGS (Full Range Oxygen Gas System, США) [215, 216, 221], внешний вид которого показан на рисунке 4.10 [83]. В конструкции данного ребризера применены технические решения по снижению его ГА шумов.

Исследования характеристик данного ребризера выполнялись при состоянии моря 2 балла с помощью макета описанной в разделе 2 антенны, установленного в заливе Петра Великого на дне прибрежной акватории с песчаным дном, глубина места 4 м, расстояние до уреза воды 100 м [215, 216, 221]. Во время выполнения данного эксперимента на удалениях менее 2 миль не было судов, плавучих пирсов и других водоизмещающих объектов, подверженных качке на волнении или создающих корабельные волны.

Перед установкой антенны чувствительности ее гидрофонов с учетом влияния электронных блоков были выравнены с точностью не хуже $\pm$ 3дБ с помощью регулируемых усилителей, входящих в состав блока усиления и полосовой фильтрации. С учетом дополнительных погрешностей [92] результирующая погрешность приведенных далее уровней сигналов составляет порядка +/– 5 дБ. Критическая частота волновода, рассчитанная по формуле (4.4) для данного района работ, составляет 250 Гц.



Рисунок 4.10 – внешний вид дыхательного аппарата FROGS. Фото с сайта [83]

Во время одного из экспериментов легководолаз перемещался вблизи дна со скоростью ~ 0.5 м/с, в 16:54:30 остановился над гидрофоном № 7 антенны, до 16:57:30 сохранял неподвижность на расстоянии менее 0.5 м над ним и дышал в обычном для себя режиме (отдыхал), затем удалился со скоростью ~ 0.5 м/с, находясь все время вблизи дна [221].

На рисунке 4.11 показаны спектрограммы сигналов с гидрофона № 7, над которым остановился и сохранял неподвижность легководолаз и гидрофона № 8, который находился на расстоянии 3 м от гидрофона № 7. Масштабы уровней условные. Спектрограммы сигналов, поступавших с других гидрофонов антенны, имеют подобный вид.

На рисунках 4.12 и 4.13 показаны фрагменты осциллограмм и спектрограмм сигналов, поступавших с гидрофонов № 7 и № 8, рисунок 4.11 в течении трех дыхательных циклов. На осциллограммах заметны импульсные помехи от щелкающих морских обитателей и узкополосные помехи, соответствующие гармоникам питающей сети. На осциллограммах

красными и синими рамками выделены фрагменты, соответствующие выдохам и вдохам, которые далее использованы для анализа. Ширина полосы анализа на спектрограммах 2.5 Гц (время анализа 0.4 с), см. п. 4.1.

Из данных спектрограмм видно, что в отличие от легководолаза с аквалангом, см. п. 4.2, основная часть энергии шумов легководолаза с данным экземпляром ребризера FROGS сосредоточена на частотах ниже 400 Гц, в начале вдохов наблюдаются затухающие импульсы длительностью порядка 0.2 с, обусловленные срабатыванием клапанов подачи дыхательной смеси.

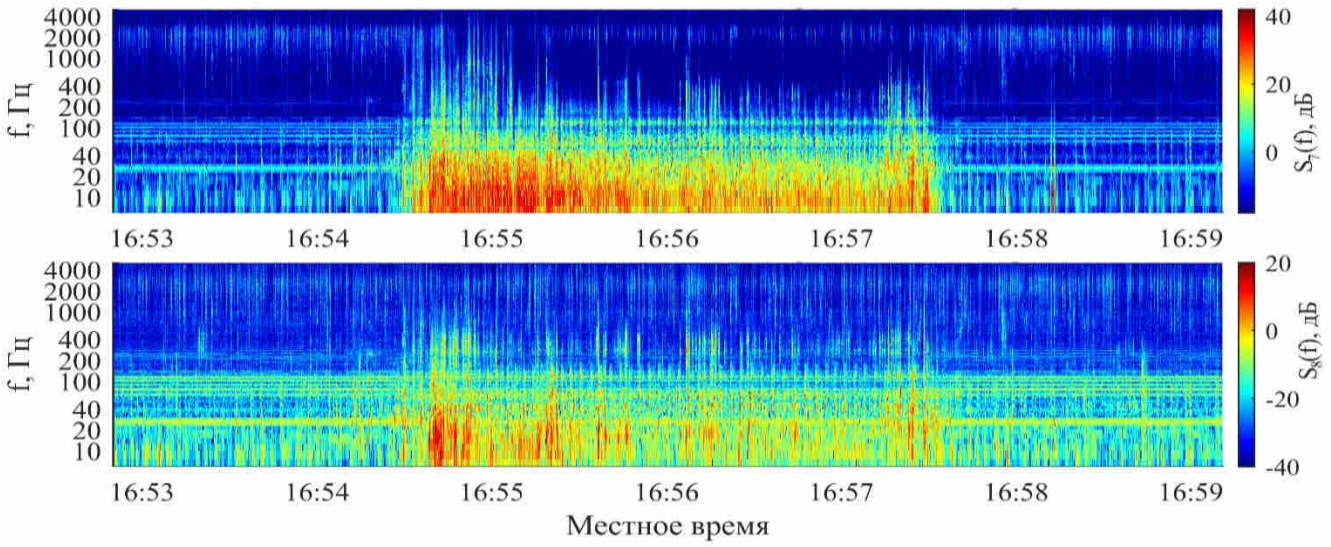


Рисунок 4.11 – Спектрограммы шумов легководолаза с ребризером FROGS: вверху – сигнала, поступавшего с гидрофона № 7, внизу – сигнала, поступавшего с гидрофона № 8

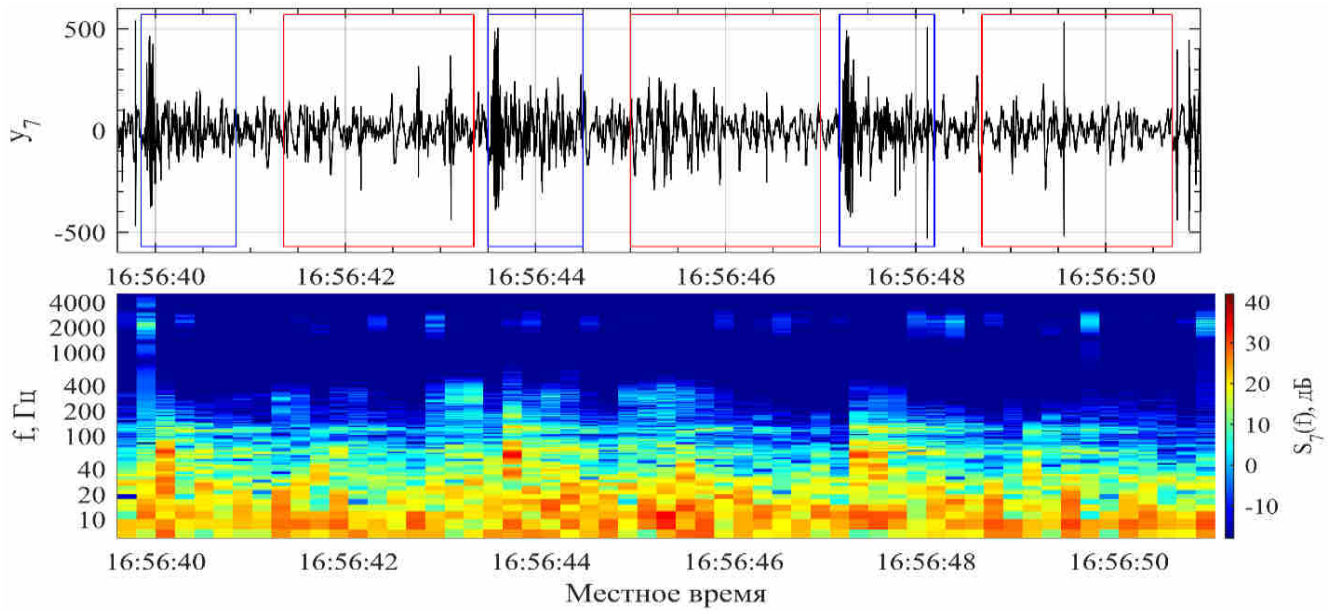


Рисунок 4.12 – Фрагменты осциллограммы и спектрограммы сигнала с гидрофона № 7, когда над ним сохранял неподвижность легководолаз с ребризером FROGS

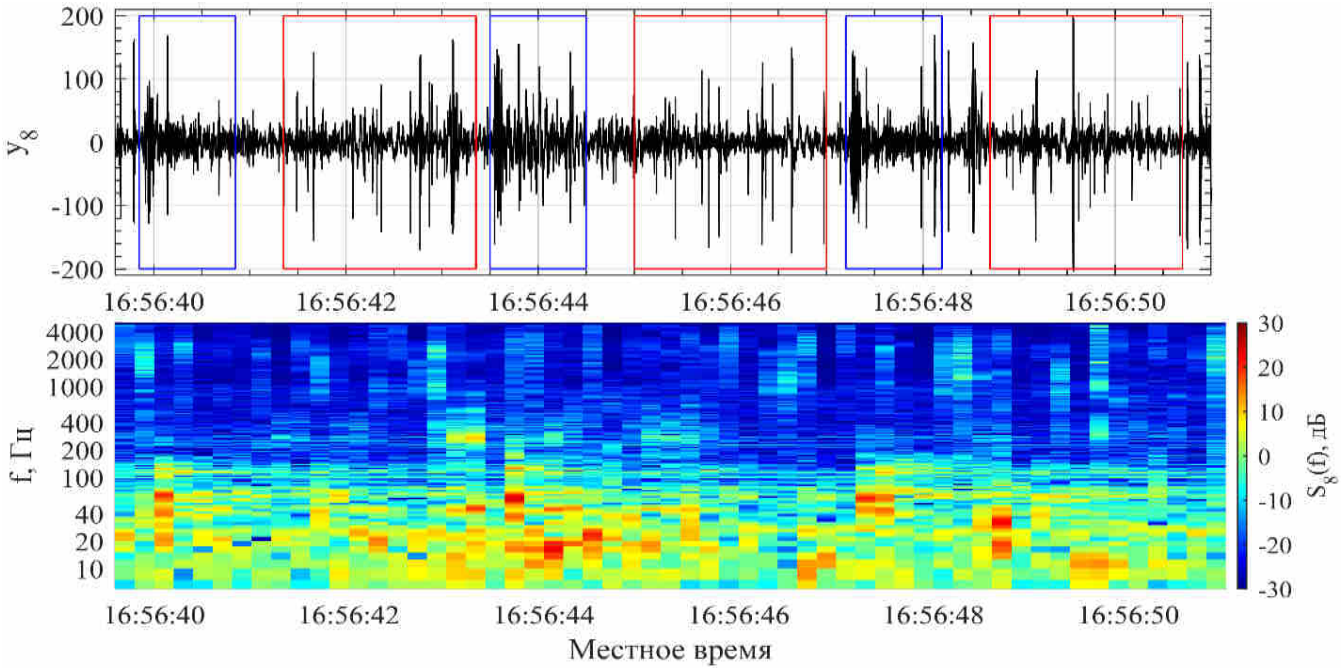


Рисунок 4.13 – Фрагменты осциллограммы и спектрограммы сигнала с гидрофона № 8, когда легководолаз с ребризером FROGS сохранял неподвижность над гидрофоном № 7

На рисунке 4.14 линиями черного, синего и красного цвета показаны усредненные спектральные уровни сигналов, поступавших с гидрофонов № 7 и № 8 в частотных полосах шириной 2.5 Гц, соответствующие шумовому фону на интервале 16:53:00 – 16:53:10, шумам при вдохе и выдохе неподвижного легководолаза с ребризером на выделенных рамками на рисунках 4.12 и 4.13 интервалах времени. Прямые линии черного цвета соответствуют наклону 6 дБ/октава.

На рисунке 4.15 линиями черного, синего и красного цвета показаны усредненные по трем фрагментам, см. рисунки 4.12 и 4.13, гистограммные оценки нормированных к (0, 1) ПРВ мгновенных значений звукового давления шумового фона, вдоха и выдоха сигналов с гидрофонов № 7 и № 8 в полосах частот 5 – 30 Гц и 30 – 400 Гц. Красными пунктирными линиями показаны нормированные гауссовские кривые. Отличие ПРВ мгновенных значений шумового от гауссовского распределения на частотах свыше 30 Гц обусловлено наличием вышеуказанных импульсных помех.

Во всех случаях в качестве модели ПРВ предпочтительно использовать три члена ряда Грама–Шарлье типа А или смесь гауссовских распределений [157, 158, 217]. Значения коэффициента эксцесса в полосе частот 5–30 Гц при вдохах меньше, чем у шумового фона, наибольшие отклонения от гауссовского закона наблюдаются во время выдохов, наименьшие – во время вдохов. Асимметрией распределения мгновенных значений звукового давления можно пренебречь.

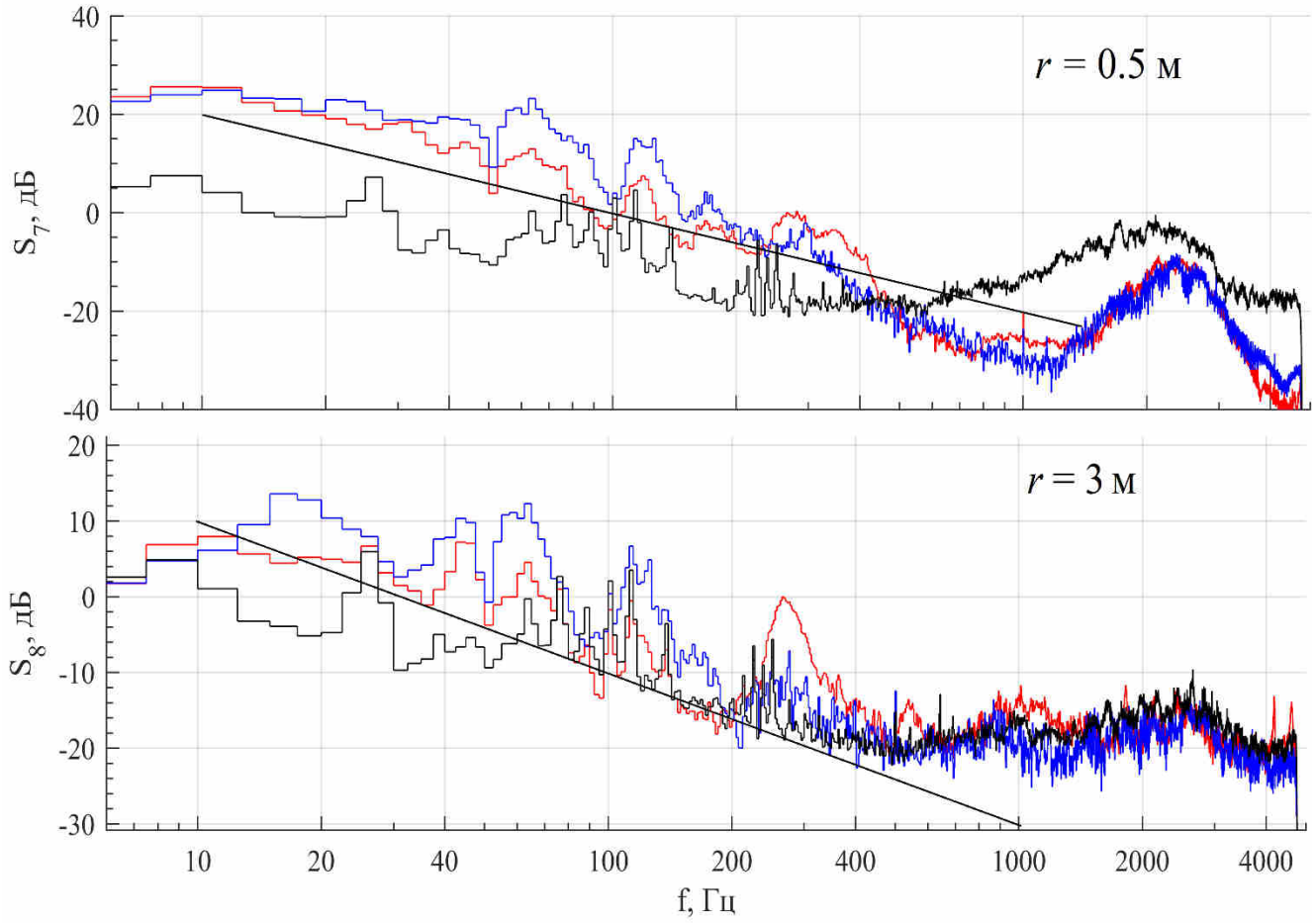


Рисунок 4.14 – Линиями черного, синего и красного цвета показаны усредненные спектральные уровни шумового фона, вдохов и выдохов на расстояниях 0.5 и 3 м от легководолаза с ребризером FROGS. Прямые линии соответствуют наклону 6 дБ/октава

На рисунке 4.16 показаны осциллограммы сигналов на выходах программно-реализованных энергетических приемников, рисунок 3.15, с полосой пропускания 30–400 Гц и временем накопления 0.2 с: вверху – для сигнала, поступавшего с гидрофона № 7, над которым сохранял неподвижность легководолаз, внизу – для сигнала, поступавшего с гидрофона № 8, отстоящего на 3 м. Масштабы уровней условные.

В данном эксперименте превышение шумов легководолаза над шумами акватории (отношение сигнал/помеха) для гидрофона № 7, над которым сохранял неподвижность легководолаз составляло порядка 30 дБ, а для удаленного на 3 м гидрофона № 8 составляло порядка 15 дБ. При увеличении расстояния от легководолаза с данным ребризером свыше 5 м наблюдалось более быстрое затухание создаваемого им шума, чем для легководолаза с аквалангом, что свидетельствует о меньших уровнях составляющих монопольного типа, по сравнению с уровнями дипольного и квадрупольного типов его шумоизлучения, а также более высоким значением критической частоты акустического волновода, образованного водным слоем акватории, в которой выполнялись исследования.

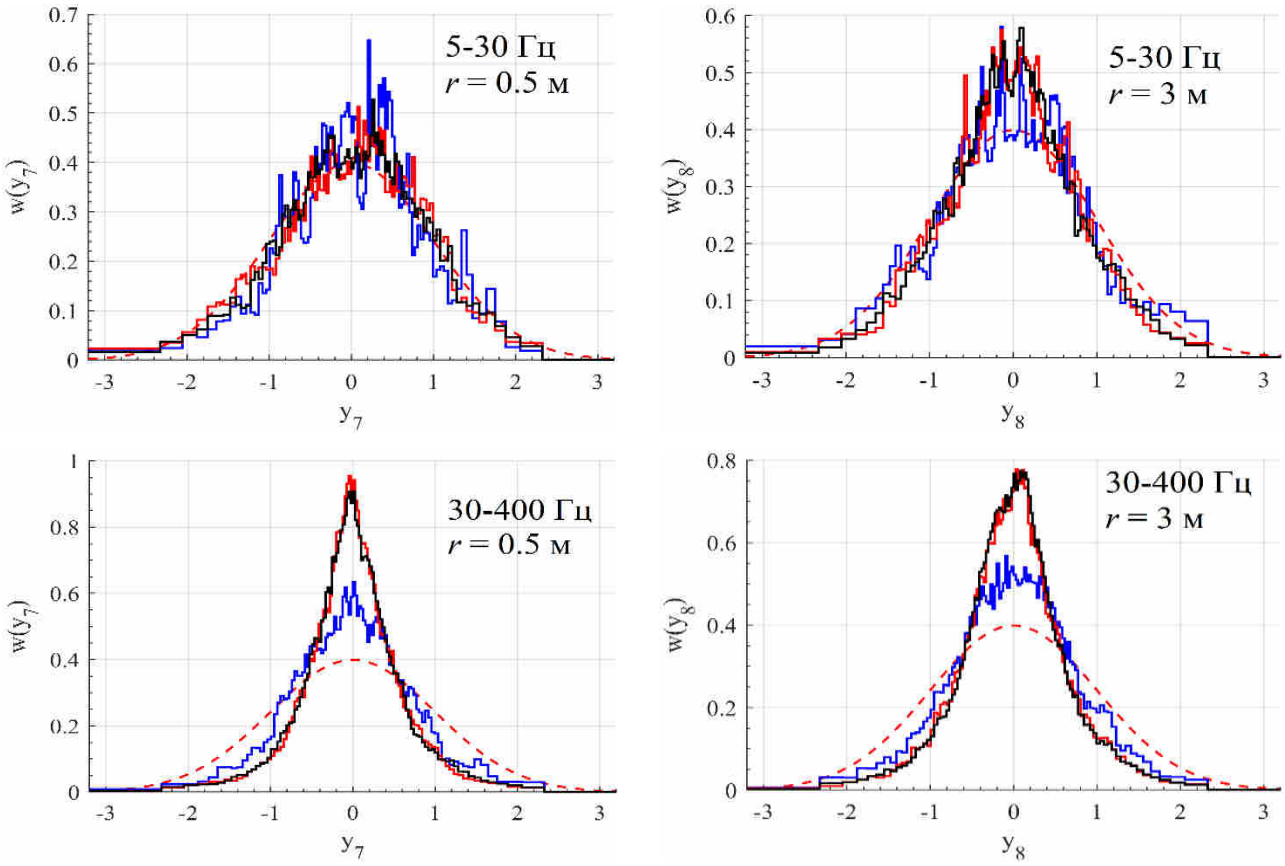


Рисунок 4.15 – Усредненные гистограммные оценки нормированных к (0, 1) мгновенных значений звукового давления шумового фона, вдоха и выдоха в частотных полосах 5–30 Гц и 30–400 Гц легководолаза с ребризером FROGS на расстояниях 0.5 м и 3 м от него

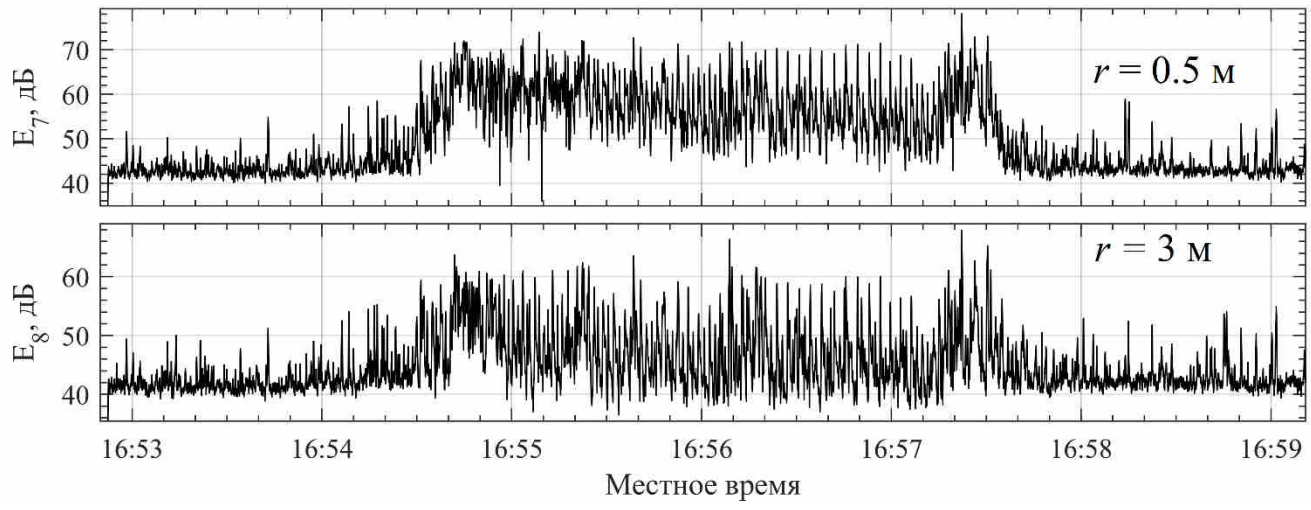


Рисунок 4.16 – Осциллограммы шумов легководолаза с ребризером FROGS на выходах энергетических приемников. Полоса частот 30 – 400 Гц, время накопления 0.2 с

Необходимо отметить, что снижением шумоизлучения легководолазов с дыхательными аппаратами замкнутого цикла (ребризерами) занимаются специалисты многих стран мира. Обнаружение легководолазов с такими дыхательными аппаратами, особенно когда они

сохраняют неподвижность, например во время отдыха, становится все более проблематичным. Тем не менее, даже при снижении шумоизлучения дыхательных аппаратов ниже шумов акваторий, существует неустранимый признак присутствия человека под водой в виде его пульсовых волн, которые удается регистрировать в малошумных условиях [222], особенно при использовании направленных приемных систем, таких как комбинированные приемники и антенные решетки.

Для оценивания частоты дыхания легководолаза, на рисунке 4.17 показаны осциллограмма и спектрограмма верхней огибающей сигнала, поступавшего с гидрофона № 5, отстоящего на 3 м от гидрофона № 7, при выполнении описываемого эксперимента. Огибающая, как и в п. 4.2, получена с помощью энергетического приемника, рисунок 3.15. Полоса пропускания фильтра энергетического приемника составляла 30 – 400 Гц, время накопления T_{int} составляло 0.2 с, время интегрирования в (3.5) $T = 20$ с. На спектрограмме использовано линейное отображение спектральных уровней в цвета RGB–палитры. Масштабы уровней условные. Составляющие на частотах менее 0.05 Гц следует рассматривать только как ориентировочные. Спектрограммы огибающих сигналов с других гидрофонов имеют подобный вид.

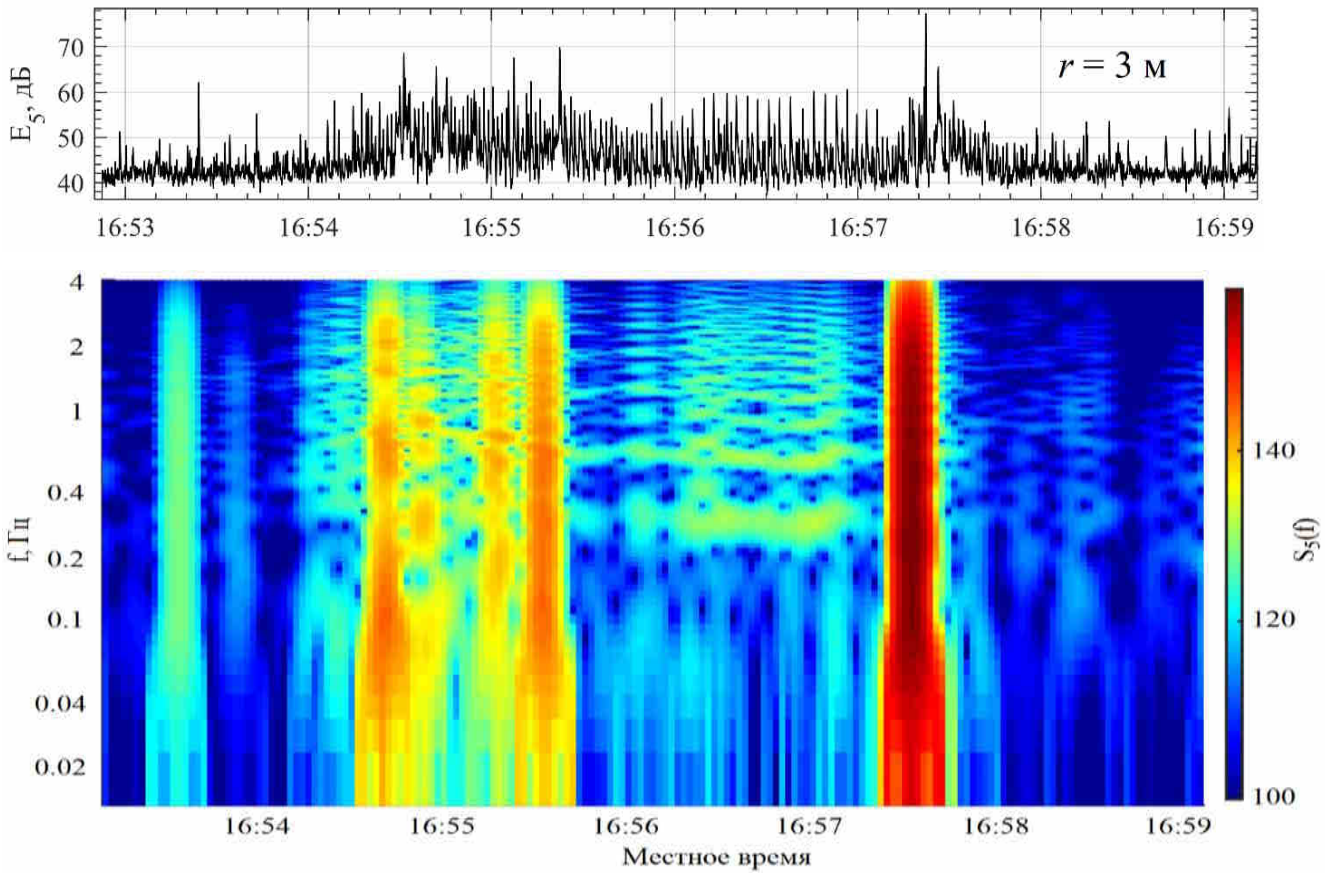


Рисунок 4.17 – Осциллограмма и спектрограмма верхней огибающей шума легководолаза с ребризером FROGS в полосе частот 30–400 Гц на расстоянии 3 м от него

Отметим, что вид спектрограмм огибающих на рисунках 4.9 и 4.17 отличается. У легководолаза с аквалангом наблюдаются более плавные, чем у легководолаза с ребризером, пульсации огибающей, соответствующие дыхательным циклам. Вследствие этого на спектрограмме огибающей легководолаза с ребризером более ярко выражены гармоники основной частоты дыхательного ритма.

На рисунке 4.18 линиями синего, красного и черного цвета показаны нормированные спектральные уровни огибающей, соответствующие сечениям спектрограммы, рисунок 4.17, в моменты времени: 16:56:00 – легководолаз сохранял неподвижность, 16:57:00 – легководолаз сохранял неподвижность, 16:58:30 – шумовой фон акватории. Нормирование выполнено так, чтобы максимальное значение на графике было равно единице. Частота дыхания легководолаза в указанные моменты времени (с учетом времени накопления 20 с) составляла 0.27 Гц и 0.32 Гц соответственно (16.2 и 19.3 дыхательных циклов в минуту). В связи с тем, что шумоизлучение легководолаза с ребризером ниже, чем шумоизлучение легководолаза с аквалангом, после вышеуказанного нормирования в шумовом фоне, в данном масштабе, стали более заметными колебания огибающей, обусловленные микросейсмами. Колебания огибающей, обусловленные микросейсмами, в данном эксперименте не превышают 15% от максимального уровня огибающей шумов дыхания. Близкие результаты были получены при использовании других гидрофонов антенны и других полос частот.

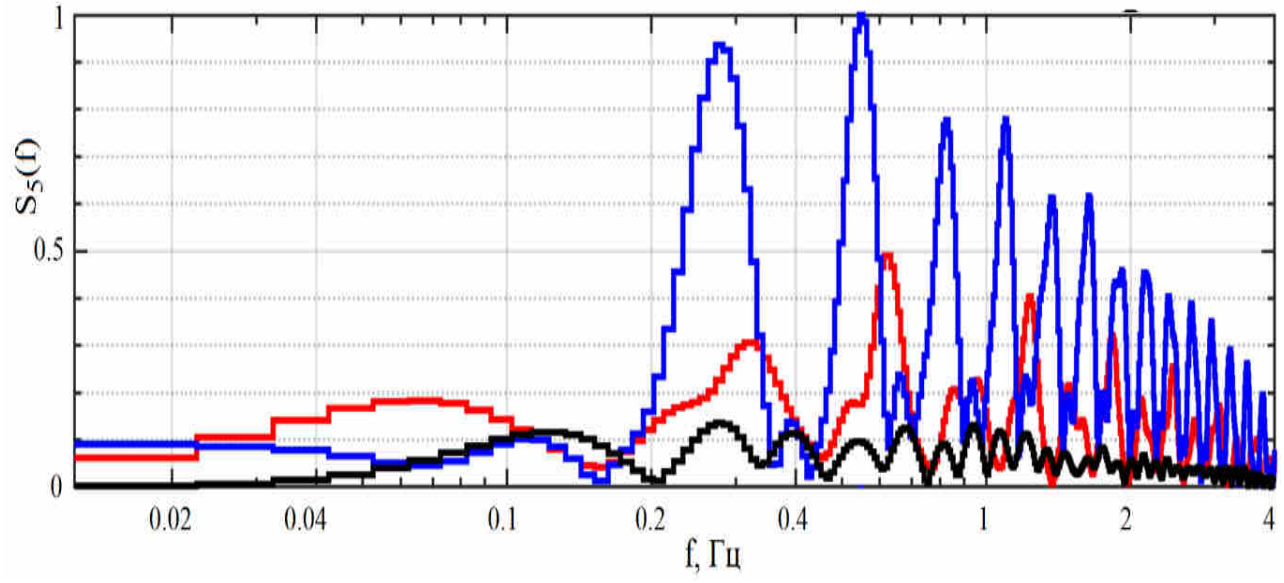


Рисунок 4.18 – Спектральные уровни огибающих шумов легководолаза с ребризером FROGS в 16:56:00, 16:57:00, 16:58:30 (синяя, красная и черная линии соответственно) на расстоянии 3 м от него

Для нижних огибающих получены аналогичные результаты. Таким образом, описанный подход позволяет дистанционно контролировать изменения со временем дыхательного ритма и элементов паттерна дыхания [210] легководолазов как с аквалангом, так и с ребризером на расстояниях в несколько метров от одиночного ненаправленного гидрофона. Если использовать вместо одиночного гидрофона приемные устройства, обладающие направленными свойствами, такие как комбинированные приемники или антенные решетки, удается отслеживать частоту и особенности паттерна дыхания легководолазов на бóльших расстояниях.

Весьма важным является вопрос о помехах приему обусловленной дыханием легководолазов модуляции огибающих ГА шумов, создаваемых подверженными качке на волнении и движущимися плавсредствами. Сравнение показанных на рисунках 4.9–4.18 спектрограмм и частотных зависимостей спектральных уровней огибающих шумов легководолазов с показанными на рисунках 3.16 и 3.17 спектрограммами и частотными зависимостями огибающих спектральных уровней шумов в другой мелководной акватории и проходящей моторной лодки позволяет сделать выводы как об их отличии, так и о возможности принятия ошибочных решений, например, если рассматривать обособленно спектрограммы только канала p на рисунке 3.16. Изучение влияния данных помех не входило в задачи диссертационной работы.

Тем не менее, описанные в п. 3.3 и п. 4.3 результаты исследований позволяют сделать вывод, что уменьшения влияния этих помех можно добиться не только путем выбора предпочтительной полосы частот для выделения огибающих, как предложено в [51–58], но и при использовании комбинированных приемников, за счет анализа модуляции огибающих не только звукового давления, но и компонент его градиента [217]. Для повышения точности спектрального анализа по сравнению с использованным, могут быть применены подходы на основе построения АР, СС и АРСС моделей [115, 130–134], а также другие параметрические методы спектрального оценивания.

4.4 Определение местоположения и скорости движения легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла по его гидроакустическим шумам

Вопросы обнаружения и определения местоположения легководолазов с помощью средств активной гидролокации рассмотрены в [2, 58, 59]. Вопросы обнаружения и определения местоположения легководолазов в пассивном режиме рассматриваются в работах [223–225].

В п. 4.4 описаны результаты специально подготовленного и выполненного эксперимента [226–228], подтвердившего возможность использования ГА шумов движущегося легководолаза с аквалангом АВМ-12-К [82] для определения его местоположения и скорости движения в

прибрежной морской акватории интенсивного судоходства (залив Петра Великого Японского моря) при состоянии моря 2 балла на удалениях до 250 м в условиях импульсных помех, создаваемых щелкающими морскими обитателями, с помощью четырех ненаправленных гидрофонов давления, лежащих на дне вдоль прямой линии длиной 44 м. Глубина места в районе выполнения эксперимента 10 м, дно – песок, камни, редкие водоросли, наклон дна отсутствует. Критическая частота волновода, оцененная с использованием соотношения (4.4), составляет: $f_0 \approx 108$ Гц при $c_w = 1500$ м/с и $c_b = 1600$ м/с, $f_0 \approx 68$ Гц при $c_w = 1500$ м/с и $c_b = 1800$ м/с.

На рисунке 4.19 сплошной линией показана траектория движения легководолаза (удаление – приближение) по данным буксируемого им по поверхности воды во время эксперимента приемника-регистратора сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Стрелки соответствуют направлению движения, центрами кружков и звездочек на траектории показаны результаты определения координат легководолаза в одни и те же моменты времени, см. далее, рисунок 4.25 д), с помощью систем ГЛОНАСС/GPS и по его ГА шумам. Размеры кружков примерно соответствуют погрешности определения координат легководолаза с учетом отклонения от вертикали фала, на котором он буксировал по поверхности буй с приемником–регистратором сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

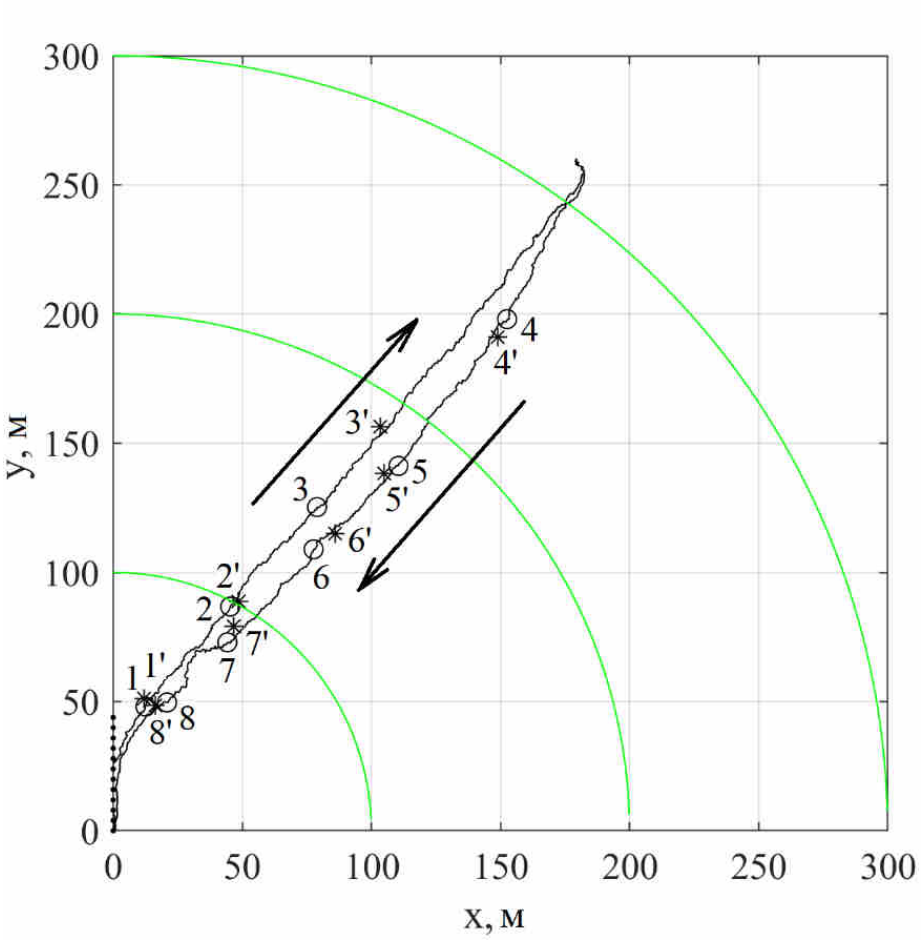


Рисунок 4.19 – Траектория движения и результаты определения местоположения легководолаза

Для приема создаваемых легководолазом шумов использовалась описанная в разделе 2 гибкая реконфигурируемая 12 – элементная антенна, уложенная на дно вдоль линии, совпадающей с осью y на рисунке 4.19, на гидрофоны были надеты чехлы из ворсистой ткани. Положения гидрофонов показаны на рисунке 4.19 точками на вертикальной оси вблизи начала координат. Расстояния между гидрофонами антенны составляли 4 м, гидрофон № 1 находился ближе всего к берегу, в точке, выбранной в качестве начала координат (x = 0 м, y = 0 м), гидрофон № 2 в точке с координатами x = 0 м, y = 4 м, и т.д., гидрофон № 12 – в точке с координатами x = 0 м, y = 44 м.

На рисунке 4.20, сверху вниз, показаны осциллограммы звукового давления сигналов, поступавших с гидрофонов № 1, № 5 и № 8 во время эксперимента. По оси ординат – звуковое давление в Па. На осциллограмме видны импульсные помехи от щелкающих морских обитателей, амплитуды многих из них превышали 10 Па.

На рисунке 4.21, сверху вниз, приведены спектрограммы сигналов, показанных на рисунке 4.20. На данной и последующих спектрограммах разрешающая способность по частоте Δf = 1 Гц, шкала уровней – в дБ относительно 1 мкПа. Видно, что как и в экспериментах, описанных в п .4.2 и п. 4.3, бóльшая часть энергии шумоизлучения легководолаза была сосредоточена в области частот 20–1000 Гц.

Дискретные составляющие в области 40–400 Гц, наиболее заметные на интервалах времени 13:45–13:58, 14:01–14:05 и начиная с 14:12 вызваны маневрированием на удалении порядка 2 миль морского парома.

Легководолаз погрузился вблизи берега в 13:40:30, и передвигаясь с помощью ласт на расстоянии 1–2 м от дна, приблизился к антенне в районе гидрофона № 1.

На интервале 13:41:35 – 13:41:40 он прошел над гидрофоном № 1 (начало координат на рисунке 4.19) в направлении к гидрофону № 6 (точка с координатами x = 0, y = 20 м).

На интервале 13:42:10 – 13:42:15 он прошел над гидрофоном № 6, на интервале 13:42:30 – 13:42:40 прошел над гидрофоном № 8 (точка с координатами x = 0, y = 28 м), повернул направо и начал удаляться под постоянным углом к линии антенны, ориентируясь по компасу.

Пройдя под водой, согласно данным приемника–регистратора ГЛОНАСС/GPS расстояние 320 м в этом направлении, легководолаз в 13:55:07 поднялся на поверхность, сориентировался, а затем погрузился и пошел в обратном направлении.

Ориентировочно в 14:06:37 легководолаз всплыл на удалении порядка 50 м от гидрофона № 8, сориентировался, погрузился и пошел далее. Ориентировочно в 14:09:20 он вернулся к антенной решетке в районе гидрофона № 8, затем повернул налево и прошел над линией

гидрофонов к гидрофону № 1, в 14:10:00 прошел над ним и пошел к берегу, где поднялся на поверхность.

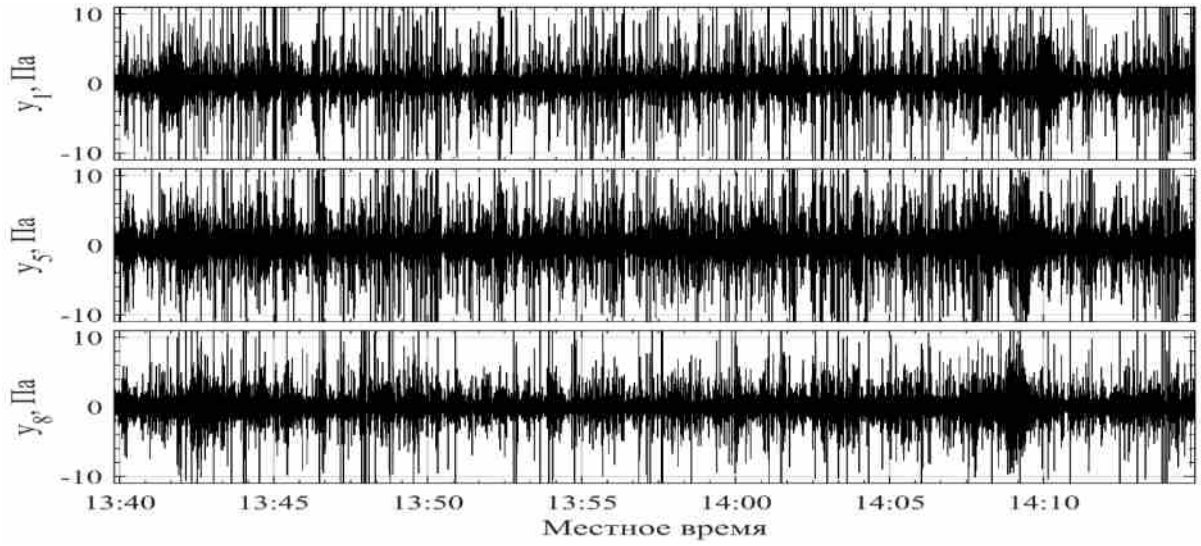


Рисунок 4.20 – Осциллограммы звукового давления сигналов $y_1(t)$, $y_5(t)$, $y_8(t)$, поступавших с гидрофонов № 1, № 5 и № 8.

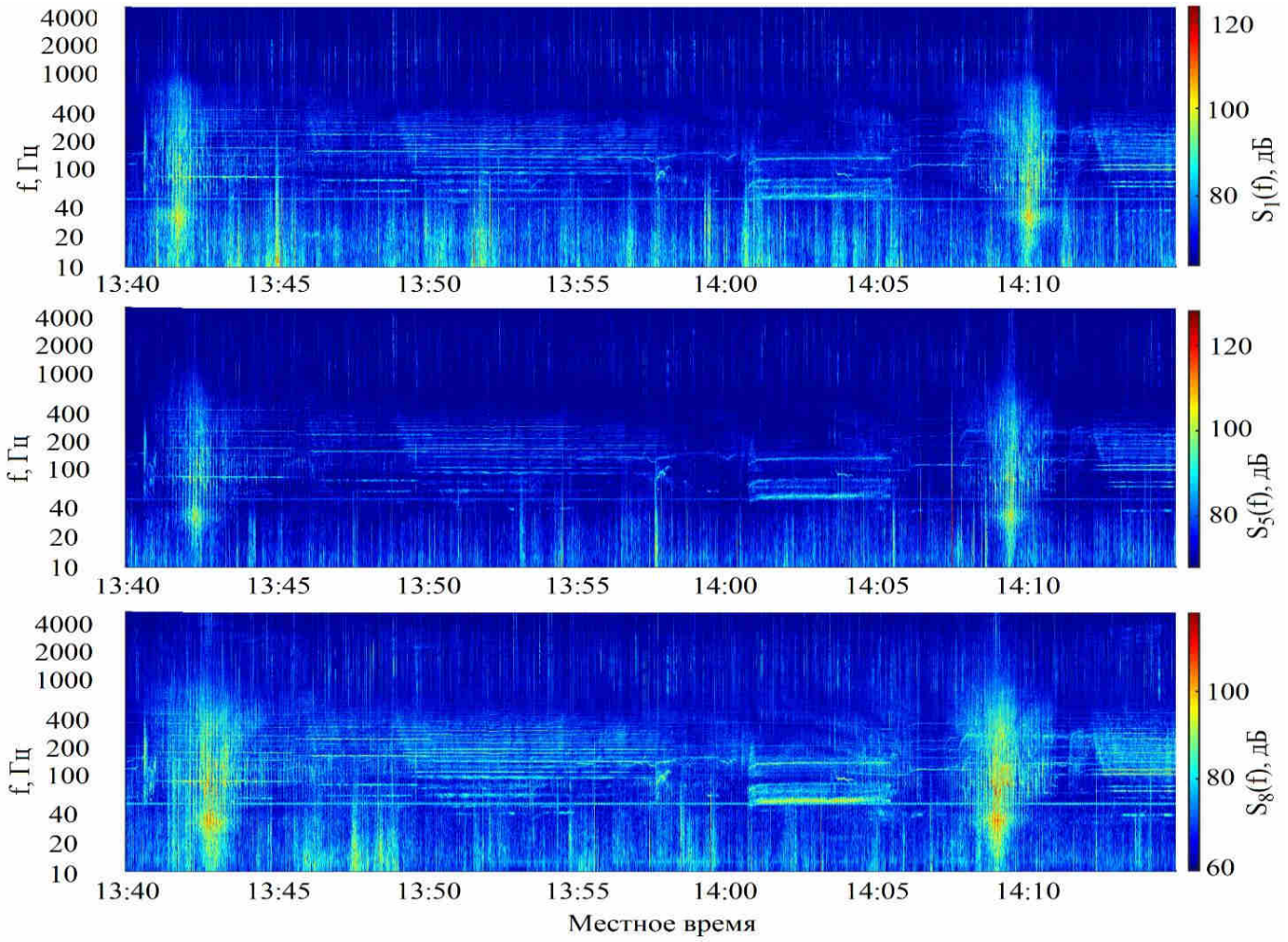


Рисунок 4.21 – Спектрограммы звукового давления сигналов $y_1(t)$, $y_5(t)$, $y_8(t)$, сверху вниз, поступавших с гидрофонов № 1, № 5 и № 8. Уровни в дБ относительно 1 мкПа/Гц$^{1/2}$

На рисунках 4.22 – 4.24 показаны осциллограммы и спектрограммы фрагментов сигналов, воспринимавшихся гидрофонами № 1, № 5 и № 8 при проходе легководолаза над ними. По оси ординат на осциллограммах – звуковое давление в Па, разрешающая способность по частоте на спектрограммах составляет 1 Гц. Рамкой на рисунке 4.23 выделены сигналы во время одного из выдохов, когда легководолаз проходил над гидрофоном № 8. Расстояния от гидрофона № 8 до гидрофонов № 5 и № 1 в данном эксперименте составляли 12 м и 28 м соответственно. Из анализа спектрограмм видно, что уровень шумов акватории на частоте 1 кГц составляет 60–65 дБ относительно 1 мкПа/Гц$^{1/2}$, когда можно пренебречь импульсными помехами. Во время действия импульсных помех уровень шумов акватории соответствует состоянию глубокого моря до 7 баллов по шкале Бофорта.

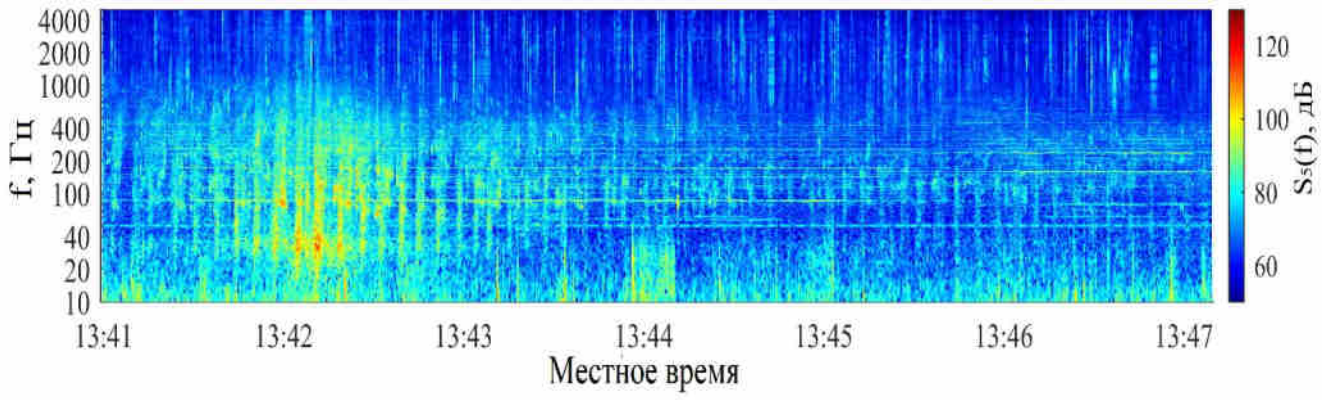


Рисунок 4.22 – Спектрограмма сигнала, поступавшего с гидрофона № 5 на интервале 13:41–13:47

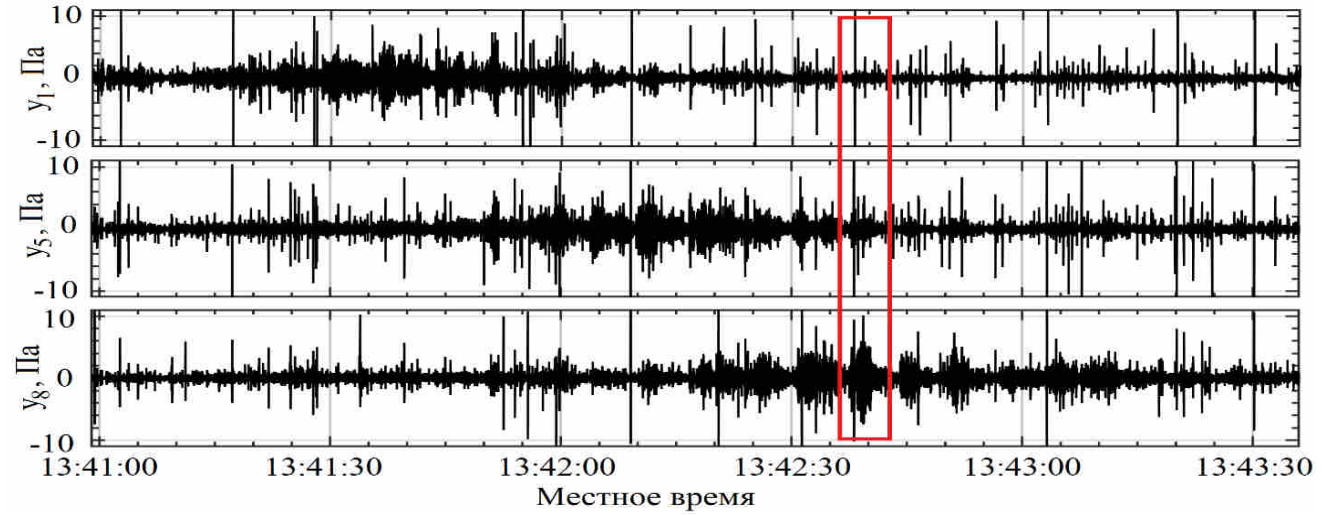


Рисунок 4.23 – Осциллограммы звукового давления фрагментов сигналов $y_1(t)$, $y_5(t)$, $y_8(t)$, поступавших с гидрофонов № 1, № 5 и № 8 при проходе легководолаза. Рамкой выделены сигналы во время одного из выдохов над гидрофоном № 8

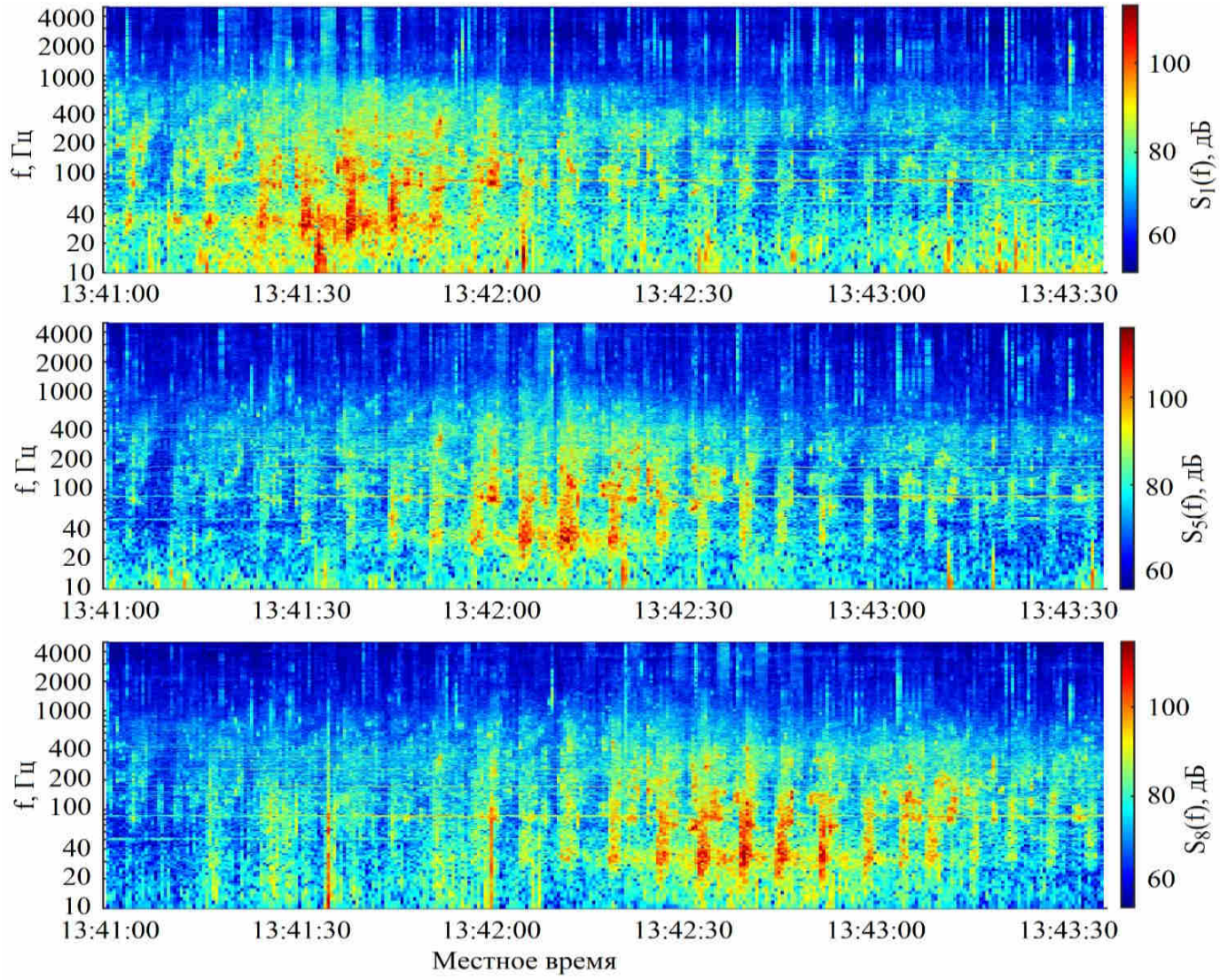


Рисунок 4.24 – Спектрограммы, сверху вниз, фрагментов сигналов, поступавших с гидрофонов № 1, № 5 и № 8 при проходе легководолаза. Уровни в дБ относительно 1 мкПа/Гц$^{1/2}$

Заметные на рисунках 4.21 – 4.24 различия в форме и спектральном составе сигналов, воспринимавшихся гидрофонами № 1, № 5 и № 8 обусловлены наличием не только монопольных, но и дипольных, квадрупольных и т.д. составляющих, а также направленностью шумоизлучения легководолаза и зависимостью затухания звука от частоты.

Из спектрограмм, показанных на рисунках 4.21 – 4.24 видно, что при выполнении данного эксперимента, в отличие от экспериментов, описанных в п. 4.2 и 4.3, наиболее высокие спектральные уровни ГА шума легководолаза во время выдохов наблюдались в полосе частот 20 – 300 Гц, что обусловлено настройкой его дыхательного автомата. Заметно, что в этой частотной области наблюдаются различия в зависимостях от частоты спектральных уровней сигналов с разных гидрофонов, обусловленные особенностями распространения НЧ звуковых волн в условиях мелкого моря [238–242], а также наличием дипольных, квадрупольных и др.

составляющих шумоизлучения легководолаза. Это ограничивает возможность использования алгоритмов, основанных на суммировании сигналов с нескольких гидрофонов в широких полосах частот [15–17]. Расчеты показали, что сужение полосы частот не приводит к существенному улучшению окончательных результатов.

Поэтому для определения местоположения легководолаза был применен метод, используемый в системах пассивной звуковой локации [243] и в гиперболических навигационных системах. Идея метода заключается в следующем. Как известно, гипербола – это геометрическое место точек на плоскости, разность расстояний от которых до двух заданных точек (фокусов гиперболы) есть величина постоянная [244]. Каждому значению разности расстояний до фокусов соответствует своя гипербола. Если в произвольной точке, лежащей на ветви воображаемой гиперболы, поместить источник сигналов (например источник гидроакустического шума), а в ее фокусах установить приемники этих сигналов (например гидрофоны), то разность расстояний от источника сигналов до приемников, в силу указанного свойства гиперболы, будет равна разности времен прихода (задержке прихода) к ним излучаемых источником сигналов, умноженной на скорость распространения сигналов. Если среда распространения сигналов является однородной и изотропной, то при перемещении источника по ветви данной гиперболы величина этой задержки останется постоянной. И обратно, каждому значению разности времен прихода сигналов будет соответствовать своя гипербола семейства, определяемого координатами его фокусов [243].

При наличии возможности использовать еще два приемника, образующих подобную систему, координаты точки пересечения гипербол будут совпадать с координатами источника сигналов.

Если расстояния от фокусов до точки на гиперболе вдвое превышают расстояние между фокусами, гиперболы можно заменить их асимптотами (линиями пеленга) [243, 244].

В соответствии с изложенным, для определения расстояния до легководолаза оценивались разности времен прихода создаваемого им шума к гидрофонам 12-элементной антенны: гидрофоны № 1 и № 5 составляли первую пару приемников, гидрофоны № 8 и № 12 – вторую пару. Расстояния между гидрофонами в каждой из пар составляли 16 м. Координаты этих гидрофонов рассматривались как фокусы двух семейств воображаемых гипербол.

Строились гиперболы возможных положений легководолаза относительно каждой из пар гидрофонов, координаты точки пересечения этих гипербол соответствовали его координатам, последовательное соединение этих точек давало траекторию легководолаза. Подробности данной процедуры описаны в [226].

Весьма важным является вопрос о выборе метода определения задержек прихода шумов легководолаза к входящим в пары гидрофонам, особенно при малых отношениях сигнал/помеха

и с учетом зависимости спектра шумоизлучения легководолаза от расстояния, см. рисунок 4.24. В данном исследовании в качестве этих задержек использовались значения сдвигов по времени, при которых достигались максимумы взаимно–корреляционных функций (ВКФ) сигналов, принимаемых входящими в пары гидрофонами в различных частотных полосах.

На рисунке 4.25 представлены зависимости от времени характеристик, использованных для определения координат легководолаза.

На рисунке 4.25 а), б) показаны осциллограммы сигналов E_1 и E_5 на выходах подключенных к гидрофонам № 1 и № 5 программно–реализованных энергетических приемников, рисунок 3.15, у которых полоса пропускания фильтра составляет $\Delta f = 30 - 1200$ Гц, а время накопления интегратора $T = 0.2$ с.

Видно, что максимальное превышение шума легководолаза над шумами акватории составляло порядка 20 дБ, когда он проходил над данными гидрофонами.

На рисунке 4.25 в), г) показаны контуры линий уровня последовательности оценок нормированных ВКФ $R_{1-5}(t, \tau_{1-5})$ сигналов $y_1(t)$ и $y_5(t)$ с гидрофонов № 1 и № 5 (1-я пара гидрофонов) и ВКФ $R_{8-12}(t, \tau_{8-12})$ сигналов $y_8(t)$ и $y_{12}(t)$ с гидрофонов № 8 и № 12 (2-я пара гидрофонов) при времени накопления $T = 0.2$ с во время эксперимента. Красным, зеленым и синим цветом обозначены области, в которых ВКФ превышали значения 0.5, 0.4 и 0.25 соответственно.

Корреляционная функция $R_{1-5}(t, \tau_{1-5})$ определялась с помощью соотношения [11, 12]:

$$R_{1-5}(t, \tau_{1-5}) = \frac{1}{\sigma_1(t)\sigma_5(t)} \int_{t-T}^{t} y_1(\theta) y_5(\theta + \tau_{1-5}) d\theta, \qquad (4.5)$$

где $\sigma_1(t)$ и $\sigma_5(t)$ – среднеквадратические отклонения сигналов $y_1(t)$ и $y_5(t)$ на интервале $[t\text{-}T, t]$. Для вычисления интеграла в (4.5) использовался метод трапеций.

Корреляционная функция $R_{8-12}(t, \tau_{8-12})$ определялась аналогично. Значения τ_{1-5}, и τ_{8-12}, соответствующие максимумам ВКФ (4.5), использованы в качестве оценок вышеуказанных разностей времен прихода шума.

На рисунке 4.25 д) сплошной линией показана зависимость от времени расстояния от легководолаза до гидрофона № 1 (положение которого соответствует началу координат на рисунке 4.19) по данным приемника–регистратора сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, который он буксировал по поверхности. Точки, в которых определялось положение легководолаза по его шумоизлучению, соответствуют центрам кружков.

Как отмечалось ранее, размеры кружков примерно соответствуют погрешности определения координат легководолаза с учетом отклонения от вертикали фала, на котором он буксировал по поверхности буй с приемником–регистратором сигналов указанных спутниковых навигационных систем.

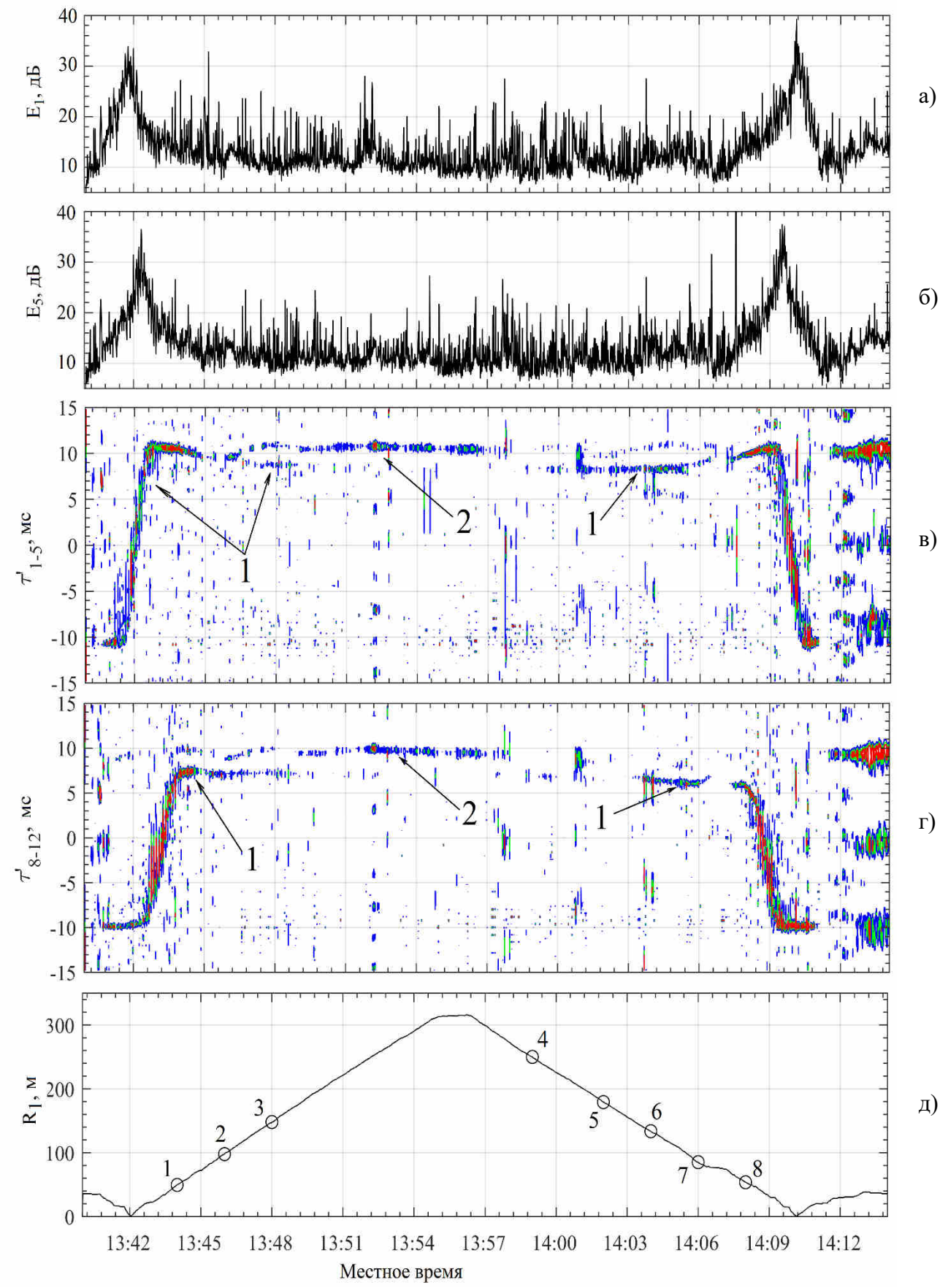


Рисунок 4.25 – Характеристики, использованные для определения траектории движения легководолаза. 1 – трасса легководолаза, 2 – трасса морского парома. Пояснения в тексте

Приведенная на рисунке 4.25 д) зависимость от времени расстояния до легководолаза позволяет оценить его скорость движения на разных участках траектории. Так, на интервалах времени 13:42–13:54 и 13:57–14:06 она была постоянной и составляла 0.4 м/с.

На интервале 13:48:30 – 13:58 (между точками 3 и 4) наблюдалась потеря «акустического контакта» с легководолазом из-за помех, создаваемых вышеуказанным маневрирующим паромом, хотя отдельные всплески корреляции более 0.25, заметные при визуальном плавном продолжении линии максимумов корреляционной функции см. рисунки 4.25 в) и г) наблюдались, в том числе, когда расстояние до легководолаза составляло 300 м. Необходимо отметить, что применимость такого продолжения на практике допустима не всегда.

По определенным с помощью соотношения (4.5) разностям времен прихода шума были уточнены фактические положения гидрофонов антенны на дне, а затем оценены координаты легководолаза, показанные на рисунке 4.19.

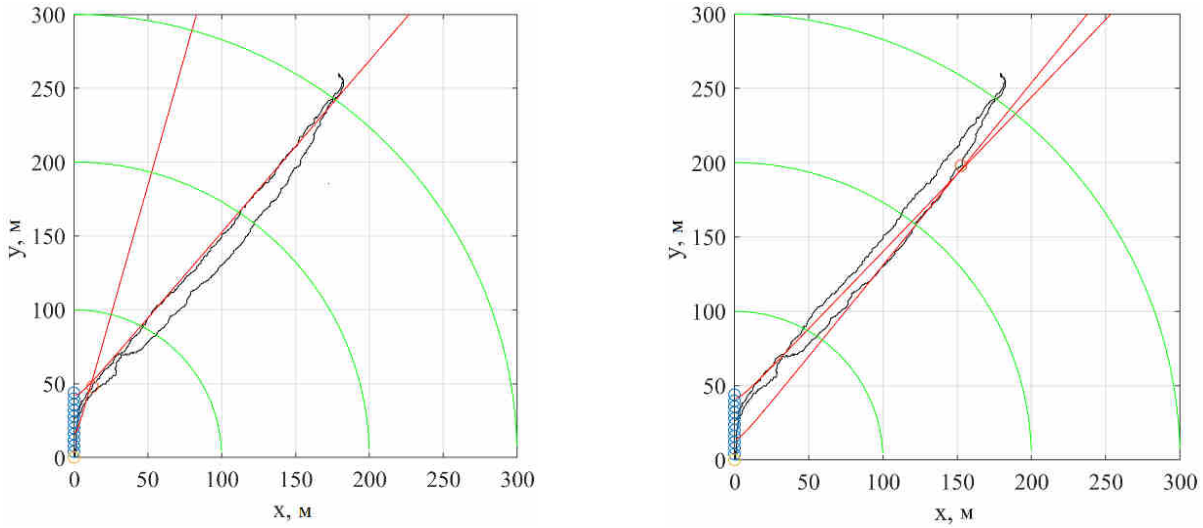
На рисунке 4.26 показаны гиперболы, использованные для определения координат легководолаза в точках 1 и 4, рисунки 4.19 и 4.25 д).

За исключением точек 3 и 3', невязка между положениями легководолаза, оцененными с помощью ГЛОНАСС/GPS, и экспериментальными оценками его локализации по акустическим задержкам $\tau'_{1\text{-}5}$ и $\tau'_{8\text{-}12}$ составила не более 10 м, что достаточно для многих практических применений. Для точек 3 и 3' невязка между акустическими данными и данными ГЛОНАСС/GPS, составила 50 м, что вызвано влиянием помех от парома (рисунок 4.25, трасса 2).

Таким образом в результате данного эксперимента подтверждена возможность уверенного определения в пассивном режиме в прибрежных акваториях с глубиной порядка 10 м и интенсивным судоходством координат движущегося легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла АВМ-12-К (и подобным ему по уровню шумоизлучения) на удалениях до 250 м с помощью двух пар лежащих на дне вдоль прямой линии гидрофонов давления, если расстояние между ними в каждой из пар составляет 16 м, а расстояние между центрами пар составляет 28 м.

Представляется важным отметить необходимость постоянного контроля временно́й изменчивости характеристик ГА шумовых помех, воздействовавших во время данного эксперимента на разные гидрофоны антенны, во избежание потери «акустического контакта» и «срыва сопровождения» [2] легководолаза. На рисунке 4.25 в), (зависимость задержки $\tau'_{1\text{-}5}$ от времени) на интервале 14:00:30–14:03:30 бесспорно видно наличие корреляции сигналов, воспринимавшихся гидрофонами № 1 и № 5 с уровнями 0.25 и более, а на отдельных интервалах более 0.5, что соответствует наличию «акустического контакта». В это же то время, на рисунке 4.25 г), (зависимость от времени задержки $\tau'_{8\text{-}12}$) на этом же интервале времени корреляция сигналов, воспринимавшихся гидрофонами № 8 и № 12 практически не заметна, особенно если

рассматривать зависимость $\tau'_{8\text{-}12}$ от времени обособленно, без учета сигналов, поступавших с гидрофонов № 1 и № 5.



а) б)

Рисунок 4.26 – Определение координат легководолаза по пересечению гипербол:
а) в точке 1, б) в точке 4 на рисунках 4.28 и 4.34 д)

На интервале 13:45 – 13:47 наблюдается обратная ситуация. Чтобы избежать потери «акустического контакта» или восстановить его после потери в подобных ситуациях на практике могут быть использованы известные процедуры трассового накопления и прогнозирования наиболее вероятного дальнейшего продолжения трассы исходя из ее непрерывности, предельной скорости движения, изменения направления движения и др. [2], в том числе с использованием методов искусственного интеллекта. Данная процедура трудно осуществима в автоматическом режиме в настоящее время.

При увеличении расстояний между входящими в пары гидрофонами, а также при увеличении расстояний между центрами пар увеличиваются углы пересечения гипербол, и соответственно должна повышаться точность определения координат источника шумоизлучения. В выполненном эксперименте такое увеличение дальности или улучшение точности определения координат легководолаза не наблюдалось. Это обусловлено уменьшением высоты и расширением главного максимума ВКФ (4.5) при увеличении расстояний между гидрофонами вследствие зависимости формы спектра шумоизлучения легководолаза и отношения сигнал/помеха от расстояния до него, см. рисунок 4.25 а), б).

Использование сигналов, поступающих с нескольких пар гидрофонов, входящих в использованную антенну и построение дополнительных гипербол в данном эксперименте не дало существенного увеличения дальности и точности определения координат. При меньших, чем в данном эксперименте уровнях ГА шумового фона, отсутствии помех от проходящих судов и

импульсных помех от щелкающих морских обитателей, а также при использовании вместо гидрофонов давления векторно–скалярных приемников удается определять координаты и скорость движения легководолазов на бóльших расстояниях.

Отметим, что при наличии адекватной акустической модели источника шумоизлучения удается экспериментально определять расстояния до него с помощью одиночного комбинированного приемника, в том числе в более сложных и менее однородных, чем морская вода средах, таких как хрупкие среды и биологические ткани [245–247]. Это подчеркивает важность уточнения моделей шумоизлучения легководолазов с дыхательными аппаратами открытого и замкнутого циклов, а также целесообразность использования комбинированных приемников.

4.5 Выводы по четвертой главе

1. В предположении равномерности потока пузырьков выдыхаемого в воду воздуха время анализа усредненных характеристик шумов легководолазов с аквалангом должно составлять не менее 0.12 с. При меньших значениях времени анализа будут заметны флуктуации, обусловленные тонкой структурой потока пузырьков.

2. Спектральный состав шумов легководолаза с аквалангом определяется его паттерном дыхания, а также конструкцией и настройкой используемого дыхательного автомата, от которых зависят размеры пузырьков выдыхаемого в воду воздуха и характеристики их потока.

3. При построении ГА систем контроля находящихся под водой легководолазов с аквалангами, характеристики шумоизлучения которых близки к характеристикам аквалангов АВМ-12-К и Aeris, достаточно ограничить полосу частот: снизу – частотами 20 – 40 Гц, сверху на уровне 1000 – 1200 Гц.

4. Наличие заметных на уровне шумов моря «пульсаций» уровней спектральных составляющих на частотах ниже 40 Гц может быть использовано как признак присутствия легководолаза с аквалангом или ребризером, в том числе выполняющим задержку дыхания, на дистанциях менее 10 м.

5. В качестве моделей ПРВ мгновенных значений звукового давления шума легководолаза как с аквалангом, так и с ребризером в полосах частот 10–300 Гц, 300–1500 Гц и др. рекомендуется использовать не гауссовское распределение, а сумму первых трех членов ряда Грама–Шарлье типа А или сумму гауссовских распределений. Целесообразность построения более точных моделей ПРВ мгновенных значений представляется спорной из-за малой длительности интервалов квазистационарности и, как следствие, недостаточного количества независимых выборочных значений, попадающих в интервалы группировки, соответствующие хвостам распределения (которые представляют наибольший интерес для оценивания вероятностных характеристик обнаружения и классификации шумов и сигналов).

6. Экспериментально показано, что основная часть энергии шума легководолаза с ребризером FROGS сосредоточена в области частот 10–400 Гц, наибольшие уровни шумов, в отличие от легководолаза с аквалангом, наблюдаются не во время выдохов, а во время вдохов.

7. Экспериментально показано, что анализ огибающих ГА шумов позволяет дистанционно контролировать изменения со временем дыхательного ритма находящегося под водой легководолаза как с аквалангом, так и с ребризером на расстояниях в несколько метров от ненаправленного гидрофона.

8. Экспериментально подтверждена возможность определения в пассивном режиме координат и скорости легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла на удалениях

более 200 м с невязкой, не превышающей 5–10 м по сравнению с его координатами, определенными с помощью спутниковых навигационных систем при использовании четырех гидрофонов, расположенных вдоль прямой линии длиной 44 м, когда приведенный уровень помех в полосе 1 Гц на частоте 1 кГц составляет 60–65 дБ относительно 1 мкПа/Гц$^{-0.5}$.

Заключение

В диссертации уточнены эмпирические модели, описывающие временну́ю изменчивость усредненных на интервалах длительностью 0.1–1 с спектральных и статистических характеристик НЧ ГА шумов, наблюдаемых в мелководных акваториях. Экспериментально подтверждено наличие интервалов квазистационарности и нестационарности этих характеристик, выполнено исследование шумов легководолазов.

Так как на интервалах квазистационарности спектральных и статистических характеристик ГА шумов в ряде случаев достижимы более высокие и стабильные результаты решения прикладных задач, выявление и использование в реальном масштабе времени этих интервалов является практически важным элементом адаптации приемных ГА средств к изменениям подводных шумов. Для выяснения причин появления интервалов квазистационарности и нестационарности, а также конкретизации методов их использования при решении прикладных задач необходимы отдельные исследования.

1. Экспериментально подтверждено, что в декадных и более узких частотных полосах для выявления и оценивания длительностей интервалов квазистационарности и нестационарности усредненных спектральных характеристик НЧ ГА шумов в реальном масштабе времени целесообразно, в прикладных задачах, анализировать временну́ю изменчивость параметров моделей АРСС этих шумов. Порядок составляющих авторегрессии и скользящего среднего данных моделей достаточно ограничить значениями 5–7.

2. Экспериментально подтверждено, что в районах выполнения исследований эмпирические ПРВ последовательных мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента, оцениваемые на произвольно выбранных фрагментах длительностью 0.1–1 с, в общем случае не соответствуют гауссовскому закону распределения вероятностей. Однако через неравномерно следующие интервалы времени порядка десятых долей – десятков секунд встречаются интервалы гауссовости. На всех входящих в них произвольно выбранных фрагментах длительностью 0.1–1 с в качестве модели ПРВ мгновенных значений звукового давления и компонент его градиента допустимо использовать гауссовское распределение вероятностей, возможно с зависящей от времени дисперсией. Длительности интервалов гауссовости составляют единицы–десятки секунд. При увеличении времени наблюдения и сужении полосы частот длительности этих интервалов возрастают, и они наблюдаются чаще, при уменьшении времени наблюдения и расширении полосы частот – уменьшаются, и они наблюдаются реже. Для выявления интервалов гауссовости достаточно десятых долей–единиц секунд работы вычислительных средств общего применения.

3. Показано на практических примерах, что флуктуации огибающих звукового давления и компонент градиента звукового давления ГА шумов в мелководных акваториях содержат спектральные составляющие, которые могут быть ошибочно классифицированы как признаки присутствия водоизмещающих объектов, подверженных качке, или шумов дыхания легководолазов.

4. В мелководных акваториях флуктуации огибающих звукового давления и компонент градиента звукового давления ГА шумов, вызванные колебаниями водных масс при движении плавсредств, наблюдаются и после прекращения их движения или удаления. Это может быть использовано в качестве информационного признака наличия или прохода водоизмещающих плавсредств, в том числе малошумных, что особенно важно при отсутствии данных видеонаблюдения (во время тумана, снегопада и т.д.).

5. Экспериментально продемонстрирована возможность дистанционного контроля индивидуальных особенностей дыхания находящихся под водой легководолазов с дыхательными аппаратами открытого и замкнутого циклов по результатам спектрального анализа огибающих звукового давления и компонент градиента звукового давления создаваемых ими ГА шумов. Использованный для контроля особенностей дыхания подход пригоден для дистанционного, в реальном времени, мониторинга легководолазов.

6. Экспериментально доказана возможность в прибрежных акваториях с глубиной порядка 10 м определения в пассивном режиме координат движущегося на ластах легководолаза с дыхательным аппаратом открытого цикла по его шумам на удалениях от единиц до 250 м и более с невязкой 5–10 м, а также его скорости с помощью лежащих на дне двух пар гидрофонов давления.

7. Чувствительности разработанных ГА приемников: двухкомпонентного ПГДС и трехкомпонентного ПГДИ достаточны для исследований подводных шумов в мелководных акваториях и многих практических применений, в том числе для контроля дыхания легководолазов. Использование данных конструкций ПГДС и ПГДИ открывает дополнительные возможности улучшения характеристик ГА средств различного назначения.

Применение на практике полученных в диссертационной работе результатов:

– позволит, за счет адаптации к изменениям подводного шума, улучшить вероятностные характеристики приемных ГА средств, в том числе работающих в автономном режиме, при решении задач обнаружения, измерения параметров и классификации шумов, сигналов и их источников, а также оценивания помехо–сигнальной обстановки в мелководных акваториях;

– позволит практически реализовать работающие в автономном режиме системы дистанционного контроля параметров дыхания легководолазов, а также системы регистрации их

координат и скорости под водой в пассивном режиме при выполнении учебных, спортивных и рабочих погружений;

– открывает перспективы построения систем дистанционного, в пассивном режиме, оценивания в реальном масштабе времени функционального и психоэмоционального состояния находящихся под водой легководолазов.

.

Список сокращений

АМ – амплитудная модуляция.

АР – авторегрессия, авторегрессионный.

АРСС – авторегрессионный – скользящего среднего.

АРУ – автоматическая регулировка усиления.

АЦП – аналого–цифровой преобразователь.

АЧХ – амплитудно–частотная характеристика.

БПФ – быстрое преобразование Фурье.

ВАК – Высшая аттестационная комиссия

ВКФ – взаимно–корреляционная функция.

ВП – векторный приемник.

ВСП – векторно–скалярный приемник.

ГА – гидроакустический.

ИИ – искусственный интеллект.

КИХ фильтр – цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой.

КП – комбинированный гидроакустический приемник.

НЧ – низкочастотный.

ПД – приемник звукового давления.

ПГД – приемник градиента звукового давления.

ПГДИ – приемник градиента звукового давления инерционного типа.

ПГДС – приемник градиента звукового давления силового типа.

ПРВ – плотность распределения вероятностей.

СПМ – спектральная плотность мощности.

СС – скользящее среднее.

ФЧХ – фазово–частотная характеристика.

DEMON – Detection of Envelope Modulation of Noise (обнаружение модуляции огибающей шума).

Список литературы

1. Фурдуев, А. В. Шумы океана / В кн. Акустика океана. Под ред. акад. Л. М. Бреховских.– М.: Наука, 1974.– С. 615–691.

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

3. Клячкин, В. И. Вероятностные задачи статистической гидроакустики: в 2 ч. Ч. 2. Интегрированные информационные системы / В. И. Клячкин, И. А. Селезнев.– СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.– 656 с.

4. Buzzacott, P. Mortality rate during professionally guided scuba diving experiences for uncertified divers, 1992–2019 / P. Buzzacott, Al. Hornsby, K. Shreeves // Diving and Hyperbaric Medicine.– 2021.– June.– 30.– 51(2).– P. 147–151.

5. Смолин, В. В. Водолазные спуски до 60 метров и их медицинское обеспечение / В. В. Смолин., Г. Н. Соколов, Б. Н. Павлов.– М.: Слово, 2003г. – 696 с.

6. Аредов, А. А. Экспериментальные оценки стационарности подводных шумов океана / А. А. Аредов, Г. М. Дронов, Н. Н. Охрименко, А. В. Фурдуев // Акустический журнал.– 1994.– Т. 40.– № 3.– С. 357–361.

7. Quijano, J. An eigenvector-based test for local stationarity applied to array processing / J. Quijano, L. Zurk // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2014.–V. 135.– P. EL277–283.

8. Quijano, J. Eigenvector-based test for local stationarity applied to beamforming / J. Quijano, L. Zurk // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2014.–V. 135.– P. 2392.

9. Cox, H. Adaptive beamforming in non–stationary environments / H. Cox.– Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers.– 2002.– DOI: 10.1109/ACSSC.2002.1197220.

10. Яглом, А. М. Введение в теорию стационарных случайных функций / А. М. Яглом // Успехи математических наук, 1952.– Т. VII.– вып. 5 (51).– С. 1–167.

11. Яглом, А. М. Корреляционная теория случайных функций: С примерами из метеорологии / А. М. Яглом.– 2-е изд.– М.: ЛЕНАРД, 2018.– 280 с.

12. Пугачев, В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. 3-е изд.– М.: Государственное издательство физико–математической литературы, 1962.– 883 с.

13. Рытов, С. М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы / С. М. Рытов.– М.: Наука, 1976.– 496 с.

14. Рытов, С. М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля / С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский.– М.: Наука, 1978.– 464 с.

15. Ван Трис, Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции Том 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. Пер. с англ. / Г. Ван Трис.– М.: Советское радио, 1972.– 744 с.

16. Ван Трис, Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции Том 2. Теория нелинейной модуляции. Пер. с англ. / Г. Ван Трис.– М.: Советское радио, 1975.– 344 с.

17. Ван Трис, Г. Теория обнаружения, оценивания и модуляции Том 3. Обработка сигналов в радио– и гидролокации и прием случайных гауссовых сигналов на фоне помех. Пер. с англ. / Г. Ван Трис.– М.: Советское радио, 1977.– 664 с.

18. Певницкий, В. П. Статистические характеристики индустриальных радиопомех / В. П. Певницкий, Ю. В. Полозок.– М: Радио и связь, 1988.– 248 с.

19. Урик, Р. Дж. Основы гидроакустики / Р. Дж. Урик.– Л.: Судостроение, 1978.– 448 с.

20. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. 2-е изд.– М.: Радио и связь, 1982.– 624 с.

21. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В трех книгах. Книга третья / Б. Р. Левин.– М: Советское Радио, 1976.– 288 с.

22. Сосулин, Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов / Ю. Г. Сосулин.– М.: Советское радио, 1978.– 320 с.

23. Шахтарин, Б. И. Обнаружение сигналов / Б. И. Шахтарин.– М.: Гелиос АРВ, 2006.– 488 с.

24. Wenz, A. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources / A. Wenz // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1962.– V. 34.– No 12.– P. 1936–1956.

25. Carey, W. M. Ocean Ambient Noise. Measurement and Theory / W. M. Carey, R. B. Evans.– New York: Springer, 2011.

26. Щуров, В. А. Векторная акустика океана / В. А. Щуров.– Владивосток: Дальнаука, 2003.– 308 с.

27. Щуров, В. А. Движение акустической энергии в океане / В. А. Щуров.– Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2019.– 204 с.

28. Дзюба, В. П. Скалярно–векторные методы теоретической акустики / В. П. Дзюба.– Владивосток: Дальнаука, 2006.– 195 с.

29. Ross, D. Mechanics of Underwater Noise / D. Ross.– New York: Pergamon Press, 1976.

30. Jensen, F. B. Computational Ocean Acoustics. Second Edition / F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. Schmidt.– New York: Springer, 2011.

31. Ярощук, И. О. Метод статистического моделирования в задачах гидроакустики / И. О. Ярощук, О. Э. Гулин.– Владивосток: Дальнаука, 2002.– 352 с.

32. Алексеев, Г. В. Метод нормальных волн в подводной акустике / Г. В. Алексеев.– Владивосток: Дальнаука, 2006.– 359 с.

33. Гордиенко, В. А. Векторно–фазовые методы и создание перспективных акустических систем нового поколения / В. А. Гордиенко, Т. В. Гордиенко, Н. В. Краснописцев, В. Н. Некрасов // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия.– 2014.– № 2.– С. 3–21.

34. Бардышев, В. И. Исследование законов распределений подводного шума прибрежной зоны моря и океана / В. И. Бардышев, Н. Г. Кожелупова, В. И. Крышний //Акустический журнал, 1973.– Т. 19.– № 2.– С. 129–132.

35. Бардышев, В. И. Подводные шумы прибоя у морских побережий разных типов / В. И. Бардышев // Акустический журнал.– 2008.– Т. 54.– № 6.– С. 939–948.

36. Бардышев, В. И. Подводные шумы Тихого океана в зоне шельфа о. Шикотан / В. И. Бардышев // Акустический журнал.– 2010.– Т. 56.– № 1.– С 53–62.

37. Кадыков, И. Ф. Подводный низкочастотный акустический шум океана / И. Ф. Кадыков.– М.: Эдиториал УРСС, 1999.– 152 с.

38. Buckingham, M. J. Cross-correlation in band-limited ocean ambient noise fields / M. J. Buckingham // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2012.– V. 132.– No. 4.– P. 2643–2657.

39. Roux, P. Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean / P. Roux, W. A. Kuperman // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2004.– V. 116.– No. 4.– P. 1995–2003.

40. Аредов, А. А. Направленность поверхностных источников морского шума / А. А. Аредов, А. В. Фурдуев // Акустический журнал.– 1997.– Т. 43.– № 5.– С. 696–699.

41. Dahl, P. H. Underwater ambient noise / P. H. Dahl, J. M. Miller, D. H. Cato, R. K. Andrew // Acoustics Today.– 2007.– January.– P. 23–33.

42. Cato, D. H. “Features of ambient noise in shallow water,” in Shallow Water Acoustics, edited by R. Zhang and J. Zhou.– China Ocean Press, 1997.– P. 385–390.

43. Na, J Characteristics of ambient noise in the shallow coastal area / J. Na, J. Kim, J. Choi // Journal of the Acoustical Society of Korea.– 1991.– No 10.– P 58–63.

44. Рутенко, А. Н. Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин / А. Н. Рутенко, В. А. Гриценко // Акустический журнал.– 2010.– Т. 56.– № 1.– С. 77–81.

45. Ильичев, В. И. Взаимодействие потоков мощности подводных окружающих шумов и локального источника / В. И. Ильичев, В. П. Кулешов, М. В. Куянова, В. А. Щуров // Акустический журнал, 1991.– Т. 37.– С. 99–103.

46. Щуров, В. А. Научно–технический отчет о работах в 14-м рейсе НИС «Академик Александр Виноградов». Фонды ТОИ ДВО РАН.– Владивосток, 1989.– 251 с.

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

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

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

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

51. Машошин, А. И. Синтез алгоритма автоматической классификации целей на основе анализа амплитудной модуляции их шумов / А. И. Машошин, Ю. В. Шафранюк // Фундаментальная и прикладная гидрофизика.– 2014.– Т. 7.– № 4.– С. 78–85.

52. Консон, А. Д. Спектр флуктуаций мощности сигнала, излучаемого кораблем при качке / А. Д. Консон // Судостроение.– 1997.– Вып. 6.– С. 46–48.

53. Консон, А. Д. О корреляционных характеристиках флуктуации мощности шумового сигнала, излучаемого надводным кораблем / А. Д. Консон // Акустический журнал.– 1999.– Т. 45.– С. 519–523.

54. Консон, А. Д. Обнаружение амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов при качке на фоне сверхнизкочастотных флуктуаций / А. Д. Консон, А. А. Волкова // Фундаментальная и прикладная гидрофизика.– 2019.– Т. 12.– № 2.– С12–19.

55. Консон, А. Д. Влияние сверхмедленных флуктуаций сигнала на помехоустойчивость шумопеленгования / А. Д. Консон, А. А. Волкова // Фундаментальная и прикладная гидрофизика.– 2021.– Т 14.– №3.– С. 58–64.

56. Chung, K. W. DEMON Acoustic Ship Signature Measurements in an Urban Harbor / K. W. Chung, // Advances in Acoustics and Vibration.– 2011.– Article ID 952798, 13 p.

57. Pollara, A. Passive Acoustic Methods of Small Boat Detection, Tracking, and Classification / A. Pollara, A. Sutin, H. Salloum.– IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security.– Boston MA.– 2017.

58. Викторов, Р. В. Адаптивная фильтрация сигнала при регистрации прохода подводного пловца / Р. В. Викторов, В. С. Колмогоров, Д. Г. Кречетов, В. В. Плюхин, Ю. В. Черкашин // Датчики и системы.– 2011.– № 11.– С. 44–49.

59. Викторов, Р. В. Интерференционный обнаружитель движущегося подводного объекта / Р. В. Викторов, В. С. Колмогоров, Э. В. Москаленко, А. С. Шпак // Фундаментальная и прикладная гидрофизика.– 2014.– Т. 7.– № 1.– С. 65–74.

60. Stolkin, R. Passive acoustic detection of modulated underwater sounds from biological and anthropogenic sources / R. Stolkin, A. Sutin, S. Radhakrishnan, R. A. Rountree.– Oceans 2007.– DOI 10.1109/OCEANS.2007.4449200.

61. Donskoy, D. M. Acoustic emission mechanism from scuba diving equipment / D. M. Donskoy // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2007.– V. 121.– No. 5 Supplement.– P. 3086.

62. Stolkin, R. Feature based passive detection of underwater threats / R. Stolkin, A. Sutin, S. Radhakrishnan, M. Bruno, B. Fullerton, A. Ekimov, M. Raftery // Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering.– 2006.– 6204.– P. 40–49.– DOI: 10.1117/12.663651.

63. Donskoy, D. M. Variability of SCUBA diver's Acoustic Emission / D. M. Donskoy, N. A. Sedunov, A. N. Sedunov, M. A. Tsionskiy // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering.– 2008.– DOI: 10.1117/12.783500.

64. Johansson, A. T. Improved Passive Acoustic Detection of Divers in Harbor Environments using Pre–Whitening / A. T. Johansson, R. K. Lennartsson, E. Nolander, S. Petrovic.– DOIOCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE.– Seattle, WA, USA.– 2010.– P. 1–6.– DOI: 10.1109/OCEANS.2010.5664549.

65. Sutin, A. Stevens passive acoustic system for underwater surveillance / A. Sutin, B. Bunin, A. Sedunov, N. Sedunov, L. Fillinger, M. Tsionskiy, M. Bruno.– 2010 International waterside security conference.– 2010.– WSS2010. art. no. 5730286.– P. 1–6.

66. Hunter, A. On the advantage of wideband data acquisition for passive diver detection / A. Hunter, L. Fillinger, M. C. Clarijs.– 1-st International Conference on Underwater Acoustics.– Corfu, Greece, 2011.

67. Fillinger, L. Passive acoustic detection of closed–circuit underwater breathing apparatus in an operational port environment / L. Fillinger, A. Hunter M. Zampolli, M. Clarijs // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2012.– V.132.– No. 4.– P. EL310–EL316.

68. Leslie, C. Hydrophone for measuring particle velocity / C. Leslie, J. Kendall, J. Jones // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1956.– V. 28.– № 4.– P. 711–715.

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

70. Захаров, Л. Н. Векторно–фазовые измерения в акустических полях / Л. Н. Захаров, С. Н. Ржевкин // Акустический журнал.– 1974.– Т. 20.– № 3.– С. 393 – 401.

71. Скребнев, Г. К. Комбинированные гидроакустические приемники / Г. К. Скребнев.– Л.: Элмор, 1979.– 200 с.

72. Гордиенко, В. А. Векторно–фазовые методы в акустике / В. А. Гордиенко.– М.: Физматлит, 2007.– 480 с.

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

74. Боббер, Р. Дж. Гидроакустические измерения / Р. Дж. Боббер.– М.: Мир, 1974.– 360 с.

75. Дмитриев, В. Г. Опыт построения и исследования комбинированной антенны / В. Г. Дмитриев // Акустический журнал.– 2013.– Т. 59.– № 4.– С. 494–501.

76. Зайцев, Д. Л. Молекулярно–электронный гидрофон для решения задач низкочастотного исследования шумов мирового океана / Д. Л. Зайцев, С. Ю. Авдюхина, В. М. Агафонов, А. С. Бугаев, Е. В. Егоров // Доклады академии наук.– 2018.– Т. 483.– С. 667–670.

77. Коренбаум, В. И. Использование электрокинетических приемников градиента давления на мелководье / В. И. Коренбаум, В. Г. Дмитриев, С. В. Горовой, Б. И. Гончаренко //Сборник трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС.– 2022.– С. 269–275.

78. Гончаренко, Б. И. Сравнительный анализ характеристик гидроакустических шумов на мелководье, воспринимаемых векторными приемниками различных типов / Б. И. Гончаренко, С. В. Горовой, В. Г. Дмитриев // Сборник трудов XXXV сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС.– 2023.– С. 414–419.

79. Ромашко, Р. В. Лазерная адаптивная векторно–фазовая гидроакустическая измерительная система / Р. В. Ромашко, Ю. Н. Кульчин, Д. В. Стороженко, М. Н. Безрук, В. П. Дзюба // Квантовая электроника.– 2021.– Т. 51.– № 3.– С. 265–271.

80. Каменев, О. Т. Волоконно–оптические гидрофоны / О. Т. Каменев, Р. В. Ромашко, Ю. Н. Кульчин.– М: Техносфера, 2022.– 328 с.

81. Корчак, В. Ю. Построение гидроакустических систем с использованием векторно–скалярных модулей и антенн / В. Ю. Корчак, Г. Н. Кузнецов, В. Н. Малышев // Фундаментальная наука – Военно–Морскому флоту.– 2018.– Т. 3.– С. 41–55.

82. Аппарат воздушно–дыхательный АВМ 12–К. Интернет–сайт компании «КАМПО» [Электронный ресурс] https://www.kampo.ru/content/apparat-vozdushno-dyhatelnyy-avm-12k. Проверено 24.03.2026.

83. Rebreather FROGS 18 [Электронный ресурс] https://milproaqualung.com/products/frogs-18?variant=45006669938871. Проверено 24.03.2026.

84. U.S. Commission on Ocean Policy. An Ocean Blueprint for the 21st Century. Final Report. Washington, DC.– 2004.

85. McCarthy, E. International Regulation of Underwater Sound / E. McCarthy.– New York: Kluwer Academic Publisher.– 2004.

86. Robinson, S. P. Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement. NPL Good Practice Guide No. 133 / S. P. Robinson, P. A. Lepper, R. A. Hazelwood.– National Measurement Office, Marine Scotland. The Crown Estate.– 2014.– ISSN: 1368-6550.

87. de Jong, C. A. F. Report TNO-DV 2011 C251 Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II: procedures for measuring underwater noise in connection with offshore wind farm licensing / C. A. F. de Jong, M. A. Ainslie, G. Blacquière.– The Hague.– 2011.

88. National Research Council. Marine Mammal Populations and Ocean Noise: Determining when Noise Causes Biologically Significant Effects, Washington, DC: National Academies Press. – 2005.

89. Веденев, А. И. Автономные гидроакустические станции для контроля уровня промышленного шума и сигналов сейсморазведки на морском шельфе / А. И. Веденев, О. Ю. Кочетов, В. Н. Иванов.– Доклады XII научной школы-семинара имени академика Л. М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXI сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС.– 2009.– С. 361–364.

90. Рутенко, А. Н. Автономные вертикальные акустико–гидрофоизические измерительные системы «Моллюск–19» и «Моллюск–21» / А. Н. Рутенко, Д. Г. Ковзель, В. А. Гриценко // Акустический журнал.– 2024.– Т. 70.– № 4.– С. 636–648.

91. Morse, P. Theoretical Acoustics / P. Morse, U. Ingrand.– Princeton University Press, 1968.– 949 p.

92. Исаев, А. Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля / А. Е. Исаев.– Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008.– 369 с.

93. Яглом, А. М. Корреляционная теория процессов со случайными стационарными *n*-ми приращениями / А. М. Яглом // Математический сборник.– 1955.– Т. 37 (79).– № 1.– С. 141–196.

94. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол : Пер. с англ.– М.: Мир, 1989.– 540 с.

95. Новиков, А. К. Корреляционные измерения в корабельной акустике / А. К. Новиков.– Л. Судостроение, 1971.– 256 с.

96. Новиков, А. К. Статистические измерения в судовой акустике / А. К. Новиков.– Л. Судостроение, 1985.– 272 с.

97. Малахов, А. Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований / А. Н. Малахов.– М.: Советское Радио, 1978.– 376 с.

98. Новиков, А. К. Полиспектральный анализ / А. К. Новиков.– СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2002.– 180 с.

99. Hinich, M. Testing for Gaussianity and linearity of stationary time series / M. Hinich // Journal of time series analysis.– 1982.– V. 3.– No. 3.– P. 169–176.

100. Brockett, P. L. Nonlinear and non–Gaussian ocean noise / P. L. Brockett, M. Hinich, G. R. Wilson // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1987.– V. 82.– No. 4.– P. 1386–1394.

101. Горовой, С. В. Исследование характеристик нелинейности и негауссовости шумов моря / С. В. Горовой.– Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л. М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXXI сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС.– 2018.– С. 301–304.– ISBN 978 5-89118-768-9.

102. Gorovoy, S. Two-dimensional and three-dimensional probability density functions of underwater noise near the port of Vladivostok / S. Gorovoy // Proceedings of Meetings on Acoustics.– 2015 24(1), 070026.

103. Горовой, С. В. Экспериментальное оценивание образов одномерных и двумерных плотностей распределения флуктуаций средней мощности гидроакустических шумов вблизи акватории порта Владивосток / С. В. Горовой.– Шестая Всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» 28 сентября – 2 октября 2015 г. Материалы конференции. Владивосток, 2015.– С. 304.

104. Горовой, С. В. Некоторые результаты экспериментального исследования двумерных функций распределения давления гидроакустических шумов в прибрежных водах Залива Петра Великого Японского моря Владивосток / С. В. Горовой.– Материалы докладов VII всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток, Дальнаука, 2011.– С 444–447.

105. Горовой, С. В. Некоторые результаты экспериментального оценивания трехмерных плотностей распределения выборочных значений давления гидроакустических шумов в Заливе Петра Великого Японского моря / С. В. Горовой.– Материалы докладов VIII Всероссийского симпозиума «Физика геосфер».– Владивосток, Дальнаука, 2013.– С 59–63.

106. Горовой, С. В. Экспериментальное исследование кумулянтных функций 3-го порядка гидроакустических шумов в Заливе Петра Великого Японского моря. Материалы докладов V Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана / С. В. Горовой.– Владивосток, ИПМТ ДВО РАН.– 2013.– С 234–238.

107. Горовой, С. В. Использование трехмерных корреляционных функций гидроакустических шумов для целей экологического мониторинга водных районов / С. В. Горовой // Известия ЮФУ. Технические науки.– 2013.– № 9 (146).– С. 69–75.

108. Горовой, С. В. Экспериментальное исследование корреляционных связей высших порядков между выборочными значениями давления гидроакустических шумов в Заливе Петра Великого Японского моря / С. В. Горовой.– 1-я Всероссийская акустическая конференция.– Москва, 2014.

109. Гейзенберг, В. Роль феноменологических теорий в системе теоретической физики / В. Гейзенберг // Успехи физических наук.– 1967.– Т. 91.– Вып. 4.– С. 731–733.

110. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах. Изд. 2-е. / Л. М. Бреховских.– М.: Наука, 1973.– 343 с.

111. Кацнельсон, Б. Г., Петников, В. Г. Акустика мелкого моря / Б. Г. Кацнельсон, В. Г. Петников.– М.: Наука, 1997.– 191 с.

112. Касаткин, Б. А. Акустика мелкого моря в скалярно–векторном описании: теория и эксперимент / Б. А. Касаткин, Н. В. Злобина, С. Б. Касаткин, Д. В. Злобин, Г. В. Косарев.– Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2019.– 360 с.

113. Исакович, М. А. К теории низкочастотных шумов океана / М. А. Исакович, Б. Ф. Курьянов // Акустический журнал.– 1970.– Т. 16.– № 1.– С. 62–74.

114. Гулин, О. Э. К теории акустических шумов в глубоком слоистом океане / О. Э. Гулин // Акустический журнал.– 1985.– № 4.– С. 524–527.

115. Марпл-мл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. / С. Л. Марпл-мл.– М.: Мир, 1990.– 584 с.

116. Дронов, Г. М. Изменение уровня шума океана с глубиной / Г. М. Дронов // Акустический журнал.– 1997.– № 5.– С. 709–710.

117. McKenna, M. F. Underwater radiated noise from modern commercial ships / M. F. McKenna, D. Ross, S. M. Wiggins, J. A. Hildebrand //The Journal of the Acoustical Society of America.– 2012.– V. 131.– No. 1.– P 92–103.

118. Dahl, P. H. Vector acoustic and polarization properties of underwater ship noise / P. H. Dahl, J. Bonnel // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2022.– V. 151.– No 6.– P. 3818–3827.

119. Dall'Osto, D. R. Measurement of acoustic particle motion in shallow water and its application to geoacoustic inversion / D. R. Dall'Osto, J. W. Choi, P. H. Dahl // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2016.– 139.– No. 1.– P. 311–319.

120. Dall'Osto, D. R. Elliptical acoustic particle motion in underwater waveguides / D. R. Dall'Osto, P. H. Dahl // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2013.– V. 134.– No. 1.– P 109–118.

121. Wales, S. C. An ensemble source spectra model for merchant ship–radiated noise / S. C. Wales, R. M. Heitmeye // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2002.– Vol. 111.– No. 3.– P. 1211–1231.

122. Merchant, N. D. Averaging underwater noise levels for environmental assessment of shipping / N. D. Merchant, P. Blondel, D. T. Dakin, J. Dorocicz // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2012.– Vol. 132.– No. 4.– P. EL343–EL349.

123. Simard, Y. Analysis and modeling of 255 source levels of merchant ships from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway / Y. Simard, N. Roy, C. Gervaise, S. Giard // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2016.– V. 140.– No. 3.– P. 2002–2018.

124. Southall, B. L. Underwater Noise from Large Commercial Ships – International Collaboration for Noise Reduction / B. L. Southall, A. R. Scholik-Schlomer, L. Hatch, T. Bergmann, M. Jasny, K. Metcalf, L. Weilgart, A. J. Wright.– In e-book: Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, 2017.– DOI: 10.1002/9781118476406.emoe056.

125. Dashen, W. M. Three models of global ocean noise / W. M. Dashen, K. M. Munk // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1984.– V. 76.– No. 2.– P. 540–554.

126. Ainslie, M. A. Proposed alignment of measurement and analysis procedures for quiet ship certifications: tech. rep. / M. A. Ainslie, D. Hannay, A. MacGillivray, K. Trounce, K. Lucke.– Technical memorandum Document.– 2021.

127. Jang, P. Source spectrum model for merchant ship radiated noise in the Yellow Sea of China / P. Jiang, J. Lin, J. Sun, X. Yi, Y. Shan // Ocean Engineering.– 2020.– V. 216.– P. 107607.

128. MacGillivray, A. A reference spectrum model for estimating source levels of marine shipping based on Automated Identification System data / A. MacGillivray, C. de Jong // Journal of Marine Science and Engineering.– 2021.– Vol. 9.– No. 4.– P. 369.

129. Gorovoy, S. V. Characteristics of underwater noise near the west roadstead of the port of Vladivostok / S. V. Gorovoy, A. V. Kiryanov, E. M. Zheldak.– 5th Pacific Rim Underwater Acoustics Conference.– Vladivostok, Russia 23–26 September 2015.

130. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения. Выпуск 1 / Г. Дженкинс, Д. Ваттс.– М.: Мир, 1971.– 316 с.

131. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения. Выпуск 2 / Г. Дженкинс, Д. Ваттс.– М.: Мир, 1972.– 287 с.

132. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Выпуск 1 / Дж. Бокс, Г. Дженкинс.– М.: Мир, 1974.– 406 с.

133. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Выпуск 2 / Дж. Бокс, Г. Дженкинс.– М.: Мир, 1974.– 197 с.

134. Лукин, А. Н. Модель флуктуации огибающей гармонического сигнала в мелком море / А. Н. Лукин, А. А. Мигулин, С. Н. Моисеев, В. Г. Петников, О. Б. Сусликов // Акустический журнал.– 1993.– Т. 39.– С. 691–696.

135. Вакман, Д. Е. Амплитуда, фаза, частота – основные понятия теории колебаний / Д. Е. Вакман, Л. А. Вайнштейн // Успехи физических наук.– 1977.– Т. 123.– № 4.– С. 657–682.

136. Сухаревский, Ю. М. Статистика основных акустических параметров глубоководных районов океана и вероятностная дальность действия гидроакустических систем / Ю. М. Сухаревский // Акустический журнал.– 1995.– Т. 41.– № 5.– С. 848–864.

137. Moskovitz, B. Statistical properties of deep ocean noise / B. Moskovitz, G. D'Spain, J. Hidfebrand, A. Madduri // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2010.– V. 127.– P. 1783.

138. Moskovitz, B. Statistical analysis of northern Philippine Sea underwater sound / B. Moskovitz, G. D'Spain, P. Worcester, M. Dzieciuch, K. Heaney, J. Mertser, A. Baggeroer // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2011.– V. 130.– P. 2557.

139. Arase, T. Deep sea ambient noise statistics / T. Arase, E. M. Arase // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1968.– Vol. 44.– P. 1679–1684.

140. Kicinski, W. A statistical model for classifying ambient noise in the sea / W. Kicinski // Oceanologia.– 1997.– 39(3).– P. 227–235.

141. Mikhalevsky, P. N. Approximations to distant shipping noise statistics / P. N. Mikhalevsky, I. Dyer. // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1978.– Vol.63.– No. 3.– P. 732–738.

142. Dyer, I. Statistics of distant shipping noise / I. Dyer // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1973.– Vol. 53.– No. 2.– P. 564–570.

143. Jobst, W. J. Statistical analysis of ambient noise / W. J. Jobst, S. L. Adams // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1977.– Vol. 62.– No 1.– P. 63–70.

144. Makris, N. C. The statistics of ocean–acoustic ambient noise : in Sea surface sound / N. C. Makris.– Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1977.

145. Silverman, B. W. Density estimation for statistics and data analysis / B. W. Silverman.– London, New York: Chapman and Hall, 1998.– 175 p.

146. Scott, D. W. Multivariate density estimation. Theory, practice and visualization / D. W. Scott.– New York: John Wiley & sons, Inc, 1992.– 317 p.

147. Thode, H. C., Jr. Testing for normality / H. C. Thode, Jr.– New York: Marsel Dekker, Inc., 2012.– 497 p.

148. Гаскаров, Д. В. Малая выборка / Д. В. Гаскаров, В. И. Шаповалов.– М.: Статистика, 1978.– 248 с.

149. Мирский, Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения / Г. Я. Мирский.– М.: Энергоиздат, 1982.– 320 с.

150. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.– 816 с.

151. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер.– М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948.– 632 с.

152. Тихонов, В. И. Выбросы случайных процессов / В. И. Тихонов.– М: Наука, 1970.– 392 с.

153. Teicher, H. On the mixture of distributions / H. Teicher // Ann. Math. Statist.– 1960.– Vol. 31 (1).– P. 55–73.

154. Middleton, D. Statistical–Physical Models of Electromagnetic Interference / D. Middleton // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.– 1977.– Vol. EMC–19.– No. 3.– P. 106–127.

155. Middleton, D. Canonical and Quasi–Canonical Probability Models of Class A Interference / D. Middleton // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.– 1983.– Vol. EMC–25.– No. 2.– P. 76–106.

156. Middleton, D. Non–Gaussian Noise Models in Signal Processing for Telecommunications: New Methods and Results for Class A and Class B Noise Models / D. Middleton // IEEE Transactions on Information Theory.– 1999.– Vol. 45.– No. 4.– P. 1129–1149.

157. Bouvet, M. Underwater noises: Statistical modeling, detection, and normalization / M. Bouvet, S. C. Schwartz // The Journal of the Acoustical Society of America.– 1988.– Vol. 83.– No. 3.– P. 1023–1033.

158. Bond, J. W. Gaussian Mixture Models for Acoustic Interference / J. W. Bond, D. Stein, J. Zeidler.– Technical Report 1667 AD–A285 950 DTIC, 1994.

159. Nakagami, M The m-distribution – A general formula of intensity distribution of rapid fading, Statistical Methods / M. Nakagami.– Radio Wave Propagation, Pergamon, 1960.– P. 3–36. DOI: 10.1016/b978-0-08-009306-2.50005-4.

160. Медведева, Е. В. Использование разнесенных в пространстве комбинированных приемных модулей для исследования скалярно–векторных характеристик акустического поля / Е. В. Медведева, Б. И. Гончаренко, А. С. Шуруп // Известия РАН. Серия физическая.– 2020.– Т. 84.– № 2.– С. 278–283.

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

162. Кузнецов, Г. Н. Локальные аномальные зоны звукового поля в мелком море. Эксперимент и моделирование / Г. Н. Кузнецов, И. В. Семенова, А. Н. Степанов // Акустический журнал.– 2021.– Т. 67.– № 6.– С. 626–638.

163. Cray, B. A. Directivity factors for linear arrays of velocity sensors / B. A. Cray, A. H. Nuttall // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2001.– V. 110.– No. 1.– P. 324–331.

164. D'Spain, G. L. Vector sensors and vector sensor line arrays: Comments on optimal array gain and detection / G. L. D'Spain, J. C. Luby, G. R. Wilson, R. A. Gramann // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2006.– V. 120.– No. 1.– P. 171–185.

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

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

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

168. Смарышев, М. Д. Об использовании комбинированных приемников и антенн в корабельной гидроакустике / М. Д. Смарышев // Гидроакустика.– 2016.– Т. 25.– № 1.– С. 5–15.

169. Иванов, В. Е. Анализ влияния подвески векторного приемника на его характеристики / В. Е. Иванов // Акустический журнал.– 1988.– Т. 34.– С. 95–101.

170. Приемник гидроакустический комбинированный КГП 1. Технические условия МГФК.406231.113ТУ.

171. Линейка комбинированных гидроакустических приемников (PV гидрофонов) [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://www.npo-akma.ru/pv.shtml. Проверено 30.03.2026.

172. Гордиенко, В. А. Градуировка звукоприемников в вертикально колеблющемся столбе жидкости абсолютным методом / В. А. Гордиенко, Е. Л. Гордиенко, А. В. Дрындин, С. М. Лихачев // Акустический журнал.– 1994.– Т. 40.– № 8.– С. 243–246.

173. Исаев, А. Е. Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017 / А. Е. Исаев, А. Н. Матвеев, Г. С. Некрич, С. Ф. Некрич, С. В. Сильвестров // Измерительная техника.– 2017.– № 8.– С. 3–5.

174. Коренбаум, В. И. Низкочастотные приемники градиента давления инерционного типа для океанологических исследований / В. И. Коренбаум, А. А. Тагильцев, С. В. Горовой, А. Е. Костив, А. Д. Ширяев // Приборы и техника эксперимента.– 2017.– № 4.– С. 142–146.

175. Интернет–сайт компании Piezotronics, США [Электронный ресурс].– Режим доступа: https://www.pcb.com/products?m=393b05. Проверено 30.03.2026.

176. Donskoy, D. M. Acoustic particle velocity horns / D. M. Donskoy // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2012.– V. 131.– No. 5.– P. 3883–3890.

177. Donskoy, D. M. Directionality and gain of small acoustic velocity horns / D. M. Donskoy // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2017.– V. 142.– No. 6.– P. 3450–3458.

178. Патент № 2568411 Российская Федерация. МПК G01V 1/16 (2006.01), G01V 1/38 (2006.01). Двухкомпонентный приемник градиента давления : № 2014137594/28 : заявл. 16.09.2014 : опубл. 20.11.2015 / Коренбаум В. И., Тагильцев А. А., Горовой С. В., Фершалов Ю. Я. .: заявитель ТОИ ДВО РАН.

179. Коренбаум, В. И. Низкочастотный приемник градиента давления силового типа для океанологических исследований / В. И. Коренбаум, А. А. Тагильцев, С. В. Горовой, А. Е. Костив, А. Д. Ширяев, Ю. Я. Фершалов, В. С. Марютин // Приборы и техника эксперимента.– 2017.– № 5.– С. 120–124.

180. Korenbaum, V. Low Frequency Underwater Pressure Gradient Receiver of Forse Type / V. Korenbaum, A. Tagiltcev, S. Gorovoy, A. Kostiv, A. Shiryaev, Y. Fershalov // 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition UACE2017.– 2017 Skiathos Island. Greece, pp. 113–117.

181. Коренбаум, В. И. Низкочастотный приемник градиента давления силового типа / В. И. Коренбаум, А. А. Тагильцев, С. В. Горовой, И. В. Дегтярев, М. И. Серветников // Труды всероссийской конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана».– 2017.– Т. 7.– С. 193–196.

182. Патент № 2624791 Российская Федерация. МПК A61B 5/08 (2006.01). Двухкомпонентный приемник градиента давления и способ измерения градиента давления с его использованием : 2016138938 : заявл. 03.10.2016 : опубл. 06.07.2017 / Коренбаум В. И., Горовой С. В., Тагильцев А. А., Костив А. Е. .: заявитель ТОИ ДВО РАН.

183. Korenbaum, V. Comparative sensitivity of pressure gradient receivers of force and inertial types to sound pressure in plane wave / V. Korenbaum, S. Gorovoy, A. Tagiltcev, A. Kostiv // Proceedings of Meetings on Acoustics.– 2014.– Vol. 21.– No. 070007.

184. Патент № 2740334 Российская Федерация. МПК G01V 1/16 (2006.01), G01V 1/38 (2006.01). Способ приема сейсмоакустической и гидроакустической волн у дна водоема и устройство для его осуществления : 2020123339 : заявл. 07.07.2020: опубл. 13.01.2021 / Коренбаум В. И., Горовой С. В., Дорожко В. М., Бородин А. Е. .: заявитель ТОИ ДВО РАН.

185. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т.– М.: Машиностроение, 1981.– Т. 6, Защита от вибраций и ударов / Под ред. К. В. Фролова, 1981.– 456 с.

186. Lamb, H. On the vibrations of an elastic plate in contact with water / H. Lamb // Proceeding of the Royal Society A.– 1920.– V. 98.– P. 205–216.– https://doi.org/10.1098/rspa.1920.0064.

187. Дорожко, В. М. О регистрации шумов дыхания водолаза–аквалангиста в мелководной акватории размещенными у дна гидрофонами / В. М. Дорожко, С. В. Горовой, В. И. Коренбаум.– Физика геосфер. Вып.2.– Владивосток: ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, 2020.– 192 с.

188. Горовой, С. В. Экспериментальные исследования шумовых характеристик судов в акватории порта Владивосток / С. В. Горовой, А. Е.Кирьянов, Я. Ю. Блиновская, А. А. Борейко, Д. А. Пестов // Гидрометеорология и экология.– 2024.– № 77.– С. 661–673.

189. Gorovoy, S. Variability of hydroacoustic noise probability density function at the output of automatic gain control system / S. Gorovoy, A. Kiryanov, E. Zheldak // Applied Sciences (Switzerland).– 2018, 8, 142, pp. 1–9.

190. Горовой, С. В. Анализ статистических характеристик шумов мелкого моря на относительно коротких интервалах времени / С. В. Горовой // Сборник трудов XXXII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС.– 2019.– С. 409–414.

191. Горовой, С. В. Сравнительный анализ характеристик сигналов, зарегистрированных с использованием векторного приемника и гидрофона давления на мелководье / С. В. Горовой // Акустический журнал.– 2024.– Т. 70.– № S5.– С. 8–9.

192. Горовой, С. В. Сравнительный анализ характеристик сигналов, зарегистрированных с использованием векторного приемника и гидрофона давления на мелководье / С. В. Горовой // Сборник трудов XXXVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС.– 2024.– С. 77 – 83.

193. Горовой, С. В. Мониторинг шумов моря вблизи океанариума в г. Владивостоке / С. В. Горовой, А. В. Кирьянов, Е. М. Желдак // Известия Южного федерального университета. Технические науки.– 2015.– № 12.– С. 15–24.

194. Горовой, С. В. Некоторые результаты исследования временно́й изменчивости характеристик гидроакустических шумов в заливе Петра Великого Японского моря : Электронный ресурс / С. В. Горовой // Ученые записки физического факультета Московского университета.– 2017.– № 5.– С. 1–5. http://uzmu.phys.msu.ru/file/2017/5/1750111.pdf.

195. Горовой, С. В. Экспериментальное исследование характеристик огибающей гидроакустических шумов на выходах комбинированного приемника / С. В. Горовой // Сборник трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС.– 2022.– С. 310–317.

196. Горовой, С. В. Некоторые результаты исследования временно́й изменчивости характеристик гидроакустических шумов на мелководье / С. В. Горовой // Акустический журнал.– 2025.– Т. 71.– № S5.– С. 26.

197. Горовой, С. В. Некоторые результаты исследования временно́й изменчивости характеристик гидроакустических шумов на мелководье / С. В. Горовой // Сборник трудов XXXVII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС.– 2025.– С. 333–338.

198. Горовой, С. В. Статистические модели гидроакустического шумового фона мелководных прибрежных акваторий / С. В. Горовой // Сборник трудов XXXVIII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС.– 2026.– С. 131–137.

199. Welch, P. D. The use of fast Fourier transform for estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms / P. D. Welch // IEEE Transaction on Audio and Electroacoustics.– 1967.– V. AU-15.– No. 2.

200. Davenport, W. B. A study of speech probability distributions. Technical report No. 148 / W. B. Davenport.– Massachusetts Institute of Technology, Research Laboratory of Electronics, 1950.– 82 p.– URI: http://hdl.handle.net/1721.1/4905.

201. Большев, Л. Н., Смирнов, Н. В. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В.Смирнов.– М.: Наука, 1983.– 416 с.

202. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников.– М.: Наука, 1968.– 464 с.

203. Blackman, R. B. The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering – Part I / R. B. Blackman, J. W. Tukey, // The Bell System Technical Journal.– 1958.– V. 37, No. 1.– P. 185–285.

204. Radford, G. A. Bubbled waters: The noise generated by underwater breathing apparatus / G. A. Radford, A. G. Jeffs, C. T. Tindale, R. G. Cole., J. C. Montgomery // Marine and Freshwater Behavior and Physiology.– 2005 38(4).– P. 259–267.

205. Gemba, K. Source signature characterization for detection of open–circuit SCUBA regulators / K. Gemba, E. Nosal // Proceeding of Meeting on Acoustics.– 2013.– V. 19.

206. Erbe, C. Underwater acoustic signature of recreational swimmers, divers, surfers and kayakers / C. Erbe, M. Parson, A. J. Duncan, K. Allen // Acoustics Australia.– 2016.– V. 44(2).– P. 333–341.

207. Gemba, K. Characterization of underwater acoustic sources recorded in reverberant environments with application to SCUBA signatures. / K. Gemba / Thesis for Ph.D.– 2014.– DOI: 10.13140/RG.2.1.3184.9048.

208. Gemba, K. Partial dereverberation used to characterize open circuit scuba diver signatures / K. Gemba, E. Nosal, T. Reed // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2014.– V. 136(2).– P. 6232–633.

209. Горовой, С. В. О регистрации шумов, создаваемых ластами на мелководье / С. В. Горовой, В. И. Коренбаум.– Физика геосфер: Одиннадцатый Всероссийский симпозиум, 09–14 сентября 2019 г.– Владивосток.– ТОИ ДВО РАН.– С. 375–379.

210. Бреслав, И. С. Паттерны дыхания: Физиология, экстремальные состояния, патология / И. С. Бреслав.– Л.: Наука, 1984.– 206 с.

211. Korenbaum, V. Underwater noises of open–circuit scuba diver / V. Korenbaum, A. Kostiv, S. Gorovoy, V. Dorozhko, A. Shiryaev // Archives of Acoustics.– 2020.– 45(2).– P. 349–357.

212. Korenbaum, V. Basic concepts of sensing respiratory sounds at the surface of human chest / V. Korenbaum, A. Tagiltcev, S. Gorovoy, A. Shiryaev, O. Kabancova // IFMBE Proceedings.– 2019.– 68(1).– P. 535–537.

213. Korenbaum, V. Underwater noises of scuba divers / V. Korenbaum, S. Gorovoy, A. Kostiv, A. Shiryaev, A. Borodin // 25th International Congress on Sound and Vibration.– 2018, ICSV 2018: Hiroshima Calling, 8.– P. 4952–4956.

214. Горовой, С. В. Возможности обнаружения легководолазов по излучаемым ими подводным шумам / С. В. Горовой, В. И. Коренбаум, А. Е. Костив, А. Д. Ширяев, А. Е. Бородин, А. А. Тагильцев, В. М. Дорожко // Труды всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики".– 2018.– С. 75–77.

215. Коренбаум, В. И. Экспериментальное исследование биологических шумов водолазов / В. И. Коренбаум, А. Е. Бородин, С. В. Горовой, А. А. Тагильцев, А. Е. Костив, А. Д. Ширяев, А. М. Василистов, И. А. Почекутова // Фундаментальная наука–Военно-Морскому Флоту. Том 2. Материалы круглого стола в рамках VII Международного Военно-Морского салона. 1 июля 2015 г.– М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016.– С. 92–98.

216. Коренбаум, В. И. Возможность пассивного акустического мониторинга легководолазов / В. И. Коренбаум, С. В. Горовой, А. А. Тагильцев, А. Е. Костив, А. Е. Бородин, И. А. Почекутова, А. М. Василистов, А. В. Крупеньков, А. Д. Ширяев, Д. И. Власов // Доклады академии наук.– 2016.– Т. 466.– № 5.– С. 1–5.

217. Горовой, С.В. Использование векторно–скалярного приемника для исследования характеристик подводных шумов легководолаза–аквалангиста / С. В. Горовой, А. А. Тагильцев, В. Г. Сиренко // Подводные исследования и робототехника.– 2026.– № 3.– С.84–94.

218. Коренбаум, В. И. Акустическая аппаратура для исследования дыхательных звуков человека / В. И. Коренбаум, А. А. Тагильцев, А. Е. Костив, С. В. Горовой, И. А. Почекутова, Г. Н. Бондарь // Приборы и техника эксперимента.– 2008.– Т. 51.– № 2.– С. 147–154.

219. Коренбаум, В. И. Обнаружение дыхательных шумов легководолазов / В. И. Коренбаум, А. Е. Бородин, С. В. Горовой, А. А. Тагильцев, А. Е. Костив, А. Д. Ширяев, А. М. Василистов, И. А. Почекутова // Фундаментальная и прикладная гидрофизика.– 2015.– Т. 8.– № 4.– С 67–71.

220. Gorovoy, S. A possibility to use respiratory noises for diver detection and monitoring physiologic status / S. Gorovoy, V. Korenbaum, A. Tagiltcev, A. Vasilistov, A. Krupenkov // Proceedings of Meetings on Acoustics.– 2014 21(1), 3aUWb14.

221. Gorovoy, S. Detecting respiratory noises of diver equipped with rebreather in water / S. Gorovoy, V. Korenbaum, A. Borodin, A. Shiryaev, I. Pochekutova // Proceedings of Meetings on Acoustics.– 2015 24(1), 070020.

222. Горовой, С. В. Некоторые результаты экспериментального исследования излучения пульсовых волн телом человека / С. В. Горовой // Известия Южного федерального университета. Технические науки.– 2014.– № 10.– С. 160–166.

223. Lo K. W. Diver Detection and Localization Using Passive Sonar / K. W. Lo, B. G. Ferguson // Proceeding of Acoustics 21-23 November 2012, Fremantle, Western Australia.

224. Hunter, A. Passive Diver Detection and Localization using Hydrophones Suspended under a Boom / A. Hunter, L. Fillinger, M. C. Clarijs.– 1st International Conference on Underwater Acoustics.– Corfu, Greece, 2011.

225. Jin B. A passive detection Method of Divers Based on Deep Learning / B. Jin, G. Xu // IEEE 3rd International Conference on Electronic technology, 2020.– P. 650–655.

226. Korenbaum, V. I. An attempt at hydroacoustic localization of an open–circuit scuba diver / V. I. Korenbaum, S. V. Gorovoy, A. E. Kostiv, A. D. Shiryaev, A. E. Borodin // The Journal of the Acoustical Society of America.– 2019.– V. 146.– No. 6.– P. 4507–4513.

227. Gorovoy, S. An attempt of hydroacoustic localization of open-circuit scuba diver using low–frequency respiratory associated noises emitted into water / S. Gorovoy, V. Korenbaum, A. Kostiv, A. Shiryaev, A. Borodin // The 26th International Conference of Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON-2019) July 16–19, 2019, Abstracts.– Vladivostok, Russia.– P. 268.

228. Патент № 2556302 Российская Федерация. МПК G01S 15/00 (2006.01). Способ пассивной акустической локации подводных пловцов : 2014109333/28 : заявл. 11.03.2014 : опубл. 10.07.2015 / Коренбаум В. И., Горовой С. В., Костив А. Е., Тагильцев А. А., Бородин А. Е., Почекутова И. А. .: заявитель ТОИ ДВО РАН.

229. Лэмб, Г. Гидродинамика / Г. Лэмб.– М.: Государственное издательство технико–теоретической литературы, 1947.– 928 с.

230. Minnaert, M. On musical air–bubbles and sounds of running water / M. Minnaert // Philosophical Magazine and Journal of Science.– 1933.– 16 : 104.– P. 235–248, DOI: 10.1080/14786443309462277.

231. Акуличев, В. А. О спектре пузырьков газа и возможностях акустической спектроскопии в приповерхностном слое океана / В. А. Акуличев, В. А. Буланов // Доклады Академии наук.– 2012.– Т. 446, № 2.– С. 212–215.

232. Акуличев, В. А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде / В. А. Акуличев, В. А. Буланов. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017.– 414 с.

233. Максимов, А. О. Пространственное распределение шума в окрестности подводных газовых источников / А. О. Максимов // Доклады Академии наук.– 2004.– Т 397.– С. 103–107.

234. Kugou, N. Experimental study on motion of air bubbles in seawater (terminal velocity and drug coefficient of air bubble rising in seawater) / N. Kugou, K. Ishida, A. Yoshida // Transaction on Built Environment.– 2003.– V. 68.– P. 145–168.

235. Lohrasbipeydeh, H. Dynamic behavior of sound generated by gas bubbles injected under water / H. Lohrasbipeydeh, A. Zielinski, T. Gulliver.– MTS/IEEE OCEANS – Bergen, Bergen, Norway, 2013.– P. 1–4.– DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608036.

236. Pumphrey, H. Bubbles as sources of ambient noise / H. Pumphrey, J. Williams // IEEE Journal of Oceanic Engineering.– 1990.– V. 15.– No. 4.– P. 268–274.

237. Бэтчелор, Дж. Введение в динамику жидкости / Дж. Бэтчелор.– М.: Мир, 1973.– 730с.

238. Кузнецов, Г. Н. Приближенные аналитические представления законов спадания векторно–скалярных полей мультипликативных источников в волноводе Пекериса / Г. Н. Кузнецов, А. Н. Степанов // Акустический журнал.– 2017.– Т. 63.– № 6.– С. 623–636.

239. Кузнецов, Г. Н. Аппроксимирующие модели регулярной составляющей инфразвукового поля мультипольных источников в плоском волноводе / Г. Н. Кузнецов, А. Н. Степанов // Акустический журнал.– 2013.– Т. 59.– № 3.– С. 378–390.

240. Кузнецов, Г. Н. Поле эквивалентного мультипольного составного излучателя в волноводе / Г. Н. Кузнецов, И. В. Семенова, А. Н. Степанов // Акустический журнал.– 2007.– Т. 53.– № 3.– С. 377–385.

241. Сидоров, Д. Д. Широкополосное звуковое поле в мелководном волноводе с неоднородным дном / Д. Д. Сидоров, В. Г. Петников, А. А. Луньков // Акустический журнал.– 2023.– Т. 69.– № 5.– С. 608–619.

242. Петров, П. С. Волновое уравнение с вязкоупругим затуханием и его применение в задачах акустики мелкого моря // Акустический журнал.– 2012.– Т. 58.– № 6.– С. 743–755.

243. Bateman, H. Mathematical Theory of Sound Ranging / H. Bateman // Monthly weather review.– 1918.– January.– P. 4–11.

244. Мусхелишвили, Н. И. Курс аналитической геометрии / Н. И. Мусхелишвили.– М.: Высшая школа, 1967.– 656 с.

245. Коренбаум, В. И. О дальнометрии источников свистящих дыхательных звуков в легких человека при интенсиметрической обработке сигналов, зарегистрированных на поверхности грудной клетки / В. И. Коренбаум, А. А. Тагильцев, С. В. Горовой, А. Д. Ширяев, А. Е. Костив // Акустический журнал.– 2016.– № 5.– С. 600–608.

246. Патент № 2545422 Российская Федерация. МПК G01V 1/16 (2006.01), G01V 1/38 (2006.01). Способ определения местоположения источника свиста в легких : 2014109333/28 : заявл. 26.03.2014: опубл. 27.03.2015 / Коренбаум В. И., Тагильцев А. А., Горовой С. В., Власов Д. И., Ширяев А. Д., Фершалов Ю. Я. .: заявитель ТОИ ДВО РАН.

247. Горовой, С. В. Исследование сигналов акустической эмиссии, наблюдаемых при растрескивании и дроблении каменного угля / С. В. Горовой // Горный информационно–

аналитический бюллетень (научно–технический журнал).– М.: Горная книга.– 2014.– № 12.– С. 14–23.