

*На правах рукописи*



**Чупин Владимир Александрович**

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ИСКУССТВЕННОГО И  
ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЗОНЕ ПЕРЕХОДА ГЕОСФЕР**

Специальность: 1.3.7 – «Акустика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Владивосток

2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН) в лаборатории физики геосфер и лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф.

**Научный консультант:** **Долгих Григорий Иванович**  
академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, директор.

**Официальные оппоненты:** **Зайцев Андрей Иванович**  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, директор;

**Собисевич Алексей Леонидович**  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Институт физики Земли РАН, заместитель директора;

**Куличков Сергей Николаевич**  
доктор физико-математических наук, профессор, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

**Ведущая организация** **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр Морской гидрофизический институт РАН**

Защита диссертации состоится «28» февраля 2024 г. в 14:00 на заседании Диссертационного совета 24.1.214.01, созданном на базе ТОИ ДВО РАН, по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТОИ ДВО РАН и на сайте института <https://poi.dvo.ru/node/2203>. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации и на сайте ТОИ ДВО РАН.

Отзыв на автореферат заверенный печатью просьба направлять по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43, ТОИ ДВО РАН, ученому секретарю диссертационного совета Анатолию Евгеньевичу Костиву.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
Д 24.1.214.01, кандидат технических наук

**Костив**  
**Анатолий Евгеньевич**

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность исследования**

Взаимодействие между геосферами имеет важное значение в исследованиях волновых процессов. Волны, возникающие в одних геосферах, трансформируются в зонах перехода в другие геосферы по определенным законам, зависящим от множества факторов, таких как импедансы сред, длины волн, характеристики береговой полосы, структуры морского дна, метеорологических условий. Следовательно, комплексное исследование распространения волновых процессов имеет огромное значение, поскольку тема трансформации волн в зоне перехода продолжает оставаться актуальной и важной в современной науке.

В современной фундаментальной и прикладной науке Российской Федерации стоят множество важных задач, среди которых обеспечение национальной безопасности, разработка эффективных методов освоения Арктики, прогнозирование опасных природных явлений и процессов. Для решения этих проблем возможно применять в том числе лазерно-интерференционные методы измерения, особенно в исследованиях процессов, происходящих в зоне перехода «вода-земная кора» в шельфовых зонах морей.

Таким образом, изучение волновых процессов и их трансформация в геосферах и переходных зонах является ключевым для понимания некоторых природных и антропогенных явлений, а также для разработки методов прогнозирования и предотвращения опасных событий. Применение современных методов и технологий в этой области исследований позволяет сделать значительный вклад в научное и техническое развитие, а также повысить уровень безопасности и эффективности деятельности в различных сферах человеческой деятельности.

Поэтому актуальность работы связана с исследованием возможностей методов наземного дистанционного зондирования различных волновых процессов природного и искусственного происхождения, распространяющихся в геосферах и в зоне их перехода.

### **Цель исследования**

Целью диссертационной работы является исследование динамики возникновения и развития различных физических процессов искусственного и природного происхождения в низкочастотном и инфразвуковом диапазонах частот в зоне перехода геосфер с использованием сейсмоакустико-гидрофизического измерительного комплекса, созданного на базе лазерных деформографов и низкочастотных гидроакустических излучателей.

### **Задачи исследования**

1. Создать экспериментальный аппаратно-программный комплекс приборов на базе стационарного двухкоординатного лазерного деформографа, мобильного лазерного деформографа и низкочастотных гидроакустических излучателей.

2. Исследовать трансформацию гидроакустических колебаний в сейсмоакустические колебания на разном удалении источника гидроакустического сигнала от берегового приемника и установить сезонную изменчивость коэффициента трансформации гидроакустических волн.

3. Выполнить регистрацию сейсмоакустических сигналов, создаваемых различными источниками гидроакустического излучения.

4. С применением береговых лазерных деформографов исследовать траектории движения источников гидроакустического излучения и определить ошибку определения направления на источник.

5. Выполнить экспериментальные исследования по регистрации источников гидроакустического излучения системой пространственно-разнесенных береговых лазерных деформографов.

6. Провести томографические исследования морской земной коры на основе применения береговых лазерных деформографов и стационарных гидроакустических излучателей различной мощности в разных областях морского шельфа, в том числе покрытого льдом.

7. Исследовать возможности метода при использовании буксируемого гидроакустического излучателя.

8. Исследовать низкочастотные сейсмоакустические процессы, возникающие на фоне микроколебаний земной коры во время влияния на измерительный полигон катастрофических атмосферных явлений.

### **Научная новизна исследования**

– на основе двухкоординатного берегового лазерного деформографа, мобильного лазерного деформографа и низкочастотных гидроакустических излучателей, часть из которых внедрялась и испытывалась в процессе проведения исследований, создан сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для исследования трансформации низкочастотных и инфразвуковых гидроакустических колебаний в сейсмоакустические колебания на границе геосфер.

– выполнена уникальная серия экспериментальных работ по исследованию трансформации гидроакустических колебаний в сейсмоакустические в зависимости от расстояния, местоположения излучателя, различия излучающих частот и гидрофизических условий, связанные с сезонными изменениями.

– на базе методов геоакустической инверсии был разработан новый метод акустической томографии, позволяющий исследовать физические свойства морского дна с использованием низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых лазерных деформографов.

– метод томографии многократно испытан в разных акваториях Японского моря, по результатам чего были исследованы состав и структура морского дна, а также показана возможность применения метода в зимних условиях в акваториях без разрушения ледового покрова.

– на основе экспериментальных исследований случайных объектов и специально организованных экспериментальных исследований разработана методика отслеживания динамики перемещения различных источников излучения по акватории с использованием разнонаправленных и пространственно-разнесенных лазерных деформографов.

– береговыми лазерными деформографами зарегистрированы впервые новые микросейсмические сигналы связанные с влиянием на акваторию моря мощных атмосферных циклонических образований, которым было дано название «микросейсмы «голос моря»» по аналогии с атмосферными колебаниями соответствующей частоты, открытыми ранее.

– исследована динамика изменения микросейсмиков «голос моря» в соответствии с траекториями перемещения разных тропических циклонов, а также определены зоны их генерации.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс на основе двухкоординатного лазерного деформографа, позволяющий регистрировать сейсмоакустические сигналы, генерируемые различными искусственными и природными источниками излучения в близлежащей акватории.

2. Результаты исследования трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе геосфер и сезонной изменчивости характеристик трансформации гидроакустической энергии.

3. Результат регистрации стационарных и движущихся источников гидроакустического излучения двухкоординатным лазерным деформографом и системой пространственно-разнесенных лазерных деформографов.

4. Метод томографии морской земной коры на основе применения береговых лазерных деформографов и гидроакустических излучателей на открытых акваториях и акваториях, покрытых льдом.

5. Результат регистрации инфразвуковых микросейсмических колебаний, вызываемых длительным воздействием тропических циклонов на морскую акваторию и определение области их генерации.

### **Практическая значимость результатов**

Применение лазерно-интерференционных измерительных устройств, как наземных средств дистанционного зондирования, позволило получить новые результаты и показать новые методы исследования распространения различных сигналов инфразвукового и низкочастотного диапазонов частот в зоне перехода геосфер. Результаты исследований были получены в результате выполнения государственных программ ТОИ ДВО РАН: «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в условиях глубокого и мелкого моря, а

также развитие акустических методов связи, локации и диагностики сложных систем», «Структура и динамики дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана», «Комплексные исследования океана и атмосферы», «Изучение фундаментальных основ взаимодействия разномасштабных гидроакустических, гидрофизических и геофизических процессов зоны перехода геосфер дальневосточных морей России и Восточного сектора Арктики», «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана», грантов РФФИ № 11-05-98544-р\_восток\_а «Атмосферно-гидросферно-литосферное взаимодействие в инфрагравитационном диапазоне частот», № 12-05-00180-а «Изучение закономерностей возникновения и развития собственных колебаний Мирового океана, а также их взаимодействия с разномасштабными геосферными процессами», № 12-05-31417-мол\_а «Трансформация энергии волн на границе геосфер при разнообразии динамических процессов моря», № 16-29-02023-офи\_м. «Разработка технологии томографии земной коры шельфа и глубокого моря на основе применения береговых лазерных деформографов и широкополосных низкочастотных гидроакустических излучателей», № 18-05-00340 «Мониторинг, анализ и прогнозирование опасных атмосферных и морских явлений и катастроф на основе применения современных технологий», гранта РФФИ № 14-17-00041. «Изучение физики возникновения, динамики, трансформации и пространственно-временной структуры геосферных процессов инфразвукового диапазона», грантов Дальневосточного отделения Российской академии наук, мегагрант № 075-15-2022-1127 от 01.07.2022 г. «Нелинейная гидрофизика с приложениями к природным катастрофам Дальневосточного региона.

### **Апробация результатов исследования**

Материалы диссертации были представлены на: Международный симпозиум сообщества морских и полярных инженеров, г. Осака, Япония, 2009 г.; Шестой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2009 г.; Седьмой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2011 г.; Восьмой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2013 г.; Девятый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2015 г.; Пятая конференция Тихоокеанского региона по подводной акустике (PRUAC 2015), 2015 г.; Двадцать пятая международная конференция по лазерно-интерференционным технологиям в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте, г. Новороссийск, 2017 г.; Двадцать шестая международная конференция по лазерно-интерференционным технологиям в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте, г. Новороссийск, 2018 г.; Десятый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2017 г.; XVI

школа-семинар им. акад. Л. М. Бреховских, совмещенной с XXXI сессией Российского Акустического Общества, 2018 г.; Международная научная конференция «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов» («Опасные явления»), 2019 г.; Одиннадцатый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2019 г.; Семинар Научного совета РАН по акустике «Актуальные достижения в области акустики. Успехи акустики 2019», 2019 г.; Двенадцатый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2021 г.; Тринадцатый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2023 г.; Китайский симпозиум по акустике океана 2024 (COA 2024), 2024 г.

### **Публикации**

По теме и материалам диссертации опубликованы 52 печатных работ, в том числе 25 публикаций в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК.

### **Личный вклад автора**

Автор данной работы занимался исследованием и разработкой в выбранной научной области. Активно участвовал в проведении экспериментальных работ и теоретических исследований, представленных в результате его труда. Автор принимал непосредственное участие в создании и настройке измерительного комплекса на МЭС «м. Шульца» ТОИ ДВО РАН, а также в испытаниях его отдельных компонентов. Автором выполнено планирование большинства экспериментальных исследований. Самостоятельно выполнена обработка полученных экспериментальных данных, их интерпретация и анализ, а также объяснение и обоснование полученных результатов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа изложена на 238 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц, 97 иллюстраций и состоит из следующих разделов: оглавление, введение, 5 глав собственных исследований, заключение, список цитируемой литературы. Библиографический указатель включает 205 источников до 2024 года включительно.

### **Благодарности**

Хочу выразить искреннюю благодарность моим уважаемым коллегам из Лаборатории физики геосфер, Лаборатории статистической гидроакустики и Лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф ТОИ ДВО РАН, а также другим соавторам, прежде всего за ценную помощь в проведении комплексных экспериментальных исследований, а также за дружелюбное отношение и продуктивное сотрудничество.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определена цель и сформулированы задачи исследований, научная новизна, практическая значимость результатов, приведена информация апробации работы и личного вклада автора.

**В первой главе** описывается экспериментальный сейсмоакустико-гидрофизический комплекс, созданный на базе береговых лазерных деформографов (ЛД) и гидроакустических (ГА) излучающих систем, позволивший получить результаты всех выполненных исследований. Комплекс расположен на морской экспериментальной станции (МЭС) ТОИ ДВО РАН «мыс Шульца» на юге Приморского края

**В параграфе 1.1.** приводится описание основного измерительного инструмента сейсмоакустико-гидрофизического комплекса – двухкоординатного лазерного деформографа (ДЛД) и его модификаций. Приводится схема расположения измерительных компонент деформографа и их пространственные характеристики, а также краткое описание оптической схемы интерферометра и принципа работы лазерно-интерференционных измерительных приборов с ее использованием. Измерительные плечи лазерных деформографов практически ортогональны друг другу и ориентированы под углом  $18^\circ$  ( $198^\circ$ ) от направления «север-юг», при длине измерительного плеча 52,5 м (СЮ), и под углом  $110^\circ$  ( $290^\circ$ ) от направления «запад-восток» при длине измерительного плеча 17,5 м (ЗВ). Принцип работы лазерного деформографа заключается в синхронном измерении с помощью интерференционных методов изменения набега фазы луча лазера, проходящего через измерительное плечо от центрального интерференционного узла до уголкового отражателя и обратно. Приводится описание эволюции увеличения чувствительности компонент лазерного деформографа за многолетний период исследований, зависящий от стабильности используемых источников лазерного излучения. Применение лазеров ЛГН-303, Стандарт-У, имеющих долговременную стабильность  $10^{-8}$ , позволяло измерять смещение устоев лазерных деформографов с длиной измерительного плеча 52,5 м с точностью:

$$\Delta l = \left| -L \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = 5,2 \cdot 10^{-8} \div 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad (1)$$

а лазерный деформограф с длиной плеча 17,5 м с точностью:

$$\Delta l = \left| -L \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = 1,75 \cdot 10^{-8} \div 1,75 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad (2)$$

где  $L$  – длина измерительного плеча лазерного деформографа, а  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

Использование более совершенных частотно-стабилизированных источников излучения, имеющих стабильность частоты на уровне  $10^{-9}$  при относительно нестабильной температуре окружающей среды и применение дополнительных мер



термоизоляции помещений, в которых работают лазерные деформографы, позволили поднять на порядок точность измерений всех компонент двухкоординатного лазерного деформографа.

Одной из выполненных автором диссертации работ стала модернизация лазерного деформографа, используя в качестве источника излучения лазерной системы излучения с электронной стабилизацией по линиям поглощения йода. В результате проведенных мероприятий был создан двухкоординатный лазерный деформограф с лазерно-интерференционными компонентами неравноплечего типа со следующими характеристиками: точность измерения деформации на базе прибора  $10^{-12}$ - $10^{-13}$ , точность измерения смещения 5,2 пм.

Полученная чувствительность прибора важна для изучения фоновых характеристик геодинамических процессов в звуковом и инфразвуком диапазонах частот, особенно на стадии их зарождения и развития, что крайне необходимо для моделирования исследуемых процессов и их возможного предсказания.

**В параграфе 1.2** описана модификация лазерного деформографа – мобильный лазерный деформограф (МД), представляющего собой унифицированную схему классического лазерного деформографа, собранного с применением современных материалов для изготовления конструктивных элементов интерферометра. Реализация установки была выполнена для упрощения его транспортировки в любой район без предварительной подготовки. Оптическая схема мобильного деформографа также, как и на стационарных системах, собрана на базе неравноплечего интерферометра Майкельсона. Основной задачей устройства является регистрация вариаций микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 0,3 нм.

Принцип измерения разности хода на базе мобильного деформографа построен также, как и у деформографов, обеспечивающих подобную или лучшую чувствительность, регистрируемый посредством фотоэлектронной аппаратуры. При этом хорошая стабильность температуры, давления, влажности, и что самое важное, учет их вариаций в измерениях, позволяет исключить ошибки измерений.

**В параграфе 1.3** описываются две гидроакустические излучающие системы с электромеханическим преобразователем для диапазонов 30–40 Гц (ГИ-1) и 19–26 Гц (ГИ-2), предназначенные для генерации тональных и фазоманипулированных гидроакустических сигналов, использовавшихся для проведения исследований в представленной работе.

Приводится общая схема конструкции, габариты и принцип работы ГИ-1. Экспериментальные измерения показали, что при практически одинаковой мощности

излучения ГИ-1, высокий уровень сигнала наблюдается уже при его погружении на глубину 12 м. Это подтверждает теорию о том, что при расположении источника звука близко к поверхности воды, т.е. при  $h/\lambda < 0,5$  (где  $h$  – заглубление источника,  $\lambda$  – длина гидроакустической волны), его поле соответствует полю диполя и амплитуда звукового давления тем меньше, чем меньше  $h$ . Волновые размеры излучателя достаточно малы, поэтому его акустическая мощность определяется выражением:

$$P_a = K\rho\omega^2 Q_m^2 / (8\pi c) \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $c$  – скорость звука в воде,  $\omega$  – циклическая частота колебаний поршней,  $Q_m$  – объемная колебательная скорость излучателя, зависящая от площади поверхности мембран,  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние дна водоема и поверхности воды. Коэффициент  $K$  определяется из расчета зависимости излучаемой мощности точечного источника от его заглубления:

$$P_a/P_0 = 1 - \sin(4\pi h/\lambda) / (4\pi h/\lambda) \quad (4)$$

На рисунке 1 приведен график зависимости относительной излучаемой мощности излучателя от его заглубления для излучателя ГИ-1, на основании расчета которого была разработана единая методика применения излучателя во всех экспериментальных исследованиях.

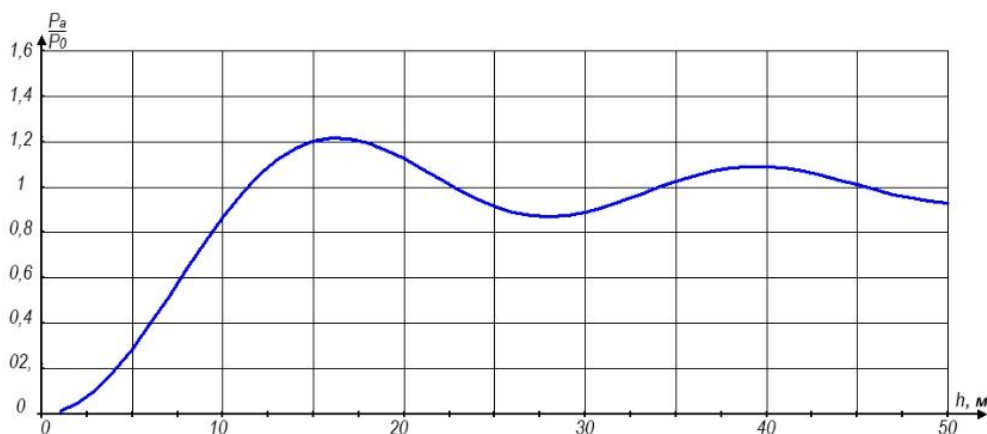
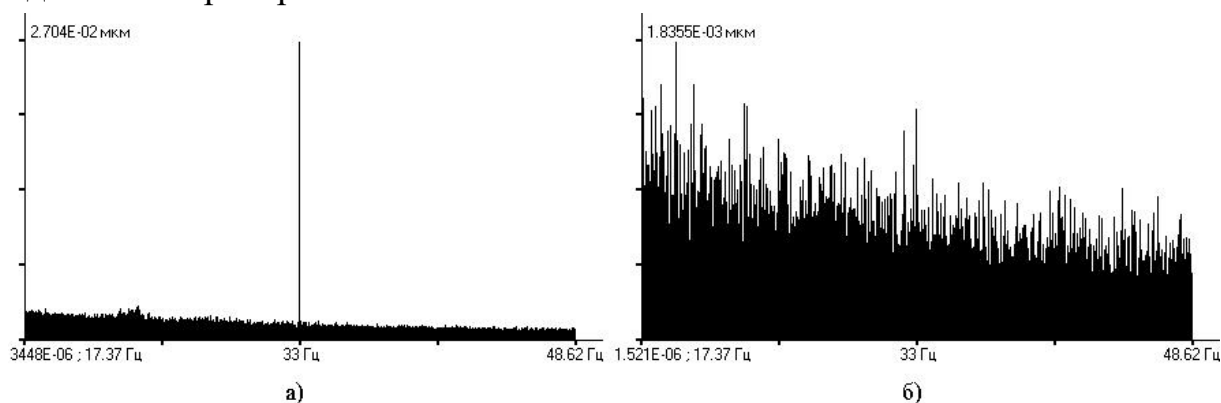


Рисунок 1 – Зависимость относительной излучаемой мощности точечного источника с частотой излучения 33 Гц от его заглубления.

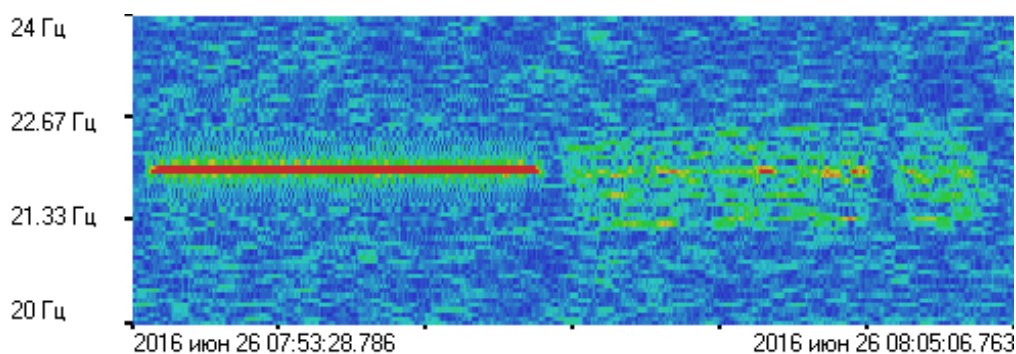
Далее в главе 1 приводится описание модификации ГИ-1 с возможностью его подводной буксировки и также создание перспективного устройства, позволяющего использовать ГИ-1 в качестве сейсмоакустического излучателя. На основе выполненных модификаций излучателя ГИ-1 были проведены экспериментальные исследования, подтвердившие его эффективность не только как гидроакустического источника излучения в разных режимах работы, но и как сейсмоакустического источника сигналов. Выполнены исследования распространения сейсмоакустического сигнала, генерируемого в земной коре излучателем ГИ-1, и

регистрация этого сигнала системой лазерных деформографов. На рисунке 2 приведены спектры принимаемого сейсмического тонального сигнала.



*Рисунок 2 – Спектры принимаемого сейсмического тонального сигнала компонентами двухкоординатного лазерного деформографа: а) СЮ; б) ЗВ.*

Далее описываются общая схема и принцип работы низкочастотной излучающей системы ГИ-2. Испытания и калибровка низкочастотной излучающей системы ГИ-2, имеющей значительный вес в воздухе, но относительно небольшой вес в воде, позволили отработать методику работы с ней при использовании небольших судов. Из соотношения (4) была рассчитана оптимальная глубина погружения для этого гидроакустического источника. При погружении излучателя на глубину 18 м, его резонансная частота составила 22 Гц. Во всех экспериментах с гидроакустическими излучателями, их работа контролировалась гидрофоном, а сейсмоакустический сигнал, образованный в результате трансформации излученного гидроакустического сигнала на границе “вода–дно”, регистрировался либо системой береговых лазерных деформографов, либо мобильным лазерным деформографом. На рисунке 3 приведена динамическая спектрограмма участка записи 52,5-метровой компоненты двухкоординатного лазерного деформографа при работе ГИ-2 в режимах излучения гармонического и сложного фазоманипулированного сигналов на удалении 10 км.



*Рисунок 3 – Динамическая спектрограмма участка записи 52,5 м лазерного деформографа при работе ГИ-2.*

**В параграфе 1.4** приведено описание вспомогательного оборудования, использовавшегося в экспериментальных исследованиях, позволяющего дополнительно учитывать динамику гидрофизических параметров морской среды, проводить позиционирование станций излучения и приема акустического сигнала. Приводится описание программного обеспечения, позволившего выполнить регистрацию экспериментальных данных (программа LD Data, реализованная ранее для работы с системой регистрации используемых лазерно-интерференционных систем) и пакета прикладных программ, позволяющий выполнить обработку и интерпретацию всех полученных экспериментальных результатов (программа Deformograph).

**В параграфе 1.5** представлен обзор результатов главы 1, в которой проведены предварительные экспериментальные исследования с использованием сейсмоакустико-гидрофизического комплекса. Комплекс включает в себя пространственно-разнесенную систему лазерных деформографов, низкочастотные гидроакустические излучающие системы, программно-аппаратный комплекс и дополнительное оборудование. Полученные данные подтверждают целесообразность выбора метода исследования трансформации волновых процессов в широком частотном диапазоне в зоне перехода между геосферами.

**Во второй главе** приводятся результаты исследования трансформации низкочастотных гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе геосфер.

**В параграфе 2.1** приводятся результаты исследования распространения гидроакустических волн на клиновидном шельфе. В акватории б. Витязь было проведено два подобных эксперимента с применением излучателей ГИ-1 и ГИ-2. Схема первого эксперимента показана на рисунке 4. В точке 1 на глубину 15 м с борта судна погружался излучатель ГИ-1, с помощью которого в воде генерировался непрерывный гармонический сигнал на частоте 33 Гц. В точках излучения 1 и приема 2-7 от поверхности до дна проводилась регистрация сигнала на горизонтах через каждые 1 м мобильной капсулой с гидрофоном Bruel & Kjaer 8104. По результатам измерения определялась плотность распределения гидроакустической энергии сигнала по глубине. На берегу трансформированные сейсмоакустические сигналы регистрировались береговым 52,5-метровым лазерным деформографом.



Рисунок 4 – Схема проведения эксперимента с ГИ-1 с расположением станции излучения и станций регистрации сигналов.

На рисунке 5 показаны результаты распределения по глубине создаваемого гидроакустическим излучателем акустического давления, полученные экспериментально с гидрофона Bruel&Kjaer 8103 и график распределения акустического давления по глубине, полученный методом регрессионного анализа.

Уравнение графика, показанного на рисунке 5, выглядит следующим образом:

$$S_r(z) = 2.9057602 \cdot 10^{-6} \cdot z^8 - 4.0551861 \cdot 10^{-4} \cdot z^7 + 0.0226453 \cdot z^6 - 0.64531 \cdot z^5 + 9.9131816 \cdot z^4 - 80.1690784 \cdot z^3 + 312.0636008 \cdot z^2 - 363.744199 \cdot z + 55.4440566$$

В точках 2-6 гидрофоном Bruel&Kjaer 8104 проводилось вертикальное зондирование давления, создаваемого гидроакустическими волнами, распространяющимися вдоль шельфа. Были получены профили распределения гидроакустического давления на частоте излучения (рисунок 6) и приведены уравнения их распределения.

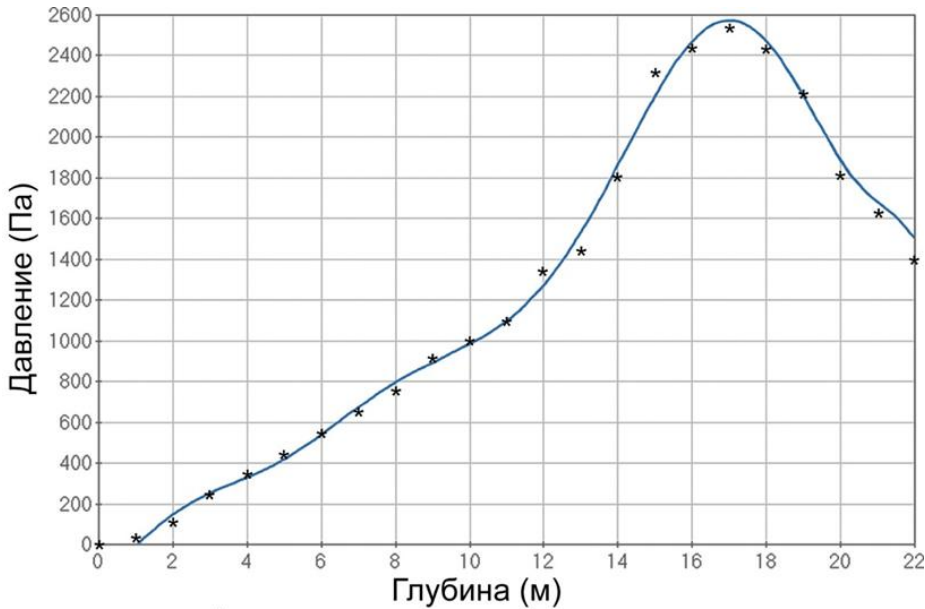


Рисунок 5 –  
Распределение по глубине  
акустического давления,  
создаваемого  
излучателем ГИ-1,  
полученный методом  
регрессионного анализа  
по данным зондирования.

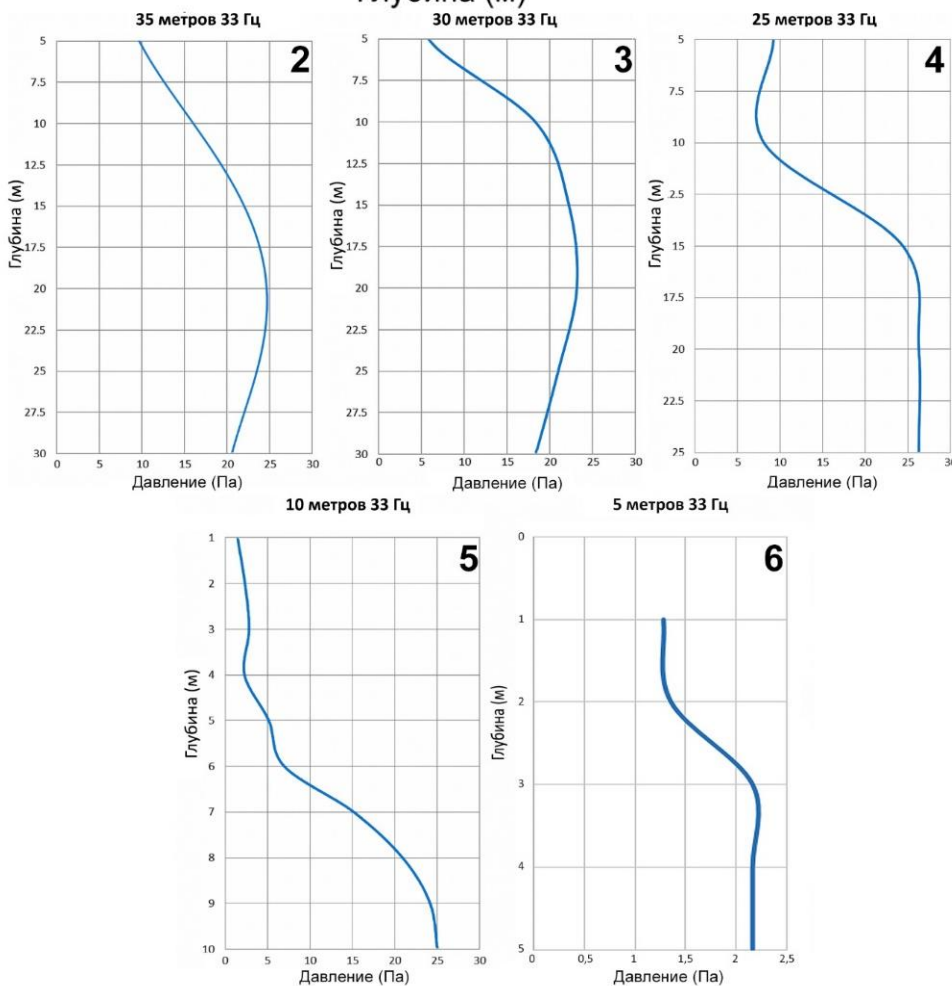


Рисунок 6 –  
Вертикальные  
профили  
распределения  
гидроакустического  
давления на  
частоте 33 Гц на  
станциях 2-б.

Рассчитаем плотность энергии гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу, по уравнениям кривых для вертикального распределения давления для каждой станции приема гидроакустического сигнала по формуле:

$$E_r = \int_0^h \frac{(S_h(z))^2}{2\rho_w c_w^2} dz \quad (5)$$

где:  $S_h(z)$  – уравнение кривой при глубине моря  $h$ ,  $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$  (плотность воды),  $c_w = 1500 \text{ м/с}$ . Излученный ГИ-1 сигнал доходит до лазерного деформографа в виде волн поверхностного типа. При этом основной вклад в смещения земной коры вносят затухающие поверхностные волны рэлеевского типа. Амплитуда данных волн экспоненциально затухает с глубиной земной коры. Поэтому плотность упругой энергии поверхностных волн рэлеевского типа можно подсчитать по следующему уравнению:

$$E_r = \int_0^{\lambda_b} \frac{\rho_b \omega^2 u^2 \exp(-4\pi z / \lambda_b)}{2 \cos(\theta)^2} dz \quad (6)$$

где:  $u$  – амплитуда смещения на частоте излученного сигнала, равная половине амплитуды волны на частоте 33 Гц, выделенной из записи лазерного деформографа,  $\lambda_b$  – длина волны рэлеевского типа на границе «воздух – земная кора», равная 104,5 м,  $\rho_b = 2100 \text{ м/с}$  (плотность пород верхнего слоя земной коры),  $\theta$  – угол между осью лазерного деформографа и линией источник-станция 2-6),  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

Гидроакустическая волна, проходящая вдоль шельфа, и затухающая волна Рэля, распространяющаяся вдоль границы раздела сред, имеют цилиндрическую расходимость. В этом случае с учетом расстояния до источника мы можем оценить величину плотности энергии гидроакустического источника, которая преобразуется в плотность энергии гидроакустической волны частотой 33 Гц, которая, в свою очередь, преобразуется в плотность энергии затухающей волны Рэля, регистрируемой лазерным деформографом. В таблице 1 приведены полученные значения плотности энергии, приведенные к расстоянию  $R$  от источника.

Таблица 1 – Плотности энергии источника гидроакустического излучения, гидроакустических волн на станциях измерения, волн Рэля.

Глубина, м	Плотность энергии источника излучения, Дж/м <sup>3</sup>	Плотность энергии ГА волны 33 Гц на станции, Дж/м <sup>3</sup>	Плотность энергии волны Рэля 33 Гц, Дж/м <sup>3</sup>
5	$1.167 \cdot 10^{-2}$	$8.7 \cdot 10^{-6}$	$1.29 \cdot 10^{-3}$
10	$1.167 \cdot 10^{-2}$	$5.84 \cdot 10^{-4}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$
25	$1.167 \cdot 10^{-2}$	$2.74 \cdot 10^{-3}$	$2.07 \cdot 10^{-3}$
30	$1.167 \cdot 10^{-2}$	$2.77 \cdot 10^{-3}$	$1.92 \cdot 10^{-3}$
35	$1.167 \cdot 10^{-2}$	$2.28 \cdot 10^{-3}$	$1.66 \cdot 10^{-3}$

На рисунке 7 приведены графики распределения плотности энергии по глубине для гидроакустических волн и волн Рэля.

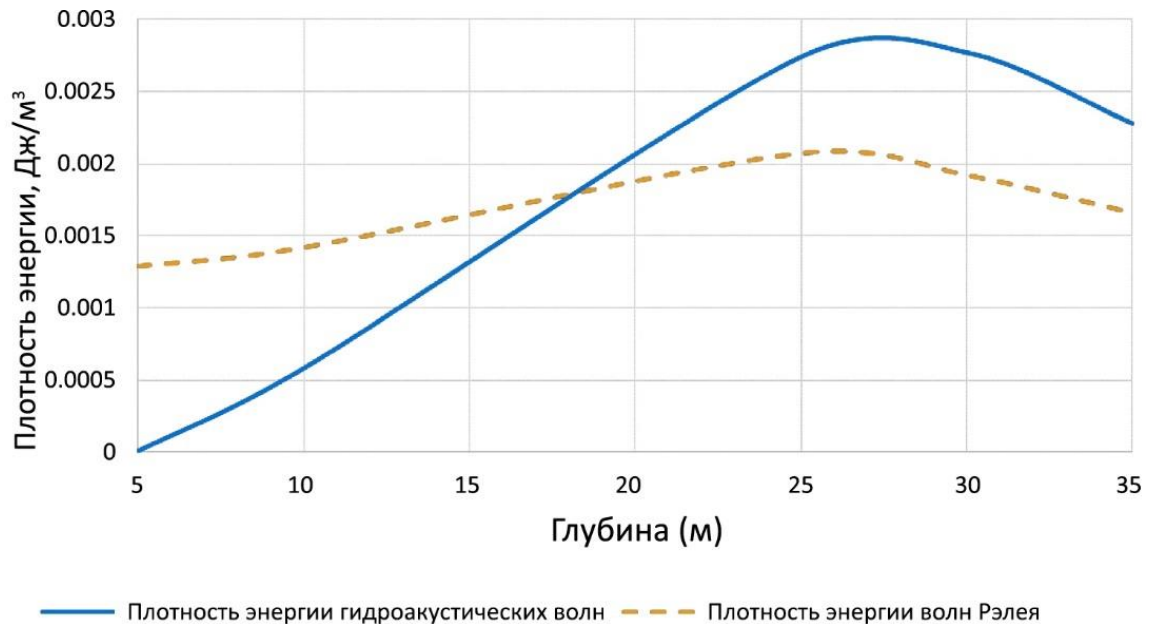
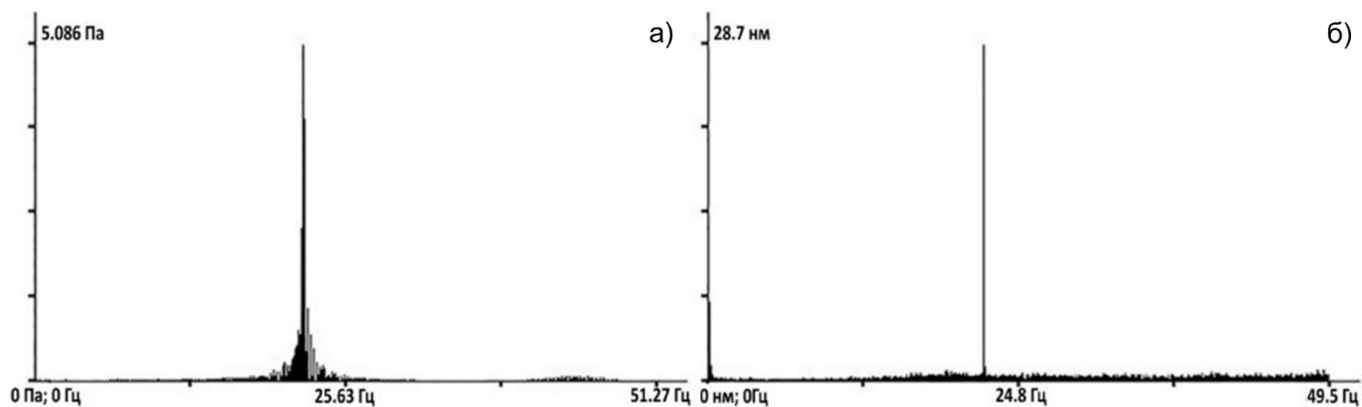


Рисунок 7 – Графики распределения плотностей энергии по глубине для гидроакустических волн и волн Рэлея.

На основе анализа полученных результатов сделаны следующие выводы: на глубинах  $h \geq \lambda/2$ , при длине волны  $\approx 45$  м, в среднем около 22% энергии гидроакустического источника преобразуется в энергию гидроакустической волны, распространяющейся вдоль шельфа; на глубинах  $h \leq \lambda/2$  энергия гидроакустических волн преобразуется в затухающие волны Рэлея, проходящие на границах “вода-дно” и “воздух-земная кора”; около 72% энергии гидроакустических волн преобразуется в затухающую энергию волн Рэлея; около 78% энергии, передаваемой гидроакустическим источником, преобразуется в энергию “объемных волн”, обычно называемых P-SV волнами. Эти волны уходят в земную кору и не регистрируются лазерным деформографом.

Второй подобный эксперимент с применением излучателя ГИ-2 также проводился в той же акватории, показанной на рисунке 4, но с более оптимизированной траекторией излучения, то есть трасса регистрации гидроакустической энергии излучения находилась по направлению оси большей компоненты двухкоординатного лазерного деформографа. Излучатель генерировал гармонические колебания на глубине 18 м. На рисунке 8 приведены участки спектров синхронных данных гидрофона и лазерного деформографа при работе излучателя ГИ-2 на одной из станций гидроакустического излучения.



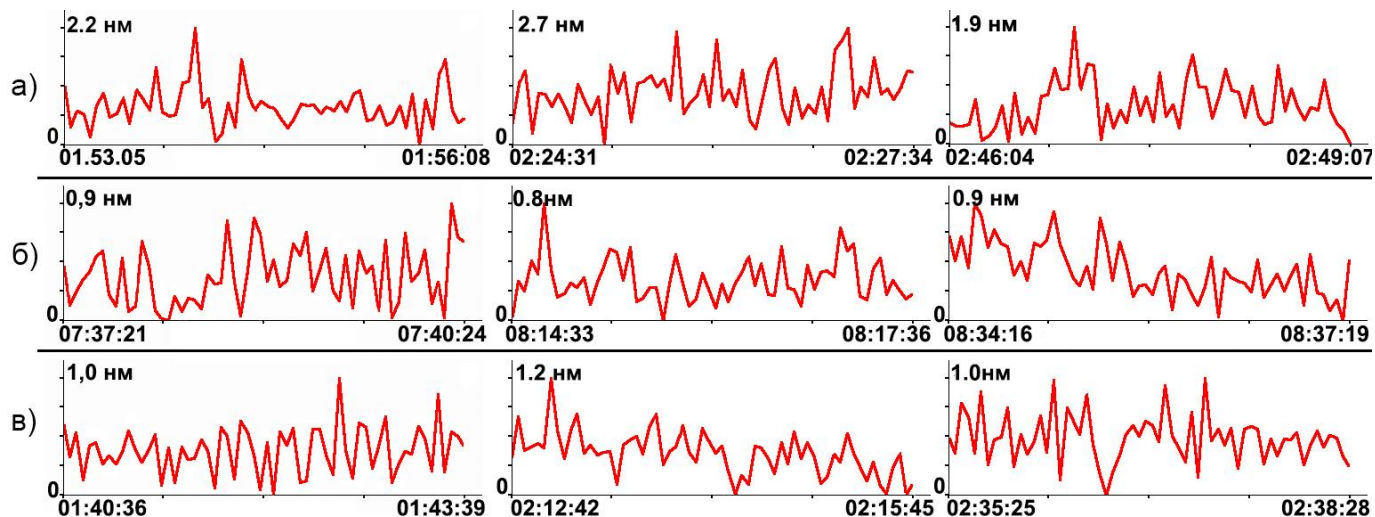


*Рисунок 8 – Участки спектров синхронных данных при работе излучателя ГИ-2: а) гидрофона и б) 52,5-метрового лазерного деформографа.*

По результатам проведения второго эксперимента были построены кривые, описывающие уровень распределения гидроакустического сигнала на каждой станции, начиная от поверхности до дна. Получены результаты расчета плотности гидроакустической и сейсмоакустической энергии при работе на каждой станции измерения и их соотношение. Определено, что в ближайшей точке измерения на частоте 22 Гц в гидроакустическую энергию перешло 83,8% излучаемой энергии, т.е. в дно ушло около 16 % энергии в виде объемных волн, что меньше, чем при работе излучателя на частоте 33 Гц. Это возможно в двух случаях: 1) каждый излучатель имеет определенную диаграмму направленности, ориентация которой определяет величину гидроакустической энергии, распространяющейся по трассе «излучатель – станции приема – лазерный деформограф», 2) глубина моря в месте излучения влияет на величину гидроакустической энергии, «высвечиваемой» излучателем в воду.

По результатам проведенных исследований двух гидроакустических излучателей с разной частотой излучения можно утверждать, что наиболее эффективно излучатель генерирует гидроакустические волны при глубине моря, равной половине длины волны, создаваемой им. А при глубине моря, сравнимой с длиной гидроакустической волны, эффективность этой генерации падает.

**В параграфе 2.2** приводится исследование сезонной зависимости трансформации энергии гидроакустических волн на границе геосфер. В разные сезоны года по одной методике проводился эксперимент по гидроакустическому излучению тонального сигнала на частоте 33 Гц с последовательным удалением от берегового измерительного комплекса до 6 км по направлению оси 52,5-метрового лазерного деформографа. Представлены динамические спектрограммы участков записи лазерного деформографа в периоды работы ГИ-1. На рисунке 9 показаны вариации амплитуды излученного тонального сигнала, принятого лазерным деформографом при работе ГИ-1 на станциях излучения, удаленных на 6, 4 и 2 км, соответственно, 21 октября 2012 г. и 09-10 июня 2013 г.



*Рисунок 9 – Вариации амплитуды сигнала, принятого лазерным деформографом при работе ГИ-1 на станциях с удалением 6, 4 и 2 км, соответственно: а) 21 октября 2012 г., б) 09 июня 2013 г., в) 10 июня 2013 г.*

При сравнении полученных результатов излучения на удалении 6, 4 и 2 км от лазерного деформографа максимальная величина принятого сигнала в октябре составила 2,3, 2,7, 1,9 нм, соответственно, с усреднённым значением около 0,9 нм. В июне максимальная величина амплитуды принятого сигнала на тех же станциях излучения в среднем составила 0,9 нм с усреднённым значением около 0,4 нм.

Проанализировано изменение коэффициента трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую энергию, которое было определено как отношение («сейсмоакустическая энергия»,  $W_c$ ) / («гидроакустическая энергия»,  $W_r$ ). Для летнего периода наблюдения данное отношение было выражено так:  $k_1 = W_{c1} / W_r$ , а для осеннего периода наблюдения имеем отношение:  $k_2 = W_{c2} / W_r$ . Учитывая то, что излучаемая гидроакустическая энергия была во всех экспериментах одинаковой, а упругие свойства пород дна практически не менялись, запишем:  $k_2 / k_1 = (W_{c2} / W_{c1}) \cong (A_{c2} / A_{c1})^2$ , где  $A_{c2}$  – амплитуда сейсмоакустической волны в осенний период,  $A_{c1}$  – амплитуда сейсмоакустической волны в летний период. В соответствии с полученными экспериментальными данными отношение коэффициентов, полученными в разные сезоны составило:  $k_2 / k_1 \cong 6$ .

**В параграфе 2.3** представлен обзор результатов главы 2 о возможности оценки характеристик источника гидроакустического излучения береговыми лазерными деформографами и особенностей распространения гидроакустического излучения в шельфовой области моря.

В третьей главе приведены результаты регистрации сейсмоакустических сигналов, создаваемых различными гидроакустическими источниками излучения, двухкоординатным лазерным деформографом. На основании принятых сигналов анализируется возможность двухкоординатного лазерного деформографа, как одного измерителя, так и в комплексе с другими измерителями контролировать перемещение низкочастотного гидроакустического источника излучения по акватории.

В параграфе 3.1 приводятся результаты регистрации судов различного класса, движущихся по разным траекториям в акватории, примыкающей к МЭС «м. Шульца». Это позволило предположить, что такие приборы, как лазерный деформограф способны регистрировать сигналы судов, движущихся на значительных расстояниях от измерительной станции. В результате продолжительных измерений было зафиксировано несколько случаев похожего по длительности частотного следа, наблюдаемого несколько часов. На рисунке 10 приведена динамическая спектрограмма данных двухкоординатного лазерного деформографа с примером непрерывно регистрируемого излучения от рейсового морского парома длительностью 7 часов. С учетом диаграммы направленности лазерных деформографов была исследована возможность использования двухкоординатного лазерного деформографа для определения направления на движущееся судно. С этой целью были выполнены расчеты направления на паром для 12 маркерных точек, географически определенных в системе Marine Traffic AIS и отмеченных временными отметками 1-12.

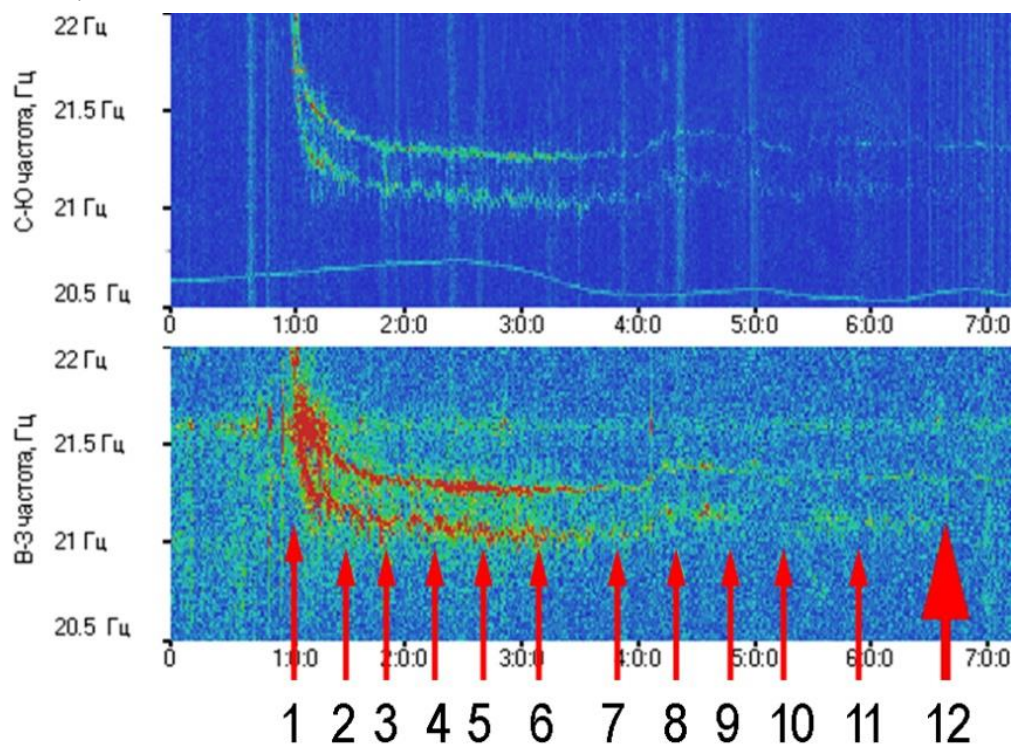


Рисунок 10 – Спектрограммы записи двухкоординатного лазерного деформографа от 3 июня 2014 г. при движении рейсового морского парома из порта Зарубино в направлении Южной Кореи.

Расчеты проводились с учетом положения судна относительно осей двухкоординатного лазерного деформографа. Проекция составляющей на ось лазерного деформографа «СЮ» составляет  $A(1,1) = A(1) \cos(\alpha_1 - \gamma_1)$ , где:  $\gamma_1$  - угол направления на источник, отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке,  $A(1,1)$  - амплитуда на частоте анализируемого сигнала, полученная при спектральной обработке записи компоненты деформографа «СЮ» при нахождении парома в точке 1,  $A(1)$  – «истинная» амплитуда смещения частиц среды, приведённая к длине базы компоненты деформографа «СЮ», при нахождении парома в точке 1,  $\alpha_1$  - угол между осью лазерного деформографа «север-юг» и направлением на север ( $198^\circ$ ). Проекция составляющей на ось компоненты лазерного деформографа «ЗВ» будет равна  $A(2,1) = A(2) \cos(\alpha_2 - \gamma_1)$ . Учитывая, что  $A(1)/A(2) = 2.8$ , получили формулу определения направления на источник в первой точке:

$$\gamma_1 = \arctg \frac{\left\{ \frac{A(1,1)\cos(\alpha_2)}{2.8 \times A(2,1)} - \cos(\alpha_1) \right\}}{\left\{ \sin(\alpha_1) - \frac{A(1,1)\sin(\alpha_2)}{2.8 \times A(2,1)} \right\}}. \quad (7)$$

При условии перемещения объекта слежения восточнее оси лазерного деформографа, проекция на ось 52,5-метровой компоненты СЮ будет равна  $A(1, i + 1) = A(1) \cos(\alpha_1 - \gamma_{i+1})$ . Проекция той же составляющей на ось 17,5-метровой компоненты ЗВ будет равна  $A(2, i + 1) = A(2) \cos(180^\circ - (\alpha_2 - \gamma_{i+1}))$ . В результате решения системы уравнения получена аналогичная формула определения направления на источник излучения. На рисунке 11 показаны спектры синхронных участков записей компонент двухкоординатного лазерного деформографа.

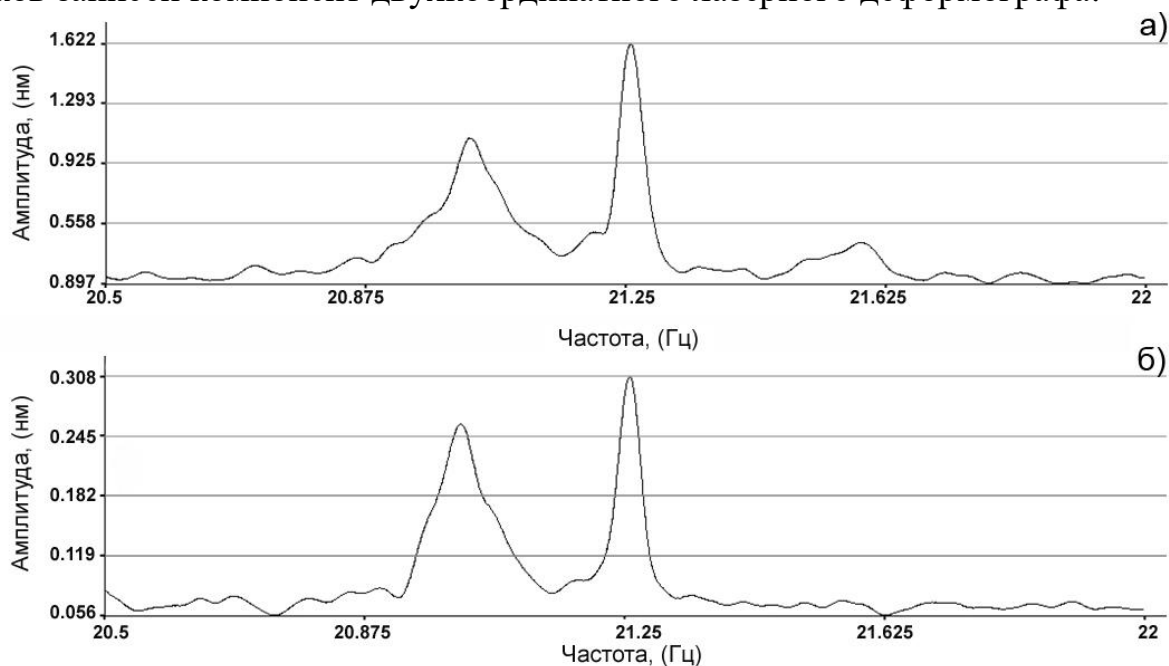
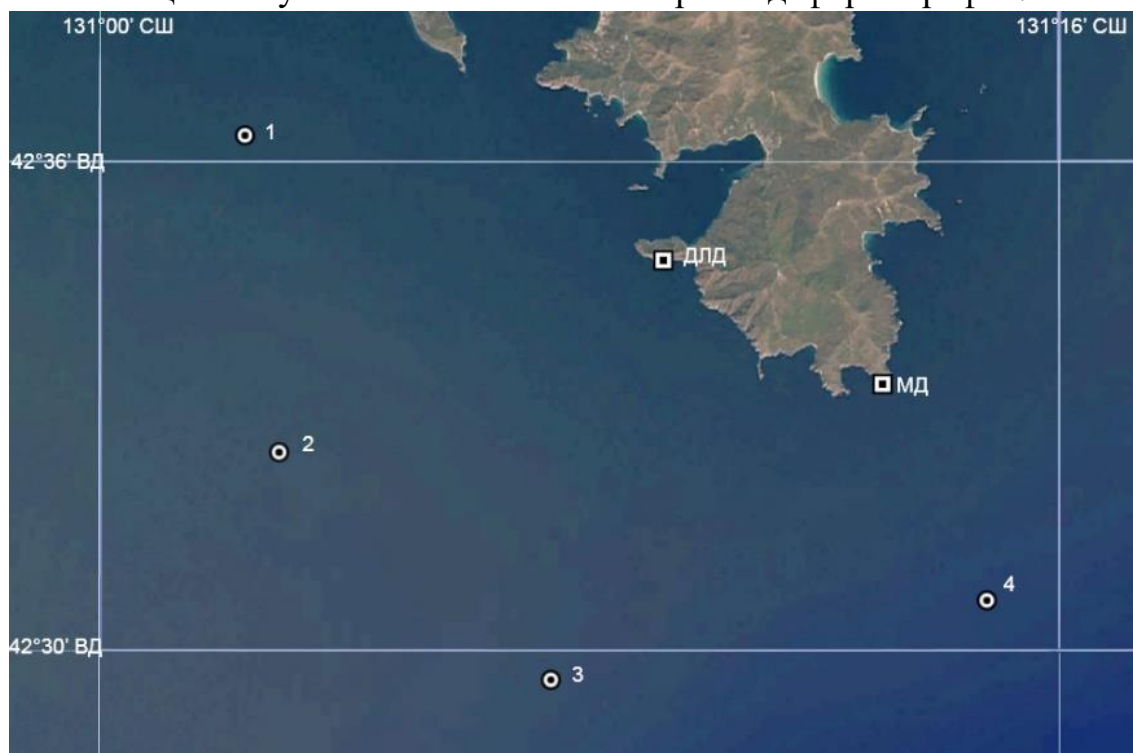


Рисунок 11 – Амплитудные Фурье спектры, рассчитанные по 5-минутным фрагментам сигналов компонент двухкоординатного лазерного деформографа: а) 52,5-м СЮ , б) 17,5-м ЗВ, взятым вблизи отметки 03.06.2014 11:15.

Таким образом на основании данных регистрации сигнала были получены результаты определения направления на источник излучения на всех 12 точках. По результатам полученных расчетов проведен анализ на основе двух возможных пути распространения сигналов от парома до двухкоординатного лазерного деформографа: 1) Излучённый сигнал захватывается звуковым каналом и распространяется по нему до глубин 35 м (примерно половина длины волны на частоте 21.5 Гц при скорости 1500 м/с), а далее сигнал до лазерного деформографа распространяется только по границе «вода-дно» в виде волны Рэлея поверхностного типа цилиндрической расходимости; 2) При отсутствии звукового канала сигнал, созданный паромом, по закону сферической расходимости распространяется до дна, а далее сигнал до лазерного деформографа распространяется по границе «вода-дно» в виде волны Рэлея поверхностного типа цилиндрической расходимости. В результате расчета потерь на распространение в обоих случаях сделан однозначный вывод распространения сигнала по первому пути.

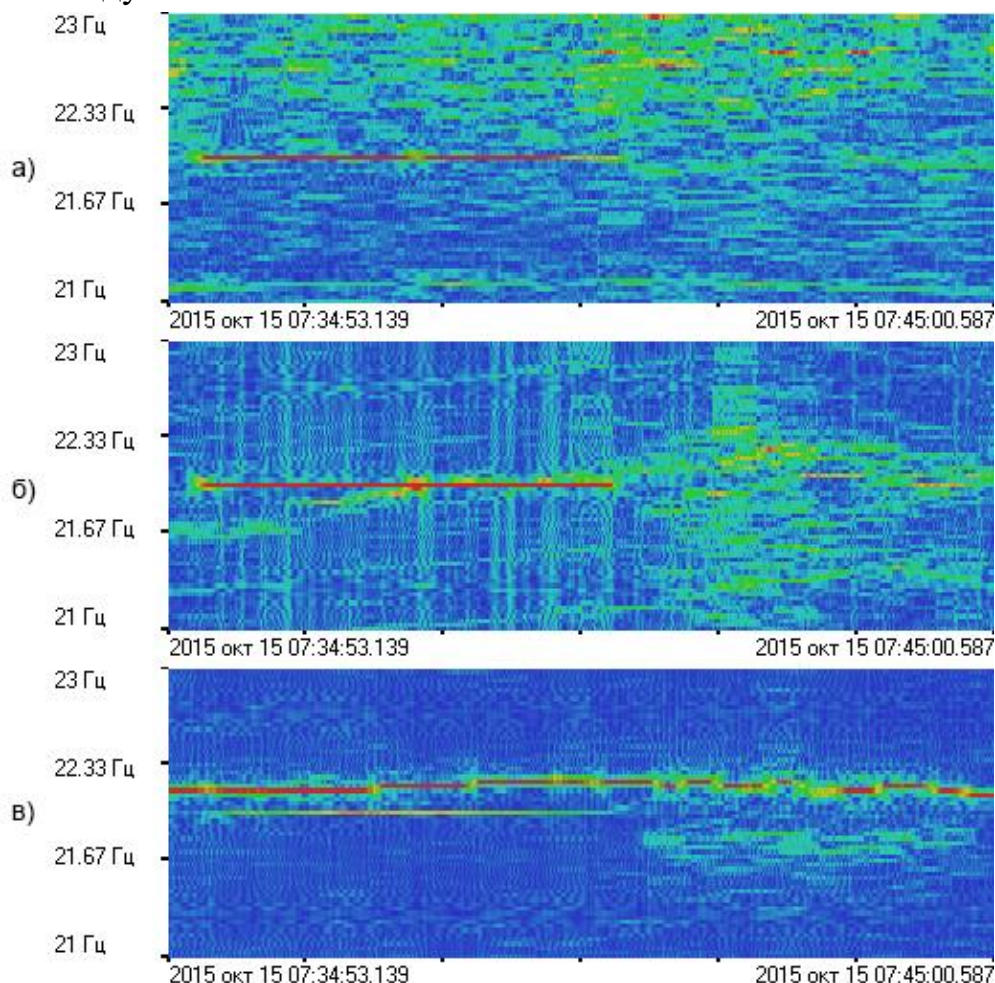
По полученным результатам ошибка в определении направления на источник (паром) находится в пределах от 0.2% до 16.5%. При этом, как ожидалось, максимальные ошибки связаны с движением парома на мелкой воде, где длина гидроакустической волны на частоте 20 Гц равна около 75 м.

**В параграфе 3.2** анализируются результаты экспериментальной работы по регистрации источников гидроакустического излучения системой пространственно-разнесенных лазерных деформографов. На рисунке 12 приведена схема расположения станций излучения и компонент лазерных деформографов.



*Рисунок 12 –Схема проведения эксперимента. 1-4 – Станции излучения.*

В эксперименте расстояние от каждой станций излучения до двухкоординатного лазерного деформографа составляло 10 км. Расстояние до мобильного деформографа с каждой станцией уменьшалось от 16 до 5,5 км. На рисунке 13 приведены динамические спектрограммы данных приема гидроакустического сигнала обоими деформографами, находящихся на удалении 5,74 км между собой.



*Рисунок 13 – Динамические спектрограммы лазерных деформографов при работе гидроакустического излучателя на ст. 1: а) лазерный деформограф 52,5 м. СЮ, б) лазерный деформограф 17,5 м ЗВ, в) мобильный лазерный деформограф.*

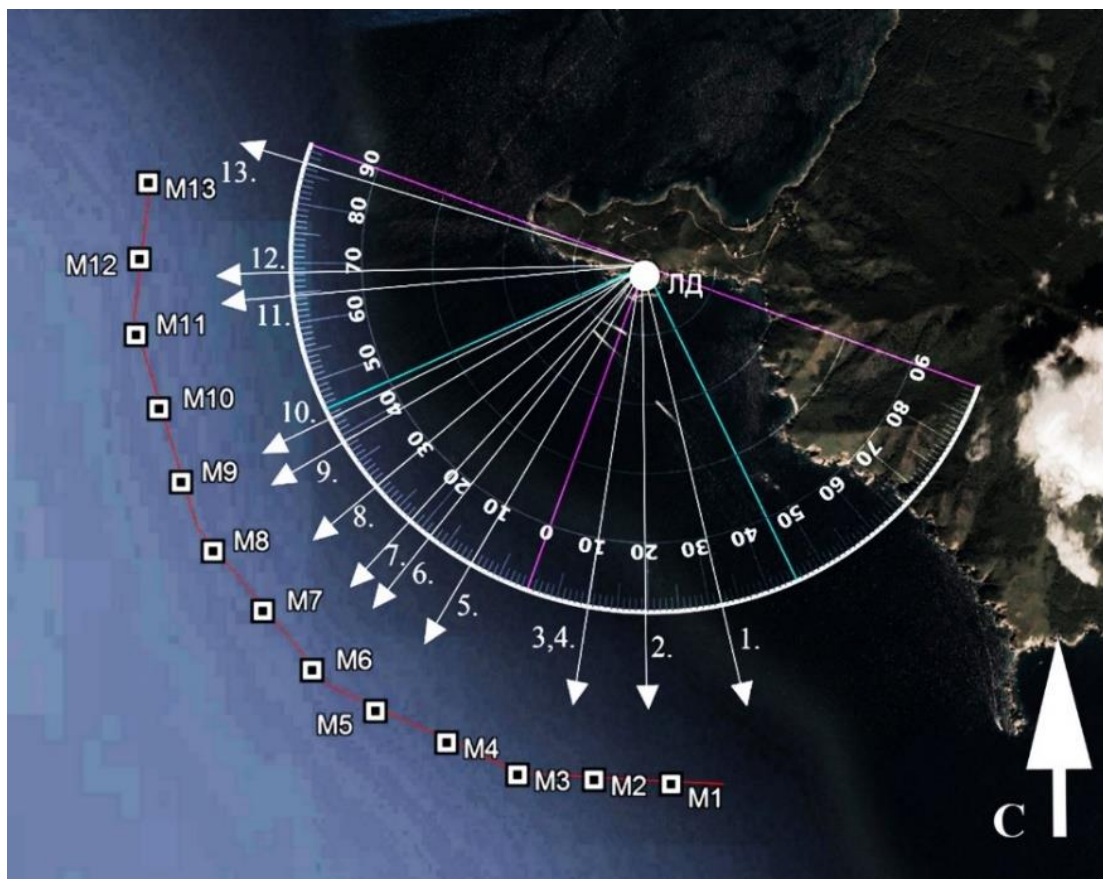
Результаты измерения амплитуды сейсмоакустического сигнала, регистрируемого лазерными деформографами в результате работы на станциях источника низкочастотного гидроакустического излучения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Величины амплитуды принимаемого сигнала лазерными деформографами при работе излучателя ГИ-2 на станциях 1–4.

№ ст.	Амплитуда СЮ (ДЛД), нм	Амплитуда ЗВ (ДЛД), нм	Амплитуда МД, нм
1	0,713	0,246	0,463
2	0,872	0,218	0,761
3	1,36	0,132	1,429
4	1,00	0,194	2,84

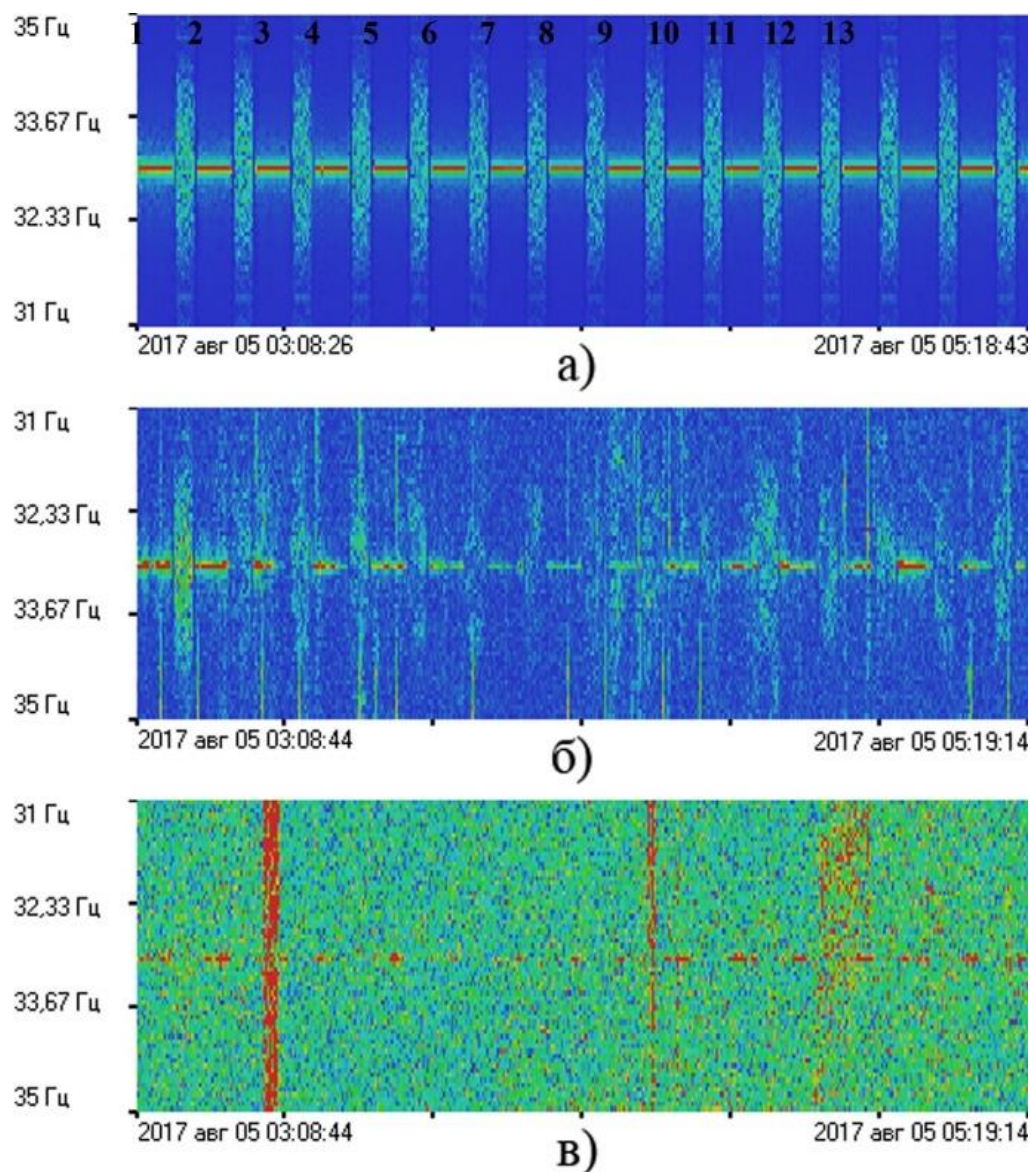
По полученным результатам сделаны выводы, что величина амплитуды сигнала, регистрируемая мобильным деформографом увеличивается, по мере приближения станций излучения к его местоположению. Вариации амплитуды принятого сигнала компонент двухкоординатного деформографа зависят от пространственного положения его измерительных осей, характеризующимися разными диаграммами направленности. Измерение разнонаправленными лазерными деформографами использует принцип поляризации сейсмоакустических сигналов, трансформирующихся из гидроакустических сигналов. Значения амплитуды принятого сигнала подтверждают изменение местоположения источника гидроакустического сигнала в соответствии с данной теорией.

**В параграфе 3.3.** описываются результаты локализации движущегося источника излучения двухкоординатным лазерным деформографом. В качестве источника излучения использовался излучатель ГИ-1 в модифицированном варианте, предназначенном для его буксировки. Схема эксперимента и результаты пеленгации источника излучения показаны на рисунке 10. Излучатель непрерывно перемещался с постоянной скоростью по траектории движения, равноудаленной на всем своем протяжении от берегового комплекса на 3 км.



*Рисунок 10 – Схема эксперимента с результатом пеленгации сигнала ГА излучателя. Квадраты М1-М13 – местоположение начала очередного излучения. Стрелки 1-13 – результат пеленгации.*

В результате проведенных экспериментальных работ была получена непрерывная регистрация гидроакустического сигнала двухкоординатным лазерным деформографом. На рисунке 11 приведены динамические спектрограммы синхронных участков записи контрольного гидрофона и компонент двухкоординатного лазерного деформографа, по которым можно определить уменьшение уровня амплитуды принимаемого сигнала при прохождении источника излучения участка траектории, близкого к углу 45 градусов, по отношению к направлению измерительных осей деформографа, что связано с их диаграммой направленности.



*Рисунок 11 – Динамические спектрограммы синхронных участков записи: а) контрольный гидрофон, б) 52,5-м ДЛД «север-юг», в) 17,5 м ДЛД «запад-восток».*

По результатам анализа результатов проведенного эксперимента, ошибка в определении направления на источник гидроакустического излучения, перемещающегося в шельфовой области, находилась в пределах от 0.2% до 10.5%. Данная погрешность вполне сопоставима с полученными ранее результатами по определению направления на источник излучения, удаляющегося от места наблюдения, поскольку измерения проводятся в шельфовой области моря. В данном



случае при глубине моря около 40 метров, длина гидроакустической волны на частоте 33 Гц составляет около 45 метров. Поэтому существенный вклад в ошибку вносят особенности трансформации гидроакустических волн на границе «вода-дно» и преобразования их энергии в энергию волн рэлеевского типа, распространяющихся по границе «вода-дно», а также различных других волн (продольных и поперечных, волн Стоунли и Лява).

**В параграфе 3.4.** обобщены выводы о перспективности применения двухкоординатного лазерного деформографа для регистрации и контроля источников низкочастотного гидроакустического излучения с использованием метода пространственно-разнесенных лазерных деформографов и метода амплитудной модуляции разнонаправленных компонент лазерных деформографов.

**В главе 4** приводятся результаты исследования возможности томографии морской земной коры на основе применения береговых лазерных деформографов и гидроакустических излучателей.

**В параграфе 4.1** описывается методика проведения экспериментальных исследований и обработки данных при исследовании возможности томографии земной коры в районе шельфа. Методика основана на том, что приёмная система не стоит на дне, как в классических методах, а расположена на берегу. Гидроакустический излучатель генерирует в море на разном удалении от береговой станции сигналы М-последовательности. Обработка результатов регистрации берегу основана на обработке прошедших по различным путям сигналов. Решение обратной задачи позволяет определить пути распространения сигналов в земной коре, скорости различных волн в слоях и на их границах, а по полученным расчетным данным определить упругие характеристики сред их распространения. Свертка данных контрольного гидрофона и береговых приемных систем осуществляется посредством встроенной в программу Deformograph процедуры с применением автокорреляционной функции, что позволяет выделить максимумы прихода сигнала из общей записи деформографов. По результатам полученной свертки определяется количество и времена приходов сигналов. Решая обратную задачу по временам прихода и расстоянию от одной точки излучения к другой строится модель морской земной коры на трассе «излучение–прием».

**В параграфе 4.2** описывается первая реализация метода томографии морской земной коры с использованием береговых лазерных деформографов на МЭС «м. Шульца». Схема эксперимента заключалась в излучении гидроакустического сигнала системой ГИ-1 с двух станций на расстоянии 3 и 6,5 км от деформографа по одной линии, и с четырех станций, располагавшихся по другой линии. Скорость звука в воде составляла от 1515 м/с у поверхности до 1487 м/с у дна. Были зарегистрированы сигналы со всех шести станций излучения. На рисунке 12 показана динамическая

спектрограмма данных лазерного деформографа за весь период проведения эксперимента.

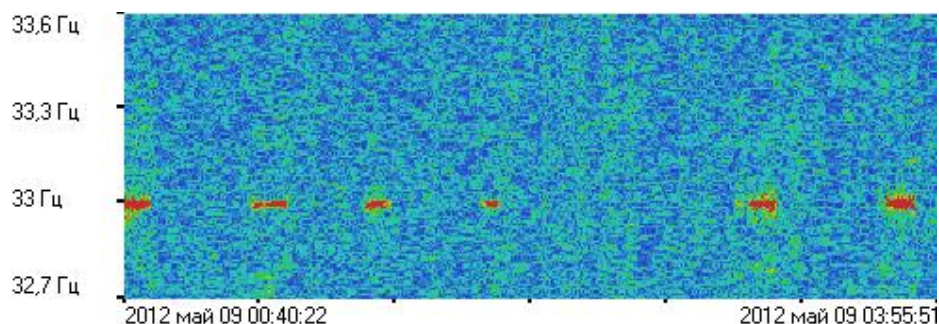


Рисунок 12 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа от 09 мая 2012 г.

С использованием методики корреляционной обработки данных лазерного деформографа с записью контрольного гидрофона получены результаты свертки на двух станциях излучения. На рисунке 13 приведен вертикальный разрез верхнего слоя земной коры по линии м. Шульца–станция 5, построенный по вычисленным данным.

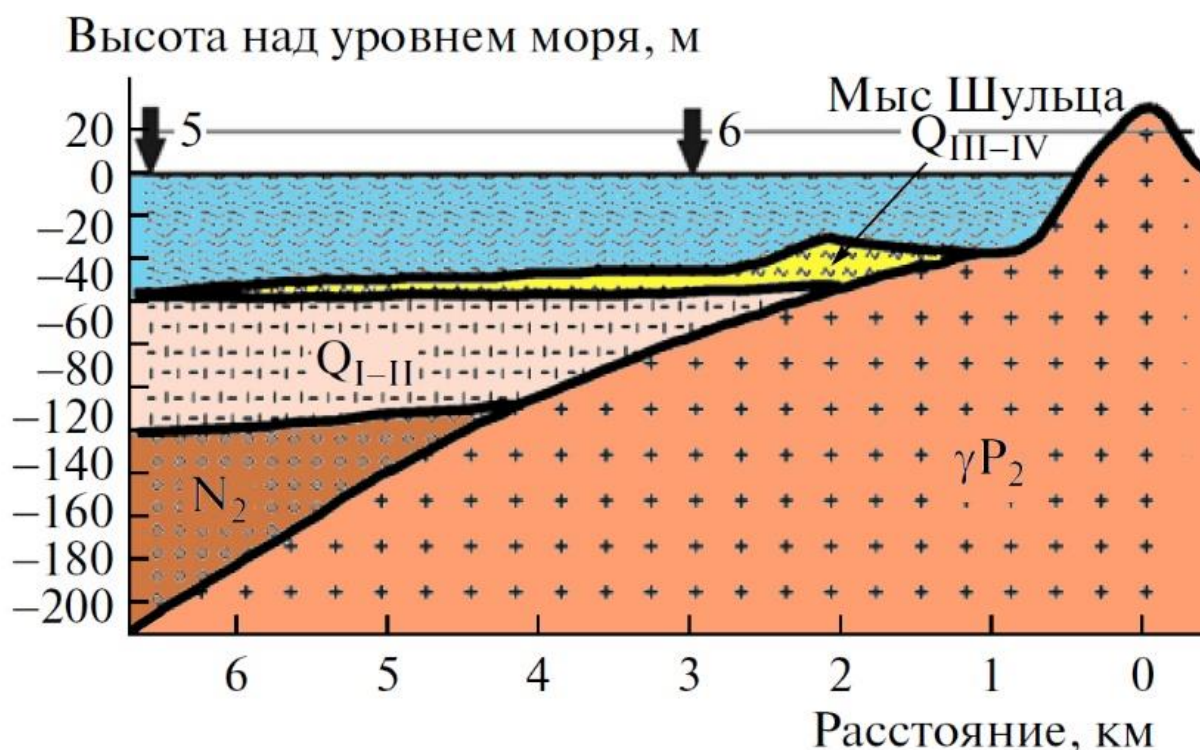


Рисунок 13 – Вертикальный разрез верхнего слоя земной коры по трассе распространения акустического сигнала «станция 5 – м. Шульца».  $Q_{I-II}$  – осадочный слой нижнего–среднего плейстоцена,  $Q_{III-IV}$  – осадочный слой позднплейстоценового возраста,  $N_2$  – литифицированный осадочный слой,  $\gamma P_2$  – полупространство, сложенное гранитоидами.

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в виде таблицы, где приводится время каждого прихода отраженного сигнала с точностью

до 0,001 с. При этом на одной из станций было зарегистрировано до 7 приходов сигнала М-последовательности. Обработка данных этой станции излучения легла в основу анализа, поскольку находилась почти по оси лазерного деформографа.

Мощность осадков в точках излучения определена в сейсмоакустических исследованиях, а продольная скорость звука в толще осадков получена по совокупности результатов сейсмоакустических исследований (методом общей глубинной точки) и подбора значений продольной скорости звука по литологическому составу рыхлого осадка. Определены возможные пути движения излученных гидроакустических сигналов от станции 5 до деформографа на м. Шульца. На начальном этапе вычислений для каждого слоя и границ разделов слоев по известным соотношениям между скоростями волн различной природы были определены скорости продольных и поперечных волн, волн Лява, затухающих и не затухающих волн Рэлея, волн Стоунли. Для определения первого прихода было рассмотрено 17 возможных, даже маловероятных, путей распространения сигналов. После сопоставления полученных расчетов с результатами свертки и дальнейших вычислений был выбран один из лучших вариантов прохода сигналов.

Вероятный путь первого прихода: излученный сигнал пересекает все слои, попадает на границу  $Q_{I-II}$  и полупространства  $\gamma P_2$ ; по границам  $Q_{I-II}-\gamma P_2$  и  $Q_{III-IV}-\gamma P_2$  проходит волна Лява, по границам слоев  $\gamma P_2$ -вода и  $\gamma P_2$ -воздух распространяется затухающая волна Рэлея, которая достигает лазерного деформографа. При расчетах приняты следующие скорости волн: скорость звука в воде 1500 м/с, скорость волны продольного типа в слое  $Q_{III-IV}$  1740 м/с, скорость волны продольного типа в слое  $Q_{I-II}$  1880 м/с, скорость волны Лява 3790 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границах  $\gamma P_2$ -вода и  $\gamma P_2$ -воздух 2970 м/с. Время движения по данному пути примерно 0.897 с.

Время второго прихода 1.233 с. При этом вероятный путь второго прихода: излученный сигнал пересекает воду, пересекает слой  $Q_{III-IV}$ , вдоль слоя  $Q_{I-II}$  распространяется волна продольного типа, по границе слоя  $Q_{III-IV}$  и полупространства  $\gamma P_2$  проходит волна Лява, по границам слоев  $\gamma P_2$ -вода и  $\gamma P_2$ -воздух распространяется затухающая волна Рэлея, которая достигает лазерного деформографа. При расчетах использовались характеристики скорости звука в воде и скорости волн продольного типа в слое  $Q_{III-IV}$  и в слое  $Q_{I-II}$ , определенные по первому приходу. Также использовались те же характеристики скоростей волны Лява и затухающей волны Рэлея на границах  $\gamma P_2$ -вода и  $\gamma P_2$ -воздух.

Время третьего прихода 2.016 с. Вероятный путь третьего прихода: излученный сигнал пересекает воду, вдоль слоя  $Q_{III-IV}$  распространяется волна продольного типа, по границе  $\gamma P_2$ -вода распространяется незатухающая волна Рэлея и по границе  $\gamma P_2$ -воздух затухающая волна Рэлея достигает лазерного деформографа. При расчетах добавлена скорость незатухающей волны Рэлея на границе  $\gamma P_2$ -вода 1540 м/с.

Время четвертого прихода 2.136 с. Вероятный путь четвертого прихода: излученный сигнал пересекает воду, по границе  $Q_{III-IV}$ -вода распространяется

затухающая волна Рэлея, по границе  $\gamma P_2$ –вода распространяется незатухающая волна Рэлея и по границе  $\gamma P_2$ –воздух затухающая волна Рэлея достигает лазерного деформографа. Дополнительно рассчитана следующая скорость волн: скорость затухающей волны Рэлея на границе  $Q_{III-IV}$ –вода 1890 м/с.

Время пятого прихода 2.497 с. Вероятный путь пятого прихода: излученный сигнал пересекает воду, по границе  $Q_{III-IV}$ –вода распространяется незатухающая волна Рэлея, по границе  $\gamma P_2$ –вода распространяется затухающая волна Рэлея и по границе  $\gamma P_2$ –воздух затухающая волна Рэлея достигает лазерного деформографа. При расчетах дополнительно принята скорость незатухающей волны Рэлея на границе  $Q_{III-IV}$ –вода 900 м/с.

Время шестого прихода 2.673 с. Вероятный путь шестого прихода: излученный сигнал пересекает воду, пересекает слой  $Q_{III-IV}$ , по границе  $Q_{III-IV}$ – $Q_{I-II}$  распространяется волна Стоунли, по границе слоя  $Q_{III-IV}$  и полупространства  $\gamma P_2$  проходит волна Лява, по границе  $\gamma P_2$ –вода распространяется затухающая волна Рэлея и по границе  $\gamma P_2$ –воздух затухающая волна Рэлея достигает лазерного деформографа. При расчетах принята скорость волны Стоунли, составившей 410 м/с.

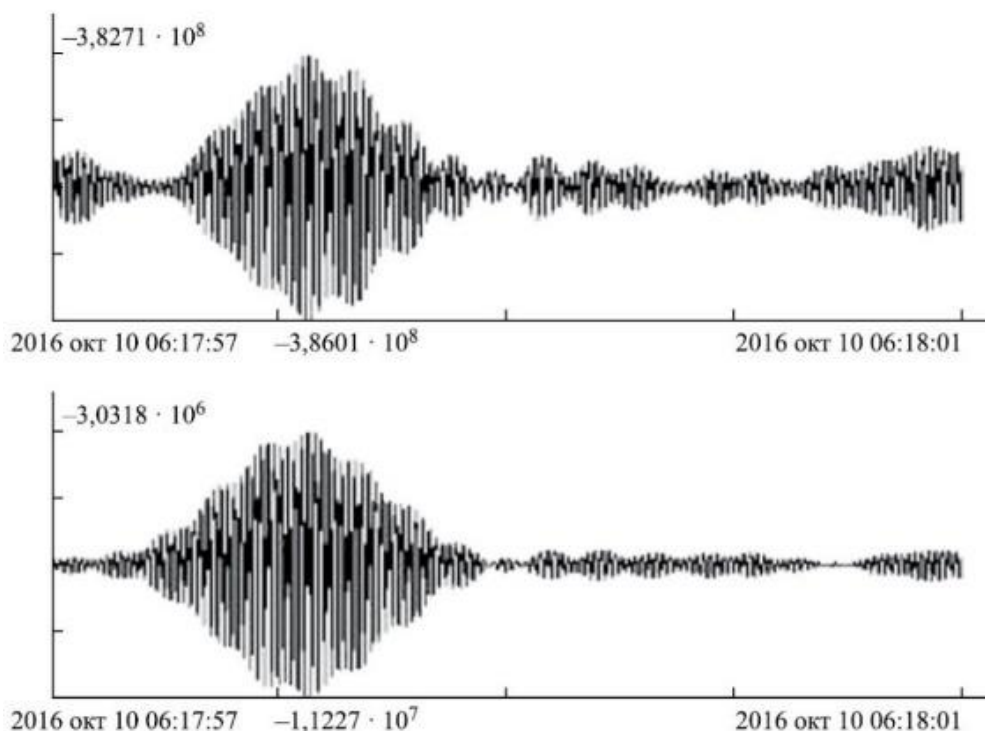
Время седьмого прихода 2.973 с. Вероятный путь седьмого прихода: излученный сигнал пересекает воду, пересекает слой  $Q_{III-IV}$ , по границе  $Q_{III-IV}$ – $Q_{I-II}$  распространяется волна Стоунли, по границе слоя  $Q_{III-IV}$  и полупространства  $\gamma P_2$  проходит волна Лява, по границе  $\gamma P_2$ –вода распространяется незатухающая волна Рэлея и по границе  $\gamma P_2$ –воздух затухающая волна Рэлея достигает лазерного деформографа. При расчетах используются все полученные результаты: скорость звука в воде 1500 м/с, скорость волны продольного типа в слое  $Q_{III-IV}$  1740 м/с, скорость волны Стоунли – 410 м/с, скорость волны Лява 3790 м/с, скорость незатухающей волны Рэлея на границах  $\gamma P_2$ –вода 1540 м/с, скорость волны Рэлея на границе  $\gamma P_2$ –воздух 2970 м/с.

**В параграфе 4.3** описываются результаты расчетов параметров морского дна, вычисленных по результатам эксперимента с использованием более мощного источника гидроакустического излучения ГИ-2 на частоте 22 Гц. Работы проводились на дистанции, удаленной от лазерного деформографа более чем на 17 км.

В результате свертки сигналов контрольного гидрофона и лазерного деформографа получено от 5 до 7 максимумов прихода М-последовательности. Разница приходов М-последовательности на таких расстояниях составляла до 12,5 с. По результатам анализа скорости прихода с использованием существующей модели распространения были рассчитаны пути распространения трансформированных сигналов, хорошо согласующихся с результатами, полученными в предыдущих работах.

**В параграфе 4.4** приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенной в б. Витязь Японского моря с целью развития технологии томографии земной коры шельфовых областей. Эксперимент был проведен с ожиданием в

перспективе проведения зимнего эксперимента по той же методике с поверхности льда. Излучатель ГИ-1 опускался на глубину 11 м при удалении от лазерного деформографа на расстояние 3300 м. Управляющие модули излучателя и приемника синхронизировались ГЛОНАСС-приемниками. Графическое представление результатов свёртки приведено на рисунке 14, по которому было выявлено пять максимумов приходов.

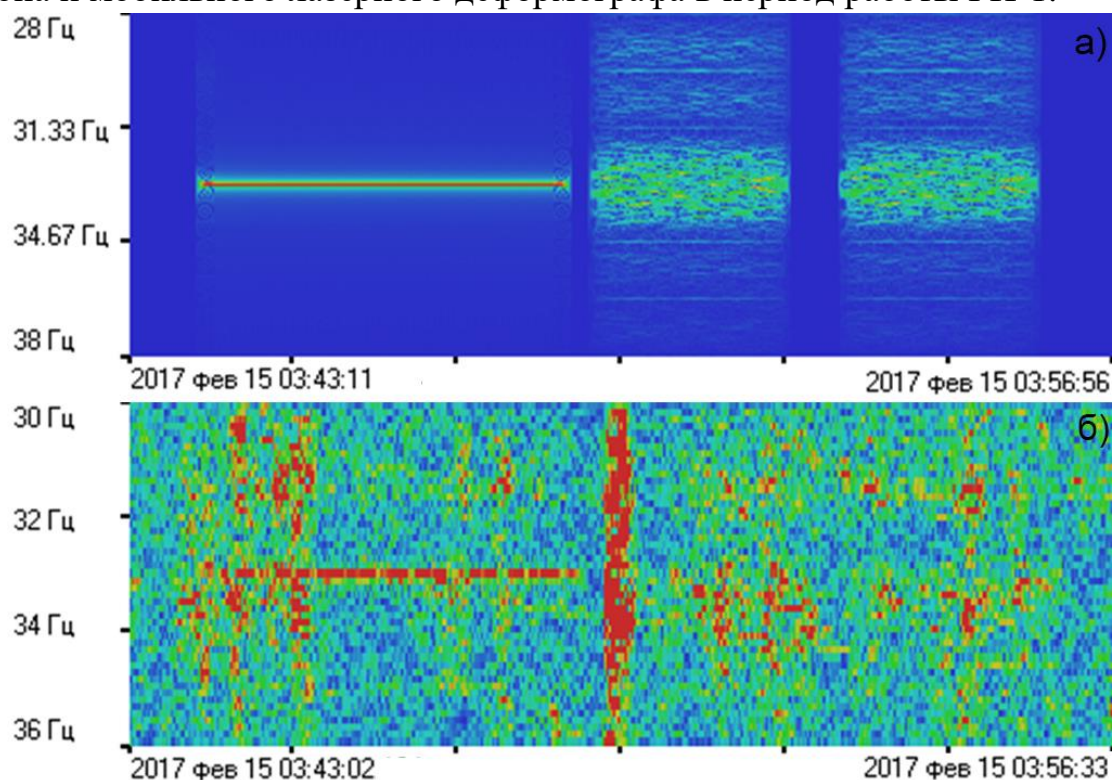


*Рисунок 14 – Графическое представление результатов свёртки данных двух лазерных деформографов с контрольным гидрофоном.*

Для каждого прихода сигнала составлено уравнение, описывающее его скорость. Рассчитаны длины пути распространения сигнала от излучателя и время приходов в соответствии с полученной моделью. Экспериментальные результаты, полученные при регистрации двухкоординатным лазерным деформографом фазоманипулированных сигналов, создаваемых в воде излучателем ГИ-1, позволили построить модель верхнего слоя морской земной коры в б. Витязь с определением скоростей волн поверхностного типа на трассе излучатель–приёмник. Вариации в приходах сигналов к двум компонентам лазерного деформографа связаны с различным расстоянием от точки излучения до данных деформографов, а также с различным строением верхнего слоя земной коры, на которых расположены их устои. Учитывая, что по границе вода–дно должны распространяться две волны поверхностного типа (затухающая и незатухающая волны Рэлея), и с учётом пяти приходов сигналов на лазерные деформографы утверждается, что на пути распространения сигнала от точки излучения до лазерных деформографов земная кора имеет следующее строение: водный слой – слой осадков – гранитное полупространство. В результате было показано, что строение верхнего слоя земной

коры б. Витязь состоит из слоя осадков, имеющего толщину не более 10 м и полупространства гранитоидов.

**В параграфе 4.5** приводятся результаты томографии морского дна в зимних условиях. Эксперимент проводился в 2017 г. на акватории Амурского залива, где в зимний период стабильно формируется ледовое поле. На берегу устанавливался мобильный лазерный деформограф. На расстоянии 3150 м от него с поверхности льда на глубину 12 м опускался ГИ-1, который создавал в воде гармонические и сложные фазоманипулированные (М-последовательности) сигналы с центральной частотой 33 Гц. На рисунке 15 приведены динамические спектрограммы сигналов контрольного гидрофона и мобильного лазерного деформографа в период работы ГИ-1.

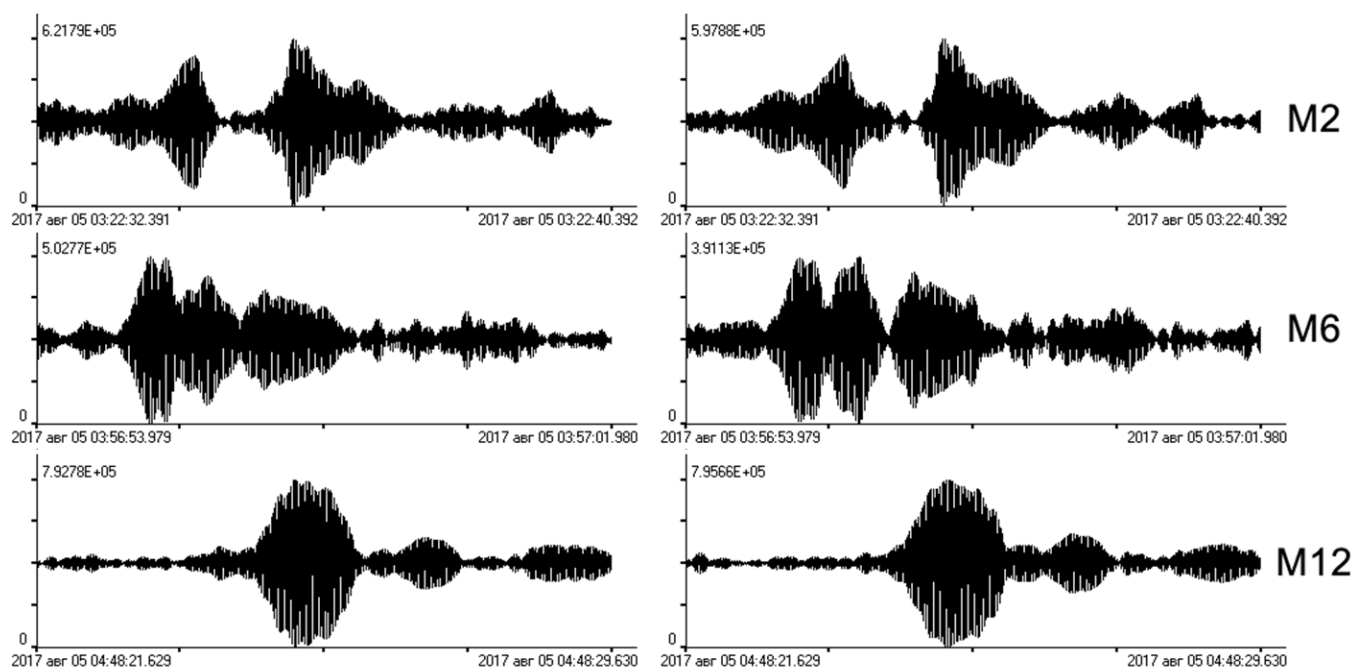


*Рисунок 15 – Динамические спектрограммы: сигнала контрольного гидрофона (а) и мобильного лазерного деформографа (б).*

По результатам свертки излученного и принятого сигналов выявлено пять приходов излученного сигнала. Весной эксперимент был в точности повторен с использованием маломерного судна. После обработки результатов эксперимента также было получено 5 приходов. Для уточнения полученных экспериментальных данных в зимний период эксперимент был повторен в феврале 2018 г. Полученные результаты полностью подтвердились. Анализ приходов сигналов проводился по известным исследованиям состава и возраста донных осадков в данном районе. По результатам зимнего эксперимента приходы сигнала соответствовали наименьшим скоростям около 2600, 2140, 1750, 1550 и 1280 м/с. В весеннем эксперименте эти приходы соответствовали скоростям около 2250, 1950, 1700, 1480 и 1300 м/с, что также указывает на сезонную зависимость распространения сейсмических сигналов.

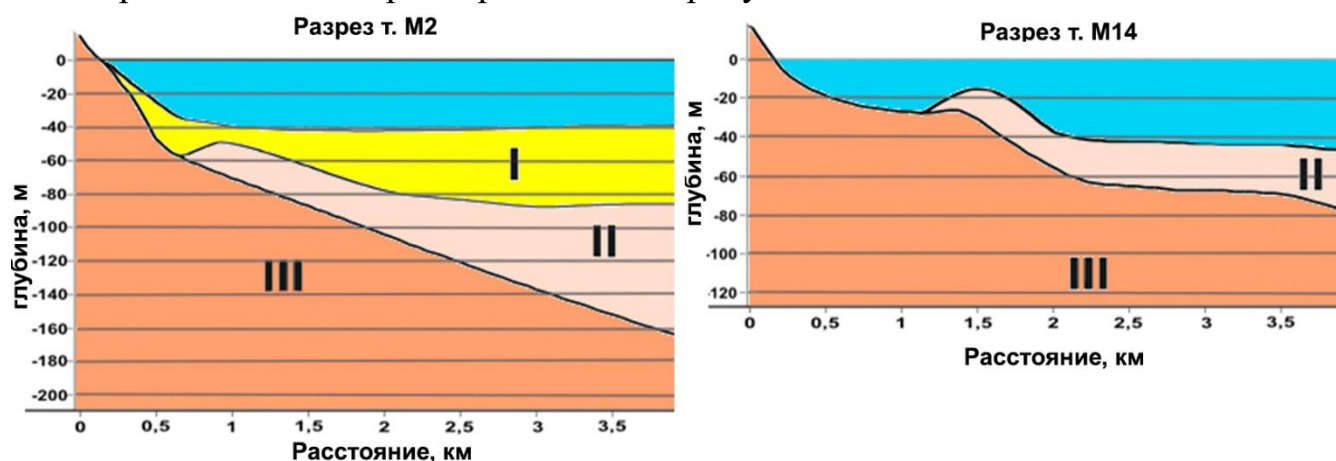
**В параграфе 4.6** приводятся результаты нескольких экспериментов по применению буксируемого излучателя в томографических исследованиях морского дна. Утяжеленный излучатель ГИ-1, оборудованный стабилизирующими поверхностями, погружался на глубину 12 м. В первом эксперименте судно непрерывно находилось в движении по заранее определенной траектории, по которой судно удалялось и затем приближалось к береговым измерительным устройствам, двигаясь вдоль оси лазерного деформографа. По результатам свертки были получены три прихода сигналов на лазерный деформограф, по времени прихода которых была уточнена ранее полученная модель строения морского дна в б. Витязь, состоящая из слоя осадочных пород и полубесконечного гранитного пространства. Во втором эксперименте была использована методика равноудаленного перемещения гидроакустического излучателя от измерительного прибора. ГИ-1 перемещался с одинаковой скоростью по траектории, показанной на рисунке 10.

На каждой станции получена свертка сигналов обоих компонент двухкоординатного лазерного деформографа, при этом результаты оказались практически идентичные. Некоторое расхождение в амплитудах связано с очень малыми искажениями фаз принятых сигналов. По полученным экспериментальным данным можно построить модель верхнего слоя морской земной коры при каждом проходе сигнала, а затем построить пространственную модель земной коры. Пример свертки сигналов на станциях показан на рисунке 16.



*Рисунок 16 – Свертки сигналов, принятых компонентами двухкоординатного лазерного деформографа «север-юг» (слева) и «запад-восток» (справа) с сигналами контрольного гидрофона на станциях излучения M2, M6, M12.*

По результатам свертки сигналов движущегося гидроакустического излучателя с данными лазерного деформографа были идентифицированы слои морского дна, некоторые модели которых приведены на рисунке 17.



*Рисунок 17 – Модели верхнего слоя морской земной коры по трассе излучения гидроакустического сигнала. I – осадочный слой позднеплейстоценоголоценового периода, II – осадочный слой нижнего-среднего плейстоцена, III – гранитоиды позднепермского периода.*

По результатам свертки сигналов с данными лазерного деформографа были идентифицированы слои морского дна: I – осадочный слой позднеплейстоценоголоценового периода, II – осадочный слой нижнего-среднего плейстоцена, III – гранитоиды позднепермского периода. При входе в залив Посьет в 3 км от оси лазерного деформографа «север–юг» в точке излучения гранитный слой находится на глубине 80 м и над ним 40 м слой осадков. В точке, находящейся под углом 45° к измерительным осям деформографа на удалении 3 км гранитный слой залегает на глубине 120 м, осадочный слой II имеет толщину около 60 м и на нем залегает тонкий слой осадочных пород I. Внутри залива глубина залегания гранитоидов составляет 160 м и граница между осадочными слоями на глубине 80 м.

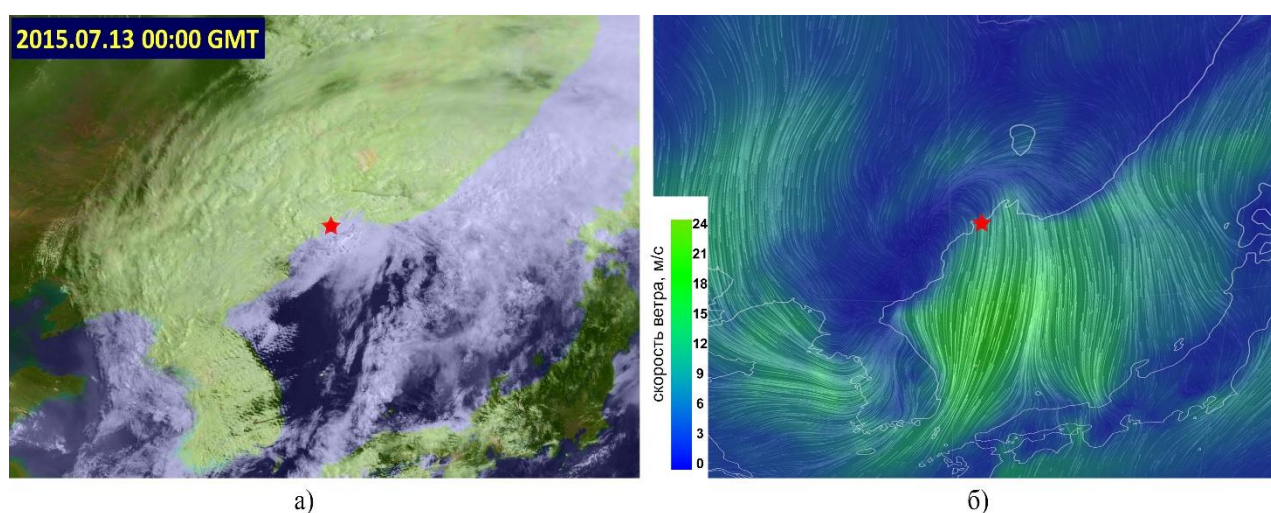
**В параграфе 4.7** представлены выводы о создании технологии изучения структуры и состава морской земной коры шельфовых зон, предназначенной также для ее применения на акваториях, покрытых льдом, без его разрушения. На основе применения методики построены модели исследуемых участков морской земной коры с определением основных параметров распространяющихся волн на трассе «излучение-прием».

**В главе 5** приводится описание тропических циклонов (тайфунов), оказавших влияние на дальневосточный регион России за последние годы и, как результат, связанное с ними открытие новых микросейсмических сигналов, зарегистрированных береговыми лазерными деформографами и получивших название микросейсмы «голос моря». Принимая во внимание, что микросейсмы «голос моря» при своем



распространении должны относиться к поверхностным волнам, была исследована возможность определения области генерации данных колебаний по данным двухкоординатного лазерного деформографа.

**В параграфе 5.1** рассматриваются классификация траекторий распространения и категорий тайфунов в Тихоокеанском регионе. Отмечен тип тайфунов, имеющих обратную ветвь перемещения, обладающей параболическими характеристиками. Такие тайфуны, стремящиеся выйти на материк, не заполняются, а начинают перемещение в северо-восточном направлении, в дальнейшем вызывая активное воздействие на акваторию Японского моря. По данным иностранного метеоагенства показана траектория перемещения тайфуна Чан-хом в 2015 г., точки понижения его категории и прекращения сопровождения. На основе данных Global Forecast System и спутниковых снимков показано, что вихревая структура циклона сохраняется, несмотря, что облачность в части циклона частично рассеялась (рисунок 18).

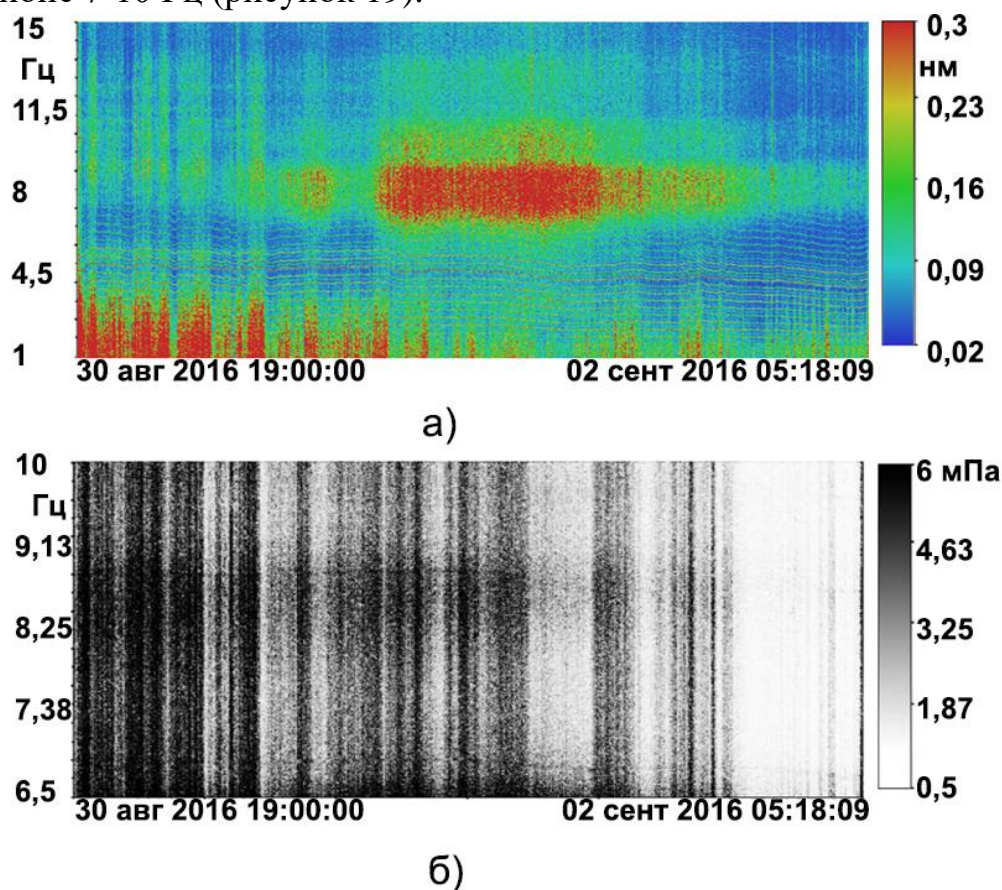


*Рисунок 18 – Сравнение спутникового снимка облачности и поля скорости ветра в приповерхностной области атмосферы при прохождении тайфуна Чан-хом 13 июля 2015 г. Многоугольником показано местоположение измерительного комплекса.*

По результатам натурных измерений на МЭС м. Шульца показано, что циклон достигнув берегов Приморского края не только сохранял свою структуру в результате изменения направления ветра, но и имел величину опасности урагана первой категории по шкале Саффира-Симпсона.

**В параграфе 5.2** приводится описание получения первых результатов по регистрации деформационных проявлений колебаний «голос моря», которым впоследствии было присвоено название микросейсмы «голос моря», по аналогии с атмосферными инфразвуковыми колебаниями «голос моря», открытыми ранее. Регистрация микросейсмических колебаний была выполнена двухкоординатным лазерным деформографом во время прохода тайфуна Лайонрок в акватории

Японского моря в августе 2016 г. Интерес изучения процессов вызванных тайфунов возник в результате того, что траектория перемещения тайфуна была не прогнозируема до самого его разрушения и он стал первым тайфуном, зашедшим в сторону Японского моря со стороны о. Хоккайдо. По результатам комплексной обработки данных лазерного деформографа и лазерного нанобарографа были получены синхронные динамические спектрограммы в диапазоне микросейсм «голос моря» в районе 7-10 Гц (рисунок 19).



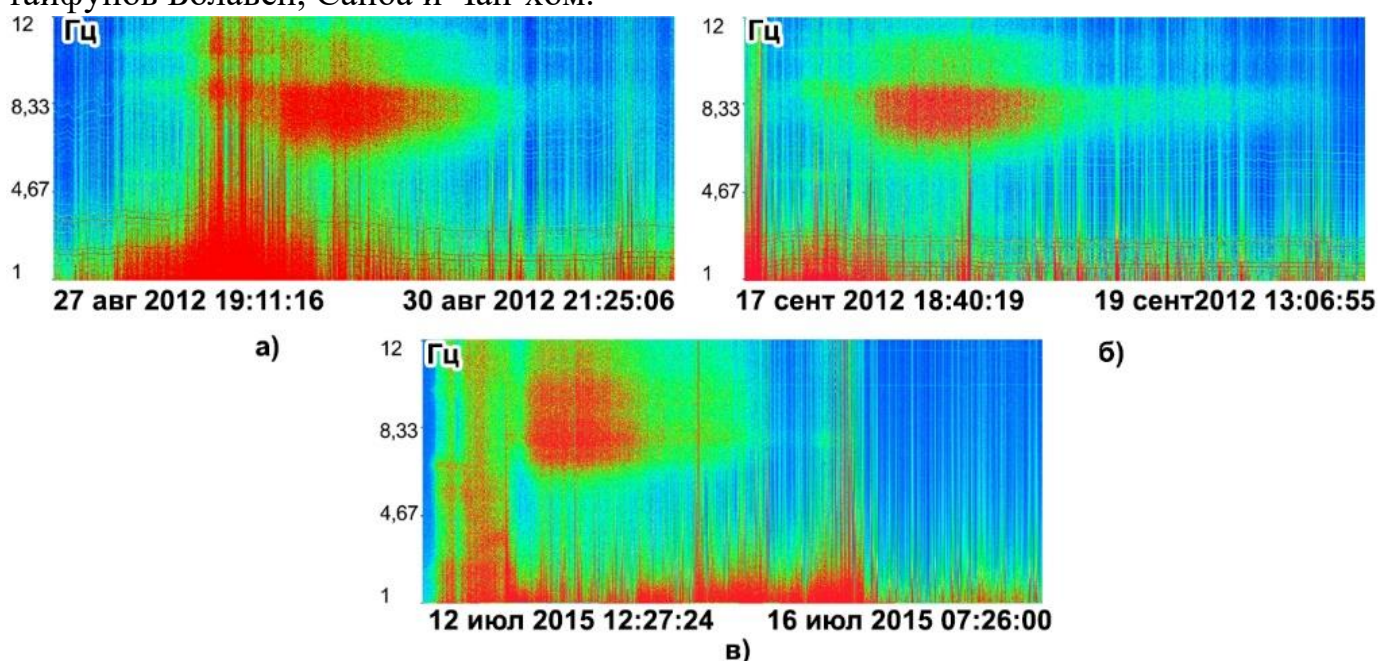
*Рисунок 19 – Синхронные записи лазерного деформографа (а) и лазерного нанобарографа (б).*

В записи лазерного деформографа выделены мощные колебания в полосе частот 6.5-8.5 Гц (с центральной частотой около 7.5 Гц). Начало возникновения данных мощных колебаний выявлено 31 августа около 16 ч 30 мин, а их условный конец 02 сентября 02 ч 50 мин. При сравнении с данными ветрового волнения, появление микросейсм «голос моря» происходит с началом прихода волн зыби с места их генерации тайфуном, с естественным временным запаздыванием, связанным с временем распространения от места их возникновения до места их регистрации.

**В параграфе 5.3** комплексно рассматриваются данные лазерных деформографов на предмет выявления генерации микросейсмических инфразвуковых колебаний «голос моря». Для синхронности интерпретации экспериментальных данных была определена воображаемая линия на земной

поверхности, соответствующая  $35^{\circ}$  с.ш., относительно которой рассматривалось время начала воздействия циклонического вихря и на основании данных движения тайфуна от Японского метеорологического агентства. В соответствии с принятой методикой были подготовлены осциллограммы и динамические спектрограммы, имеющие начальную точку при пересечении центральной области тайфуна принятой линии. Обработка данных лазерных деформографов проводилась в нескольких диапазонах с целью выявить проявляющиеся инфразвуковые возмущения диапазона «голос моря» и определить зависимость их проявления.

Для каждого тайфуна были выделены три основных периода развития инфразвуковых колебаний: развитие, максимальное возмущение и затухание. На рисунке 20 приведены динамические спектрограммы данных лазерного деформографа в диапазоне частот от 3 до 15 Гц, представляющих проявление сигналов в диапазоне «голоса моря» на измерительном полигоне в периоды влияния тайфунов Болавен, Санба и Чан-хом.



*Рисунок 20 – Динамические спектрограммы данных лазерного деформографа в диапазоне частот «голос моря»: а) Тайфун Болавен, б) Тайфун Санба, в) Тайфун Чан-хом*

Описаны некоторые синоптические характеристики по данным метеорологических наблюдений при перемещении атмосферных вихрей вблизи региона. Проведено сравнение появления инфразвуковых возмущений на исследуемых частотах в соответствии с ветровым воздействием на полуостров, где расположен измерительный комплекс, и влияния морских волн зыби, вызванных тайфуном.

Как известно, на внешней части тропического циклона наблюдается наиболее сильный ветер. Возникновение инфразвуковых микросейсмических возмущений

«голос моря» всегда происходит после начала действия тайфуна и продолжительного времени (до суток) после прохода центральной зоны тайфуна далеко от области нахождения измерительного полигона.

После сопоставления и совместного анализа комплексных динамических спектрограмм и осциллограмм экспериментальных данных, выявлена четкая взаимозависимость между колебаниями, вызванными морскими волнами зыби с микросейсмическими колебаниями «голос моря» в диапазоне 7–9 Гц. С началом регистрации этих колебаний с естественной задержкой регистрируются первичные и вторичные микросейсм. Исчезновение микросейсм «голос моря» коррелирует с исчезновением первичных микросейсм и слабо коррелирует с исчезновением вторичных микросейсм. Влияние ветра на измерительном полигоне не совпадает с максимальными амплитудами микросейсм «голос моря».

В параграфе 5.4 исследуется динамика микросейсмических инфразвуковых возмущений в зависимости от области влияния тайфунов. Помимо ранее исследованных тайфунов, были выявлены новые периоды микросейсмических колебаний «голос моря» в период с 2012 по 2019 гг. На рисунке 21 показана объединенная схема траекторий тайфунов, в результате влияния которых в регионе фиксировались микросейсм «голос моря».

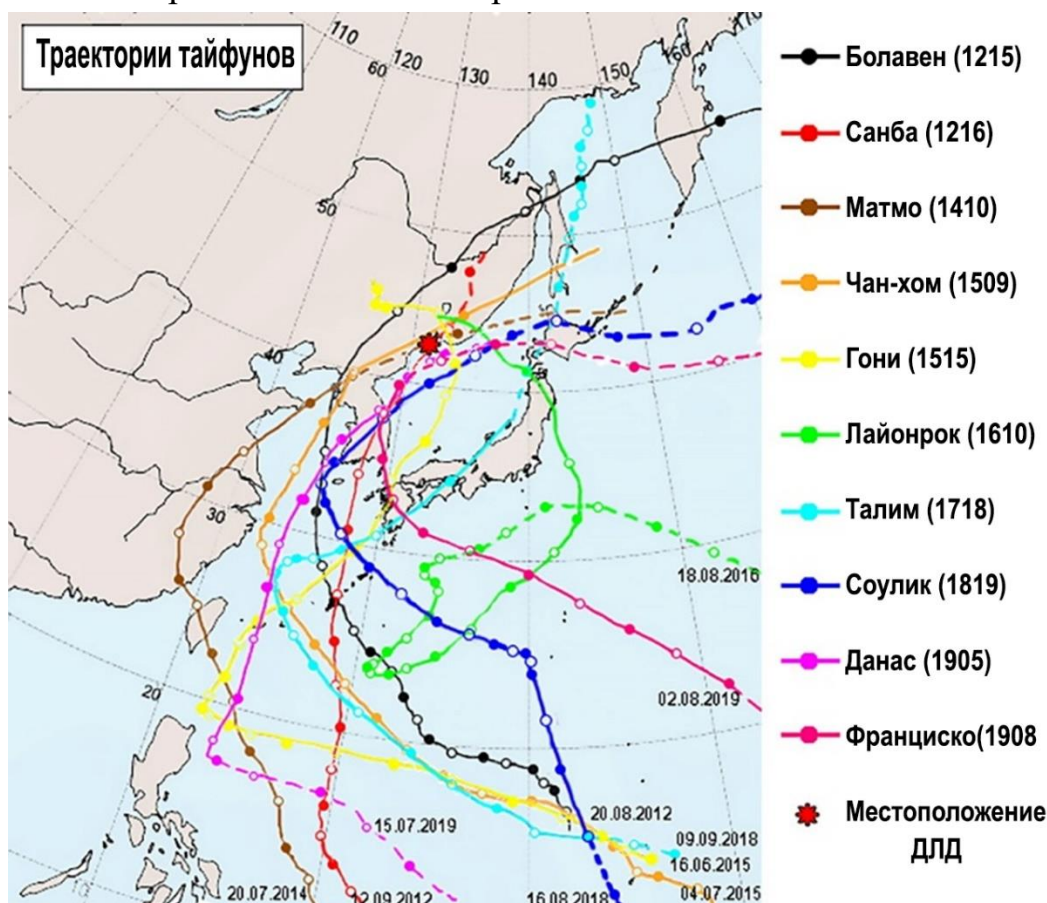


Рисунок 21 – Объединенная схема траекторий тайфунов периода 2012-2019 гг.

В рамках исследования приведены основные характеристики исследованных тайфунов, включающие минимальное давление и максимальную скорость ветра. Рассматривается география перемещения каждого тайфуна и приводятся динамические спектрограммы данных лазерного деформографа в диапазоне периодов микросейсм «голос моря» и микросейсм 1 и 2 рода, вызываемых ветровыми волнами. В результате комплексного анализа в периоды влияния более десяти тропических циклонов на акваторию Японского моря были зарегистрированы микросейсм «голос моря» на частотах в диапазоне от 6 до 11 Гц. Исходя из первоначального предположения о наличии зависимости диапазона частот проявления данных микросейсм от траекторий перемещения атмосферного вихря была построена сравнительная таблица 3, в которой приведены диапазоны частот регистрируемых микросейсм и их частотные характеристики, а тайфуны разделены по группам, объединяющих близкие частотные характеристики в зависимости от траектории движения циклонов.

Таблица 3. Частотные характеристики инфразвукового сигнала «голос моря»

Тайфун (номер)	Частотный диапазон, Гц	Пиковая частота, развитие, Гц	Пиковая частота, макс. амплитуда, Гц	Пиковая частота, затухание, Гц	Длительность сигнала, час
Группа 1					
Болавен (1215)	6.5–9.3	7.90	7.72	7.86	29
Чан-хом (1509)	6.7–10.6	7.87	7.90	7.85	27
Группа 2					
Данас (1905)	6.1–10.6	8.0	8.5	8.0	34
Франциско (1908)	7.4–8.8	8.3	8.3	8.3	10
Матмо (1410)	7–8.7	8.20	8.30	8.27	14
Соулик (1819)	6.5–9.6	7.52	8.50	8.80	26
Санба (1216)	6.3–9.4	8.4	8.5	8.4	25
Группа 3					
Гони (1515)	7.3–9.2	7.95	8.05	8.0	10
Лайонрок (1610)	6.5–8.5	7.5	7.7	7.8	29
Группа 4					
Талим (1718)	7.6–10.5	8.95	8.86	8.75	30

Из сравнительного анализа отметим, что время генерации инфразвуковых волн имеет достаточно продолжительные периоды. Процесс генерации инфразвукового сигнала даже в течение 10 ч, как при тайфунах Гони и Франциско, оказывает продолжительное воздействие на окружающую среду. Такие тайфуны как Матмо, Гони, Франциско генерировали достаточно невысокие амплитуды сигнала. В периоды влияния этих тайфунов диапазон инфразвуковых колебаний находится в полосе шириной менее 2 Гц. Отдельные диапазоны инфразвуковых колебаний достигают ширины до 4.5 Гц с длительностью более суток. Из рисунка 21 следует, что два тайфуна Болавен и Чан-хом проходят восточнее измерительного полигона, воздействуя на акваторию Японского моря восточной частью, где преобладает направление ветра южного направления. Можно отметить, что при прохождении этих тайфунов средняя частота инфразвуковых колебаний с максимальной амплитудой составила 7.8 Гц. Ряд тайфунов: Данас, Франциско, Соулик, Матмо прошли своим центром восточнее измерительного полигона, полностью воздействуя своей вихревой структурой на северо-западную часть Японского моря, смещаясь вдоль его побережья на северо-восток. Для данных тайфунов средняя частота с преобладающей амплитудой равна около 8.3 Гц. Траектория тайфуна Санба также примерно соответствовала направлению движения этой группы циклонов, но этот тайфун вышел своим центром в районе города Владивостока. Средняя частота инфразвукового сигнала с максимальной амплитудой, генерируемого этим тайфуном, составила 8.4 Гц. Два тайфуна из рассматриваемого списка Гони и Лайонрок подошли к дальневосточному региону России с его восточной стороны. При этом тайфун Гони пересекал акваторию Японского моря в течение полутора суток, в отличие от тайфуна Лайонрок, который стремительно пересек Японское море с востока на запад. Средние частоты с максимальной амплитудой для этих тайфунов также близки: 8 Гц во время влияния тайфуна Гони и 7.8 Гц во время влияния тайфуна Лайонрок. Тайфун Талим, траектория которого отличается от всей группы, перемещался вдоль западного побережья Японских островов, оказывая влияние на акваторию Японского моря западной частью циклонического вихря. В результате его воздействия генерировался сигнал с шириной полосы около 3 Гц и имеющий максимальную амплитуду на частоте 8.8 Гц. В результате были получены зависимости распределения частотных диапазонов данных микросейсмических сигналов «голос моря» в зависимости от траектории движения циклонов.

**В параграфе 5.5** описывается решение задачи по определению областей генерации микросейсм «голос моря» по данным двухкоординатного лазерного деформографа.

Методика, использованная ранее для исследования возможности определения пространственного положения гидроакустического источника излучения, была применена к задаче определения направления на область возможной генерации микросейсмических колебаний с учетом пространственного положения осей лазерного деформографа.

На рисунке 22 приведены синхронные динамические спектрограммы данных компонент двухкоординатного лазерного деформографа в диапазоне регистрируемых микросейсмических сигналов «голос моря» в период влияния тайфуна Чан-хом.

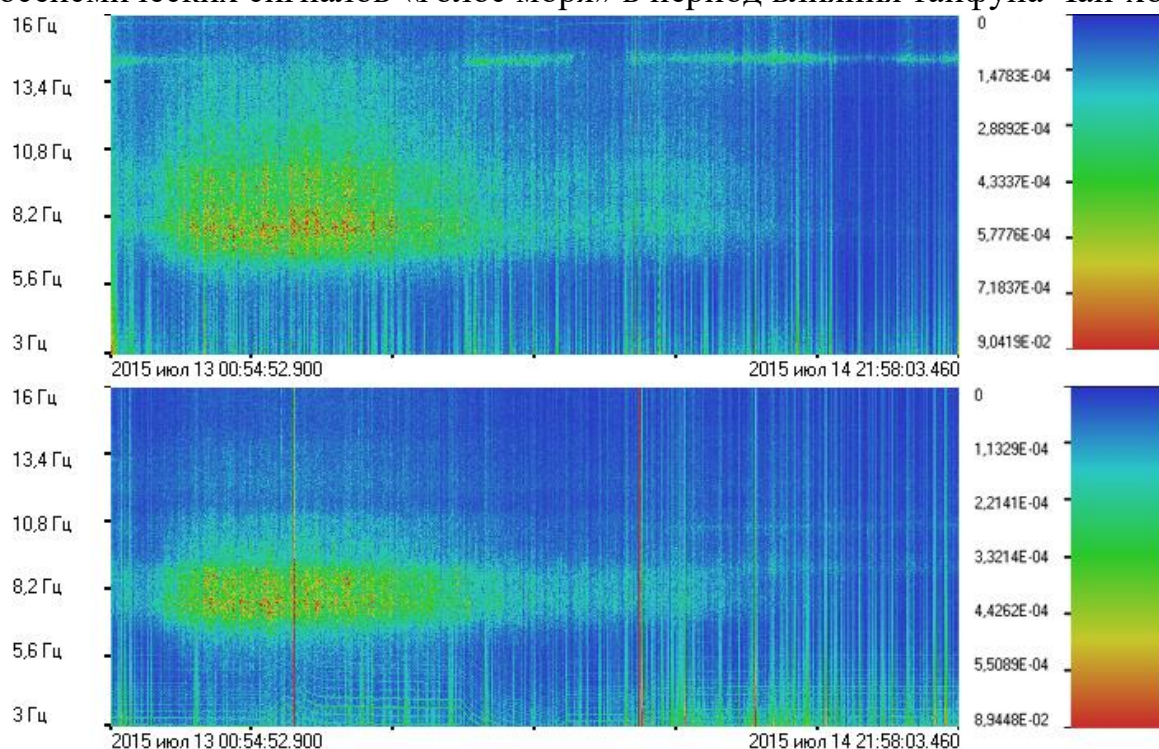


Рисунок 22 – Динамические спектрограммы микросейсм «голос моря» по данным ДЛД в июле 2015 г: 52,5-метрового лазерного деформографа (вверху) и 17,5-метрового лазерного деформографа (внизу).

По результатам обработки данных были получены последовательности изменения величины амплитуды микросейсмического сигнала «голос моря». По результатам анализа изменения амплитуды микросейсм «голос моря» с учетом расположения осей двухкоординатного лазерного деформографа, были определены направления на области генерации микросейсм «голос моря». На рисунке 23 показаны вариации амплитуды сигнала.

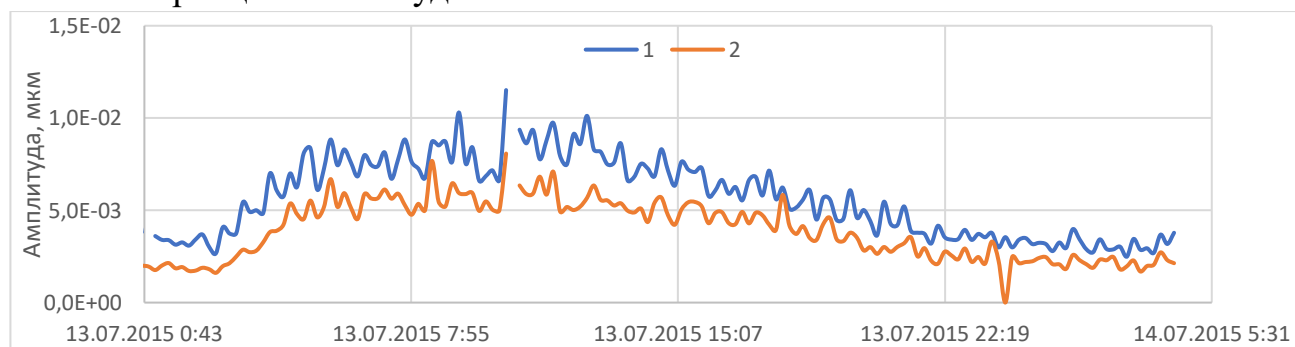
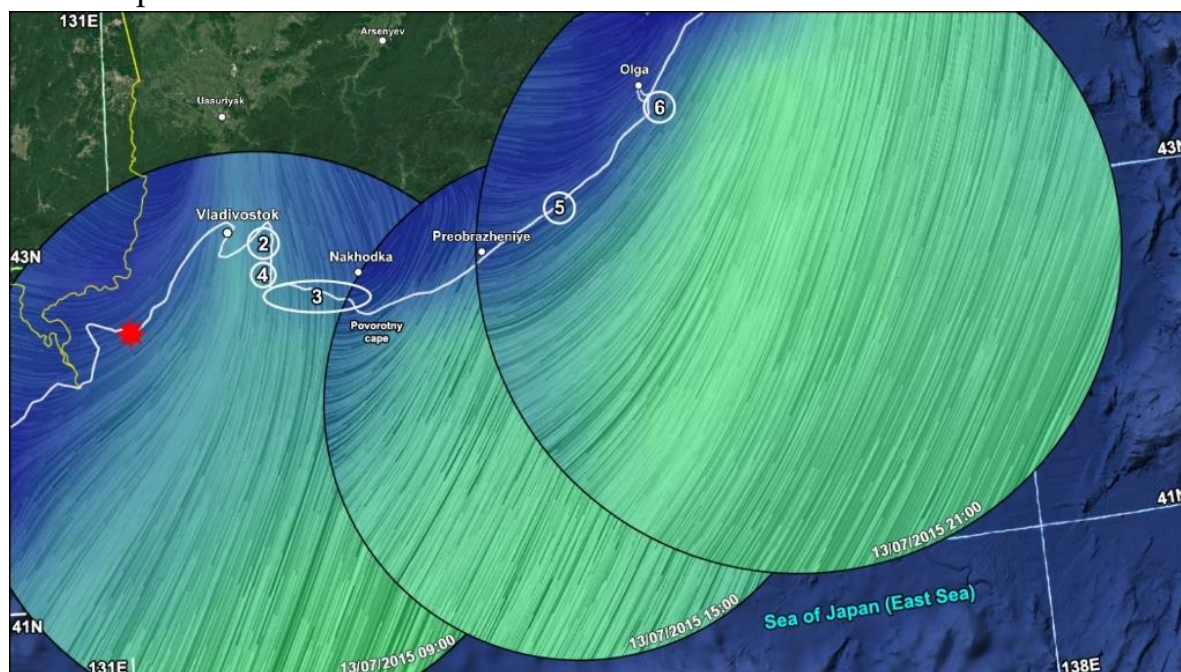


Рисунок 23 – Вариация амплитуды микросейсмического сигнала «голос моря», регистрируемого ДЛД в период прохождения тайфуна Чан-хом: 1 – вариации амплитуды сигнала, регистрируемого 52,5-метровым ЛД; 2 – вариации амплитуды сигнала, регистрируемого 17,5-метровым ЛД.

На рисунке 24 показаны результаты определения областей генерации микросейсм «голос моря» при перемещении тайфуна Чан-хон вдоль побережья Японского моря.



*Рисунок 24 – Области генерации микросейсм «голос моря».*

*2-6 – последовательные (по времени) области генерации микросейсм.*

*Красной отметкой указано место расположения двухкоординатного лазерного деформографа.*

Области генерации микросейсм «голос моря» последовательно перемещаются вдоль побережья Японского моря Приморского края. При этом область низкого атмосферного давления в это время находилась над территорией Приморского края.

Аналогичным методом были обработаны данные двухкоординатного лазерного деформографа и определены области генерации микросейсм «голос моря» еще двух тайфунов: Матмо в 2014 г. и Хагупит в 2020 г. Во время влияния тайфуна Матмо области генерации микросейсм формировались в шельфовой области западного побережья японского острова Хоккайдо и постепенно смещались с севера на юг до полного затухания. В период перемещения тайфуна Хагупит микросейсмсы начали регистрироваться с направления Восточно-Корейского залива, смещаясь вдоль восточного побережья КНДР и затухая в районе залива Цзинчэн.

**В параграфе 5.6** приведены краткие выводы по 5 главе, обобщающие обнаружение и исследование микросейсмических сигналов «голос моря» в период циклонической активности в акватории Японского моря.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы трансформации звуковых и инфразвуковых волн в зоне перехода геосфер и их исследование с использованием наземных дистанционных методов имеет важное значение для понимания взаимодействия различных типов волн, выяснения характера их распространения в геологических структурах, получения новых знаний, разработки более эффективных методов мониторинга и контроля различных процессов природного и антропогенного происхождения.

В результате комплекса проведенных исследований, приведенных в работе, были получены следующие результаты:

1. Создан экспериментальный сейсмоакустико-гидрофизический комплекс, состоящий из: 1) пространственно-разнесенной системы лазерных деформографов, включающей в свою очередь стационарный двухкоординатный лазерный деформограф и мобильный лазерный деформограф; 2) двух низкочастотных гидроакустических излучающих систем; 3) вспомогательного оборудования, при использовании которого были получены важные экспериментальные результаты о трансформации акустических колебаний на границе геосфер, подтвердивших обоснованность принятия решения о перспективности выбранного направления исследования;

2. Выявлены закономерности распространения низкочастотных гидроакустических волн на частоте 33 Гц в акватории б. Витязь на шельфе убывающей глубины и их трансформации в сейсмоакустические волны поверхностного типа на границе «вода – дно»: при глубинах  $h \geq \lambda/2$  в среднем около 22% энергии излучения трансформируется в энергию гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу; при глубинах  $h \leq \lambda/2$  энергия гидроакустических волн трансформируется в энергию затухающих волн рэлеевского типа, распространяющихся на границах «вода–дно» и «воздух–земная кора»; около 72% энергии гидроакустических волн трансформируется в энергию затухающих волн рэлеевского типа; около 78% излученной гидроакустическим излучателем энергии трансформируется в энергию объемных волн, которые уходят в земную кору и не регистрируются лазерным деформографом;

3. Установлена сезонная изменчивость коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе «вода–дно» на одной и той же трассе распространения сигнала;

4. Показана возможность контроля источника гидроакустического излучения при его перемещении по контролируемой акватории методом амплитудной модуляции с применением двухкоординатного лазерного деформографа и с применением пространственно-разнесенных по побережью системы лазерных деформографов.

5. Разработан и создан способ изучения структуры и состава морской земной коры шельфовых зон вплоть до границы Мохоровичича, предназначенный также для ее применения на акваториях, покрытых льдом, без его разрушения, с применением

низкочастотных гидроакустических излучателей, работающих как в стационарном, так и в динамическом режимах излучения; в результате применения данного способа были построены модели морской земной коры различных районов шельфа Японского моря вплоть до фундамента с определением основных параметров распространяющихся волн на трассе «излучение-прием»;

6. Показана перспективность применения низкочастотных гидроакустических излучателей, позволяющих исследовать тонкую структуру морской земной коры, работающих как в стационарном, так и в динамическом режимах излучения;

7. Обнаружены микросейсмические колебания «голос моря» в диапазоне частот от 6 до 11 Гц, генерирующиеся в периоды воздействия на акваторию моря мощных тропических циклонов;

8. Выявлена взаимозависимость между микросейсмическими колебаниями вызванными морскими волнами зыби с микросейсмическими колебаниями «голос моря» и отсутствие зависимости от ветра в районе измерения;

9. Определено несколько групп тайфунов, частотные диапазоны проявления микросейсм «голос моря» которых зависят от траектории перемещения, а ширина частотного диапазона микросейсм зависит от длительности воздействия на акваторию моря.

10. Определены зоны генерации микросейсмических колебаний «голос моря» в прибрежных областях Японского моря.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Чупин В.А.**, Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н., Яковенко С.В., Ярощук И.О. Регистрация и локализация гидроакустического источника береговым измерительным комплексом // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 2. С. 4-9.

2. **Чупин В.А.** Микросейсмические колебания как индикатор тропических циклонов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 3. С. 9-17.

3. **Чупин В.А.**, Долгих Г.И., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швец В.А., Швырев А.Н., Яковенко С.В., Ярощук И.О. Регистрация источников гидроакустического излучения системой пространственно-разнесенных лазерных деформографов // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4 (42). С. 62-70.

4. Долгих Г.И., **Чупин В.А.**, Гусев Е.С., Овчаренко В.В. Пеленг зон генерации микросейсм “голоса моря” // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 2. С. 226-230.

5. **Чупин В.А.**, Гусев Е.С. Инфразвуковые колебания, вызываемые внетропическими циклонами в Японском море // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3. № 4. С. 346-354.

6. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., **Чупин В.А.**, Швец В.А., Яковенко С.В. Особенности применения лазерных деформографов классического и маятникового типов // Фотоника. 2021. Т. 15. № 6. С. 474-483.

7. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., **Чупин В.А.** Пеленгование геосферных возмущений лазерными деформографами // Фотоника. 2021. Т. 15. № 8. С. 656-665.

8. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Пивоваров А.А., Плотников А.А., Самченко А.Н., **Чупин В.А.**, Швец В.А., Швырёв А.Н., Яковенко С.В., Ярощук И.О. Томография морской земной коры на основе применения береговых лазерных деформографов и гидроакустических излучателей // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 766-771.

9. Долгих Г.И., Shengchun P., Будрин С.С., Yang S., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., **Чупин В.А.**, Яковенко С.В., Yang D., Xiaohan W., Швец В.А. Особенности распространения и трансформации низкочастотных гидроакустических сигналов на шельфе убывающей глубины // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 2. С. 112-116.

10. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Пивоваров А.А., Плотников А.А., Самченко А.Н., **Чупин В.А.**, Швец В.А., Швырев А.Н., Яковенко С.В., Ярощук И.О. Разработка технологии томографии земной коры шельфа и глубокого моря на основе применения береговых лазерных деформографов и широкополосных низкочастотных гидроакустических излучателей // Инженерная физика. 2019. № 4. С. 38-61.

11. Долгих Г.И., **Чупин В.А.**, Гусев Е.С. Инфразвуковые деформационные возмущения, вызванные тайфунами // Физика Земли. 2019. № 5. С. 110-117.
12. **Чупин В.А.**, Долгих Г.И., Гусев Е.С. Регистрация инфразвуковых возмущений тайфунов лазерными деформографами // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 117-127.
13. Долгих Г.И., Гусев Е.С., **Чупин В.А.** Деформационные проявления "голоса моря" // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481. № 1. С. 95-98.
14. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырёв А.Н., **Чупин В.А.**, Ярощук И.О. Развитие технологии томографии земной коры шельфовых областей // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 2. С. 210-214.
15. Долгих Г.И., **Чупин В.А.**, Щербатюк А.Ф. Аппаратно-программный комплекс для исследования динамики гидросферно-литосферных процессов // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 156-157.
16. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырёв А.Н., **Чупин В.А.**, Яковенко С.В., Ярощук И.О. Излучающая гидроакустическая система на частотах 19-26 Гц // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 137-141.
17. **Чупин В.А.**, Будрин С.С., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швец В.А., Швырёв А.Н., Яковенко С.В., Ярощук И.О. Разработка методики томографии морского дна для акваторий, покрытых льдом. Первый эксперимент // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1 (23). С. 62-67.
18. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., **Чупин В.А.**, Яковенко С.В. Особенности применения мобильного лазерного деформографа в зимних условиях // Фотоника. 2017. № 4 (64). С. 86-91.
19. **Чупин В.А.**, Долгих Г.И., Самченко А.Н. Неразрушающий бесконтактный метод исследования строения морского дна // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 2. С. 9-15.
20. Долгих С., Долгих Г., **Чупин В.**, Яковенко С. Применение мобильного лазерного деформографа // Фотоника. 2016. № 6 (60). С. 82-87.
21. **Чупин В.А.**, Долгих Г.И. Развитие технологии диагностики морского дна с помощью низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых лазерных деформографов // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2015. № 6 (184). С. 90-95.
22. **Чупин В.А.**, Бородин А.Е., Долгих Г.И. Регистрация двухосевым лазерным деформографом сейсмоакустических сигналов, создаваемых гидроакустическими источниками // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 4. С. 55-60.
23. **Чупин В.А.**, Будрин С.С., Долгих Г.И., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырёв А.Н., Ярощук И.О. Сезонная зависимость коэффициента трансформации

гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе "вода-дно" // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 35-39.

24. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., **Чупин В.А.**, Швырёв А.Н., Ярощук И.О. О Перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. № 3. С. 321.

25. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., **Чупин В.А.**, Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерный деформограф с точностью на уровне пикометров // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 2. С. 138.

#### **Статьи в других изданиях и материалах конференций**

1. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., **Chupin V.A.**, Davydov A.V., Mishakov A.V. Remote seismoacoustic monitoring of tropical cyclones in the Sea of Japan // Remote Sensing. 2023. Т. 15. № 6. С. 1707.

2. **Chupin V.A.** Dynamics of upper-frequency-range infrasonic wave generation in the northwestern part of the Sea of Japan // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Т. 11. № 10. С. 1955.

3. **Чупин В.А.**, Долгих Г.И., Овчаренко В.В. Вариации микросейсмических колебаний, возбуждаемых тропическими циклонами в Японском море // Материалы докладов тринадцатого всероссийского симпозиума "Физика геосфер". 2023. С. 133-135.

4. Долгих Г.И., Долгих С.Г., **Чупин В.А.**, Швец В.А. Дистанционный сейсмоакустический мониторинг тропических циклонов // Материалы докладов тринадцатого всероссийского симпозиума "Физика геосфер". 2023. С. 39-41.

5. Dolgikh G.I., **Chupin V.A.**, Gusev E.S. Research of the area of generation of high-frequency infrasound oscillations in the Sea of Japan, caused by typhoons // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. Т. 19. С. 3034612.

6. **Chupin V.A.**, Dolgikh G.I., Gusev E.S., Timoshina G.A. Remote sensing of infrasound signals of the "Voice of the Sea" during the evolution of typhoons // Remote Sensing. 2022. Т. 14. № 24. С. 6289.

7. Dolgikh G.I., **Chupin V.A.**, Gusev E.S., Timoshina G.A. Cyclonic process of the "Voice of the Sea" microseism generation and its remote monitoring // Remote Sensing. 2021. Т. 13. № 17. С. 3452.

8. **Чупин В.А.** Амплитудно-частотные характеристики высокочастотных инфразвуковых колебаний, генерируемых тайфунами в Японском море // Материалы докладов двенадцатого всероссийского симпозиума "Физика геосфер". 2021. С. 127-129.

9. **Чупин В.А.**, Гусев Е.С. Регистрация лазерными методами инфрагравитационных волн, вызванных тайфунами // Оптические методы исследования потоков: Труды XVI Международной научно-технической конференции. Под общей редакцией Ю.Н. Дубнищева, Н.М. Скорняковой. М: Перо, 2021. С. 242-246.

10. Долгих Г.И., **Чупин В.А.**, Гусев Е.С. Пеленг тайфунов по зонам генерации микросейсм "голоса моря" // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – III»): материалы третьей Международной научной конференции памяти чл.-корр. РАН Д.Г. Матишова. Ростов-на-Дону, 2021. С. 49-52.

11. Dolgikh G., **Chupin V.**, Gusev E. Microseisms of the "Voice of the Sea" // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2020. Т. 17. № 5. С. 750-754.

12. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., **Chupin V.A.**, Yakovenko S.V., Piao S., Song Y., Dong Y., Wang X. Study of low-frequency hydroacoustic waves' behavior at the shelf of decreasing depth // Applied Sciences (Switzerland). 2020. Т. 10. № 9. С. 3183.

13. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., **Чупин В.А.**, Швец В.А., Яковенко С.В. Особенности распространения гидроакустических волн на клиновидном шельфе // Физика геосфер. Сборник научных статей по избранным материалам одиннадцатого всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток, 2020. С. 50-73.

14. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., **Chupin V.A.**, Shvets V.A., Shvyrev A.N., Yakovenko S.V., Yaroshchuk I.O. Developing a method for experimental studies of crustal structure in marine areas in different seasons // Seismic Instruments. 2019. Т. 55. № 4. С. 369-376.

15. **Чупин В.А.** Томография морского дна береговыми лазерными деформографами // Материалы докладов одиннадцатого всероссийского симпозиума "Физика геосфер". 2019. С. 205-208.

16. Долгих Г.И., Гусев Е.С., Будрин С.С., Долгих С.Г., **Чупин В.А.** Атмосферные и морские опасные природные явления: фундаментальные и прикладные аспекты // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. 2019. С. 28-30.

17. Долгих Г.И., **Чупин В.А.**, Будрин С.С. Томографические исследования шельфовых зон // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. 2019. С. 30-32.

18. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Плотников А.А., **Чупин В.А.**, Швец В.А., Яковенко С.В. Мониторинг, анализ и прогнозирование опасных атмосферных и морских явлений и катастроф на основе применения современных технологий // В сборнике: Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов ("Опасные явления"). материалы Международной научной конференции. 2019. С. 45-51.

19. Гусев Е.С., Долгих Г.И., **Чупин В.А.** Низкочастотное сейсмоакустическое влияние тайфунов на Дальневосточный регион России // В сборнике: Морские исследования и образование (MARESEDU-2018). Труды VII Международной научно-практической конференции. 2019. С. 35-40.

20. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., **Чупин В.А.**, Швец В.А., Швырёв А.Н., Яковенко С.В., Ярощук И.О. Отработка методики проведения экспериментальных работ по изучению структуры морской земной коры в различные сезоны года // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 4. С. 14-27.

21. Долгих Г.И., **Чупин В.А.**, Ярощук И.О. Решение томографических задач с помощью буксируемого низкочастотного гидроакустического излучателя // АКУСТИКА ОКЕАНА: Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXXI сессией Российского Акустического Общества. 2018. С. 181-184.

22. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., **Chupin V.A.**, Yakovenko S.V. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // Journal of the Acoustical Society of America. 2017. Т. 142. № 4. С. 1990-1996.

23. **Чупин В.А.** Распространение низкочастотных гидроакустических колебаний на коротких и длинных дистанциях // Материалы докладов девятого Всероссийского симпозиума Физика геосфер. 2015. С. 247-248.

24. **Чупин В.А.** Исследование трансформации энергии акустических волн на границе геосфер // Материалы докладов восьмого всероссийского симпозиума Физика геосфер. 2013. С. 228-230.

25. **Чупин В.А.**, Будрин С.С., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Плотников А.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс ТОИ ДВО РАН: современное состояние // Материалы докладов седьмого всероссийского симпозиума Физика геосфер. 2011. С. 251-255.

**Чупин Владимир Александрович**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Подписано в печать 23.10.2024 г.  
Формат 64×84/16. Объем 2 усл. печ. л.  
Тираж 100 шт. Заказ № 127.

Отпечатано в ОНТИ ТОИ ДВО РАН  
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43  
Тел./факс: (423) 231 25 73.