

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

На правах рукописи



Чупин Владимир Александрович

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

Специальность: 1.3.7 – «Акустика»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант
доктор физико-математических наук
академик РАН
Долгих Григорий Иванович

Владивосток 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СЕЙСМОАКУСТИКО- ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС	14
1.1 Двухкоординатный стационарный лазерный деформограф.....	14
1.2 Мобильный лазерный деформограф.....	20
1.3 Низкочастотные гидроакустические излучатели	22
1.3.1 Низкочастотная излучающая система ГИ-1	23
1.3.2 Низкочастотная излучающая система ГИ-2.....	34
1.4. Вспомогательное оборудование и программное обеспечение	41
1.5 Выводы.....	44
ГЛАВА 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ ГЕОСФЕР	45
2.1 Особенности распространения гидроакустических волн на клиновидном шельфе	46
2.2 Сезонная зависимость трансформации энергии гидроакустических волн на границе геосфер.....	60
2.2.1 Результаты экспериментальных исследований	60
2.2.2 Анализ экспериментальных данных.....	71
2.3 Выводы.....	76
ГЛАВА 3. РЕГИСТРАЦИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, СОЗДАВАЕМЫХ МОРСКИМИ ОБЪЕКТАМИ, ДВУХКООРДИНАТНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДЕФОРМОГРАФОМ	78
3.1 Регистрация сигналов различных гидроакустических источников.....	80

3.2 регистрация источников гидроакустического излучения системой пространственно-разнесенных лазерных деформографов.....	95
3.3 Локализация движущегося источника излучения двухкоординатным лазерным деформографом	105
3.4 Выводы.....	111
ГЛАВА 4. ТОМОГРАФИЯ МОРСКОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕРЕГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДЕФОРМОГРАФОВ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ.....	
4.1. Методика проведения экспериментальных исследований и обработки данных.....	118
4.2 Реализация метода томографии морского дна с использованием береговых лазерных деформографов	120
4.3 Томография морского дна с применением мощных источников гидроакустического излучения	128
4.4 Развитие технологии томографии земной коры шельфовых областей ...	134
4.5. Томография морского дна в зимних условиях	141
4.6. Применение буксируемого излучателя в работах по томографии морского дна	150
4.7 Выводы.....	159
ГЛАВА 5. ТАЙФУНЫ И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ «ГОЛОС МОРЯ».....	
5.1. Тайфуны: категории и траектории	166
5.2. Открытие микросейсм «голос моря». Тайфун Лайонрок	171
5.3. Инфразвуковые деформационные возмущения, вызванные тайфунами	176

5.4 Динамика микросейсмических инфразвуковых возмущений в зависимости от области влияния тайфунов	189
5.5 Определение областей генерации микросейсм «голос моря»	201
5.6 Выводы.....	209
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	211
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	214

ВВЕДЕНИЕ

Исследование звуковых и инфразвуковых колебаний в геосферах Земли является важным направлением научных исследований, поскольку такие волны могут быть использованы для изучения физических процессов, происходящих внутри планеты. Генерация волновых процессов может быть вызвана различными факторами. Это могут быть искусственные источники колебаний, связанные с антропогенной деятельностью: промышленные шумы, транспортная активность и др. Также низкочастотные и инфразвуковые колебания генерируются в геосферах Земли в результате влияния высокоэнергетических природных процессов. Исследование природы колебаний, поиск источников возникновения, изучение вариаций регистрируемых характеристик колебаний на различных стадиях их существования – все эти задачи крайне важны для достижения понимания физических особенностей их распространения и трансформации в зоне перехода геосфер, а также для прогнозирования и мониторинга опасных событий. Конечно же выявление и изучение этих процессов на уровне фоновых колебаний возможно только с применением высокочувствительной аппаратуры. При распространении звуковых и инфразвуковых колебаний в геосфере зарождения и их трансформации в колебания соседних геосфер в зоне перехода, возможна регистрация этих колебаний на значительном расстоянии. И эти измерения уже могут считаться методами дистанционного зондирования, но только наземными средствами. Возникновение колебаний, возбуждающихся природными факторами, имеет случайный характер, и генерация разных звуковых полей происходит в результате существования особых погодных условий. Поэтому их исследование и анализ условий возникновения, развития и затухания этих колебаний возможно либо при наличии достаточного объема информации, достаточного для проведения статистического анализа, либо при регулярности возникновения определенных явлений, способных возбудить интересующие колебания. При исследовании распространения низкочастотных акустических колебаний главную роль играют конечно же экспериментальные методы исследования, когда исследование

определенного процесса можно запланировать, изучить и впоследствии смоделировать. Проводя изменения условий экспериментальных исследований возможно исследовать особенности распространения акустических колебаний, влияния на них разных факторов, найти причинные связи при воздействии других процессов, что позволяет в естественных условиях получать зависимости между первичными наблюдениями и непосредственными измерениями.

Актуальность работы

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, метеорологические условия. 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, связанных с ними. 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.

Цели и задачи исследований

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 данных измерений сейсмоакустико-гидрофизического измерительного комплекса, созданного на базе лазерно-интерференционных регистрирующих устройств.

Для реализации поставленной цели сформулированы **следующие задачи:**

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 удаленными низкочастотными источниками гидроакустического излучения.
4. С применением береговых лазерных деформографов исследовать траектории движения источника 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

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. С использованием созданного измерительного комплекса выполнена длительная серия многолетних экспериментальных исследований трансформации гидроакустических колебаний в сейсмоакустические в зависимости от расстояния, местоположения, различия излучающих частот и гидрофизических условий, связанные с сезонными изменениями.

Основываясь на полученных результатах, на базе методов геоакустической инверсии был разработан новый метод акустической томографии, который позволяет исследовать физические свойства морского дна с использованием низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых стационарных и мобильных лазерных деформографов. Метод томографии был испытан многими

экспериментальными исследованиями, по результатам которых были исследованы состав и структура морского дна в изучаемых акваториях, а также показана возможность применения метода в зимних условиях в акваториях без разрушения ледового покрова.

На основе экспериментальных исследований показана возможность отслеживания динамики перемещения различных источников по акватории с использованием разнонаправленных и пространственно-разнесенных лазерных деформографов.

Береговыми лазерными деформографами зарегистрированы впервые новые микросейсмические сигналы, появляющиеся на общем фоновом уровне сейсмических шумов, связанные с влиянием на акваторию моря мощных атмосферных циклонических образований. Обнаруженным микросейсмическим сигналам 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 перемещений разных тропических циклонов. С использованием двухкоординатного лазерного деформографа определены зоны генерации этих микросейсмиков, связанные с шельфовыми областями Японского моря.

Основные защищаемые положения

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.

Обоснованность результатов

Обоснованность результатов, приводимых в диссертационной работе, подтверждается в результате проведения многолетних экспериментальных исследований по изучению трансформации низкочастотных гидроакустических колебаний и волн. Новейшие полученные результаты генерации микросейсмических колебаний инфразвукового диапазона, возникающие в результате влияния тайфунов, подтверждены архивными данными круглогодичных наблюдений берегового измерительного комплекса.

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 в зоне перехода геосфер. Результаты исследований, приведенные в диссертационной работе, были получены в результате выполнения государственных программ Тихоокеанского Океанологического института им. В.И. Ильичева 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.

Апробация работы

1. Международный симпозиум сообщества морских и полярных инженеров, г. Осака, Япония, 2009 г.
2. Шестой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2009 г.
3. Седьмой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2011 г.

4. Восьмой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2013 г.
5. Девятый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2015 г.
6. Пятая конференция Тихоокеанского региона по подводной акустике (PRUAC 2015), 2015 г.
7. Двадцать пятая международная конференция по лазерно-интерференционным технологиям в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте, г. Новороссийск, 2017 г.
8. Двадцать шестая международная конференция по лазерно-интерференционным технологиям в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте, г. Новороссийск, 2018 г.
9. Десятый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2017 г.
10. XVI школа-семинар им. акад. Л. М. Бреховских, совмещенной с XXXI сессией Российского Акустического Общества, 2018 г.
11. Международная научная конференция «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов» («Опасные явления»), 2019 г.
12. Одиннадцатый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2019 г.
13. Семинар Научного совета РАН по акустике «Актуальные достижения в области акустики. Успехи акустики 2019», 2019 г.
14. Двенадцатый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2021 г.
15. Тринадцатый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2023 г.
16. Китайский симпозиум по акустике океана 2024 (COA 2024), 2024 г.

Публикации

Все излагаемые в диссертационной работе результаты опубликованы в 52 научных трудах.

Объем работы

Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы из 205 наименований. Работа содержит 238 страниц текста, 17 таблиц и 97 рисунков.

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 также 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 экспериментальных исследований, обработка экспериментальных данных, их интерпретация и анализ, а также изучение и обоснование полученных результатов.

Хочу выразить искреннюю благодарность моим уважаемым коллегам из Лаборатории физики геосфер и Лаборатории статистической гидроакустики 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.

ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СЕЙСМОАКУСТИКО-ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Исследования, представленные в научной работе, проводятся в очень интересной геофизической области – в зоне перехода геосфер Земли. Трансформация любых инфразвуковых и низкочастотных гидроакустических волн, искусственно или натурально генерирующихся в гидросфере и трансформирующихся в сейсмоакустические сигналы, носит достаточно сложный характер. Для максимально достоверного экспериментального результата исследования необходимо получить как можно больше знаний о гидрологических, термодинамических, сейсмологических процессах, происходящих в соседствующих средах, при этом все измерения должны выполняться максимально синхронизировано и комплексно. Для решения поставленных в работе практических задач использовалась приборная база уникального сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, расположенного на юге Приморского края Российской Федерации на морской экспериментальной станции (МЭС) «м. Шульца» Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва (ТОИ) ДВО РАН в точке с координатами $42,58^\circ$ СШ и $131,157^\circ$ ВД [1]. Основным методом всех проводимых измерений является лазерно-интерференционный метод, на основе которого работают основные измерительные инструменты комплекса.

1.1 ДВУХКООРДИНАТНЫЙ СТАЦИОНАРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДЕФОРМОГРАФ

Начало применения лазерно-интерференционных методов измерений для регистрации природных процессов на Дальнем Востоке было положено еще в 80-х годах XX века [2]. Современное формирование программно-аппаратной базы измерительного комплекса было продолжено уже в 2000-х годах [3-8]. Основным

измерительным устройством лазерно-интерференционного комплекса является двухосевой (двухкоординатный) лазерный деформограф [9]. Его основу составляют два установленных на высоте 76 м над уровнем моря лазерных деформографа оптические части которых построены по принципу неравноплечего интерферометра Майкельсона с использованием в качестве источников излучения частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров. В разное время проводились исследования применения различных схем измерений: классическая и маятниковая [10]. Схема расположения компонент двухкоординатного лазерного деформографа на территории МЭС «м. Шульца» показаны на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Расположение компонент двухкоординатного лазерного деформографа с длинами измерительных плеч 52,5 м (1) и 17,5 м (2). 3 – лабораторное здание

Чувствительные элементы приборов установлены в отдельных гидротермоизолированных камерах, размещенных вместе с герметичными воздушнонаполненными световодами на глубине 3—5 м от поверхности земли. Измерительные плечи лазерных деформографов практически ортогональны друг

другу и ориентированы под углом 18° (198°) от направления «север-юг», при длине 52,5 м, и под углом 110° (290°) от направления «запад-восток» при длине 17,5 м. Принцип работы приборов заключается в синхронном измерении с помощью интерференционных методов изменений набега фазы лучей лазеров, проходящих через измерительные плечи от центральных интерференционных узлов до уголкового отражателя и обратно. На рисунке. 1.2 приведена классическая оптическая схема лазерного деформографа неравноплечего типа, преимущественно используемая при измерениях.

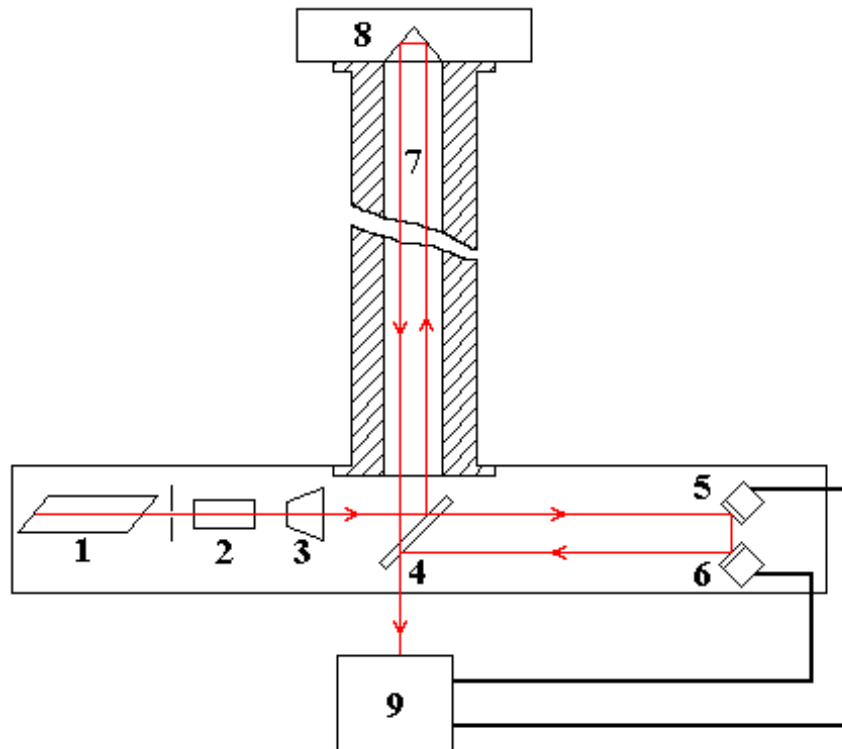


Рисунок 1.2 – Оптическая схема лазерного деформографа неравноплечего типа: 1 – лазер; 2 – оптический затвор; 3 – коллиматор; 4 – полупрозрачная плоско-параллельная пластина (ПИ-100); 5,6 – плоско-параллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах; 7 – световод; 8 – уголкового отражатель; 9 – система регистрации

Луч лазера 1, проходя через оптический затвор 2 и коллиматор 3, разделяется на плоскопараллельной оптической пластине 4 на два луча. Один из лучей направляется по герметичному световоду 7 до уголкового отражателя 8 и,

отражаясь, возвращается на плоскопараллельную оптическую пластину. Второй луч, пройдя через интерференционный узел с зеркалами установленных на пьезокерамических цилиндрах 5,6, возвращается на плоскопараллельную пластину. На пластине два когерентных луча сводятся на в одну точку на фотоприёмнике системы регистрации 9, образуя интерференционную картину.

Чувствительность лазерного деформографа неравноплечего типа зависит от стабильности используемых источников излучения – лазеров [11-14]. В разное время применялись разные частотно-стабилизированные лазеры гелий-неоновые (He-Ne) ЛГН-303, ЛГН-303СМ, Стандарт-У. ЛГН-303 имеет достаточно долговременную стабильность 10^{-8} при малых изменениях температуры в пределах $\pm 5^\circ\text{C}$. При малых изменениях температуры в пределах $0,1^\circ\text{C}$, стабильность лазерного источника улучшается на 1-2 порядка. Кратковременная стабильность He-Ne лазера на один порядок превышает долговременную. При этом долговременная стабильность позволяет зарегистрировать инфразвуковые процессы, протекающие в земной коре в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1 Гц. Кратковременная стабильность определяет точность измерения микроперемещений земной коры в частотном диапазоне более 1 Гц и она на порядок лучше долговременной стабильности.

Поэтому, при вышеуказанной стабильности частоты лазеров ЛГН-303, можно измерять смещение устоев деформографа с длиной измерительного плеча 52,5м с точностью:

$$\Delta l = \left| -L \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = 5,2 \cdot 10^{-8} \div 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad (1.1)$$

а деформографа с длиной плеча 17,5 м с точностью:

$$\Delta l = \left| -L \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = 1,75 \cdot 10^{-8} \div 1,75 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad (1.2)$$

где L – длина измерительного плеча лазерного деформографа, а λ - длина волны лазерного излучения.

За последние 10 лет в качестве основных источников излучения на лазерных деформографах применялись частотно-стабилизированные лазеры Melles Griot 25 STP 912-230, стабильность частоты которого находится уже на уровне 10^{-9} при относительно нестабильной температуре окружающей среды. Подземные помещения, в которых работают лазерные деформографы, совершенствовались. Были применены дополнительные меры гидротермоизоляции, исключающие непосредственное атмосферное воздействие, особенно во время прохождения активных циклонических образований. Таким образом стабильность частоты удалось поднять на порядок – до 10^{-10} . Следовательно, смещение, регистрируемое лазерным деформографом с длиной плеча 52, 5 м имело следующую точность:

$$\Delta l = \left| -l \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = 5,2 \cdot 10^{-10} \div 5,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}, \quad (1.3)$$

а соответственно деформографа с длиной плеча 17,5 м с точностью:

$$\Delta l = \left| -l \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = 1,75 \cdot 10^{-10} \div 1,75 \cdot 10^{-11} \text{ м}, \quad (1.4)$$

По теории, применяемые лазерно-интерференционные методы позволяют измерять смещение с точностью $10^{-6} \cdot (\lambda/2)$, что при длине волны He-Ne лазера в 632,8 нм составляет 0,32 пм.

Одной из выполненных работ стала модернизация компоненты 52,5-метрового лазерного деформографа с заменой оптико-механической части прибора [15]. В качестве источника излучения был использован лазерный интерферометр Майкельсона NEOARK Corporation со стабильностью частоты $\sim 10^{-12}$. Интерферометр Neoark состоит из двух He-Ne лазеров. Один маломощный (0,1 мВт) гелий-неоновый (I-He-Ne) лазер постоянного излучения, частота которого имеет электронную стабилизацию по линиям поглощения йода Второй лазер мощный (1 мВт): не частотно-стабилизированный, гелий-неоновый (He-Ne). На рисунке 1.3 показана оптическая часть лазерного деформографа с длиной плеча 52, 5 метра, находящаяся в термоизолированном помещении, где 1 – частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер со стабилизацией частоты излучения по

линиям поглощения йода, 2 – нестабилизированный мощный гелий-неоновый лазер, со стабилизацией частоты по излучению лазера 1, 3 – фотоприёмник системы стабилизации лазера 2, 4 – блок питания и управления частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, 5 – блок питания и управления нестабилизированного мощного гелий-неонового лазера, 6 – система регистрации, 7 – оптический затвор, 8 – коллиматор, 9 – делительная пластина, 10 – пьезокерамические элементы раскочки и компенсации, 11 – лучевод измерительного плеча. Используется как основной источник излучения измерительной части интерферометра. Частотная стабилизация излучения измерительного лазера проводится на предварительном интерференционном столе в электронной связке с I-He-Ne лазером по его частоте.

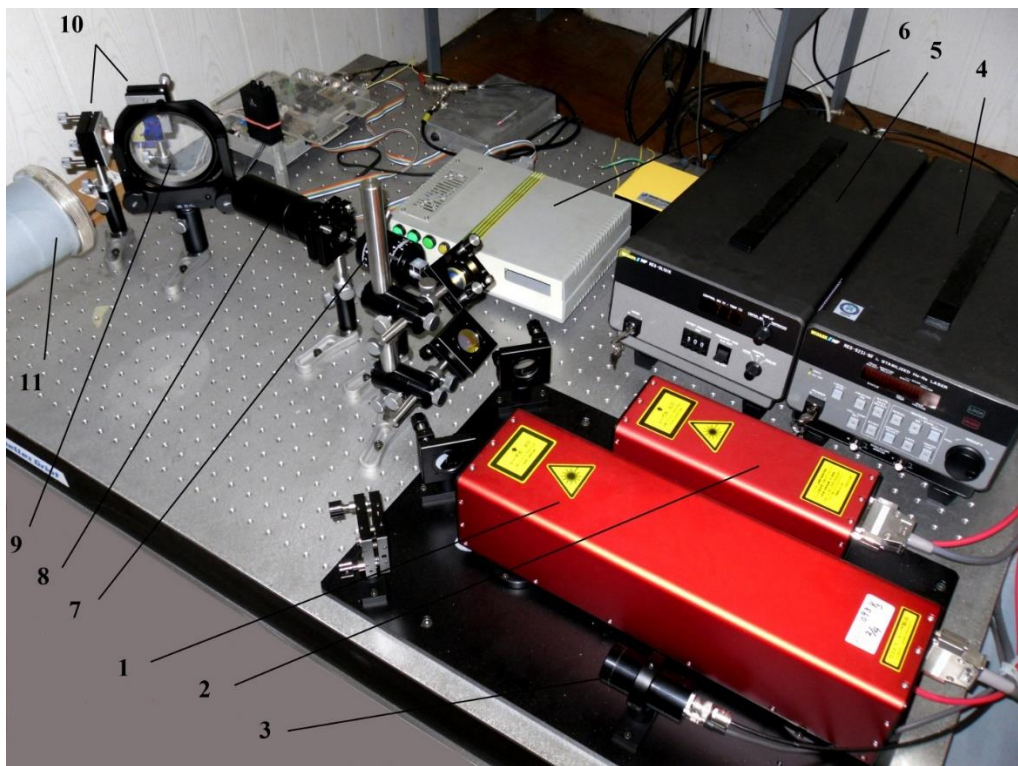


Рисунок 1.3 – Оптическая часть лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52,5 м

На рисунке 1.4 показан воздушнонаполненный герметичный лучевод, набранный из нержавеющей труб с фланцевым герметичным соединением. Торцы лучевода герметично закрыты плоскопараллельными оптическими стеклами.



Рис. 1.4 – Лучевод измерительного плеча 52,5-метрового неравноплечего лазерного деформографа.

Таким образом, проведенные мероприятия позволили создать двухкоординатный лазерный интерферометр 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 инфразвуковом диапазонах частот, особенно на стадии их зарождения и развития, что крайне необходимо для моделирования исследуемых процессов и их возможного предсказания.

1.2 МОБИЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДЕФОРМОГРАФ

Для исследования локальных колебательных процессов в земной коре была разработана мобильная модификация лазерного деформографа [16]. Прибор

создавался на основе патента на полезную модель [17]. Схема мобильного деформографа представляет собой унифицированную схему классического лазерного деформографа с применением современных материалов при изготовлении конструктивных элементов интерферометра. Целью изготовления такого прибора стояла простота его транспортировки в любой район без предварительной подготовки. Оптическая схема мобильного деформографа также, как и на стационарных системах, собрана на базе неравноплечего интерферометра Майкельсона [15]. Источником излучения служит лазер Melles Griot 25 STP 912-230, имеющий долговременную стабильность 10^{-9} - 10^{-10} . Лазерный луч проходит между интерференционной скамьей и отражателем по воздушнонаполненным, герметично запаянным и термоизолированным полипропиленовым трубам. Отражатель смонтирован на упругом основании и в отличие от жестко закрепленного в почве основания скамьи интерферометра, устанавливается непосредственно на измеряемую поверхность. Скамья интерферометра жестко крепится к верхнему слою почвы, при этом желательно закрепится за скальную породу. Основной задачей устройства является регистрация вариаций микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10000 Гц с точностью 0,3 нм (рисунок 1.5).

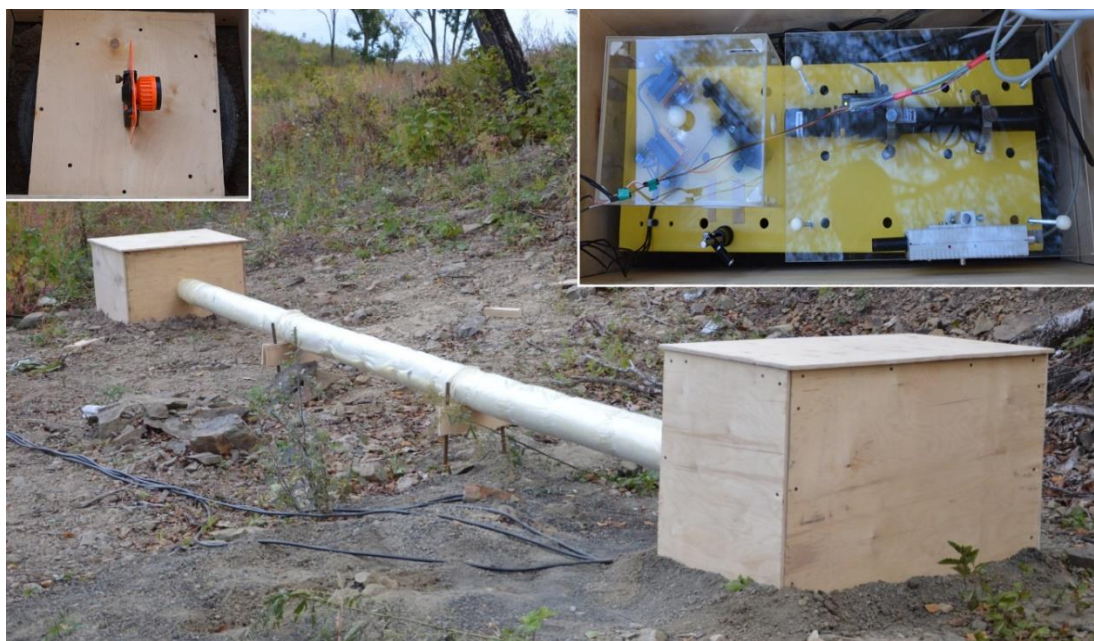


Рисунок 1.5 – Мобильный лазерный деформограф в рабочем положении

На рисунке 1.5 приведена экспериментальная установка мобильного лазерного деформографа в одну из первых испытательных установок при полевых исследованиях сейсмического фона случайной территории.

Принцип измерения разности хода на базе лазерных деформографов 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, небольшой диапазон подаваемых напряжений на пьезокерамические элементы (до 198 В) позволяют исключить ошибки измерений, возникающие из-за таких паразитных явлений, как крип и гистерезис пьезокерамики при работе деформографов в диапазоне от 0 (условно) до 1 000 Гц.

1.3 НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Низкочастотная гидроакустика является уникальным инструментом дистанционного исследования не только различных неоднородностей в океане, но и пород океанического дна. При распространении низкочастотной волны в океане часть ее энергии проникает в дно, при этом, чем ниже частота сигнала, тем большая часть энергии сигнала проникает в дно и тем глубже его проникновение в донные осадочные слои [18]. Глубина проникновения волны может достигать сотен метров, а при очень низких частотах излучаемых сигналов – границы Мохоровичича. В связи с этим характеристики такой волны зависят от параметров дна (плотности, поглощения и скорости звука в нем), а значит, при проведении экспериментальных исследований можно попытаться получить информацию о физических свойствах дна.

Низкочастотные гидроакустические излучающие системы с электромеханическим преобразователем с частотами излучения 33 и 22 Гц, стоящие на вооружении лаборатории Физики геосфер ТОИ ДВО РАН, имеют

уникальные технические характеристики. Начало разработки данных систем было положено в 90-х годах и при относительно небольших размерах, они сохраняли высокую мощность излучения, позволяющую исследовать характеристики распространения акустических сигналов даже без использования больших судов. Это главное качественное отличие от излучателей электромагнитного типа соответствующих частот излучения [19], разрабатывающихся в разное время в ИПФ РАН, которые при частоте излучения 20 Гц, имели размеры 3 м в диаметре и массу 4500 кг. Излучатели подобного типа, с частотой излучения 75 Гц и звуковым давлением до 190 дБ разрабатывались в США [20], но нет подробной информации о технических характеристиках этих систем. При их известной высокой стоимости от 1,5 млн. долларов за единицу, вероятно имеющие большие габариты. Можно сделать вывод, что излучающие системы ТОИ ДВО РАН имеют большую компактность и мобильность среди подобных систем, применяемых другими исследователями.

Основными излучающими устройствами, использованными для проведения исследований в представленной работе, являются две излучающие системы для диапазонов 30–40 Гц (ГИ-1) и 19–26 Гц (ГИ-2), предназначенные для генерации гидроакустических сигналов.

1.3.1 НИЗКОЧАСТОТНАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ГИ-1

Излучающая система диапазона 30–40 Гц предназначена для излучения тональных и фазоманипулированных гидроакустических сигналов при глубинах погружения излучателя от 2 до 25 метров. Первая подобная система была разработана в 2002 г. [21]. Эффективное звуковое давление в полосе составляет около 3700 Па (191 дБ/1 мкПа). Внешний вид системы приведен на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Внешний вид излучающей гидроакустической системы 30–40 Гц

В состав излучающей системы входит излучатель с электромагнитным преобразователем, источник питания, рама для установки излучателя на грунт, контрольный гидрофон, кабель-шланг с манометром и двумя ниппелями и комплект соединительных проводов. Схематические изображения сечений излучателя приведены на рисунке 1.7.

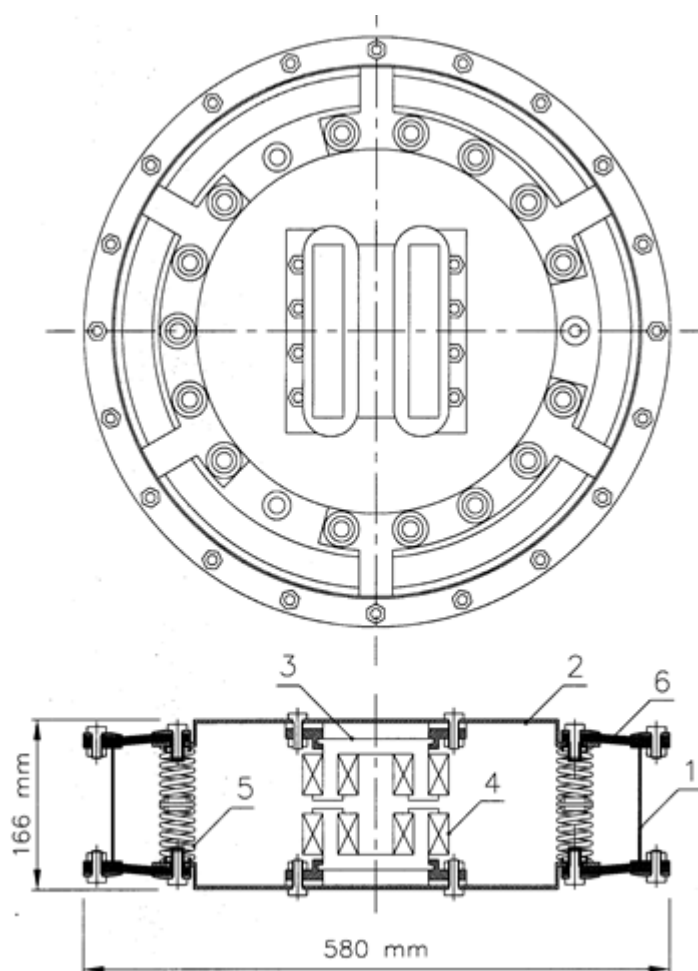


Рисунок 1.7 – Схематическое изображение сечений излучателя диапазона излучения 30–40 Гц и его наружные габариты.

Излучатель состоит из жесткого цилиндрического корпуса 1 и двух излучающих поршней 2, которые колеблются в противоположных направлениях и создают синфазные потоки объемной колебательной скорости. Колебания возбуждаются преобразователем электромагнитного типа с П-образными наборными половинами сердечника 3 и четырьмя катушками 4. Края поршней соединены между собой набором цилиндрических пружин 5, а с фланцами корпуса 1 – резиноканевыми воротниками 6.

Предварительное сжатие достигается путем понижения, примерно на 0,2 атмосферы, давления в полости излучателя относительно гидростатического давления на глубине погружения. Компенсация гидростатического давления производится путем накачки воздуха в полость излучателя с помощью насоса.

Источник питания содержит сетевой блок питания, защитные цепи и устройства: мостовой ключевой усилитель, компенсирующую батарею конденсатор ёмкостью 220 мкФ и дроссель индуктивностью 30 мГн для развязки цепей питания переменного и постоянного токов. Источник питания подключается к однофазной сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц, или к трем последовательно соединенным аккумуляторным батареям напряжением по 12 В. На вход источника подаются сигнал стандарта TTL или прямоугольный сигнал с размахом напряжения 5-10 В и с частотой, равной частоте излучения. Уровень излучаемого сигнала измеряется контрольным гидрофоном чувствительностью 98 мкВ/Па и ёмкостью 34 нФ.

При практически одинаковой мощности излучения, высокий уровень сигнала наблюдается уже при работе излучателя на глубине 12 м. Это подтверждает известную теорию, что при расположении источника звука близко к поверхности воды, т.е. при $h/\lambda < 0,5$ (где h – заглубление источника, λ – длина гидроакустической волны), его поле соответствует полю диполя и амплитуда звукового давления тем меньше, чем меньше h [22]. Волновые размеры излучателя достаточно малы, поэтому его акустическая мощность определяется выражением:

$$P_a = K\rho\omega^2 Q_m^2 / (8\pi c) \quad (1.5)$$

где ρ – плотность воды, c – скорость звука в воде, ω – 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 по формуле:

$$P_a/P_0 = 1 - \text{Sin}(4\pi h/\lambda)/(4\pi h/\lambda) \quad (1.6)$$

На рисунке 1.8 приведен полученный для гидроакустического излучателя с частотой излучения 33 Гц результат зависимости относительной излучаемой мощности излучателя от его заглубления.

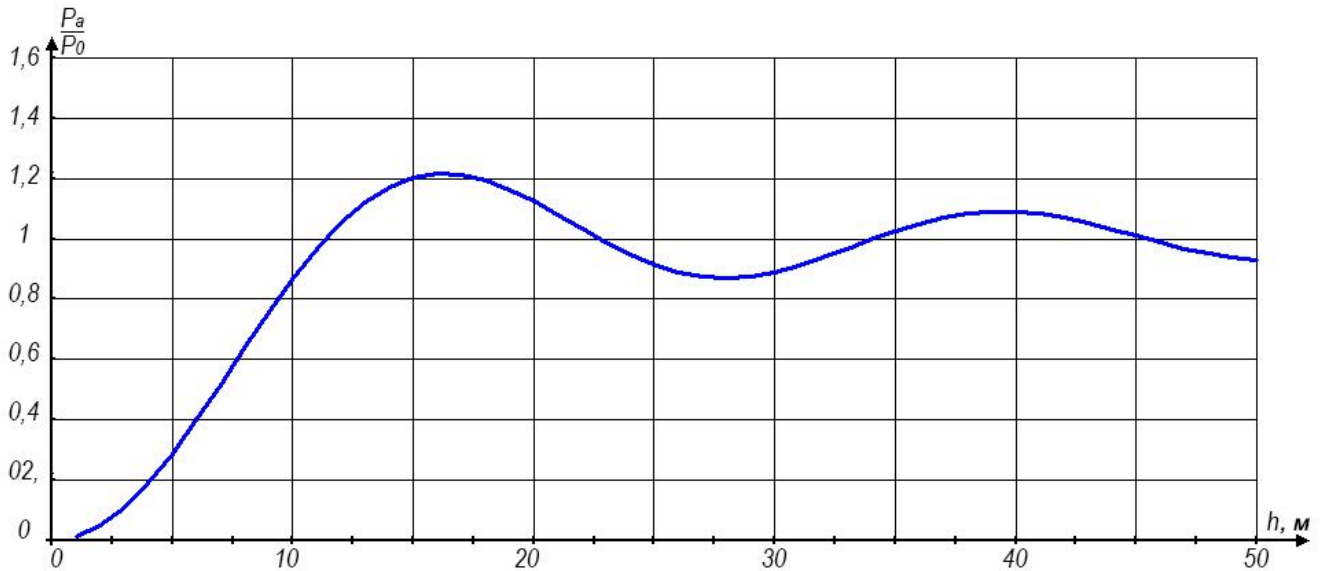


Рисунок 1.8 – Зависимость относительной излучаемой мощности точечного источника с частотой излучения 33 Гц от его заглубления

В ходе проведения экспериментальных работ с исследованием возможности буксировки излучателя ГИ-1 выяснилась невозможность его использования в первоначальном варианте сборки. Поэтому излучатель был дооборудован для возможности его буксировки. Для этого был разработан и установлен на несущий каркас излучателя прямоугольный балансный блок с обтекающими поверхностями, обеспечивающий устойчивое положение по горизонтали излучателя при скорости его буксировки, достигающей до 3 узлов в час. При дальнейших работах выяснилось, что изготовленный балансный блок идеально подходит для проведения гидроакустических работ на льду при снятии стабилизирующих поверхностей.

Для проведения будущих исследований по генерации, распространению и трансформации на границе геосфер сейсмоакустических колебаний на частоте работы излучателя, составляющей 33 Гц было разработано дополнительное устройство для размещения внутри него гидроакустического излучателя ГИ-1. Устройство разрабатывалось на основе расчета коробчатой обечайки, работающей под внутренним давлением. При заполнении водой данного устройства и размещении в нём гидроакустического излучателя с помощью дополнительных модулей создаются условия, аналогичные условиям расположения

гидроакустического излучателя на конкретной глубине моря, что позволяет использовать его в качестве низкочастотного сейсмоакустического излучателя при расположении на земной поверхности или внутри различных сооружений.

Расчет коробчатой обечайки был сделан на базе справочника по основам конструирования химической аппаратуры [23]. Основные внутренние характеристики емкости были определены в соответствии с размерами несущего каркаса излучателя ГИ-1 и составляли высоту и длину по 800 мм, а ширину 350 мм. Расчет проводился по упрощенной методике, рассматривая каждую из четырех прямоугольных плоских стенок, из которых образуется обечайка, как пластину, равномерно нагруженную избыточным давлением p .

Первоначально в соответствии с намерениями использовать низколегированную сталь типа 09Г2С был сделан расчет толщины стенок конструкции нового устройства. Номинальная расчетная толщина гладкой прямоугольной плоской стенки s' в м, ограниченной ребрами исходя из их прочности определяется по формуле [23]:

$$s' = Kb \sqrt{\frac{p}{\sigma_{уд}}} \quad (1.7)$$

где b – меньшая сторона прямоугольной плоской стенки конструкции, $K = f\left(\frac{l}{b}\right)$ – коэффициент, зависящий от способа закрепления стенки по периметру (l – большая сторона прямоугольной стенки), $\sigma_{уд}$ – максимальное изгибающее напряжение.

Значения коэффициента K определяются из табличных данных [24] для конструкционных материалов, имеющих величину коэффициента Пуассона $\mu \approx 0,3$.

В соответствии с принятыми размерами короба $K=0,5$. Учитывая характеристики применяемого металла при минимальном классе прочности равном 265, временное сопротивление разрыву $\sigma_{\partial}=43$

0 Н/мм² и предел текучести для остаточной деформации $\sigma_T=265$ Н/мм². Запас прочности материала при избыточном давлении в конструкции составляющем менее 0,5 Н/мм² – n_{∂} имеет величину 2,6 и $n_T=1,65$. Номинальное допускаемое напряжение для стали 09Г2С по пределу прочности определяем по формуле (1.7):

$$\sigma_{\partial}^* = \frac{\sigma_B^t}{n_B} = \frac{430}{2,6} = 165,36 \text{ Н/мм}^2 \quad (1.8)$$

а номинальное допускаемое напряжение по пределу текучести определяем по формуле (2.8):

$$\sigma_{\partial}^* = \frac{\sigma_T^t}{n_T} = \frac{265}{1,65} = 160,6 \text{ Н/мм}^2 \quad (1.9)$$

Меньшее значение является расчетным, поэтому допускаемое напряжение принимаем равным 160,6 Н/мм².

Учитывая, что внешние воздействия окружающей среды на излучатель не превышают давление более 0,15 Мпа, подставим в формулу (1.7), полученные значения с максимальным давлением внутри обечайки 0,2 МПа. В результате получим $s' = 4,76 \cdot 10^{-3}$ м. С учетом полученного результата и прибавок на округление толщины стенки конструкции при условии отсутствия избыточного давления было принято решение изготавливать короб из металла толщиной 5 мм.

После определения толщины металла короба стояла задача укрепления плоских стенок ребрами, располагающимися снаружи стенки, чтобы сделать их более жесткими, поскольку внутренний объем подразумевает наличие внутреннего давления. Существуют схемы укрепления продольными, поперечными полосами, а также смешанный способ. При изготовлении короба было решено применить смешанный способ (рисунок 1.9), т. е. укрепление и продольными и поперечными ребрами. Предварительный расчетный момент сопротивления укрепляющего поперечного ребра W_p' в м³, считая его как балку на двух опорах, нагруженным половинным расчетным давлением p по площади, соответствующей части прямоугольной стенки, приходящейся на одно ребро, определяется по формуле:

$$W_p' = \frac{B^2 l p}{4K \sigma_{\partial}} \quad (1.10)$$

а продольного ребра:

$$W_p' = \frac{H^2 b p}{4K \sigma_{\partial}} \quad (1.11)$$

где K – коэффициент, зависящий от способа закрепления ребра на опорах; при жестком закреплении $K=12$; при нежестком закреплении $K=8$.

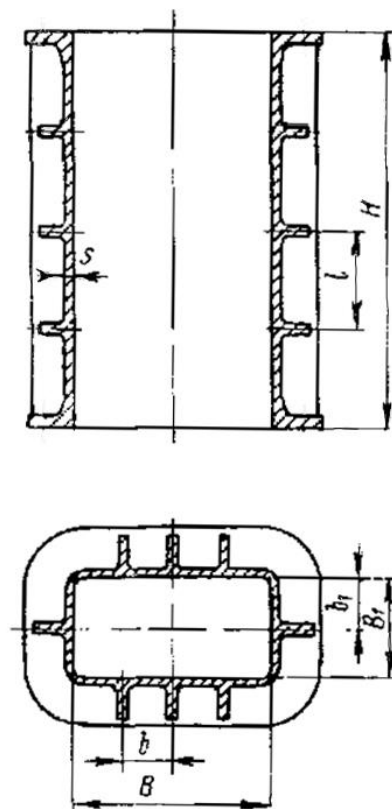


Рисунок 1.9 – Схема укрепления коробчатой обечайки с продольным и поперечным расположением ребер.

Формулы (2.10) и (2.11) получены из известного выражения для момента сопротивления $W_p' = \frac{M_u}{\sigma_{ud}}$ путем подстановки в него значений $M_u = \frac{Pl}{2K}$, где P – давление и соответствующая длина ребра конструкции.

Было принято расстояние между ребрами жесткости $l=0,27$ м, при $H=0,8$ м, т. е. равномерно разделена стенка с максимальной площадью поверхности на 3 части по горизонтали и 3 части по вертикали. Тогда из формулы 2.10 следует, что предварительный расчетный момент сопротивления поперечных ребер $W_p' = 4,483 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Номинальный расчет толщины ребра в метрах с прямоугольным сечением и рекомендуемым отношением толщины его к высоте 1:5 определяется по формуле (1.12):

$$s' = 0,62 \sqrt[3]{W_p'} = 0,62 \sqrt[3]{4,483 \cdot 10^{-6}} = 0,01 \text{ м} \quad (1.12)$$

в которой при подстановке полученных значений получаем, что толщина ребра жесткости составляет 10 мм.

В соответствии с полученными расчетными значениями была изготовлена коробчатая обечайка для генерации сейсмоакустических колебаний посредством работы гидроакустического излучателя с толщиной стенки корпуса 5 мм и толщиной ребер жесткости 10 мм. В верхней части основной емкости изготовлен фланец с резиновым покрытием. Герметизация устройства происходит путем болтового крепления пластиной, также выполненной из стали 09Г2С, поверх фланца по периметру. В пластину встроены трубы с набором фитингов для набора воды, стравливания излишнего давления, устройство контроля давления. Общий вид изготовленного изделия во время проведения испытаний представлен на рисунке 1.10.

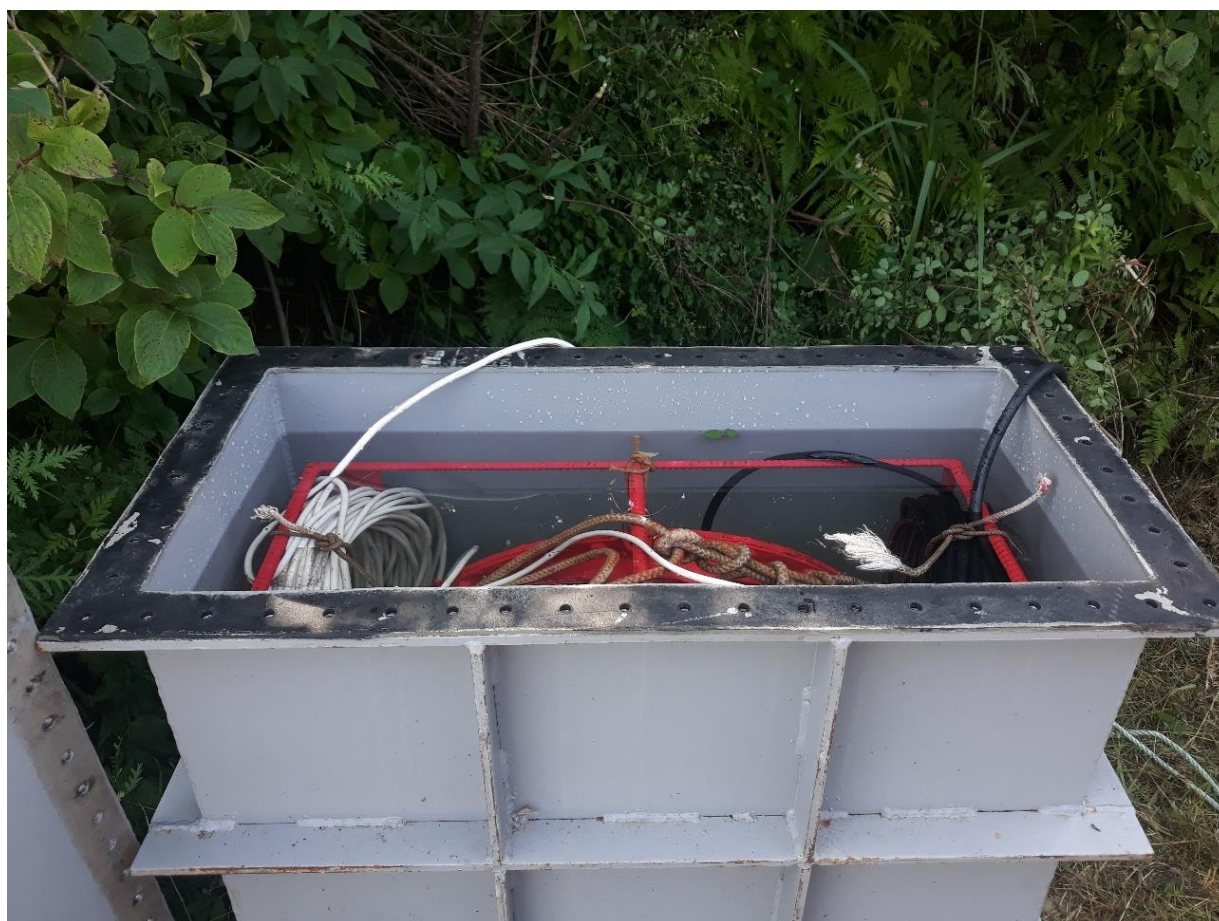


Рисунок 1.10 – Коробчатая обечайка для гидроакустического излучателя.

В соответствии с рекомендуемой последовательностью операций по работе с гидроакустическим излучателем в море было выполнено несколько проверок по генерации тонального акустического сигнала при установке излучателя в

коробчатой обечайке на земной поверхности. Генерация сигнала выполнялась при подключении к блоку питания разного количества аккумуляторов, задающих мощность излучения. Схема предварительного испытательного эксперимента представлена на рисунке 1.11. Станция излучения располагалась на мягкой ровной поверхности почвы, поэтому при наполнении емкости водой и установки в него излучателя ребра жесткости сделанные в нижней части под действием силы тяжести вошли в поверхностный слой. Регистрация сигнала проводилась системой лазерных деформографов и сейсмографом. Расстояние от сейсмографа составило 216 м, от деформографа «север-юг» – 290 м. Так как лазерный деформограф с ориентацией «запад-восток» находился под углом 90° к станции излучения, регистрируемые колебания практически не проявляются на уровне фоновых шумов.

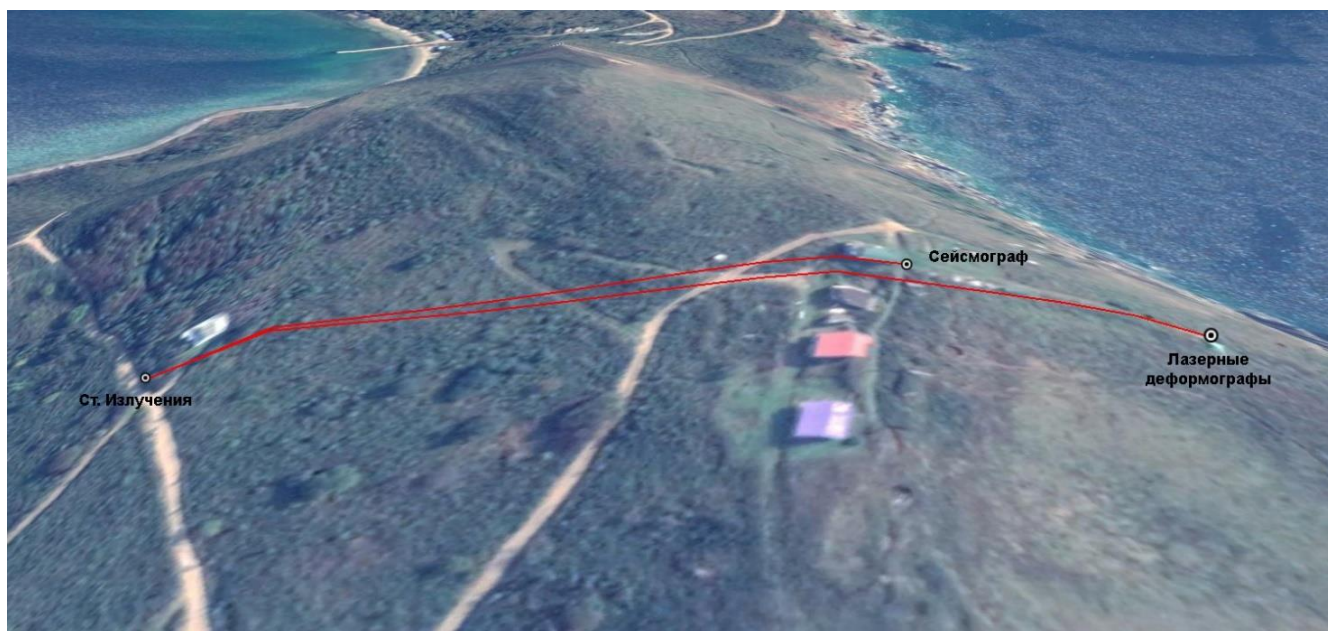


Рисунок 1.11 – Схема проведения эксперимента по излучению сейсмического сигнала гидроакустическим излучателем

Сравнительные спектры принимаемого сигнала лазерными деформографами показаны на рисунке 1.12.

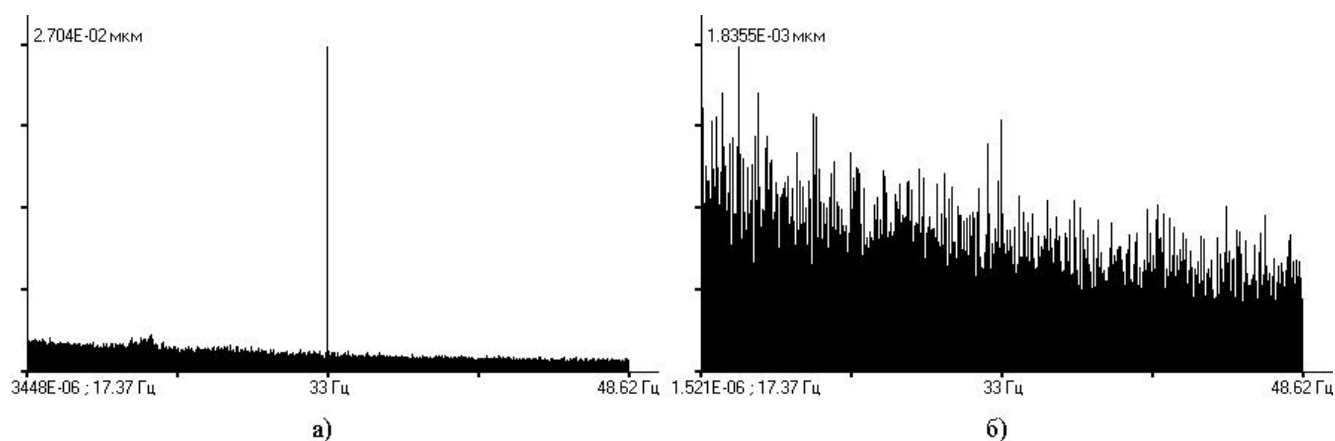


Рисунок 1.12 – Спектры принимаемого сейсмического тонального сигнала лазерных деформографов: а) «север-юг»; б) «запад-восток»

Динамические спектрограммы указанных приемников сейсмического сигнала показаны на рисунке 1.13. По спектрограммам полностью видна последовательность генерации сейсмического сигнала с подключением разного количества аккумуляторов, дающих разную мощность излучения.

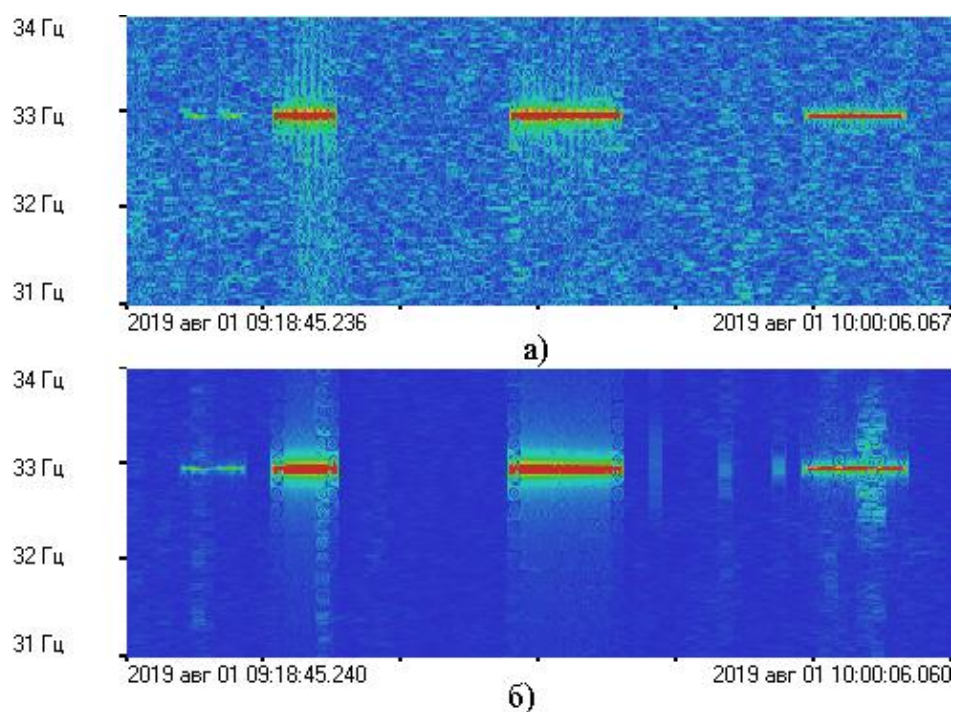


Рисунок 1.13 – Динамические спектрограммы принимаемого сейсмического сигнала: а) лазерный деформограф «север-юг»; б) сейсмограф

Как видно из рисунка 1.13, сначала были поданы два пробных включения излучателя с одним аккумулятором, длившихся по 90 с, чтобы свести к минимуму

возможные неполадки системы. После того, как система показала устойчивую работу, был подключен весь комплекс оборудования, используемый при гидроакустических излучениях. Были проведены несколько периодов излучения в течение 3 и 9 минут.

Как показал предварительный эксперимент, в специальном созданном корпусе гидроакустический излучатель может быть эффективным источником сейсмоакустического излучения, что может дать новые знания в дальнейших исследованиях распространения и трансформации акустических сигналов на границе геосфер.

1.3.2 НИЗКОЧАСТОТНАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ГИ-2

Другая излучающая система такого же типа, как излучатель ГИ-1, предназначена для генерации длительных тональных и фазоманипулированных гидроакустических сигналов в полосе частот порядка 1 Гц при центральной частоте полосы в диапазоне 19–26 Гц (в зависимости от глубины погружения излучателя) [25]. Система была изготовлена в 2013 году, и при непосредственном участии автора работ прошла первые испытания и показала свою перспективность в проведении экспериментальных работ.

Максимальное изменение объема излучателя может достигать 0.0123 м^3 . На частоте 20 Гц в безграничном водном пространстве это соответствует излучаемой акустической мощности 1000 Вт. Внешний вид излучающей гидроакустической системы приведен на рисунке 1.14. В состав системы входят: излучатель с электромагнитным преобразователем, рама для подвеса излучателя, кабель-шланг с контрольным манометром, источник электропитания, электронасос, контрольный гидрофон, два калибровочных акселерометра.

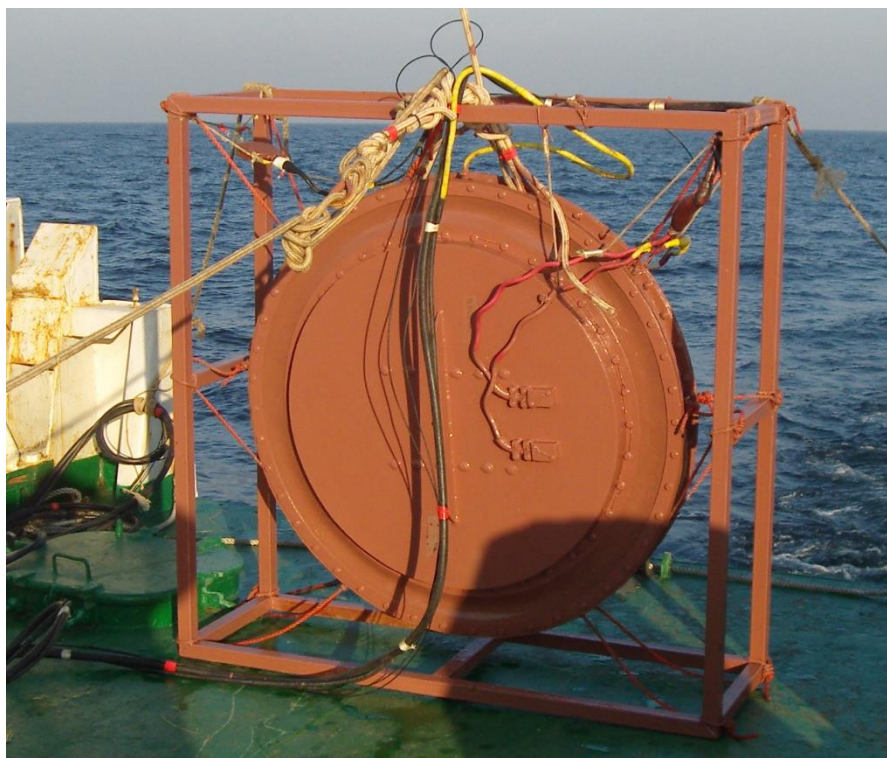


Рисунок 1.14 – Внешний вид гидроакустической излучающей системы 19–26 Гц

Общая схема конструкции излучателя и его габариты показаны на рисунке 1.15.

Излучатель массой 260 кг имеет цилиндрический корпус 1, в котором установлена пара излучающих поршней 2, колеблющихся во взаимно противоположных направлениях и создающих синфазные потоки объемной колебательной скорости. Колебания возбуждает преобразователь электромагнитного типа с П-образными наборными половинами сердечника 3 и четырьмя катушками 4. Между краями поршней зажат набор из 312-ти цилиндрических пружин 5, предварительное сжатие которых достигается за счет пониженного в 0.5 раз атмосферного давления воздуха в полости излучателя относительно гидростатического на глубине его погружения. Для компенсации гидростатического давления при погружении или поднятии применяется шланг длиной 60 м с контрольным манометром и двумя ниппелями. Зазоры между фланцами корпуса и краями поршней уплотнены резиноканевыми воротниками 6. Катушки в каждой паре на половине сердечника 3 соединены последовательно.

Подвод тока к ним осуществляют посредством упругих проводников, выведенных через уплотнения на поршнях 2.

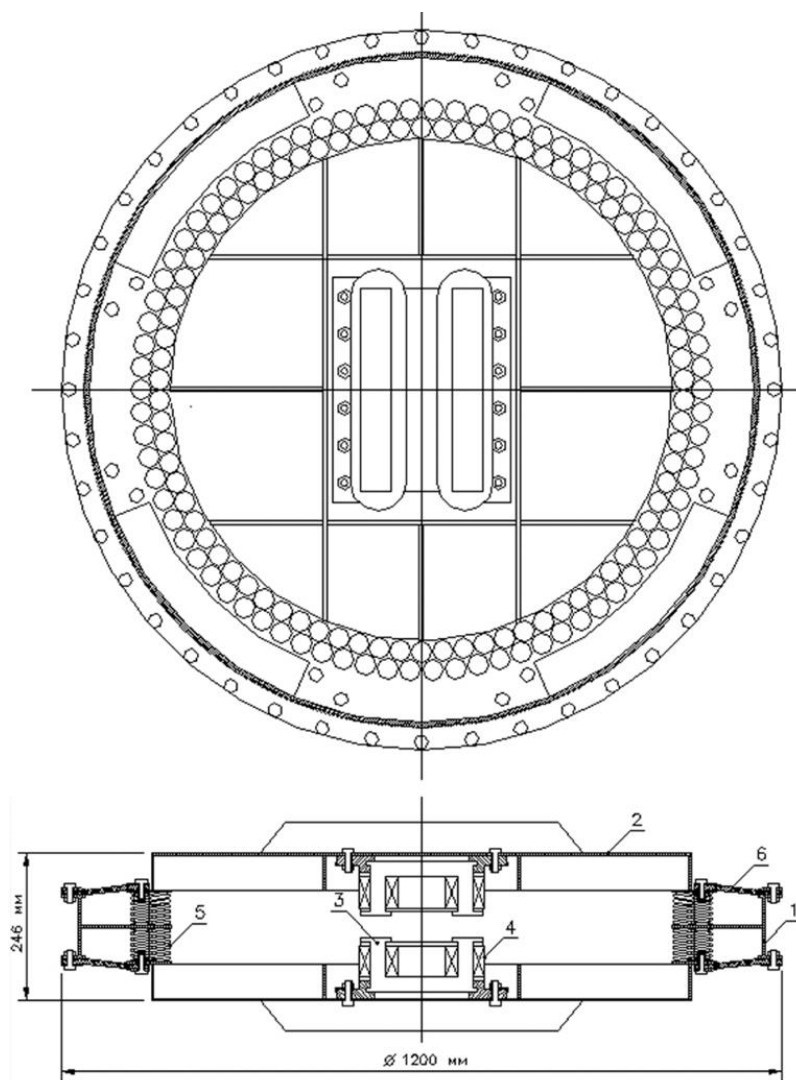


Рисунок 1.15 – Схема конструкции гидроакустического излучателя 19–26 Гц

В качестве первичных источников тока используется батарея последовательно соединенных (от 3 до 22 штук в зависимости от необходимой мощности) свинцово-кислотных аккумуляторов напряжением по 12 В, емкостью 90 А·ч. Источник питания представляет собой мостовой ключевой усилитель, выполненный на двух полу мостовых IGBT-модулях, с компенсирующей батареей конденсаторов 420 мкФ, защитным автоматом и амперметром постоянного тока.

Процесс подготовки излучателя к рабочему положению на глубине тщательно контролируется в течение всего времени погружения. В полости

излучателя постоянно поддерживается давление воздуха ниже внешнего гидростатического, для чего используются показания глубиномера и манометра. При погружении излучателя на глубину от 2 до 40 м частота механико-акустического резонанса плавно возрастает от 19 до 26 Гц. Рабочими являются частоты вблизи резонансной.

По контрольному гидрофону определяют частоту максимального излучения. Под эту частоту механико-акустического резонанса перед работой подстраивается частота электроакустического резонанса и соответственно немагнитный зазор преобразователя путем изменения среднего давления в полости излучателя по отношению к гидростатическому в пределах ± 0.05 атм.

После погружения излучателя на заданную глубину на входы оптронов источника подаются сигналы: синусоидальный сигнал с частотой, равной половине частоты излучения (например, 11 Гц при частоте излучения 22 Гц), поступающий через ограничитель амплитуды, а также фазоманипулированный сигнал, смоделированный с той же частотой, либо прямоугольный сигнал с размахом 2.2 В и “нулевыми полочками”, разделяющими положительные и отрицательные значения сигнала, что позволяет исключить сквозные токи в полумостовых IGBT-модулях.

Ограничение сигнала необходимо для обеспечения надежной работы установленных на оборудовании оптронов, нормальное значение входного напряжения которых 1.15 В, а максимальное – 1.3 В. Отсутствие соударения элементов магнитного сердечника контролируется по изменению давления в полости излучателя. Контроль проводится с помощью гидрофона чувствительностью 98 мкПа и емкостью 34 нФ, закрепленного рядом с излучателем.

Методика применения излучателя ГИ-2 отработывалась несколько лет. В силу того, что излучатель имеет достаточно большой вес в воздухе, но относительно небольшой вес в воде, это позволило применять небольшие плавсредства, оборудованные П-рамой, для испытания и калибровки излучателя в близлежащих от измерительного полигона на м. Шульца акваториях. Одно из

ключевых испытаний излучающей гидроакустической системы ГИ-2 было проведено в июне 2016 г. на шельфе Японского моря. При погружении излучателя на глубину 18 м, его резонансная частота составила 22 Гц. Излучатель с центральной частотой излучения 22 Гц опускался через борт судна. Для уменьшения колебаний при волнении и сносе течением под излучателем подвешивался груз ~60 кг. Запись контрольного гидрофона велась на ноутбук через аналого-цифровой преобразователь L-Card E-14-140-M. Согласно [22], зависимость эффективности излучателя от заглубления на данной частоте определяется из графика, представленного на рисунке 1.16. При работе излучатель и противофазный ему мнимый источник совместно образуют антенну, минимум характеристики направленности которой лежит в горизонтальной плоскости. В результате отработки методики работы с излучателем, чаще всего его располагали на глубине, близкой к 17 м ($1/4$ длины волны), при этом считается, что максимум характеристики при этом максимально направлен вниз.

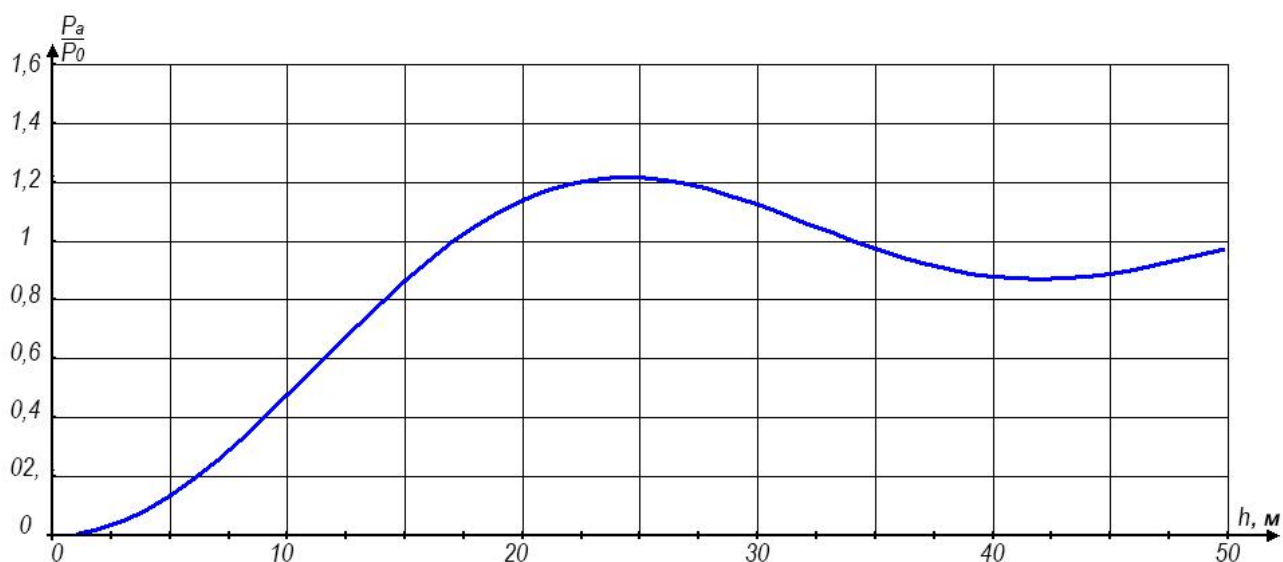


Рисунок 1.16 – Зависимость относительной излучаемой мощности точечного источника с частотой излучения 22 Гц от его заглубления

В бухте Витязь была проведена калибровка излучателя. Каждая серия излучаемых сигналов содержала набор гармонических и фазоманипулированных (М-последовательностей) сигналов. Работа излучателя контролировалась

гидрофоном, а сейсмоакустический сигнал, образованный в результате трансформации излученного гидроакустического сигнала на границе “вода–дно”, регистрировался системой береговых лазерных деформографов, состоящей из двухкоординатного деформографа [9] и деформографа маятникового типа [10, 27].

Основные испытания излучающей гидроакустической системы ГИ-2 были проведены на шельфе открытой части Японского моря. На рисунке 1.17 приведена схема расположения станций излучения. На каждой станции гидроакустический излучатель опускался на глубину 18 м. Центральная частота излучения в таком положении составляет 22 Гц. Для оценки полученных экспериментальных данных после проведенных испытаний была выполнена их предварительная обработка с помощью пакета прикладных программ «Deformograph», имеющего в своем составе различные средства спектрального и статистического анализа. Описание пакета процедур, входящих в программу, будет приведено в этой же главе.



Рисунок 1.17 – Схема расположения станций излучения (21-24) и двухкоординатного лазерного деформографа (•)

На рис. 1.18 приведена динамическая спектрограмма участка записи 52.5-м лазерного деформографа с ориентацией «север-юг» при работе низкочастотного гидроакустического излучателя на станции № 23.

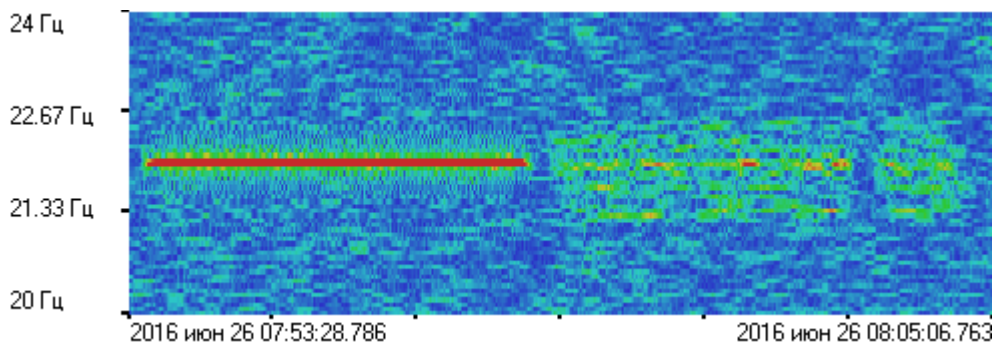


Рисунок 1.18 – Динамическая спектрограмма участка записи 52,5 м лазерного деформографа при работе ГИ-2 на станции 23

В левой части рисунка показана регистрация гармонического сигнала, а в правой части рисунка – регистрация сложного фазоманипулированного сигнала 52,5-метровым лазерным деформографом. Такая же спектрограмма характерна и для других лазерных деформографов в соответствии с их диаграммой направленности и демонстрирует уверенную регистрацию береговыми лазерными деформографами излученных гидроакустических сигналов.

Применение излучателей ГИ-1 и ГИ-2 в дальнейших работах показало их высокую значимость в исследованиях распространения и трансформации гидроакустических и сейсмоакустических сигналов на границе геосфер.

1.4. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Изменение настроек работы сбора и передачи данных на системах лазерно-интерференционных устройств или на отдельных измерительных установках обеспечивается в программной оболочке, которая объединяет в себе, по возможности, все функции, позволяющих оператору наиболее оперативно и корректно настраивать оборудование в рамках проводимых работ. При выполнении всех исследований использовалась программная оболочка LD Data версия 6 (рис. 1.19). Это программное обеспечение, которое обеспечивает прием и анализ данных до 16 физических каналов с аналого-цифрового преобразователя L-Card E14-140 в режиме дифференциального ввода. Программа обеспечивает просмотр входных сигналов из любых активных каналов. Окно анализатора спектра позволяет отображать в режиме реального времени диапазон сигналов. Программа обеспечивает запись информации в файлы с указанием длительности, дискретности и общего количества данных.

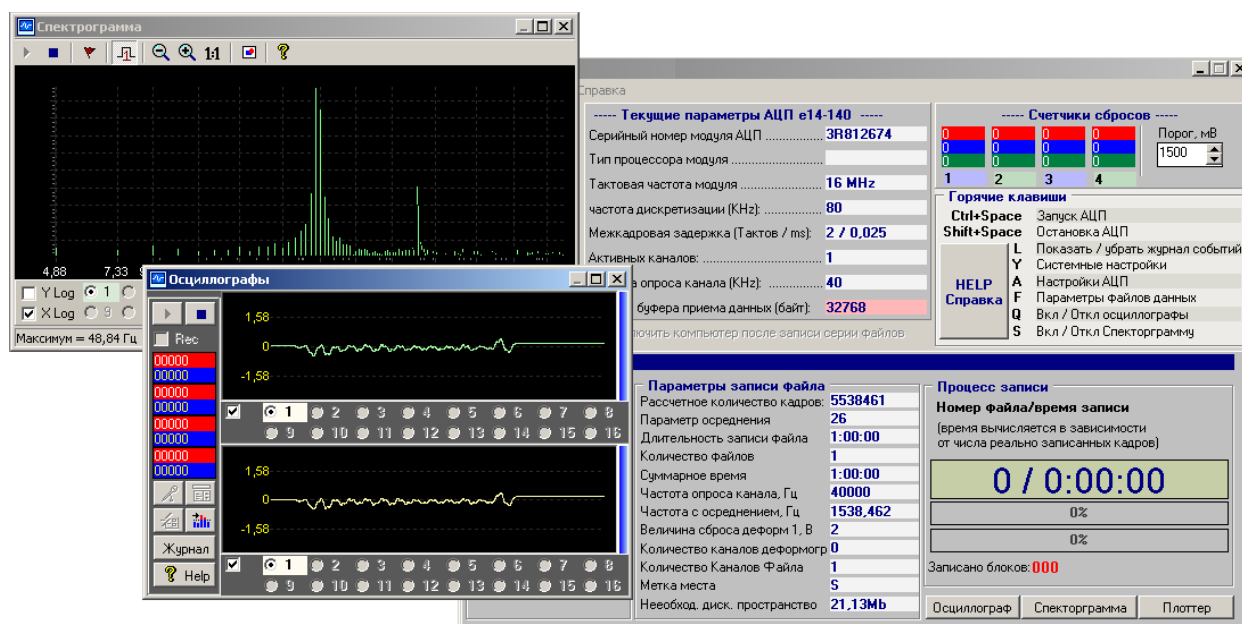


Рисунок 1.19 – Интерфейс программы LD Data v.6

Для промежуточной и полной обработки экспериментальных данных лазерных деформографов применялся пакет прикладных программ «Deformograph» (рис. 1.20), в котором предусмотрено выполнение значительного количества процедур обработки: 1) статистическая обработка данных (дисперсия, среднее, ошибка среднего, коэффициент вариации, доверительный интервал, среднеквадратичное отклонение, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, статистика локальных экстремумов), 2) децимация, 3) тренды различных порядков, 4) корреляция, 5) выделение огибающей, 6) спектральный анализ (периодограмма, Бурга, МТМ, MEM), 7) двухканальный анализ, 8) анализ случайной и детерминированной составляющих, 9) спектр максимального правдоподобия, 10) когеграмма, 11) фазовая диаграмма, 12) двумерная и трехмерная спектрограмма, 13) низкочастотная, высокочастотная и полосовая фильтрация с различными окнами (прямоугольное, треугольное, Хэмминга, Кайзера, Чебышева), 14) моделирование (линейно-частотная модуляция, модельный много гармонический ряд).

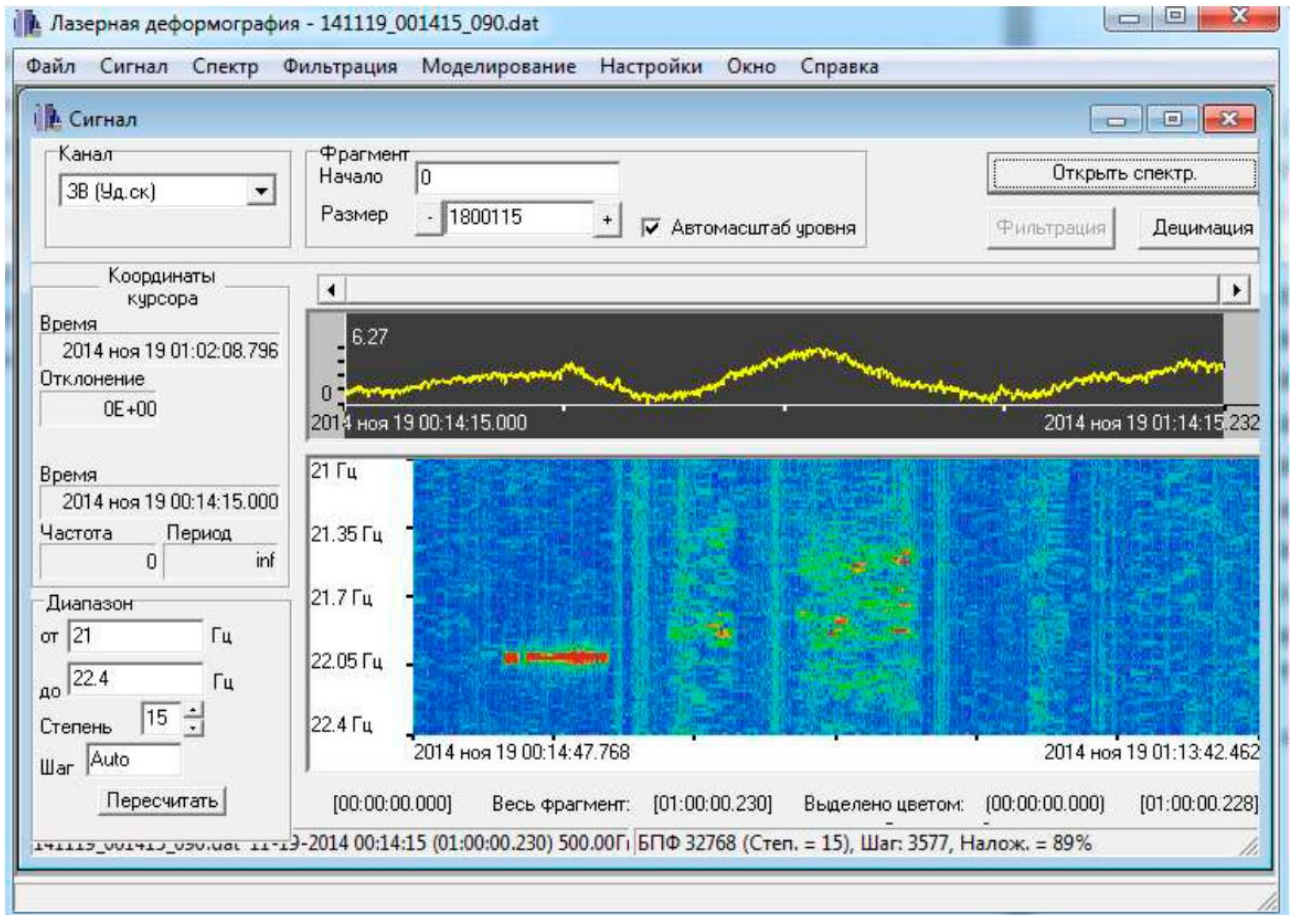


Рисунок 1.20 – Общий вид интерфейса пакета программ «Deformograph»

Для обеспечения корректного сбора данных каналы передачи данных от приборов до регистрирующей аппаратуры должны иметь надежное экранирование, современные средства защиты от электрических наводок и помех. Регистрирующая аппаратура оснащается приемниками ГЛОНАСС, сигнал с которых позволяет произвести временную синхронизацию данных. Каждый из записанных файлов данных должен иметь заголовок, состоящий из сопроводительной информации о параметрах записи и всех необходимых параметров записи для дальнейшей обработки сведений.

Для измерения гидрофизических параметров морской среды на трассе распространения гидроакустических колебаний преимущественно использовался профилометр Valeport miniSVP, представляющий собой 24-битовый профилирующий регистратор температуры, скорости звука и давления. Профилометр имеет возможность автономной работы и позволяет получить не

только вертикальные разрезы толщи воды до морского дна, но и проводить статические измерения.

1.5 ВЫВОДЫ

Для проведения экспериментальных исследований процессов трансформации искусственных и природных волновых полей низкочастотного звукового и высокочастотного инфразвукового диапазонов 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) низкочастотной гидроакустической излучающей системы работающей на частоте 33 Гц; 3) низкочастотной гидроакустической излучающей системы, работающей на частоте 22 Гц; 4) программно-аппаратного комплекса, состоящего из станции бесперебойного питания, сети компьютеров, объединенных общей сетью ТОИ ДВО РАН, аналого-цифрового преобразователя и программы управления комплексом, первичной обработки экспериментальных данных с их последующей записью на магнитные носители; 5) вспомогательное оборудование для измерения основных гидрологических параметров.

С использованием экспериментального комплекса были проведены предварительные экспериментальные исследования в процессе ввода в эксплуатацию отдельных её компонентов, подтвердивших обоснованность принятия решения о возможностях исследований трансформации волновых процессов широкого диапазона частот в зоне перехода геосфер.

ГЛАВА 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ ГЕОСФЕР

При выполнении исследований процессов трансформации гидроакустических сигналов на границе геосфер был проведен целый ряд экспериментов по излучению в водной среде гидроакустических волн на различных частотах искусственными низкочастотными гидроакустическими источниками и регистрации распространяющихся волн в гидросфере и литосфере различными приёмными системами, в том числе лазерными деформографами. Волны переходят из одних геосфер в другие по законам трансформации, возбуждают в соседних геосферах волны на соответствующих частотах в линейном случае или генерируют волны на других частотах в нелинейном случае. Возможно также параметрическое воздействие данных волн на основные характеристики волн различных частот, распространяющихся в соседних геосферах. Волновая энергия может переходить во внутреннюю энергию соседних геосфер. Ранее автором были выполнены разные модельно-теоретические оценки трансформации энергии гидроакустических волн, исходя из полученных данных небольшого количества экспериментов [28, 29]. Также, рядом экспериментальных работ установлено, что с понижением частоты излучения всё большая доля энергии гидроакустических волн трансформируется в энергию сейсмоакустических волн на границе «вода–дно» [30–33]. Но в этих работах не проводилась оценка комплексного влияния на распространение и трансформацию гидроакустических волн изменения различных динамических процессов морской среды, атмосферных процессов, удаленности гидроакустических излучателей от подводных и наземных приемников гидроакустических колебаний, параметров морского дна в условиях шельфовой области моря.

Одним из интересных результатов, полученных в рамках исследования взаимодействия низкочастотных гидроакустических волн с ветровыми морскими волнами, стало то, что в пределах ошибок эксперимента и применяемых методах обработки, не было обнаружено модулирующего воздействия морских ветровых

волн и волн зыби на распространяющиеся низкочастотные (33 Гц) гидроакустические волны на трассе «излучатель-приёмник» [34]. Ранее считалось, что на параметры любых гидроакустических волн влияют инфразвуковые колебания, вызванные приливами, внутренними и поверхностными волнами, что в результате позволяло бы исследовать их характеристики ограниченными по частотному диапазону приемными системами [35, 36]. Проведенные единичные экспериментальные исследования по излучению низкочастотных гидроакустических волн на шельфе и за свалом глубин и приему трансформированных волн лазерным деформографом, позволили оценить вклад гидроакустических волн в уровень микродеформаций земной коры и продемонстрировать большие возможности применения лазерных деформографов по изучению гидросферных процессов и явлений, а также оценить количество трансформированной энергии гидроакустических волн, созданных гидроакустическими излучателями в условиях моря разной глубины, в энергию сейсмоакустических волн слоя земной коры, в котором расположен лазерный деформограф [29].

2.1 ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА КЛИНОВИДНОМ ШЕЛЬФЕ

При исследованиях распространения низкочастотных гидроакустических волн на границах геосфер в разных акваториях, были определены некоторые особенности их трансформации на шельфе убывающей глубины. Для этого были проведены два эксперимента с разными излучателями [37-39]. Оба эксперимента проводились в акватории б. Витязь. В качестве излучающей системы в первом эксперименте применялся низкочастотный гидроакустический излучатель ГИ-1 и во втором эксперименте излучатель ГИ-2 с контрольным гидрофоном. Схема первого эксперимента схематически показана на рисунке 2.1.

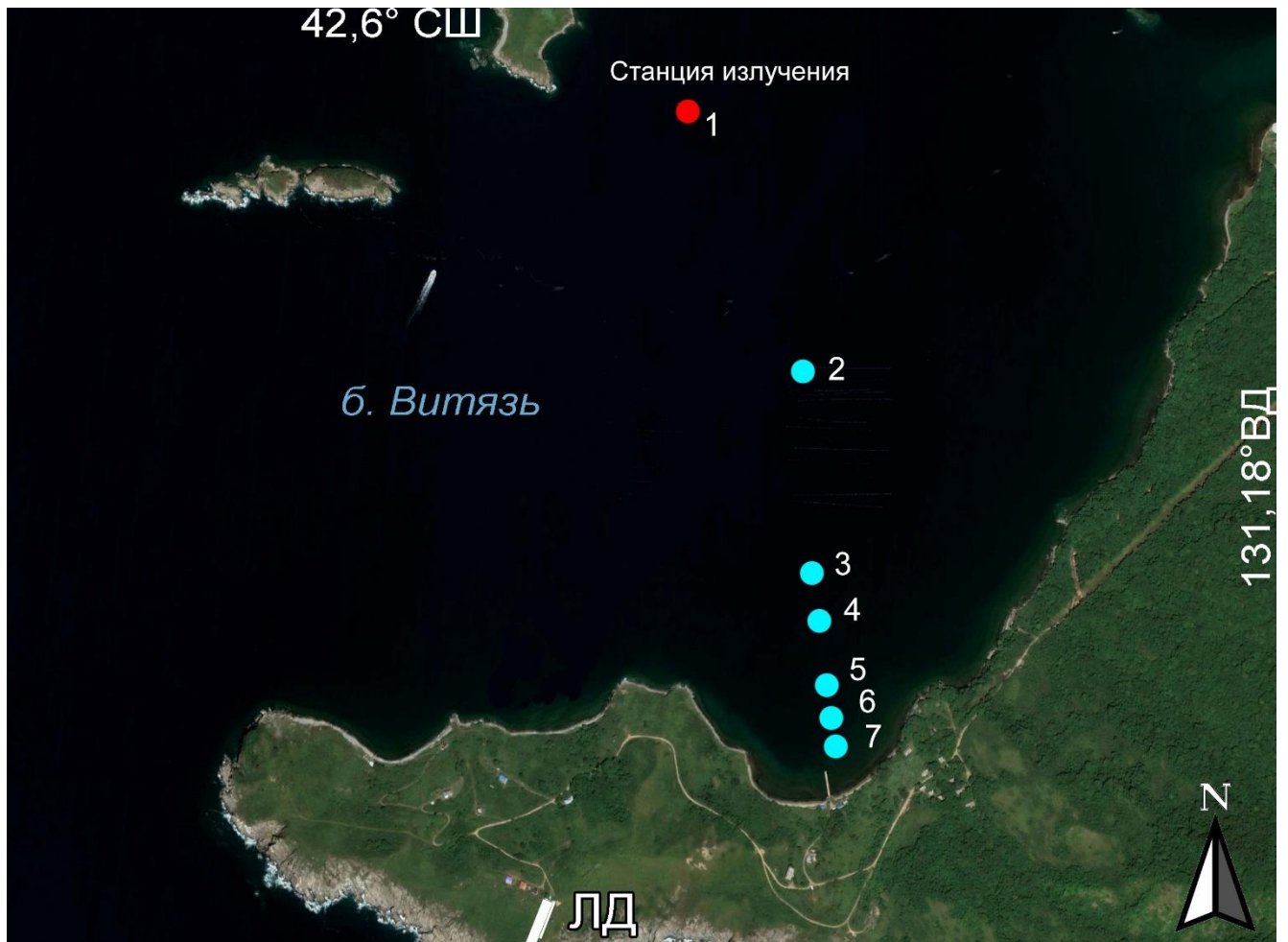


Рисунок 2.1 – Схема проведения эксперимента с гидроакустическим излучателем ГИ-1. 1 – станция излучения, 2-7 точки приёма, ЛД – лазерный деформограф.

В точке 1, имеющей координаты $42^{\circ}35,773'$ СШ, $131^{\circ}9,636'$ ВД, на глубину 15 м с борта судна погружался излучатель ГИ-1, с помощью которого в воде генерировался непрерывный гармонический сигнал на частоте 33 Гц. Гидрофон Briel & Kjaer 8103 применялся для вертикального зондирования гидроакустического поля вблизи излучателя, по которым в дальнейшем определялась плотность энергии, которая создавалась в воде излучателем. В точках приема 2-7 от поверхности до дна проводилась регистрация сигнала на горизонтах через каждые 1 м гидрофоном 8104 компании Briel & Kjaer, опускавшегося с борта катера. Гидрофон Briel & Kjaer 8104 помещался в мобильную капсулу, внутри которой находились: предусилитель гидрофона, аналого-цифровой преобразователь, автономное записывающее устройство. На берегу

трансформированные сейсмоакустические сигналы принимались береговым 52,5-метровым лазерным деформографом (ЛД). Каждая установка, применяемая в эксперименте, привязывалась к часам точного времени, обеспечивающим точность в 1 мс. На рисунке 2.2 показаны данные с гидрофона ВК8103, полученные во время зондирования и график распределения давления по глубине, полученный методом регрессионного анализа.

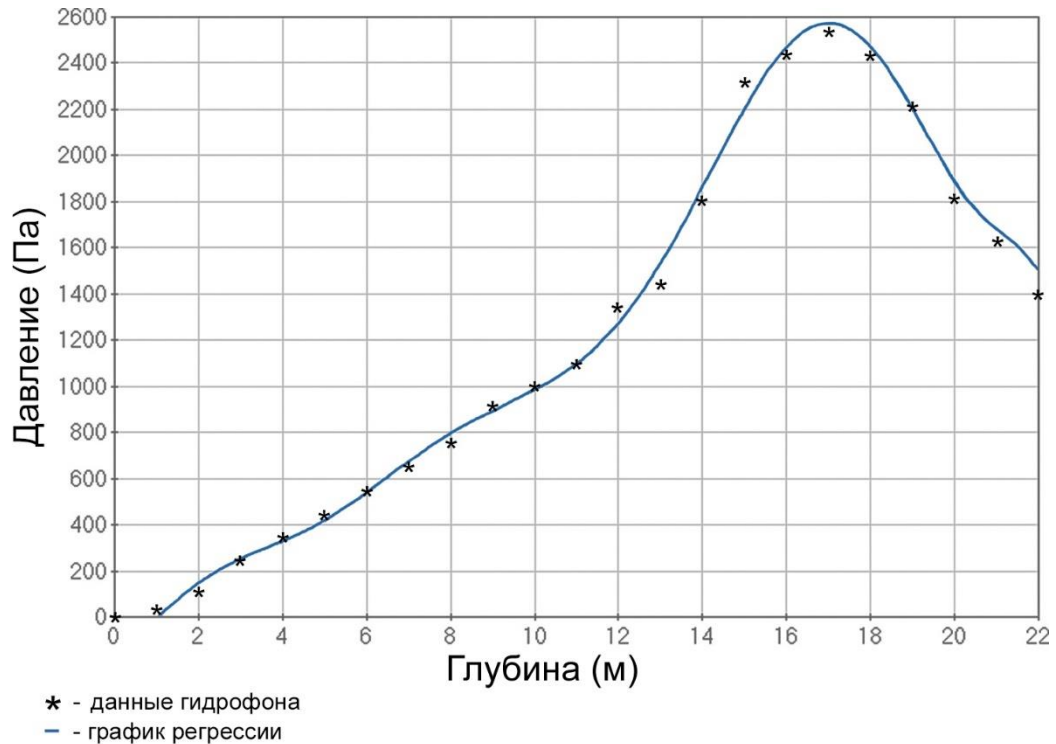


Рисунок 2.2 – График распределения по глубине акустического давления создаваемого источником, полученный методом регрессионного анализа по данным зондирования.

Уравнение графика, показанного на рисунке 2.2, 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 2-7 мобильная капсула с гидрофоном Bruel & Kjaer 8104 помогла провести вертикальное зондирование давления, создаваемого гидроакустическими волнами, распространяющимися вдоль шельфа. На рисунке 2.3 показаны спектры

синхронизированных записей лазерного деформографа и гидрофона, измеренные в точках 2 и ЛД во время излучения гидроакустического сигнала.

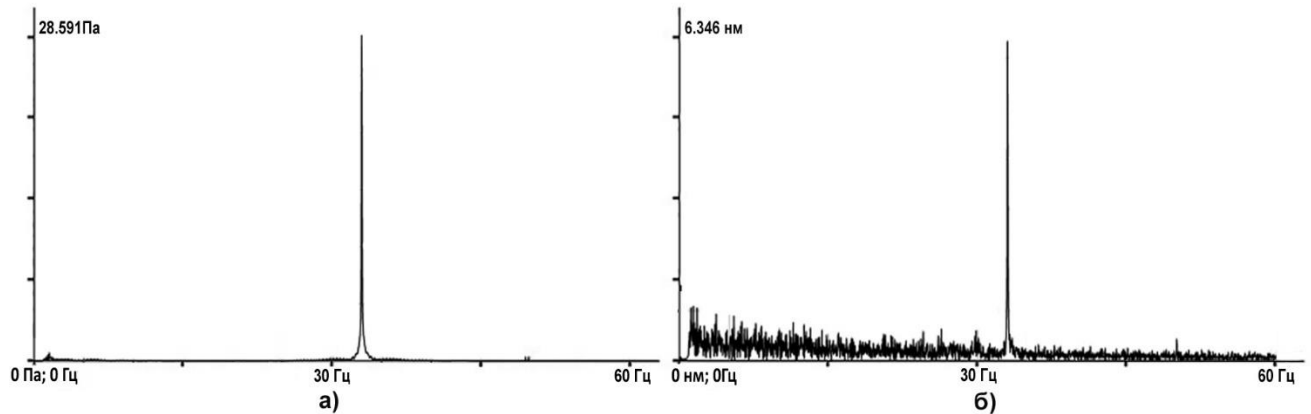


Рисунок 2.3 – Участки спектров синхронных данных при работе излучателя ГИ-1:
а) гидрофона и б) лазерного деформографа

В таблице 2.1 приведены экспериментальные данные, а также формулы графиков распределения акустического давления по глубине.

Таблица 2.2. Экспериментальные данные при работе с излучателем ГИ-1.

№	Глубина, м	Расстояние от станции излучения, м	Уравнение кривой	Амплитуда смещения, нм
2	35	768	$S_{35}(z) = 1.6453027 \cdot 10^{-4} \cdot z^4 - 0.0121622 \cdot z^3 + 0.2546217 \cdot z^2 - 0.7244586 \cdot z + 8.3907788$	6.8
3	30	1240	$S_{30}(z) = 3.6746868 \cdot 10^{-4} \cdot z^4 - 0.0238797 \cdot z^3 + 0.4488056 \cdot z^2 - 1.4875667 \cdot z + 6.4259367$	7.3
4	25	1343	$S_{25}(z) = -9.0611405 \cdot 10^{-5} \cdot z^4 - 0.0036628 \cdot z^3 + 0.253201 \cdot z^2 - 2.0504237 \cdot z + 11.5526048$	7.6
5	10	1564	$S_{10}(z) = -0.0349266 \cdot z^4 + 0.6964281 \cdot z^3 - 4.1046993 \cdot z^2 + 9.2574611 \cdot z - 4.4423333$	6.3
6	5	1616	$S_5(z) = 0.0976667 \cdot z^4 - 1.233 \cdot z^3 + 5.3223333 \cdot z^2 - 8.727 \cdot z + 5.822$	6.0

В первом столбце таблицы 2.1 указан номер станции, во втором столбце указана глубина моря на станции, в третьем столбце — расстояние от станции до источника, в четвертом — уравнение кривой для вертикального распределения давления на станции, в пятом столбце — амплитуда смещения частота передаваемого сигнала, полученная в результате спектральной обработки данных лазерного деформографа.

На рисунке 2.4 приведены профили распределения гидроакустического давления на частоте излучения по результатам вертикального зондирования.

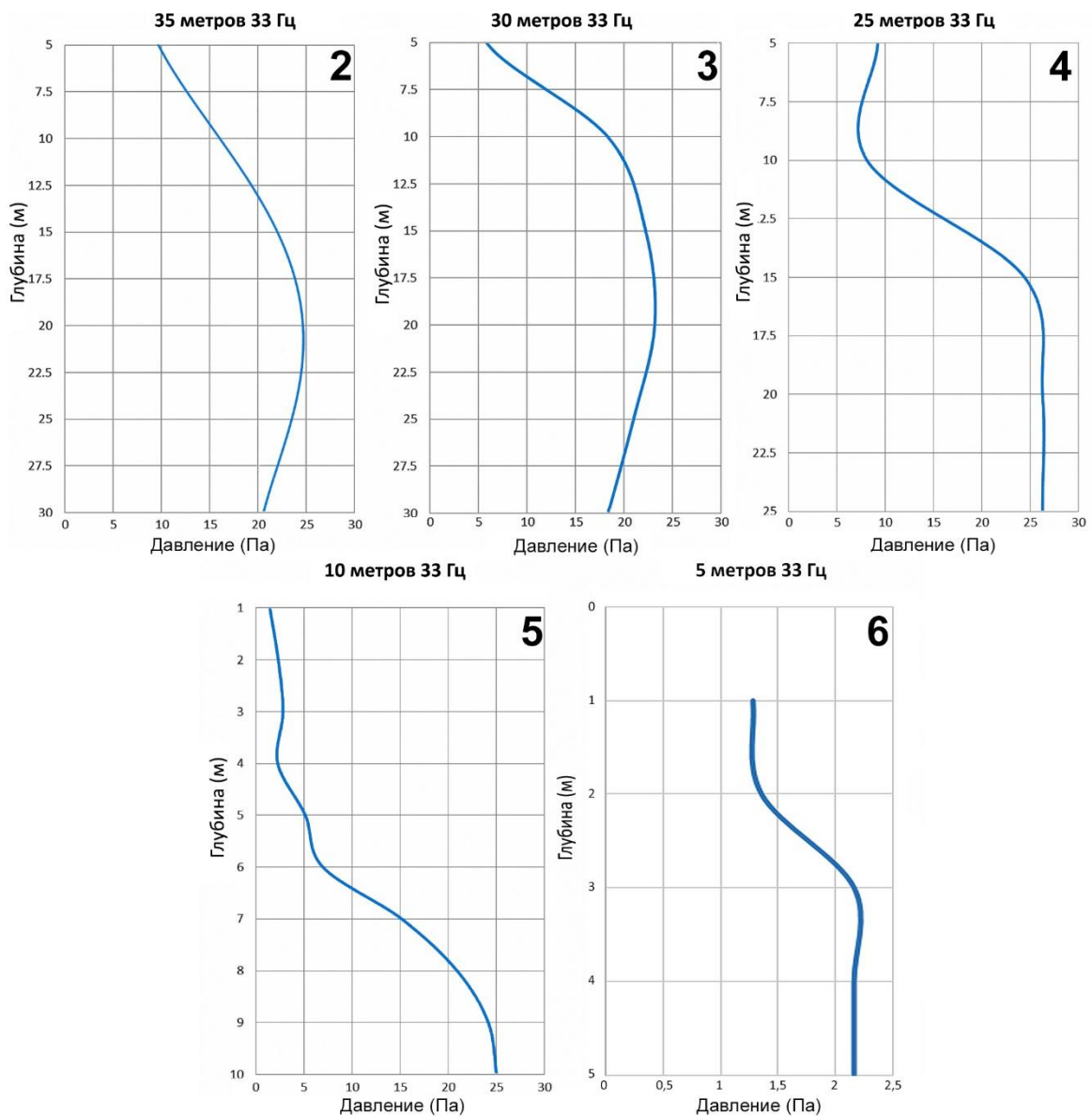


Рисунок 2.4 – Вертикальные профили распределения гидроакустического давления на частоте 33 Гц на станциях 2-6

Рассчитаем плотность энергии гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу, по уравнениям, приведенным в таблице 2.1, для всех станций приема по формуле [40, 41]:

$$E_r = \int_0^h \frac{(S_h(z))^2}{2\rho_w c_w^2} dz, \quad (2.1)$$

где: $S_h(z)$ – уравнение кривой при глубине моря h , $\rho_w=1000$ кг/м³ (плотность воды), $c_w=1500$ м/с (скорость звука в воде).

В соответствии с [28, 42] предполагаем, что излученный низкочастотным гидроакустическим излучателем 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:

$$E_r = \int_0^{\lambda_b} \frac{\rho_b \omega^2 u^2 \exp(-4\pi z / \lambda_b)}{2 \cos(\theta)^2} dz \quad (2.2)$$

где: u – амплитуда смещения на частоте излученного сигнала, равная половине амплитуды волны на частоте 33 Гц, выделенной из записи лазерного деформографа, λ_b – длина волны рэлеевского типа на границе «воздух – земная кора», равная 104,5 м, $\rho_b=2100$ м/с (плотность пород верхнего слоя земной коры), θ – 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 Рэлея, 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

Рэлея, регистрируемой лазерным деформографом. В таблице 2.2 приведены значения плотности энергии, приведенные к расстоянию R от источника.

Таблица 2.2. Плотности энергий источника гидроакустического излучения, гидроакустических волн на станции измерения, волн Рэлея.

Глубина ,м	Плотность энергии источника излучения, Дж/м ³	Плотность энергии гидроакустической волны 33 Гц на станции, Дж/м ³	Плотность энергии волны Рэлея 33 Гц. Дж/м ³
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	$1.167 \cdot 10^{-2}$	$2.28 \cdot 10^{-3}$	$1.66 \cdot 10^{-3}$

Для лучшей визуализации процесса преобразования гидроакустической энергии в энергию волн Рэлея на основе данных таблицы 2.2 построены графики распределения плотностей энергии по глубине, показанные на рисунке 2.4.

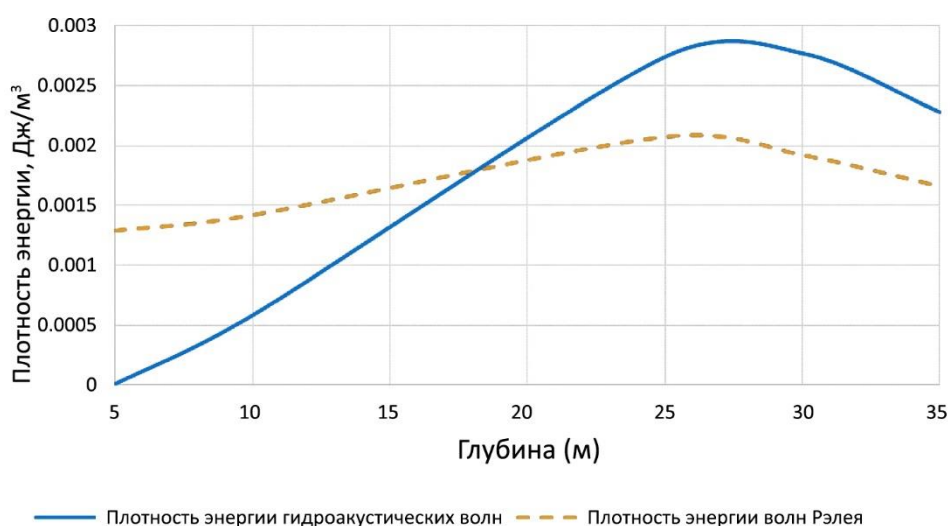


Рисунок 2.5 – Графики распределения плотностей энергии по глубине для гидроакустических волн и волн Рэлея

По результатам распределения энергии гидроакустического излучения на частоте 33 Гц, показанным в таблице 2.2, можно сделать следующие выводы:

- 1) На глубинах $h \geq \lambda/2$, где $\lambda = (1500 \text{ м/с} / 33 \text{ Hz}) \approx 45 \text{ м}$, в среднем около 22% энергии гидроакустического источника преобразуется в энергию гидроакустической волны, распространяющейся вдоль шельфа.
- 2) На глубинах $h \leq \lambda/2$ энергия гидроакустических волн преобразуется в затухающие волны Рэлея, проходящие на границах “вода-дно” и “воздух-земная кора”.
- 3) Около 72% энергии гидроакустических волн преобразуется в затухающую энергию волн Рэлея.
- 4) 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 эксперимент проводился в той же акватории, но уже с оптимизированной линией нахождения станций излучения по отношению к оси берегового лазерного деформографа. На рисунке 2.6. приведена схема экспериментальных работ по регистрации сигнала гидроакустического излучателя ГИ-2. В точке «Станция излучения» (координаты N42°35.6827', E131°09.8707') при глубине моря 32 м на якорю стояло научно-исследовательское судно, с борта которого на глубину 18 м был опущен ГИ-2 создающий в воде гармонические сигналы на частоте 22 Гц. Остальные вспомогательные измерительные устройства были абсолютно такие же, как и в первом эксперименте. При проведении спектральной обработки полученных данных установлено что в данных обеих приемных систем присутствуют колебания на частоте 22 Гц при работе на станциях 1–7. На рисунке 2.7 приведены участки спектров одновременных записей гидрофона и лазерного деформографа при работе на станции 3, на которых выделены мощные спектральные составляющие на частоте 22 Гц.



Рисунок 2.6 – Схема экспериментальных работ

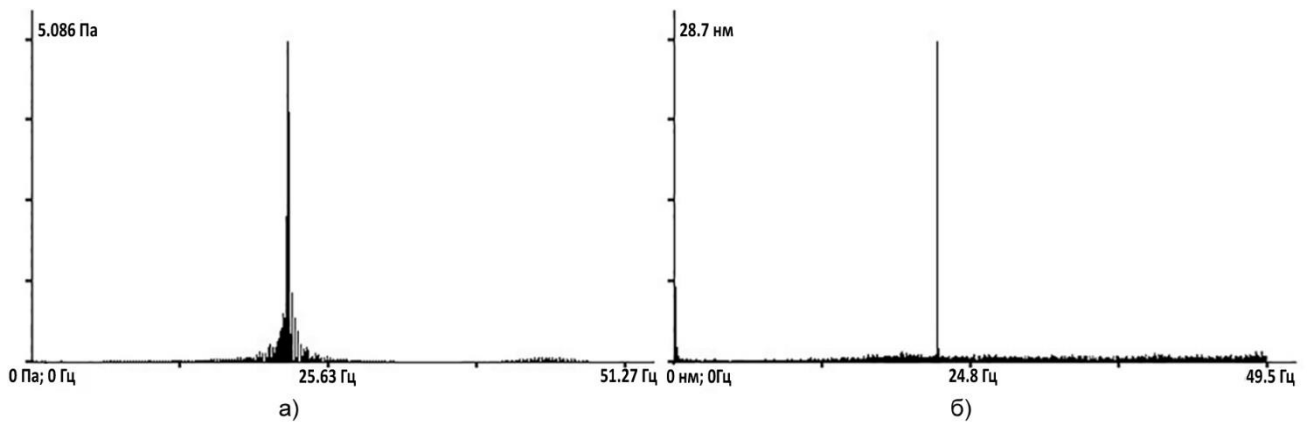


Рисунок 2.7 – Участки спектров синхронных данных при работе излучателя ГИ-2:
а) гидрофона и б) лазерного деформографа

По полученным данным гидрофона определялась амплитуда принятого сигнала на частоте 22 Гц. В дальнейшем строилась кривая, описывающая уровень принятого гидроакустического сигнала, начиная от поверхности до дна. На рисунке

2.8 приведены кривые полученных экспериментальных данных. Каждая кривая была описана полиномиальным уравнением наиболее подходящей степени. Экспериментальные данные лазерного деформографа записывались на рабочий компьютер с частотой дискретизации 1000 Гц. При работе на каждой станции излучения запись лазерного деформографа разбивалась на последовательные участки по 65536 точек, которые в дальнейшем подвергались спектральной обработке.

После обработки были выделены 12–13 участков записей лазерного деформографа при работе на каждой станции излучения и в соответствии с этим получены по 12–13 амплитуд сигнала на частоте 22 Гц, по которым в дальнейшем была определена средняя амплитуда. Полученные результаты приведены в таблице 2.3.

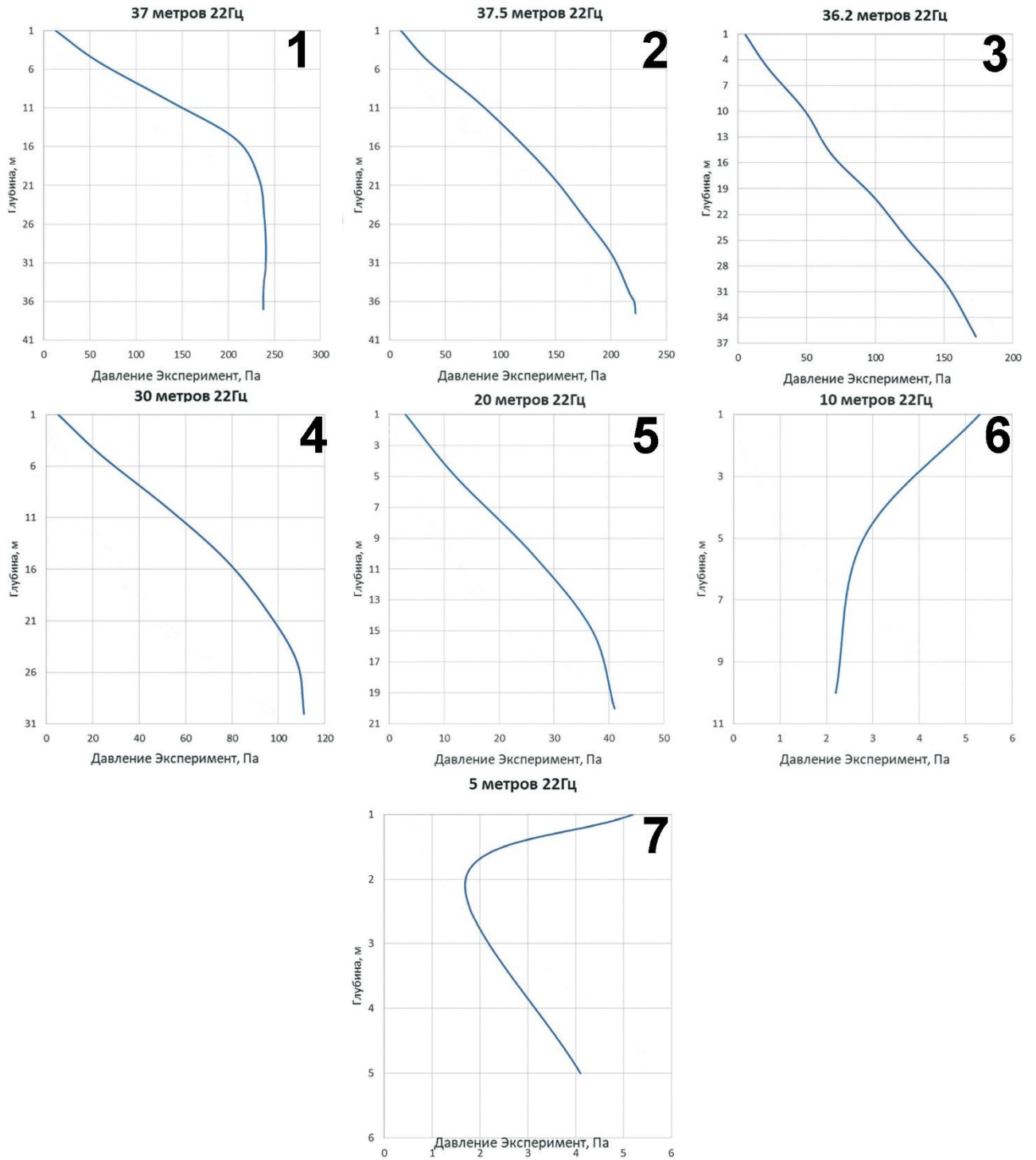


Рисунок 2.8 – Вертикальные профили распределения гидроакустического давления на частоте 22 Гц на станциях 1-7

Таблица 2.3. Экспериментальные данные.

№	Глубина, м	Расстояние от станции излучения, м	Уравнение кривой	Амплитуда смещения, нм
1	37	335	$S_{37}(z) = (3.2835124 \cdot 10^{-7}) \cdot z^7 - (4.5340116 \cdot 10^{-5}) \cdot z^6 + 0.0024484 \cdot z^5 - 0.0643262 \cdot z^4 + 0.8225148 \cdot z^3 - 4.5942522 \cdot z^2 + 21.798353 \cdot z - 4.9269574$	14.6
2	37.5	502	$S_{37.5}(z) = (8.8507925 \cdot 10^{-5}) \cdot z^4 - 0.0085366 \cdot z^3 + 0.1861208 \cdot z^2 + 6.2774712 \cdot z + 2.4975244$	16.4
3	36.2	674	$S_{36.2}(z) = -(1.1161644 \cdot 10^{-4}) \cdot z^4 + 0.0063251 \cdot z^3 - 0.0895405 \cdot z^2 + 5.0292998 \cdot z - 0.206082$	28.7
4	30	970	$S_{30}(z) = (1.2446708 \cdot 10^{-4}) \cdot z^4 - 0.0112489 \cdot z^3 + 0.2185657 \cdot z^2 + 3.8794756 \cdot z + 0.9499853$	26.7
5	20	1148	$S_{20}(x) = (1.641604 \cdot 10^{-4}) \cdot z^4 - 0.0135414 \cdot z^3 + 0.2436404 \cdot z^2 + 1.2073308 \cdot z + 1.462406$	28.1
6	10	1252	$S_{10}(z) = 0.0561111 \cdot z^2 - 0.9616667 \cdot z + 6.2055556$	24.4
7	5	1300	$S_5(z) = 1.075 \cdot z^2 - 6.725 \cdot z + 10.85$	23.3

Результаты расчета приведены в таблице 2.4. В таблице 2.4 также приведены расчетные данные доли плотности гидроакустической энергии на каждой станции приема от плотности энергии излучателя с учетом цилиндрической расходимости излученного сигнала, а также доли плотности гидроакустической энергии, перешедшей на каждой станции приема в плотность сейсмоакустической энергии с учетом цилиндрической расходимости волны рэлеевского типа.

Таблица 2.4. Результаты расчета.

Расстояние от точки излучения, м	Глубина места, м	Плотность энергии излучателя, Дж/м ³	Плотность гидроакустической энергии, Дж/м ³	Излучатель/ гидроакустика, %	Плотность сейсмоакустической энергии, Дж/м ³	Сейсмоакустика/ гидроакустика, %
335	37	0,124	$3,1 \times 10^{-4}$	83,8	$0,91 \times 10^{-8}$	4,2
502	37,5	0,124	$1,7 \times 10^{-4}$	68,8	$1,15 \times 10^{-8}$	8,8
674	36,2	0,176	$8,3 \times 10^{-5}$	31,8	$3,51 \times 10^{-8}$	46,8
970	30	0,176	$4,0 \times 10^{-5}$	22,1	$3,04 \times 10^{-8}$	61,5
1148	20	0,176	$3,3 \times 10^{-6}$	2,2	$3,37 \times 10^{-8}$	100
1252	10	0,176	$1,9 \times 10^{-8}$	1,4	$2,54 \times 10^{-8}$	100
1300	5	0,176	$4,3 \times 10^{-9}$	0,3	$2,32 \times 10^{-8}$	100

Проанализируем полученные результаты. Будем учитывать, что гидроакустическая волна распространяется вдоль клиновидного шельфа и в этом случае потеря энергии будет определяться несколькими факторами. При глубине моря в несколько раз превышающей длину волны гидроакустического излучения, потеря энергии обуславливается поглощением звука водой и его рассеянием на поверхности моря. Чем меньше частота излучения, тем больше морское дно начинает влиять на ослабление энергии гидроакустического излучения. Для длин волн, превышающих глубину моря, доля энергии, поглощаемой из слоя воды морским дном и преобразующейся в упругие волны на границе раздела «вода-дно», увеличивается.

Предположим, что к первой точке измерения вся энергия пришла полностью, т.е. потери составили 0%, как в случае эксперимента, так и в случае цилиндрической расходимости, тогда можно в процентном соотношении вычислить, сколько энергии ушло в дно в виде объемных волн и не дошло до

лазерного деформографа. Как видно из пятого столбика, при дистанции от места излучения 335 м в гидроакустическую энергию перешло 83,8% энергии, выдаваемой излучателем. Т.е. в дно ушло в виде объемных волн около 16%. Если сравнивать с результатами работы, полученными в эксперименте с низкочастотным гидроакустическим излучателем с частотой излучения 33 Гц, то можно утверждать, что при работе гидроакустического излучателя на частоте 22 Гц в объемные волны ушло значительно меньше энергии, чем при работе гидроакустического излучателя 33 Гц (78%). Это возможно только 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. Заметим, что глубина моря в точке излучения при работе гидроакустического излучателя 33 Гц равна 30 м при длине гидроакустической волны 45 м. А при работе гидроакустического излучателя на 22 Гц глубина моря составляла 32 м при длине гидроакустической волны 68 м. При сравнении приведенных чисел можно утверждать, что наиболее эффективно излучатель генерирует гидроакустические волны при глубине моря, сравнимой с половиной длины волны, создаваемой им. А при глубине моря, сравнимой с длиной гидроакустической волны, создаваемой им, эффективность этой генерации падает.

В результате проведенных экспериментальных исследований выявлены общие закономерности распространения низкочастотных гидроакустических волн на шельфе убывающей глубины и их трансформации в сейсмоакустические волны поверхностного типа на границе «вода – дно». Приведенные результаты особенностей распространения гидроакустических волн и их трансформации в сейсмоакустические волны в зоне перехода геосфер б. Витязь [43, 44] дают новое представление о взаимодействиях акустических полей в прибрежных зонах.

2.2 СЕЗОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ ГЕОСФЕР

Одним из значимых полученных результатов получен в результате цикла экспериментов по исследованию процессов трансформации энергии гидроакустических и сейсмоакустических волн в разное время года в зоне перехода “вода-дно” с использованием приборной базы экспериментального сейсмоакустико-гидрофизического комплекса.

2.2.1 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе проведения экспериментов было установлено, что при дрейфующем перемещении работающего излучателя значительно меняется амплитуда принятых лазерным деформографом сигналов. При расположении излучателя на «глубокой» воде (относительно частоты сигнала гидроакустического излучения) вариации принятых амплитуд имеют значительно меньшую величину. Дрейфующее изменение принятых амплитуд может быть связано прежде всего с неоднородным строением сред распространения (вода, верхний слой морской земной коры), а также с вариациями наклона морского дна относительно направления на гидроакустический излучатель.

Неоднородное строение водной среды связано с изменяющимися размерами слоёв воды, имеющих различные температуры. Для изучения влияния неоднородности водной среды на эффективность трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны необходимо было провести экспериментальные исследования по изучению закономерностей трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую энергию с применением низкочастотного гидроакустического излучателя с центральной частотой излучения 33 Гц и берегового лазерного деформографа в разные сезоны года по одной методике при расположении гидроакустического излучателя в одинаковых

точках. В данной работе нас не интересовали определения и понятия «гидроакустическая энергия» или «сейсмоакустическая энергия», происхождение которых связаны с результатом трансформации гидроакустических сигналов, излучённых низкочастотным гидроакустическим излучателем на частоте 33 Гц, в сейсмоакустические сигналы на границе «вода–дно», а интересовали лишь изменение отношения («сейсмоакустическая энергия»)/ («гидроакустическая энергия»), которое можно определить как коэффициент трансформации. Таким образом, целью конкретного пункта исследований являлось экспериментальное изучение сезонной зависимости коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны.

При разработке методики по излучению гидроакустических колебаний учитывалось максимальное попадание станций излучения в зону диаграммы направленности берегового лазерного деформографа. В соответствии с положением измерительных осей лазерных деформографов были выбраны координаты станций излучения при проведении экспериментов на расстоянии 2 км по трём сторонам света (север, юг, запад), относительно берегового лазерного деформографа и далее через 2 км каждая последующая точка при удалении станций излучения на юг, относительно оси лазерного деформографа «север-юг». В результате была подготовлена методика с алгоритмом проведения экспериментальных исследований по исследованию трансформации энергии акустических волн на границе «вода-дно» с использованием лазерно-интерференционных измерительных средств с использованием вычислительных ресурсов ТОИ ДВО РАН. Методика содержала схему выполнения работ при проведении экспериментальных исследований, правила управления приёмными устройствами измерительного комплекса, правила сбора, обработки и хранения данных.

При выполнении поставленных в работе задач необходимо было обеспечить соблюдение следующих условий: 1) станции излучений должны быть во всех экспериментах одними и теми же со строгой привязкой к координатной сетке; 2) глубина погружения излучателя и его режим работы должны быть одинаковыми

при проведении экспериментов в разные сезоны года на одной и той же станции;

3) оптико-электронная часть лазерного деформографа должна быть неизменной. Во всех точках излучения обеспечивалась постоянная мощность излучения, амплитуда которого контролировалась гидрофоном, расположенным на расстоянии 1 м от геометрического центра излучателя. Все эти условия были выполнены.

В план проведения эксперимента были добавлены станции излучения, включающие в том числе и станции, позволяющие исследовать вариации гидроакустического сигнала при приеме на разнонаправленные оси деформографов.

21 октября 2012 г. на МЭС ТОИ ДВО РАН “м. Шульца” был проведен первый эксперимент, в рамках проводимой работы, по излучению гидроакустических колебаний низкочастотным гидроакустической излучающей системой на частоте 33 Гц. План эксперимента заключался в выполнении серии излучений низкочастотным гидроакустическим излучателем в заранее определённых точках, в соответствии с рекомендациями методики проведения экспериментальных работ, и приёме гидроакустических волн, трансформирующихся в сейсмоакустические волны, двухкоординатным лазерным деформографом. В таблице 2.5 приведена информация о времени и координатах станций излучения.

Таблица 2.5 – Станции излучения

№	Время	Координаты		<i>H</i> , м	<i>L</i> , км	Дрейф, м
1	00:27:300	42°35.842' 42°35.837'	131°09.772' 131°09.814'	31	2.030 2.045	55
2	01:02:48	42°35.270' 42°35.324'	131°07.511' 131°07.518'	33	2.727 2.747	90
3	01:52:50	42°31.565' 42°31.517'	131°08.623' 131°08.609'	51	6.036 6.129	90
4	02:20:16	42°32.725' 42°32.746'	131°08.858' 131°08.855'	45	3.864 3.828	40
5	02:45:49	42°33.772' 42°33.790'	131°09.163 131°09.250'	42	1.896 1.843	120
6	03:24:42	42°35.838' 42°35.803'	131°09.702' 131°09.796'	30	2.008 1.970	150

В колонке «Дрейф» указано расстояние дрейфа судна при проведении излучения гидроакустического сигнала. В колонке «*H*» указана глубина моря на станции в метрах. В столбце «*L*» указано расстояние от точки излучения до берегового 52,5-метрового лазерного деформографа.

Во время проведения первого эксперимента дул умеренный северо-западный ветер 5-7 м/с, волнение моря достигало величины 2-3 балла.

На рисунке 2.9 приведена карта-схема проведённых экспериментальных работ, где точками 1-6 обозначены станции работы гидроакустического излучателя. Красной точкой на м. Шульца указывает местонахождение двухкоординатного горизонтального лазерного деформографа. В бухте Витязь, напротив станции излучения 1 в точке с координатами 42° 35.038'СШ и 131° 9.881'ВД был стационарно установлен мобильный измеритель вариаций давления гидросферы с целью приёма гидроакустического сигнала излучателя и фиксации его энергии в приграничной области зоны перехода. На станциях профилометром выполнялись вертикальные разрезы для контроля гидродинамических параметров морской среды. Излучаемый гидроакустический сигнал имел следующую форму:

тональное излучение – 300 секунд, пауза – 20 секунд, излучение М-последовательности – 84 секунды.

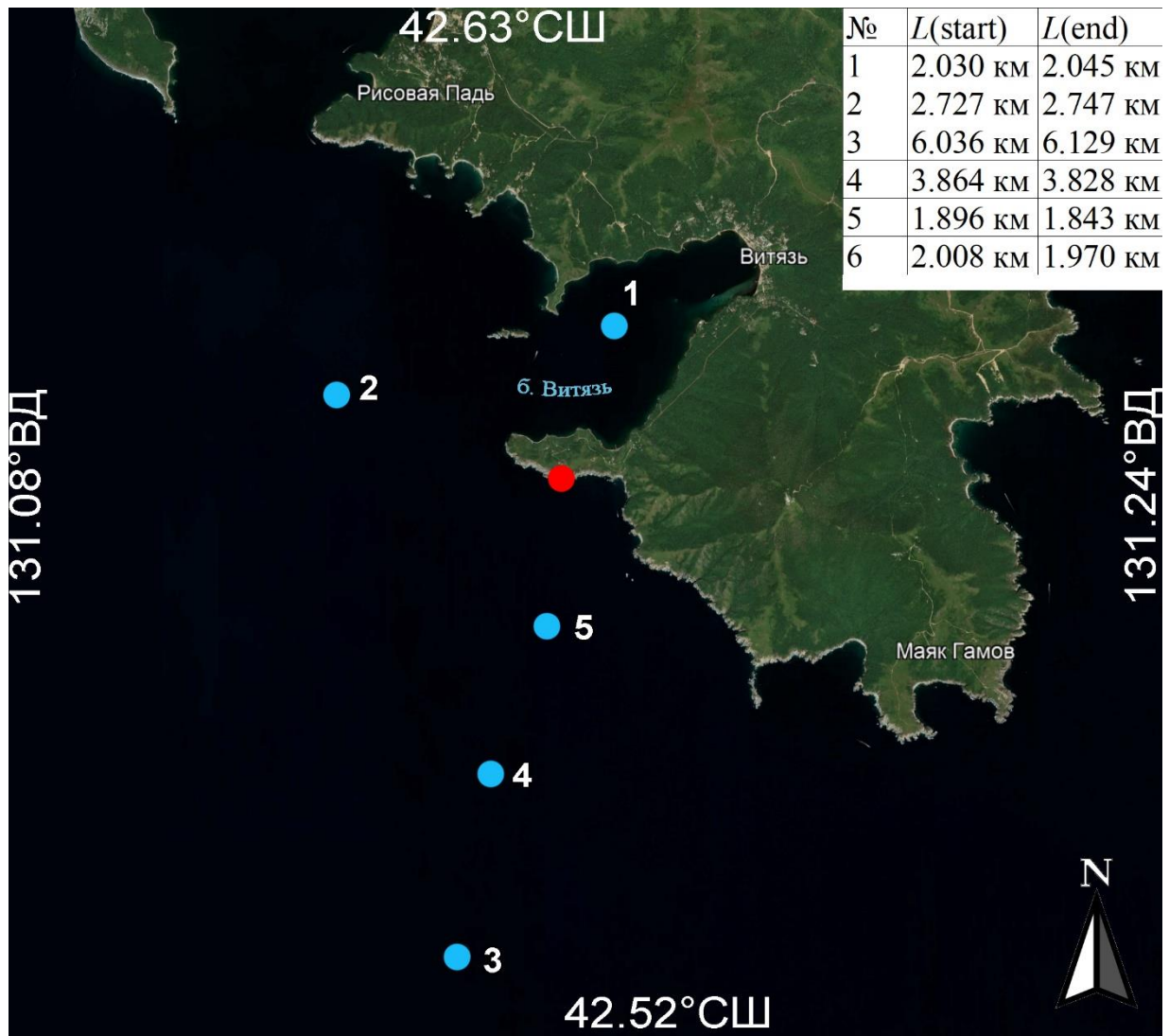


Рисунок 2.9 – Карта проведения эксперимента 21 октября 2012 г.

Мгновенный спектр М-последовательности (псевдослучайной последовательности) представляет собой модуляцию синусоидального сигнала несущей частоты кодовой М-последовательностью, состоящей из $V = 2n - 1$ символов (в нашем случае $n = 8$, $V = 255$); в конце каждого символа производится изменение фазы колебаний на 0° или 180° по псевдослучайному закону. Длительность элементарного символа выбирается кратной периоду излучаемой

частоты T_0 и равна в нашем случае $\phi = 10T_0 = 303.03$ мс ($\Delta f = 3.3$ Гц), т.е один символ состоит из 10 периодов частоты излучаемого сигнала. На рисунке 2.10 показан спектр излучаемой псевдослучайной последовательности.

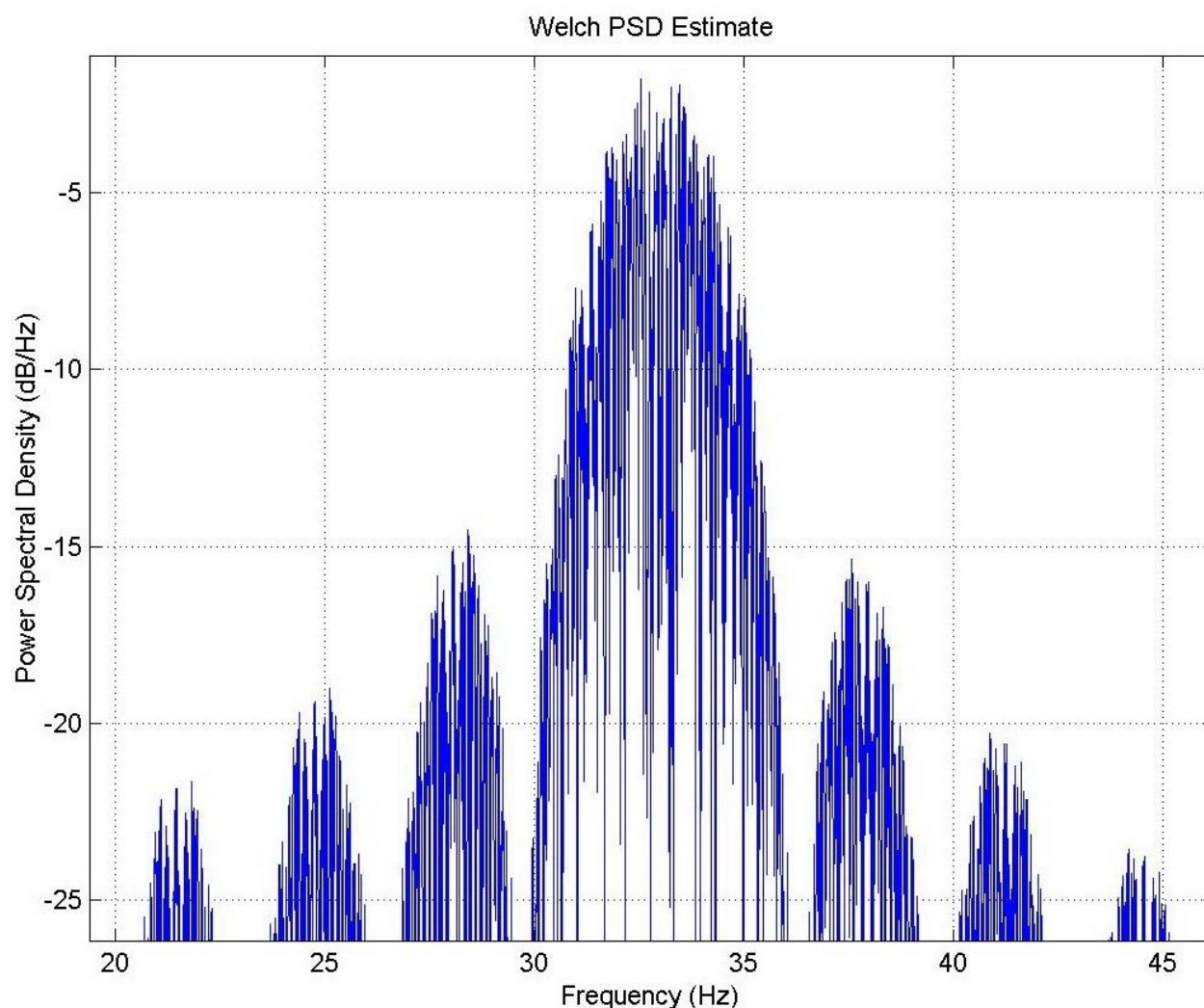


Рисунок 2.10 – Спектр псевдослучайной последовательности 33 Гц

На рисунке 2.11 представлена динамическая спектрограмма записи с контрольного гидрофона, прикреплённого в 1 м от геометрического центра излучателя. На всех станциях излучения контрольным гидрофоном проводилось измерение и запись работы гидроакустического излучателя. В последующем, помимо использования системы синхронизации работы излучающих и приёмных приборов, данные использовались как опорный сигнал при анализе данных

береговой регистрирующей аппаратуры. На его основе выполнялся контроль мощности излученного сигнала, время начала и окончания работы излучателя.

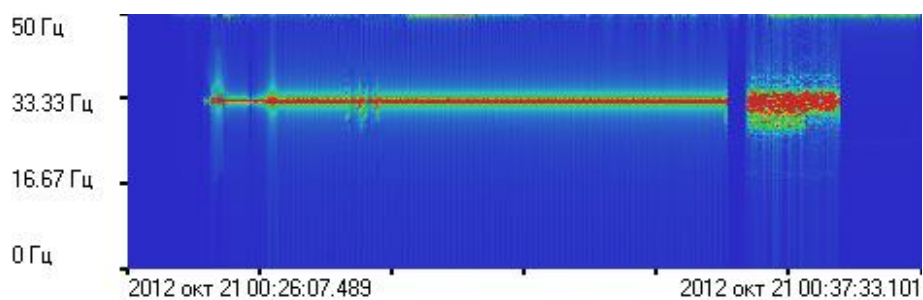


Рисунок 2.11 – Динамическая спектрограмма записи гидроакустического сигнала с контрольного гидрофона

На рисунке 2.12 а), б) и в) показаны динамические спектрограммы сигнала, принятого лазерными измерителями на суше и в воде.

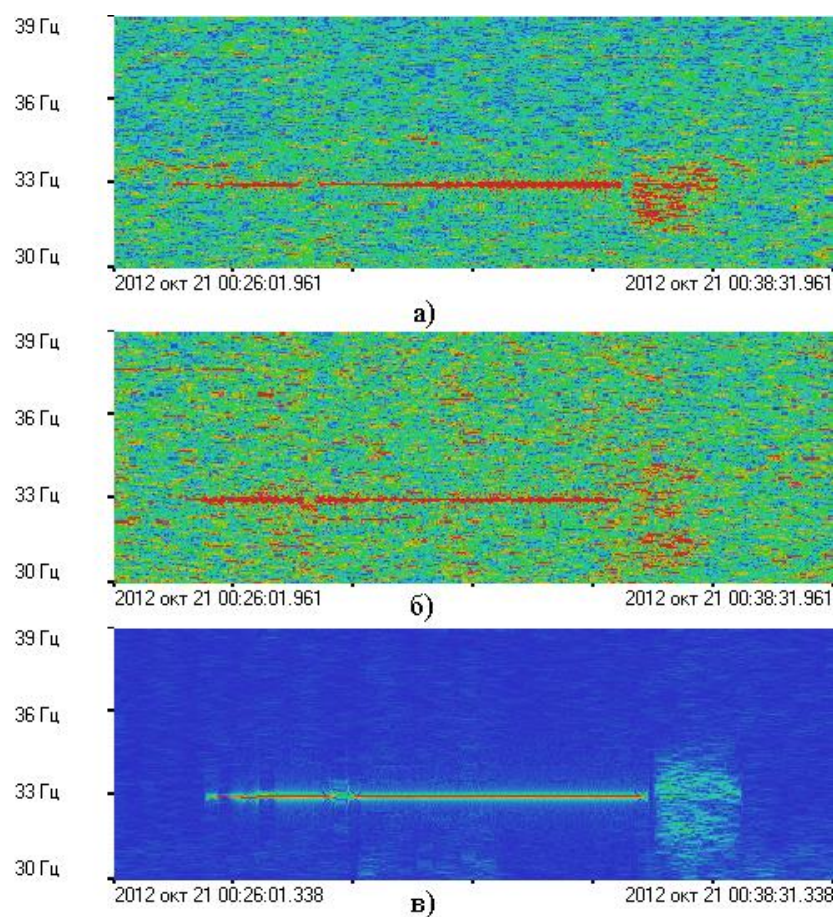


Рисунок 2.12 – Динамические спектрограммы записи излучения лазерными интерферометрами на станции 1: а) лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17,5 м, б) лазерного деформографа с длиной

измерительного плеча 52,5 м, в) мобильного измерителя вариаций давления гидросферы

Соответственно, приём излучаемого сигнала проводился береговым двухкоординатным лазерным деформографом с длинами измерительных плеч 17,5 м, и 52,5 м и мобильным измерителем вариаций давления гидросферы (при измерениях в точках 1) и б).

Гидроакустическое излучение на станции 2 выполнялось для получения трансформированного гидроакустического сигнала максимальной амплитуды на лазерном деформографе, ориентированного по оси «запад-восток», поэтому точка выбрана с удалением на 2 км на запад от этой компоненты лазерного деформографа. На рис. 2.13 а) и б) показаны динамические спектрограммы данных лазерных деформографов в диапазоне, где присутствует сигнал с этой станции на частоте работы гидроакустического излучателя.

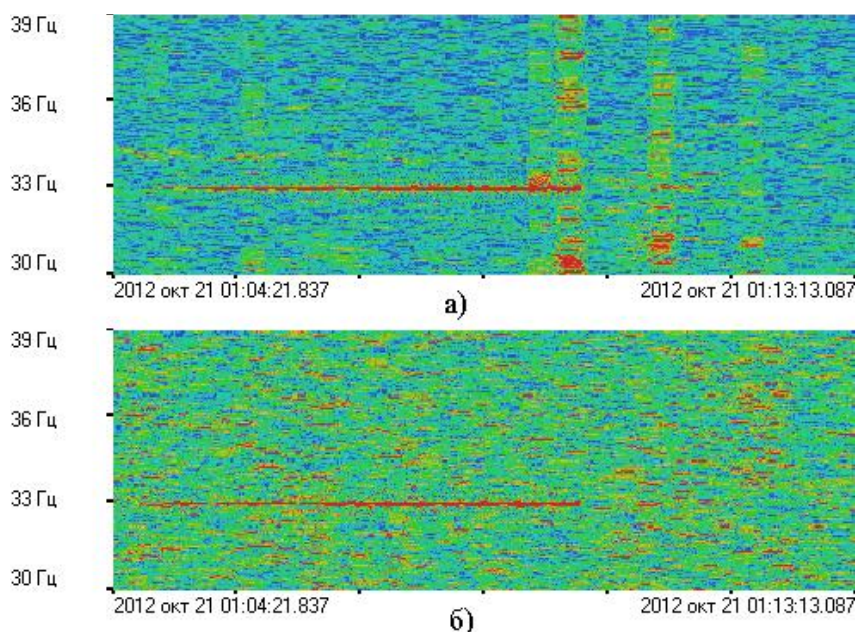


Рисунок 2.13 – Динамические спектрограммы записи лазерных деформографов приема сигнала гидроакустического излучателя при его работе на ст. 2:

- а) лазерный деформограф 52,5 м «север-юг»;
- б) лазерный деформограф 17,5 м «запад-восток»

На рисунке 2.14 приведены динамические спектрограммы во время работы излучателя на ст.3, находящейся на удалении 6 км от приёмных систем.

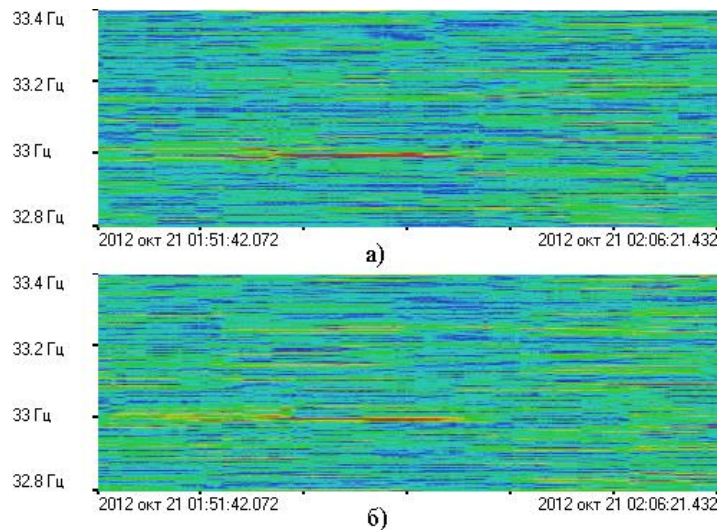


Рисунок 2.14 – Динамические спектрограммы записи лазерных деформографов приема сигнала гидроакустического излучателя при его работе на ст. 3:

- а) лазерный деформограф 52,5 м «север-юг»;
- б) лазерный деформограф 17,5 м «запад-восток»

На рис. 2.15 приведены динамические спектрограммы сигнала в диапазоне излучения, выделенного при работе гидроакустического излучателя на ст. 4., удаленной от приёмной станции на 4 км.

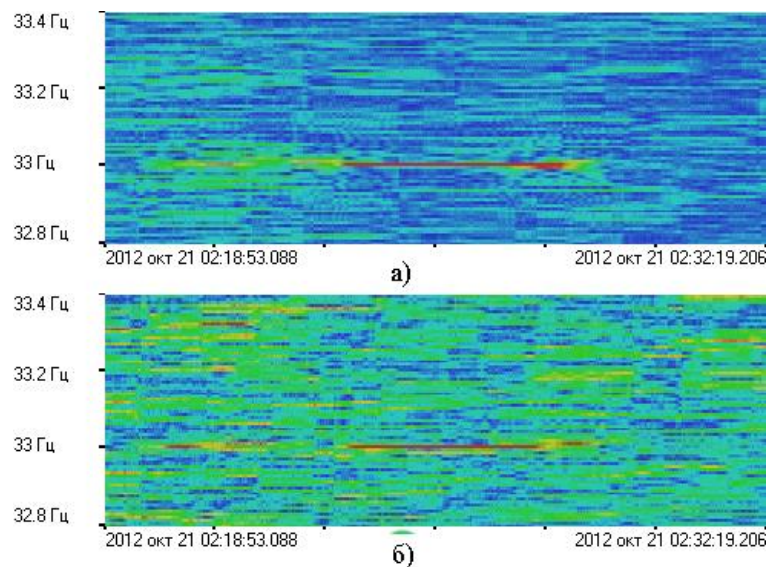


Рисунок 2.15 – Динамические спектрограммы записи лазерных деформографов приема сигнала гидроакустического излучателя при его работе на ст. 4:

- а) лазерный деформограф 52,5 м «север-юг»;
- б) лазерный деформограф 17,5 м «запад-восток»

На рис. 2.16 приведены динамические спектрограммы принятого сигнала от излучателя, работающего на ст. 6 в двух километрах от приемных станций.

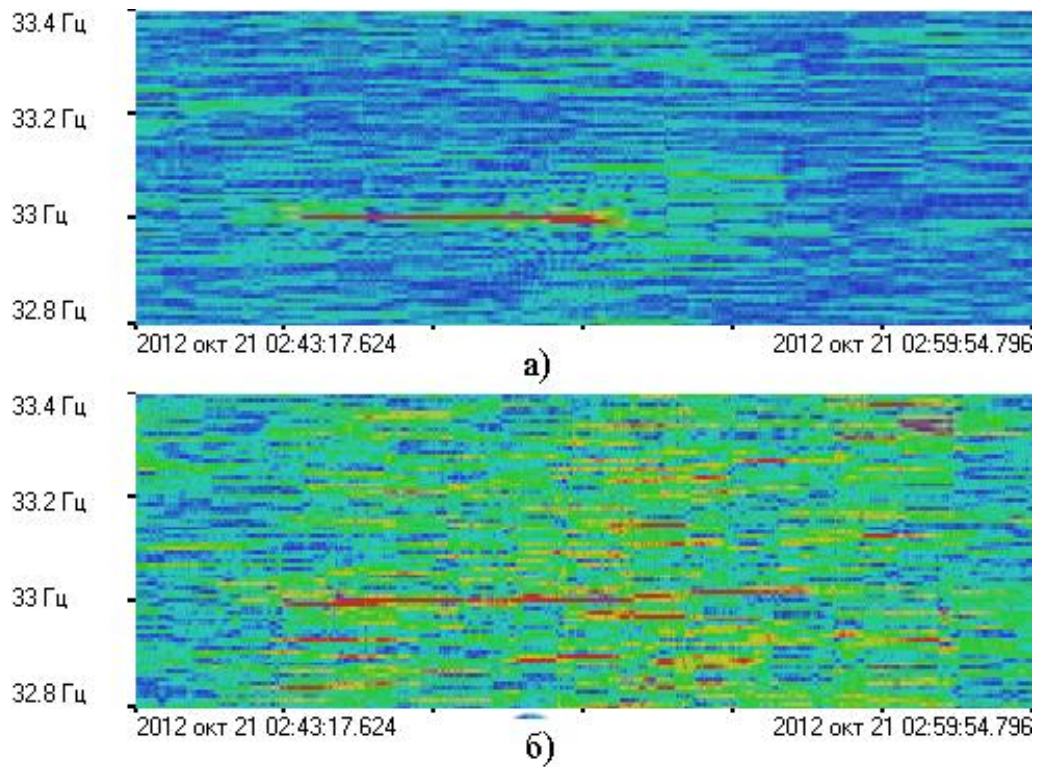


Рисунок 2.16 – Динамические спектрограммы записи лазерных деформографов приема сигнала гидроакустического излучателя при его работе на ст. 5:

- а) лазерный деформограф 52,5 м «север-юг»;
- б) лазерный деформограф 17,5 м «запад-восток»

В результате обработки результатов первого эксперимента и дальнейшем планировании продолжения исследования, было определено, что для достижения поставленной задачи необходимо использовать данные, полученные со станций излучения, имеющих удаление от измерительного полигона в южном направлении.

Приведем комплексный рисунок 2.17, на котором показаны динамические спектрограммы контрольного гидрофона (а), а также динамические спектрограммы, полученные при обработке записей лазерного деформографа «север–юг» при удалении источника излучения на 6, 4 и 2 км соответственно, на которых показаны спектры зарегистрированных сигналов, полученных на этих

станциях при работе низкочастотного гидроакустического излучателя в непрерывном и фазоманипулированном режимах работы.

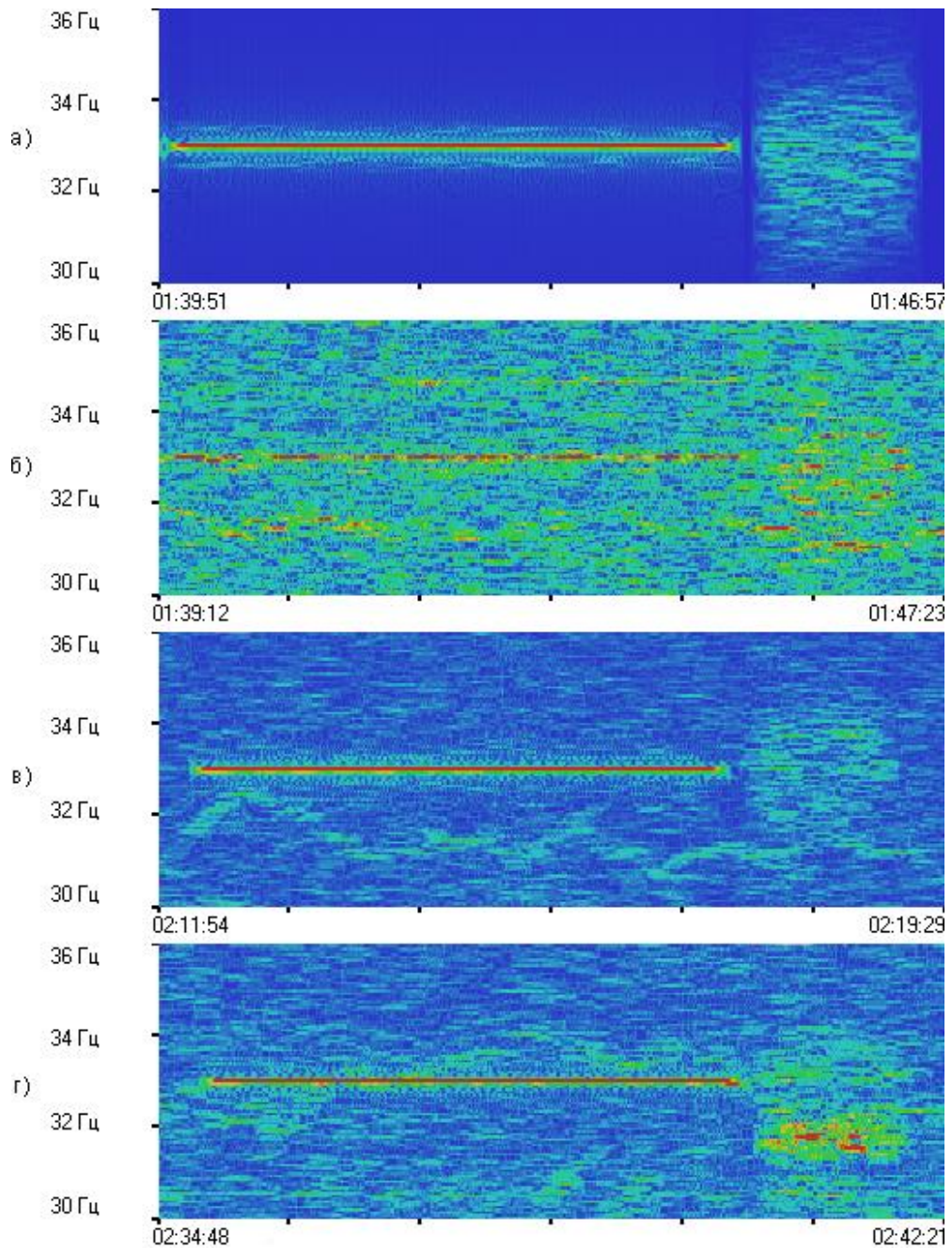


Рисунок 2.17 – Динамические спектрограммы при работе гидроакустического излучателя: а) – контрольный гидрофон, б) – лазерный деформограф при удалении от источника 6 км, в) – лазерный деформограф при удалении от источника 4 км, г) – лазерный деформограф при удалении от источника 2 км.

10 июня 2013 г.

На рисунках 2.18 а) и 2.18 б) приведены графики распределения температуры на трассе излучения в октябре 2012 г. и в июне 2013 г. соответственно, полученные с помощью профилометра Valeport miniSVP.

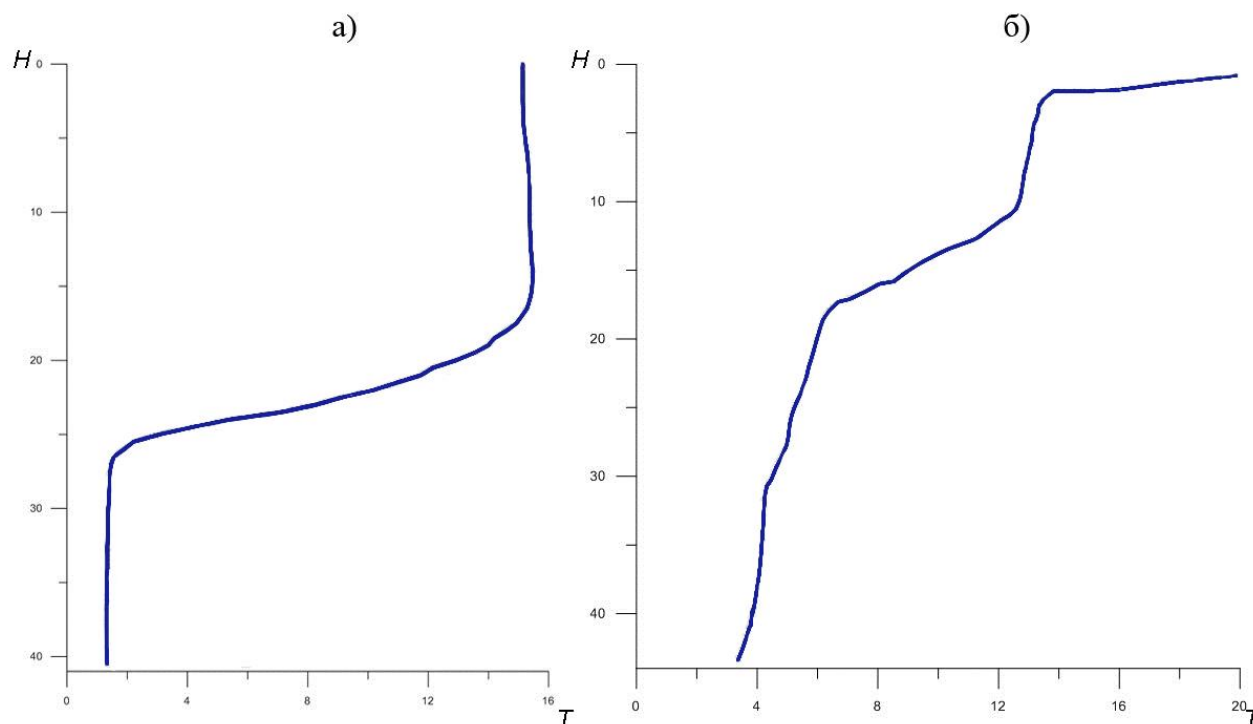


Рисунок 2.18 – Распределение температуры на трассе распространения гидроакустического сигнала в заливе Посьета Японского моря в 21 октября 2012 г. (а) и 10 июня 2013 г. (б)

2.2.2 АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для процесса распространения звука при условии, что глубина моря меньше или соизмерна с длиной волны, характерны сложность теоретического анализа и трудности математического описания акустических свойств, как границ, так и среды, заключенной между ними, так как процесс сопровождается отражениями звука от поверхности моря и дна. В акустике широко используется метод мнимых источников, используемый при расчете звукового поля, образованного действительным источником и бесконечным рядом зеркальных источников. Но применение данного метода приводит к значительному усложнению анализа. Флуктуации параметров среды и излучателя позволяют перейти к усредненным

законам спадаения интенсивности и давления, имеющих большое практическое значение. Учитывая сложность оценки поля в указанных условиях, используется один из эмпирических усредненных законов спадаения энергии, полученные Маршем и Шулькиным [45]: $p^2(r) = \frac{p_0^2 r_0^2}{r^2} 10^{-0,1\beta r} A_L$, где A_L – фактор аномалии в ближнем поле, $A_L = 10 \lg \frac{P}{P_{\text{безгр}}}$, Дб; r – расстояние до точки измерения, м; β – коэффициент затухания акустической энергии, 1/км. Расстояние r , входящее в множители затухания определяется в километрах. Параметры фактора аномалии в ближнем поле и коэффициента затухания в “промежуточном” море определяются в зависимости от частоты излучения по данным таблицы значения фактора аномалии и коэффициента затухания в мелком море [46]. Значение акустической мощности на расстоянии 1 м от геометрического центра излучателя, при использовании выражения усредненного закона спадаения акустической энергии принимает следующий вид: $P_a = (4\pi P_0^2 / \rho c) \times 10^{-10^{-4}} \times 10^{0,1A_L}$.

При анализе записей лазерного деформографа на частоте излучения исследовалась величина амплитуды тонального сигнала в течение одинаковых интервалов времени в ходе работы гидроакустического излучателя на одинаковых станциях в разные сезоны года.

На рисунке. 2.19 приведены графики вариаций амплитуд, зарегистрированных лазерным деформографом сейсмоакустических сигналов на частоте излучения 33 Гц, полученных в результате трансформации гидроакустических сигналов на границе «вода–дно», при работе гидроакустического излучателя на станции №3 21 октября 2012 г., 09 июня 2013 г., 10 июня 2013 г. соответственно, в непрерывном режиме. Можно утверждать, что 21 октября 2012 г. максимальная величина принятого сигнала равна 2,3 нм с усреднённым значением около 0,9 нм. 09 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 0,9 нм с усреднённым значением около 0,4 нм. 10 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 1,0 нм с усреднённым значением около 0,3 нм.

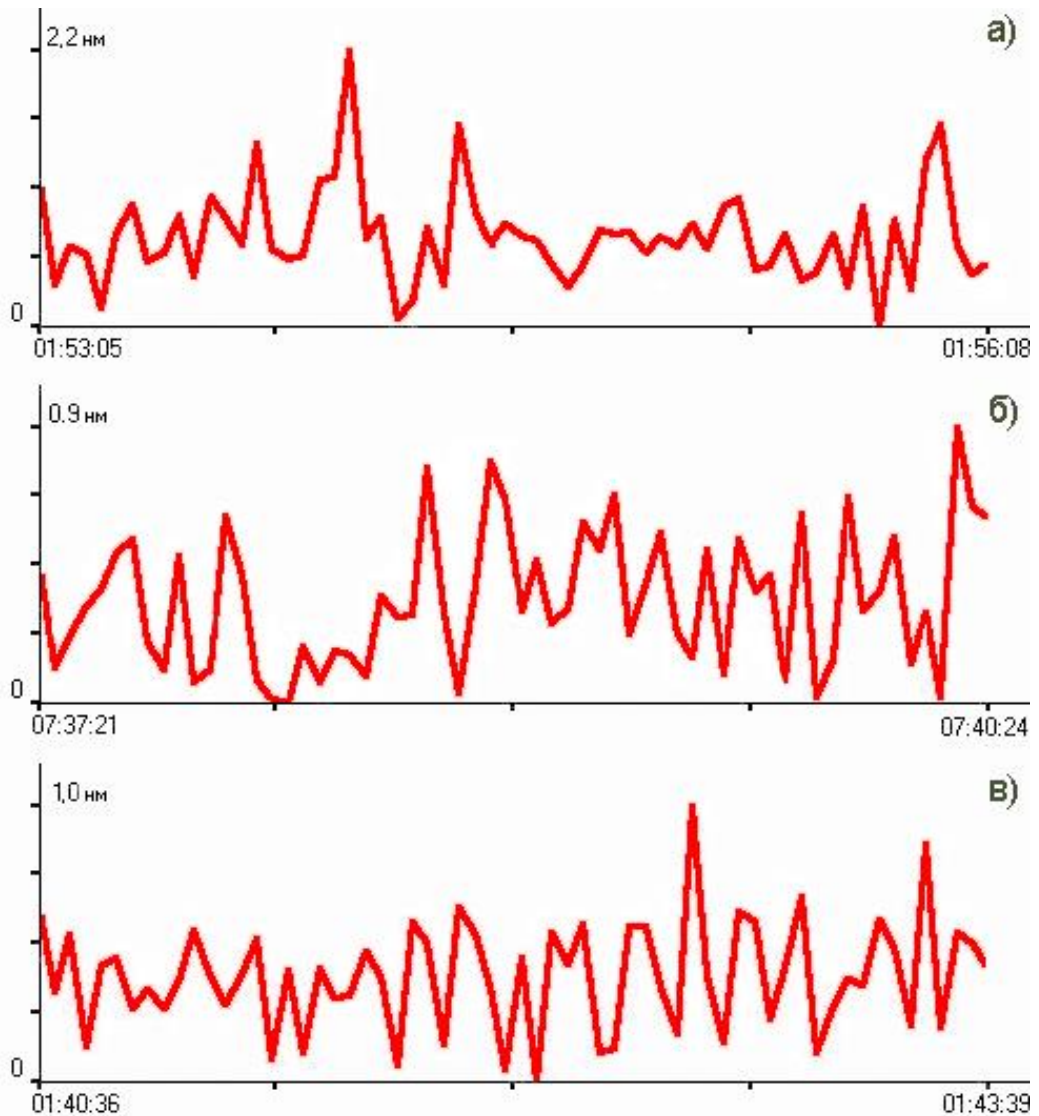


Рисунок 2.19 – Вариации амплитуды сигнала, принятого лазерным деформографом при работе гидроакустического излучателя на станции № 3: а – 21 октября 2012 г., б – 09 июня 2013 г., в – 10 июня 2013 г.

На рисунке 2.20 приведены графики вариаций амплитуд, зарегистрированных лазерным деформографом сейсмоакустических сигналов на частоте излучения 33 Гц, полученных в результате трансформации гидроакустических сигналов на границе «вода–дно», при работе гидроакустического излучателя на станции №4 21 октября 2012 г., 09 июня 2013 г., 10 июня 2013 г. соответственно, в непрерывном режиме. Можно утверждать, что 21 октября 2012 г. максимальная величина принятого сигнала равна 2,7 нм с

усреднённым значением около 1,4 нм. 09 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 0,8 нм с усреднённым значением около 0,3 нм. 10 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 1,2 нм с усреднённым значением около 0,4 нм.

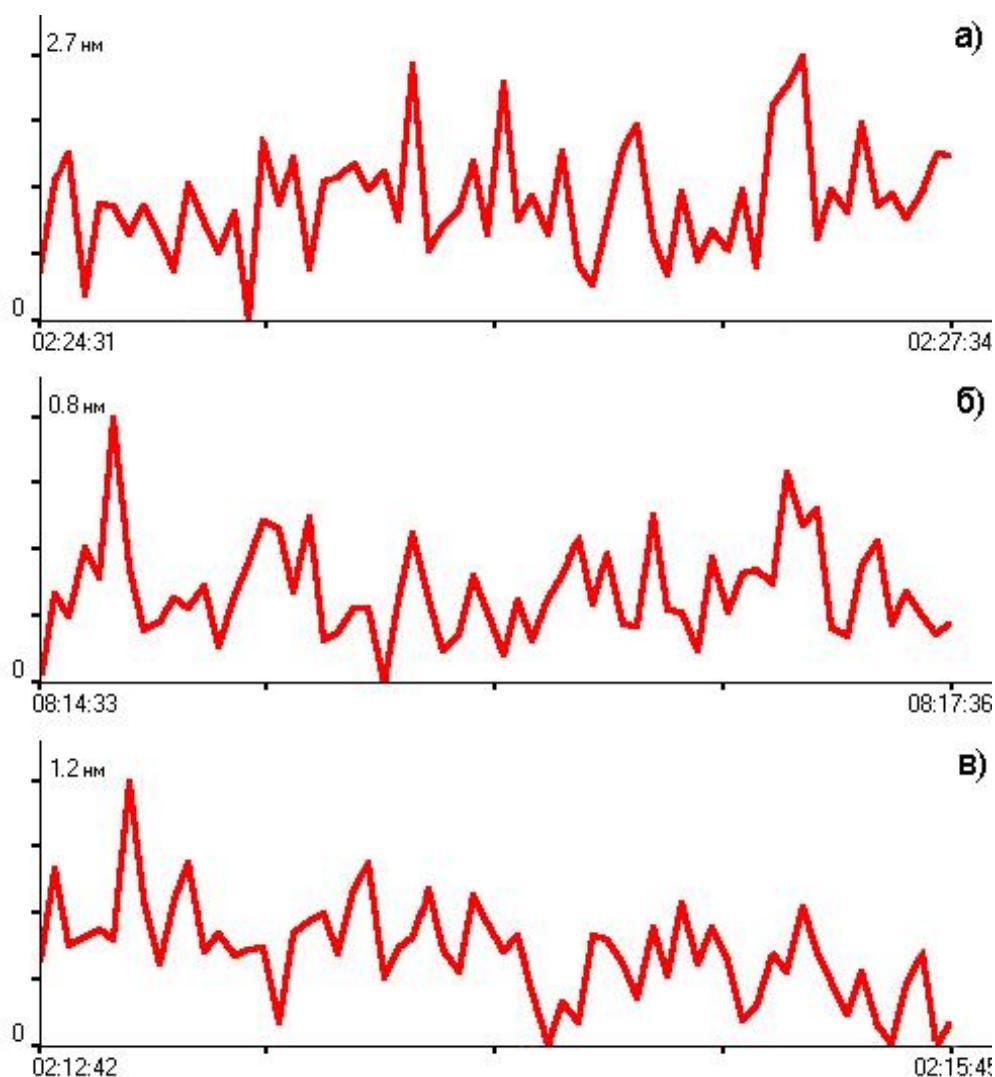


Рисунок 2.20 – Вариации амплитуды сигнала, принятого лазерным деформографом при работе излучателя на станции № 4: а – 21 октября 2012 г., б – 09 июня 2013 г., в – 10 июня 2013 г.

На рисунке 2.21 приведены графики вариаций амплитуд, зарегистрированных лазерным деформографом сейсмоакустических сигналов на частоте излучения 33 Гц, полученных в результате трансформации гидроакустических сигналов на границе «вода–дно», при работе гидроакустического излучателя на станции №5 21 октября 2012 г., 09 июня 2013 г.,

10 июня 2013 г. соответственно, в непрерывном режиме. Можно утверждать, что 21 октября 2012 г. максимальная величина принятого сигнала равна 1,9 нм с усреднённым значением около 0,9 нм. 09 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 0,9 нм с усреднённым значением около 0,4 нм. 10 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 1,0 нм с усреднённым значением около 0,5 нм.

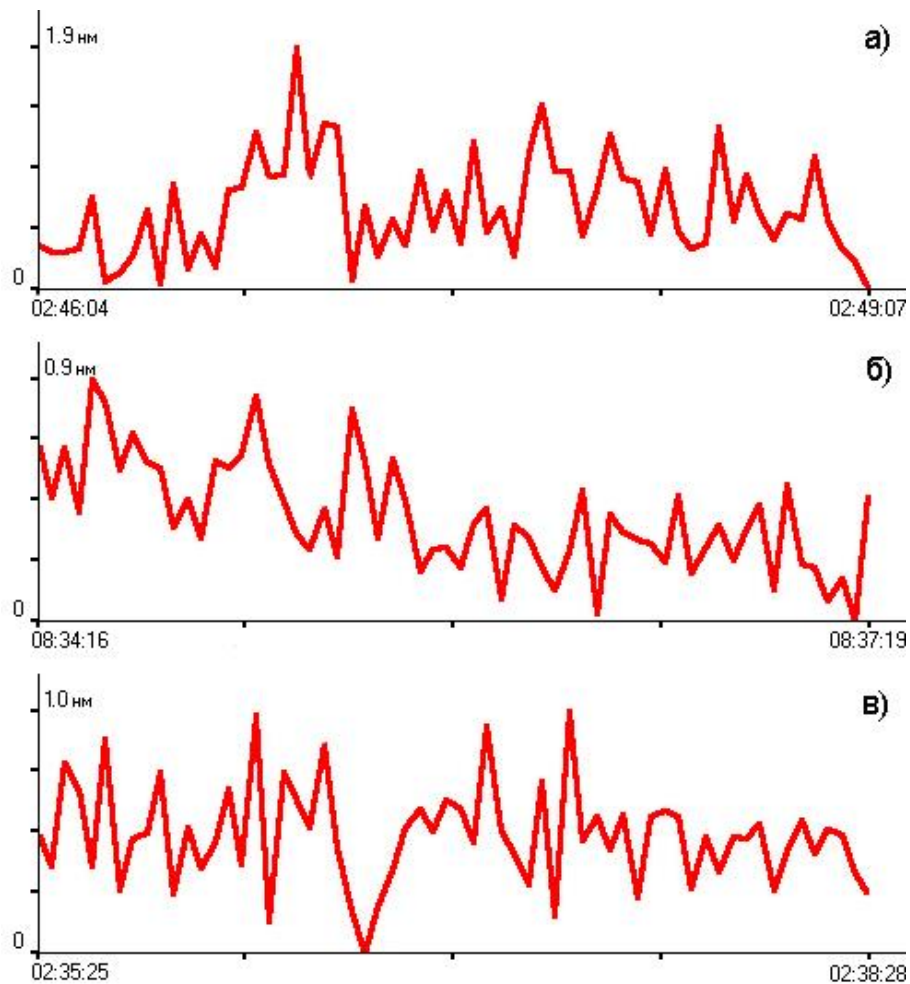


Рисунок 2.21 – Вариации амплитуды сигнала, принятого лазерным деформографом при работе излучателя на станции №5: а – 21 октября 2012 г., б – 09 июня 2013 г., в – 10 июня 2013 г.

Далее проанализируем изменение коэффициента трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую энергию, который мы определили выше как отношение («сейсмоакустическая энергия», W_C)/ («гидроакустическая энергия», W_T), т.е.:

$$k = W_c / W_\Gamma . \quad (3.1)$$

Для летнего периода наблюдения данное отношение выразим так:

$$k_1 = W_{c1} / W_\Gamma . \quad (3.2)$$

Для осеннего периода наблюдения данное отношение выразим так:

$$k_2 = W_{c2} / W_\Gamma \quad (3.3).$$

В результате нас интересовало только отношение k_2/k_1 . Учитывая то, что излучаемая гидроакустическая энергия была во всех экспериментах одинаковой, а упругие свойства пород дна практически не менялись, можно написать, что:

$$k_2 / k_1 = (W_{c2} / W_{c1}) \cong (A_{c2} / A_{c1})^2, \quad (3.4)$$

где A_{c2} – амплитуда сейсмоакустической волны в осенний период, A_{c1} – амплитуда сейсмоакустической волны в летний период.

Таким образом, данное отношение с учётом усреднений будет равно:

$$k_2 / k_1 \cong 6.$$

2.3 ВЫВОДЫ

Распространяющаяся в воде по шельфу гидроакустическая волна и распространяющаяся по границам раздела сред затухающая волна рэлеевского типа имеют цилиндрическую расходимость. Поэтому с учетом расстояния от источника (гидроакустического излучателя) можно оценить величину плотности энергии гидроакустического излучателя, которая преобразовывается в плотность энергии гидроакустических волн с частотой 33 Гц, которая, в свою очередь, трансформируется в плотность энергии зарегистрированных лазерным деформографом затухающих волн рэлеевского типа.

По результатам проведенных расчетов сделаны выводы, что в акватории б. Витязь на клиновидном шельфе существуют следующие зависимости при распространении и трансформации гидроакустического сигнала:

1. При глубинах $h \geq \lambda/2$, где $\lambda = \frac{1500 \text{ м/с}}{33} \approx 45$ м, в среднем около 22% энергии гидроакустического излучателя трансформируется в энергию гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу.

2. 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».

3. Около 72% энергии гидроакустических волн трансформируется в энергию затухающих волн рэлеевского типа.

4. Около 78% излученной гидроакустическим излучателем энергии трансформируется в энергию объемных волн. Данные волны уходят в земную кору и не регистрируются лазерным деформографом.

В результате проведенных экспериментальных работ на основании обработки данных лазерного деформографа, полученных при работе низкочастотного гидроакустического излучателя с центральной частотой излучения 33 Гц в разные времена года была установлена сезонная изменчивость коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе «вода–дно». [47]

ГЛАВА 3. РЕГИСТРАЦИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, СОЗДАВАЕМЫХ МОРСКИМИ ОБЪЕКТАМИ, ДВУХКООРДИНАТНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДЕФОРМОГРАФОМ

Исследования распространения акустических сигналов, издаваемых различными объектами в прибрежных водах, такими как корабли или морские животные, является распространенной задачей исследований. Регистрация распространяющихся сигналов производится в водной среде различными гидроакустическими средствами. Например, могут использоваться глайдеры, оснащенные акустическим векторным датчиком [48]. Еще не так давно популярным методом регистрации сигналов оставались гидроакустические антенные решетки [49] или сеть распределенных гидрофонов [50], но в условиях мелкого моря распространение таких сигналов в воде может быть актуальным только для высокочастотных сигналов [51]. Для распространения низкочастотных сигналов подходит более подходящая методика исследования в соответствии с теорией распространения сейсмических волн рэлеевского типа на границе раздела между жидкостью и упругой твердой средой. Такие волны также называют волнами Шолте [52]. Эксперименты по идентификации и исследованию моделей распространения сигналов проводят как в лабораториях [53], так и в натуральных условиях, например распределенной сетью донных сейсмографов [54]. Исследуются возможности увеличения качества выделения подобных волн в системе сигнал/шум [55, 56].

В ходе ранних многочисленных исследований лазерными деформографами сейсмоакустических процессов в низкочастотном диапазоне (менее 50 Гц) было установлено, что в данном диапазоне присутствуют сейсмические шумы, вызываемые работой механизмов многочисленных морских объектов [57-62]. В проведенных экспериментальных исследованиях основное внимание было уделено изучению возможностей однокоординатных лазерных деформографов равноплечего и неравноплечего вариантов по регистрации сейсмоакустических сигналов, создаваемых на границе «вода-дно» в результате трансформации

гидроакустических сигналов указанных источников в сейсмоакустические сигналы. Были проведены предварительные расчёты по оценке доли гидроакустической энергии, излучаемой в водной среде низкочастотным гидроакустическим излучателем, работающим на частоте 33 Гц, трансформированной в сейсмоакустическую энергию на границе «вода-дно» [28]. В этих работах также было установлено, что гидроакустический сигнал от низкочастотного гидроакустического излучателя до лазерного деформографа в воде распространяется по приповерхностному звуковому каналу по закону цилиндрической расходимости, а затем по границе «вода-дно» с глубин порядка половины длины гидроакустической волны в основном в виде поверхностных волн рэлеевского типа по границам раздела «вода-дно» и «земная кора – воздух».

Учитывая данный результат и поляризационные свойства волн рэлеевского типа, а также диаграмму направленности лазерных деформографов однокоординатного типа [61], можно ожидать, что использование лазерных деформографов с взаимно перпендикулярными плечами, установленными в одной месте, позволит определить направление на источники гидроакустических сигналов. При этом надо учитывать, что с возрастанием частоты излучения ошибка по пеленгу увеличивается из-за действия закона Снеллиуса, оказывающего существенное влияние на направление распространения сейсмоакустических сигналов в неоднородной среде. С учётом ранее полученных результатов были поставлены следующие задачи: 1) изучить возможности двухкоординатного лазерного деформографа по регистрации сигналов, создаваемых в воде различными гидроакустическими источниками; 2) экспериментально оценить частотную зависимость доли гидроакустической энергии, трансформированной в сейсмоакустическую энергию на границе «вода-дно». Для проведения данного цикла исследований также использовался комплекс береговых лазерных деформографов.

3.1 РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Морская акватория вблизи расположения береговых лазерных деформографов является районом достаточно интенсивного судоходства, как больших судов неограниченного района плавания, так и маломерных судов прибрежного плавания, что связано с наличием в районе нескольких крупных портов. Впервые о возможности регистрации лазерными деформографами сейсмоакустических волн, создаваемых судами, было указано в работе [63]. При исследовании экспериментальных данных обнаружено, что компоненты лазерного деформографа достаточно чувствительны при регистрации сигналов, создаваемых судами различного класса в воде. Результаты выполненных наблюдений были опубликованы в работах [64, 65]. Приведем различные примеры данных двухкоординатного лазерного деформографа, на которых присутствуют сигналы от судов, движущихся на прилегающей акватории. На рисунке 3.1 приведены динамические спектрограммы полуторачасового участка записи обоих плеч лазерного деформографа во время прохождения малого рыболовного сейнера 23 июня 2013 г.

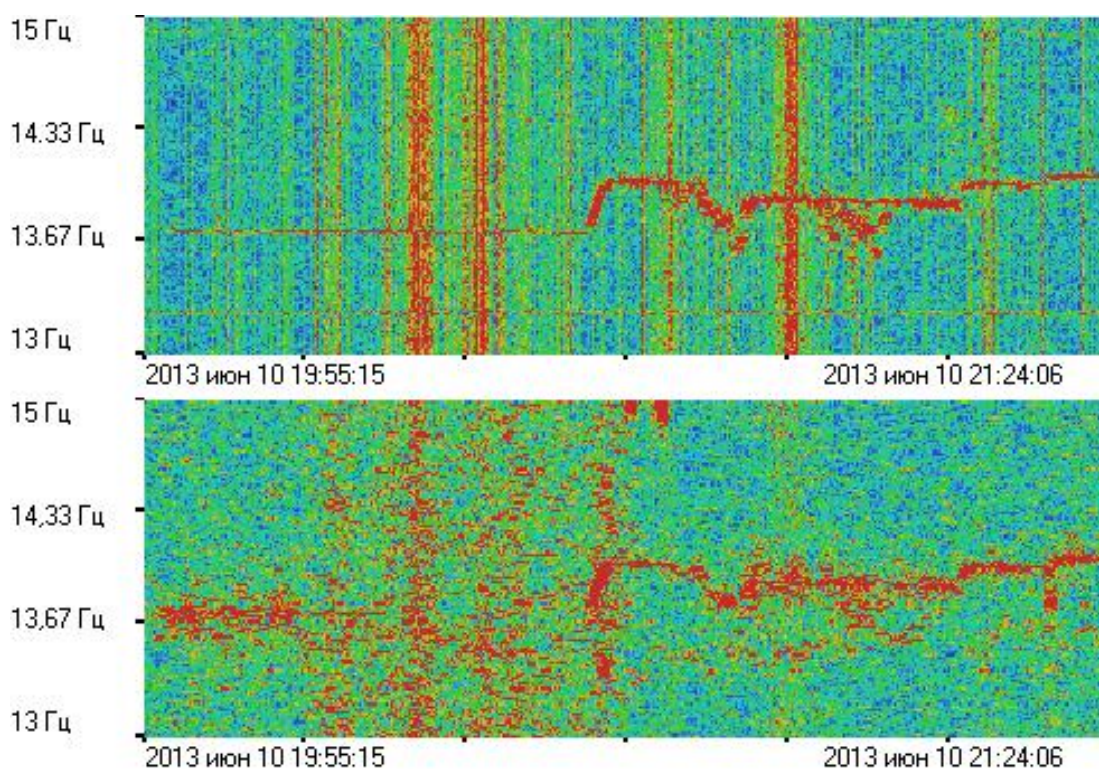


Рисунок 3.1 – Динамические спектрограммы участков записи шума малого рыболовного сейнера двухкоординатным лазерным деформографом ориентацией «север-юг» (вверху) и «запад-восток» (внизу).

В момент явного обнаружения сигнала, создаваемого судном, оно находилось от береговой системы в 5 милях. Сигнал регистрировался при проходе судна вдоль побережья берегового полигона вплоть до его входа в порт Зарубино, расположенного в бухте Троицы.

На рис. 3.2 приведена спектрограмма записи лазерного деформографа «север-юг» при прохождении 18 ноября 2014 г. гидрографического катера вокруг п-ова Шульца к причалу в бух. Витязь Японского моря. Радиус визуального наблюдения в это время не превышал одну милю, поскольку вся территория, где находится измерительный комплекс была покрыта густым туманом.

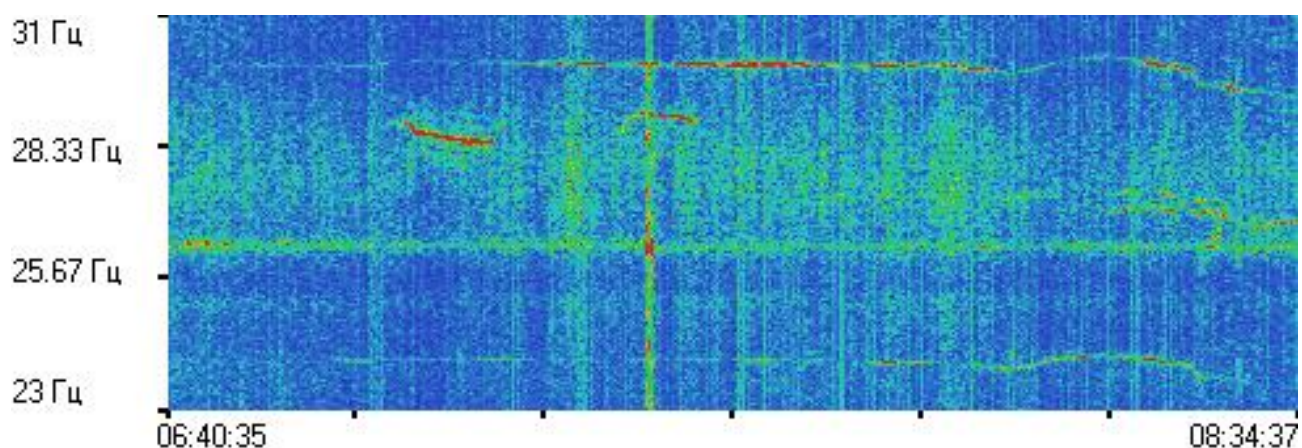


Рисунок 3.2 – Спектрограмма записи деформографа «север-юг» при прохождении гидрографического катера.

На рис. 3.3 приведены спектрограммы восьмидесятиминутной записи двухосевого деформографа при регистрации сейсмоакустических сигналов, создаваемых в дне Японского моря пассажирским паромом «New Blue Ocean» южнокорейской судоходной компании «Stena Daea Line», вышедшего 03 декабря 2013 г. из порта Зарубино в южнокорейский порт Сокчо. Общие характеристики парома следующие: длина 160 м, ширина 25 м, осадка 6.3 м, водоизмещение 16490 тонн, грузоподъемность 4429 тонн, год постройки – 1989 г. На рисунке отчетливо выделяются множество гармоник, которые вызваны работой двух 4-х тактных 8-цилиндровых дизельных двигательных установок парома, приводящих в движение два гребных винта. Эта картина является характерным идентификационным признаком данного судна. Радиус наблюдения составил около 15 миль.

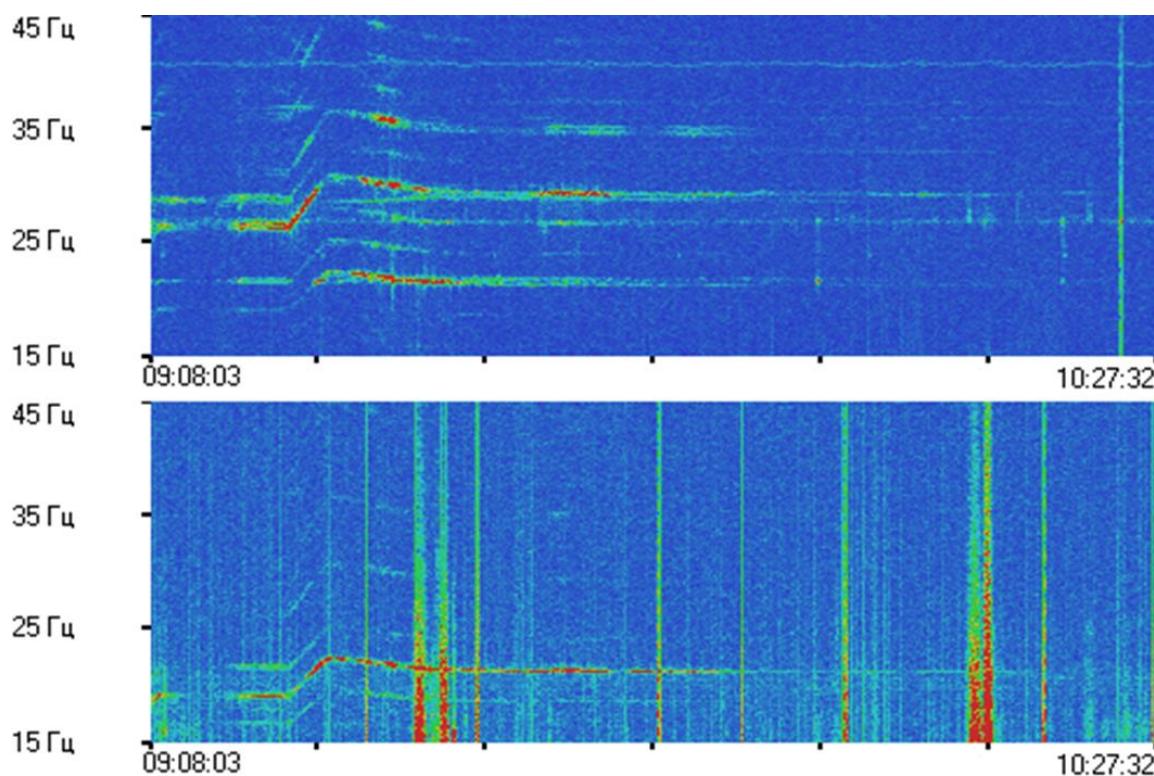


Рисунок 3.3 – Спектрограммы записи двухкоординатного лазерного деформографа при движении рейсового морского парома (вверху — «север-юг», внизу — «запад-восток»).

Исследование согласованных по времени данных с установленных на глубинах 12-20 м вблизи мыса гидроакустических измерительных средств – лазерных гидрофонов, входящих в измерительный комплекс МЭС «м. Шульца [64, 66], подтвердило отсутствие особенностей вблизи 20 Гц, т.е. на данных глубинах сигнал от парома в воде не распространяется. Факт того, что регистрируемый сигнал имеет пару близких частотных компонент, объясняется небольшими отличиями в работе двигателей или систем управления. Детальный анализ треков в сигналах деформографов показывает, что базовые частоты работы двигателей изменяются не монотонно, а с периодическими флуктуациями, составляющими 10-12 минут. У более низкочастотного трека флуктуации близки к гармоническому сигналу с размахом около 0,1 Гц. Высокочастотная компонента сигнала близка к пилообразному. При этом частота трека постепенно снижается, после чего возвращается к первоначальному положению. Размах этой части сигнала заметно

меньше и составляет около 0,05 Гц. Это подтверждается фактом, что в большинстве случаев в Фурье-спектрах сигналов деформографов ширина низкочастотной компоненты больше ширины высокочастотной компоненты.

Было зафиксировано несколько случаев аномального по длительности частотного следа, составляющих несколько часов, что позволило предположить, что такие приборы, как лазерный деформограф способны регистрировать сигналы судов, движущихся на значительных расстояниях от измерительной станции [66]. Регулярность маршрута паромов и указанные идентификационные признаки позволили по спектрограммам записи 03 июня 2014 г. (приведенным на рисунке 3.4) подтвердить данное предположение и осуществить длительное сопровождение паромов от момента начала его движения из порта Зарубино до максимально возможной дистанции наблюдения. Первичная информация о траектории движения паромов была взята с ресурса <http://marinetraffic.com>, предоставляющем некоторые данные о положении судов, зарегистрированных в Автоматической Идентификационной Системе (AIS), в открытом доступе.

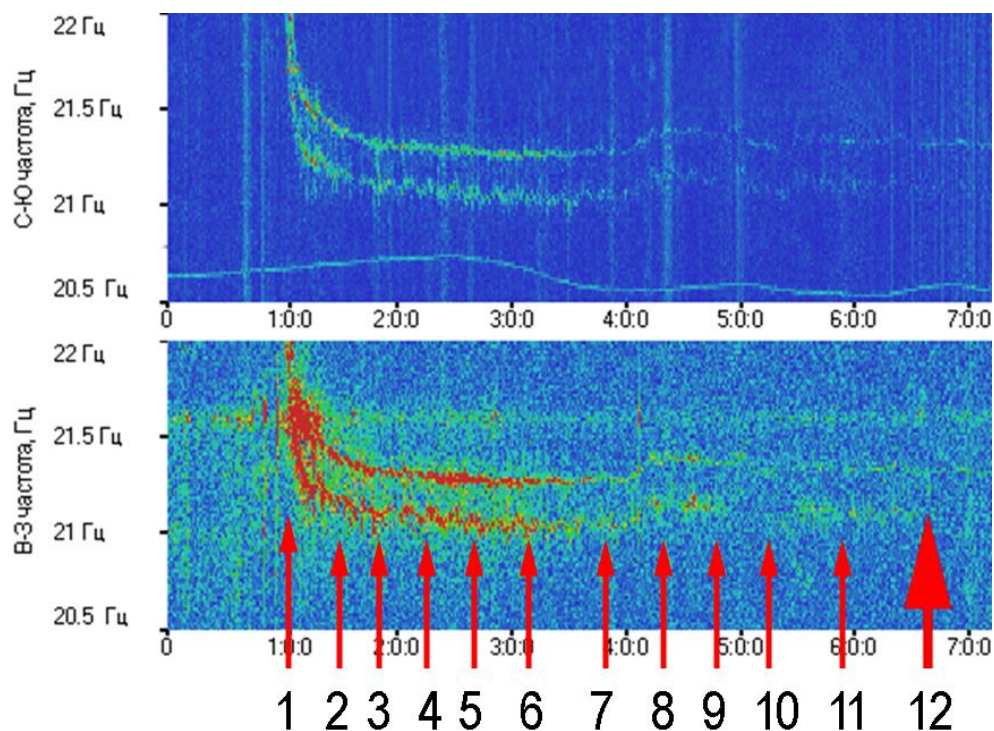


Рисунок 3.4 – Спектрограммы записи двухкоординатного лазерного деформографа 3 июня 2014 г. при движении рейсового морского паромов (вверху — «север-юг», внизу — «запад-восток»).

Данный случай рассматривался в поле решения двух задач. Это возможность определения направления на известные положения парома при его движении по трассе на основе анализа двух компонент двухосевого лазерного деформографа и оценка максимальной дальности, на которой в спектре записей деформографа заметен сдвоенный частотный трек.

Спектрограммы показанные на рис. 3.4 имеют длительность 7 ч с двух деформографов «север-юг» и «запад-восток» в диапазоне 20.5 - 22 Гц. Время на спектрограммах отсчитывается от начала записи - 8:00 UTC. Стрелками на спектрограммах указаны моменты времени, соответствующие положению судна в точках, помеченных на карте (рисунок 3.5) маркерами. Карта отображает траекторию и 12 маркеров AIS, показывающих местоположение судна в указанные рядом с номерами маркеров моменты времени.

Паром отошел от причальной стенки порта Зарубино в 08:20 UTC, в 08:50 при подходе к м. Шульца начал ускоряться, в 09:00 по данным видеонаблюдения проходил траверс м. Шульца. В этот момент в AIS было зафиксировано первое сообщение с парома, содержащее текущие время, координаты и скорость его движения. После этого в течение 5 ч с AIS были получены еще 11 сообщений о времени и координатах судна. Эта информации позволила весьма точно отследить траекторию парома на начальной стадии перехода в Сокчо.

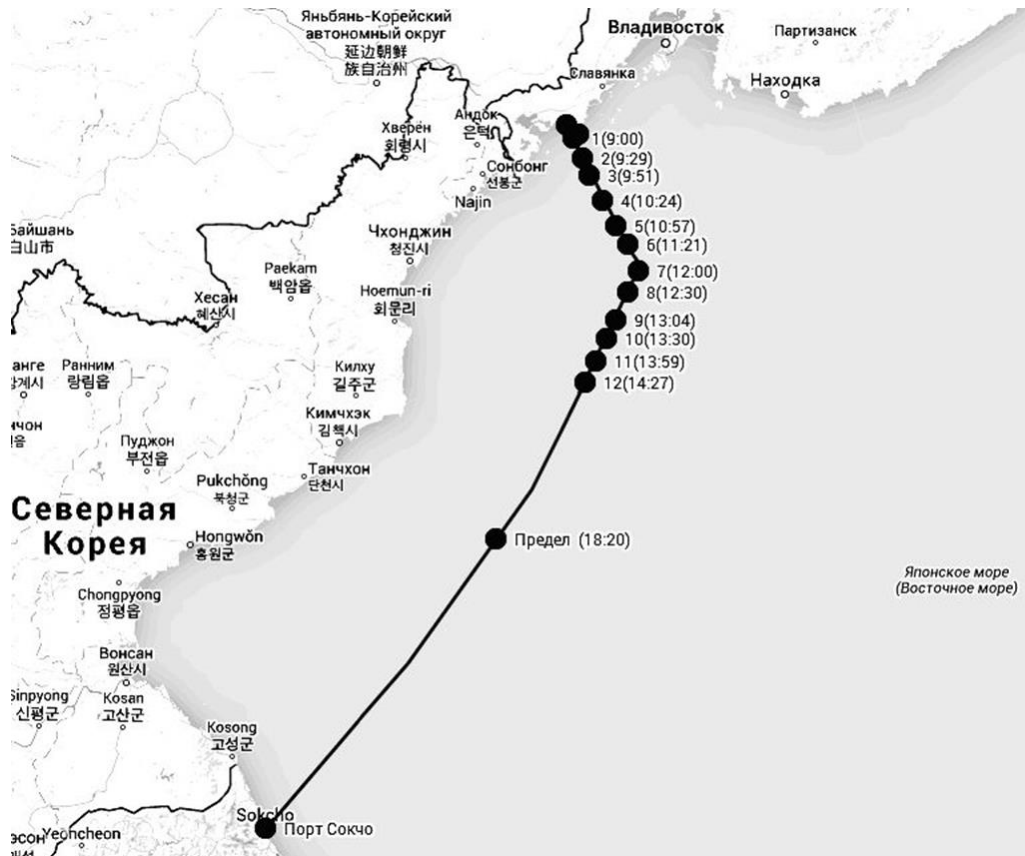


Рисунок 3.5 – Маршрут парома с маркерными точками, полученными из AIS

Номера маркеров на карте и временных реперов на спектрограммах согласованы. Как видно по карте, в течение трех часов вплоть до маркерной точки 7 паром двигался почти прямолинейно, удаляясь от м. Шульца в сторону открытой части Японского моря, после чего на удалении около 100 км достаточно резко повернул на $40-45^\circ$ и стал двигаться также прямолинейно вдоль берегов Северной Кореи, на удалении от них - 90-100 км. Частотные треки парома очень хорошо видны на спектрограммах обоих деформографов вплоть до точки поворота 7, после чего становятся менее контрастными, однако прослеживаются весьма уверенно вплоть до маркерной точки 9 - 12:00 UTC, соответствующей удалению судна от м. Шульца на 156 км.

С учетом диаграммы направленности лазерных деформографов [63, 67] была исследована возможность использования двухкоординатного лазерного деформографа для определения направления на движущееся судно. С этой целью были выполнены расчеты направления на паром для всех 12 маркерных точек,

которые затем сравнили с реальным направлением на источник, определённый по карте (рис. 3.5). При выполнении расчетов, в соответствии с [28, 32] считалось, что основные смещения устоев деформографов вызваны поверхностными волнами рэлеевского типа. Так как частицы в волне Рэлея движутся по эллипсам, большая полуось которых перпендикулярна границе, а малая параллельна направлению распространения волны, то по синхронным данным двух лазерных деформографов можно найти угол направления на источник. При расчёте будем учитывать только составляющую волны, ориентированную вдоль направления распространения волны. Сначала расчёты проведём при условии, что угол направления на источник находится между осями лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» (положение маркерной точки 1). Проекция составляющей, ориентированной по направлению распространения волны, на ось лазерного деформографа «север-юг» будет равна:

$$A(1,1) = A(1) \cos(\alpha_1 - \gamma_1), \quad (3.1)$$

где: γ_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 лазерного деформографа «север-юг» при нахождении паррома в точке 1, $A(1)$ – «истинная» амплитуда смещения частиц среды, приведённая к длине базы лазерного деформографа «север-юг» (52.5 м), при нахождении паррома в точке 1, α_1 - угол между осью лазерного деформографа «север-юг» и направлением на север (198°).

Проекция той же составляющей на ось лазерного деформографа «запад-восток» будет равна:

$$A(2,1) = A(2) \cos(\alpha_2 - \gamma_1), \quad (3.2)$$

где: γ_1 - угол направления на источник, отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке, $A(2,1)$ – амплитуда на частоте анализируемого сигнала, полученная при спектральной обработке записи лазерного деформографа «север-юг» при нахождении паррома в точке 1, $A(2)$ – «истинная» амплитуда смещения частиц среды, приведённая к длине базы лазерного деформографа «север-юг» (52.5

м), при нахождении парома в точке 1, α_2 - угол между осью лазерного деформографа «север-юг» и направлением на север (290°).

Учитывая то, что $A(1)/A(2) = 2.8$, и раскладывая косинусы в уравнениях (3.1) и (3.2), имеем:

$$\frac{A(1,1)}{2.8 \times A(2)} = \cos(\alpha_1) \cos(\gamma_1) + \sin(\alpha_1) \sin(\gamma_1), \quad (3.3)$$

где:

$$A(2) = \frac{A(2,1)}{\cos(\alpha_1) \cos(\gamma_1) + \sin(\alpha_1) \sin(\gamma_1)}, \quad (3.4)$$

При подстановке (3.4) в (3.3) после несложных преобразований, получаем:

$$\gamma_1 = \arctg \frac{\left\{ \frac{A(1,1) \cos(\alpha_2)}{2.8 \times A(2,1)} - \cos(\alpha_1) \right\}}{\left\{ \sin(\alpha_1) - \frac{A(1,1) \sin(\alpha_2)}{2.8 \times A(2,1)} \right\}}. \quad (3.5)$$

Далее расчёты проводятся при условии, что угол направления на источник находится восточнее оси лазерного деформографа «север-юг» (положение маркерных точек 2-11). В этом случае проекция составляющей, ориентированной по направлению распространения волны, на ось лазерного деформографа «север-юг» будет равна:

$$A(1, i + 1) = A(1) \cos(\alpha_1 - \gamma_{i+1}), \quad (3.6)$$

где: γ_1 – угол направления на источник, отсчитываемый от направления на север для $i+1$ станции, $A(1, i+1)$ – амплитуда на частоте анализируемого сигнала, полученная при спектральной обработке записи лазерного деформографа «север-юг» при нахождении парома в маркерной точке ($i+1$), $A(1)$ – «истинная» амплитуда смещения частиц среды, приведённая к длине базы лазерного деформографа «север-юг» (52.5 м), при нахождении парома в точке $i+1$.

Проекция той же составляющей на ось лазерного деформографа «запад-восток» будет равна:

$$A(2, i + 1) = A(2) \cos(180^\circ - (\alpha_2 - \gamma_{i+1})), \quad (3.7)$$

где: γ_{i+1} – угол направления на источник, отсчитываемый от направления на север для $i+1$ точки, $A(2, i+1)$ – амплитуда на частоте анализируемого сигнала, полученная при спектральной обработке записи лазерного деформографа «запад-восток» при нахождении парома в маркерной точке $i+1$, $A(2)$ – «истинная» амплитуда смещения частиц среды, приведённая к длине базы лазерного деформографа «запад-восток» (17.5 м), при нахождении парома в точке $i+1$. Решая систему уравнений (3.6) и (3.7) и с учётом того, что $A(1) / A(2) = 2.8$, получаем:

$$\gamma_{i+1} = \arctg \left[- \frac{\left\{ \frac{A(1, i+1) \cos(\alpha_2)}{2.8 \times A(2, i+1)} + \cos(\alpha_1) \right\}}{\left\{ \frac{A(1, i+1) \sin(\alpha_2)}{2.8 \times A(2, i+1)} + \sin(\alpha_1) \right\}} \right]. \quad (3.8)$$

В результате по формуле (3.5) проведены расчёты для первой маркерной точки, а по формуле (3.8) – для всех остальных маркерных точек.

Зная положение на оси времени по UTC каждой маркерной точки, мы выбирали из записей обоих лазерных деформографов синхронные участки небольшой длительности (5-10 мин) около этой точки и рассчитывали спектры Фурье на интервале частот 20.5 - 22 Гц. Как следовало ожидать, в спектрах синхронных участков лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» видны характерные максимумы на одних и тех же частотах, величины которых варьировались от одной маркерной точки к другой в пределах 21.00-21.22 и 21.25-21.49 Гц. При этом частотный интервал между этими пиками от одной маркерной точки к другой варьировался в небольших пределах. На рис. 3.6 приведён пример спектров участков записей лазерных деформографов при нахождении парома в маркерной точке 6.

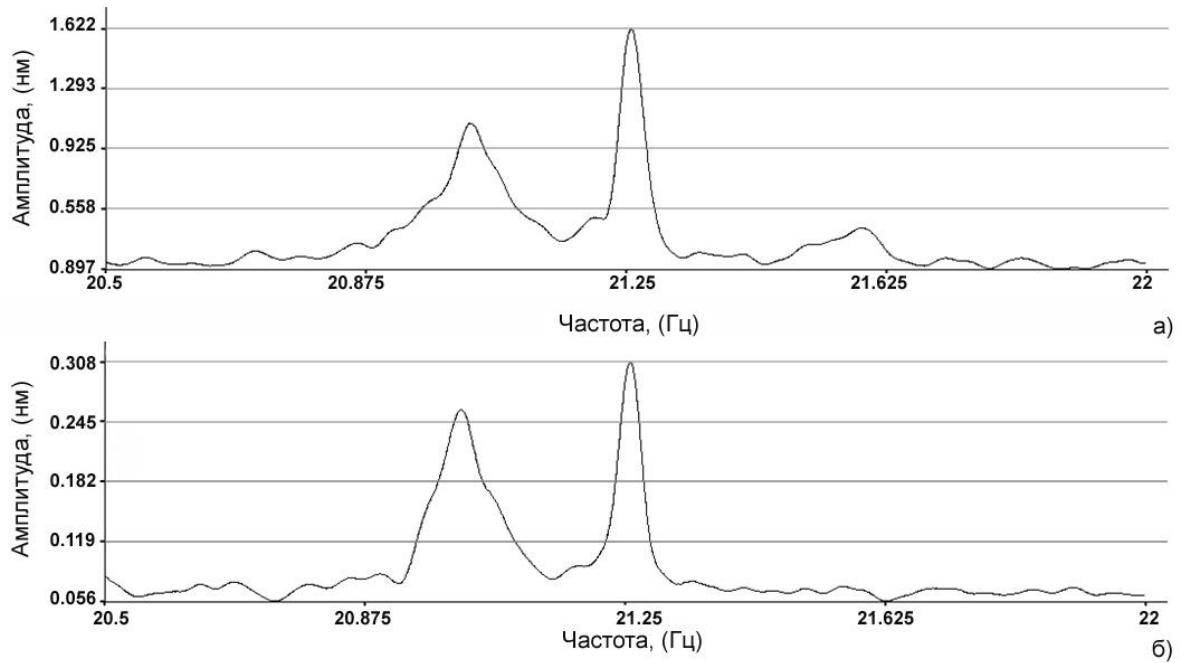


Рисунок 3.6 – Амплитудные Фурье спектры, рассчитанные по 5-минутным фрагментам сигналов деформографов: а) север-юг, б) запад-восток, взятым вблизи отметки 11 часов 15 минут

В результате проведенных вычислений составлена таблица 3.1, в которой приведены полученные результаты по всем маркерным точкам.

Таблица 3.1 – Экспериментальные данные регистрации судна береговым измерительным комплексом

№	Время, UTC	Путь, км	Глубина моря (м)	Расстояние от деформографов, км	Частота максиму-ма, Гц	Амплитуда де-формографа «се-вер-юг», нм	Амплитуда де-формографа «за-пад-восток», нм	Вычисленное направление на паром от севера,	Направление на паром от севера, градусы
1	9:00	0	16	2.72	21.49	16.20	0.81	207.9	249.14
					21.22	8.31	0.67	212.5	
2	9:29	16.18	80	16.26	21.35	11.40	0.79	189.0	165.87
					21.13	7.25	0.61	186.7	
3	9:51	28.73	358	28.51	21.31	6.21	1.21	170.9	161.74
					21.07	4.53	1.00	167.8	
4	10:24	48.41	2497	47.66	21.29	11.5	1.46	180.2	157.45
					21.09	7.03	1.69	165.4	
5	10:57	67.36	2901	65.77	21.28	5.15	1.27	164.7	155.81
					21.02	5.49	1.04	171.6	
6	11:21	82.59	3051	81.69	21.26	3.93	0.78	170.4	154.54
					21.01	2.37	0.72	158.7	
7	12:00:36		3309	101.20	21.39	2.19	0.26	181.3	155.46
					21.15	1.97	0.33	174.8	
8	12:30:06		3237	113.31	21.36	2.02	0.20	184.4	161.75
					21.12	3.13	0.37	181.5	
9	13:04:40		3282	129.41	21.30	1.17	0.30	164.0	168.07
					21.06	0.96	0.29	159.5	
10	13:30:13		3252	140.44	21.35	1.12	0.21	171.4	171.64
					21.13	1.76	0.25	178.2	
11	13:59:59		3339	155.72	21.33	1.39	0.22	175.4	175.38
					21.08	1.36	0.21	176.4	

Проанализируем результаты расчетов, приведённые в таблице 3.2. При этом рассмотрим два возможных случая распространения сигналов от паромов до лазерного деформографа: 1) Излучённый паромом 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. Конечно, излучённый паромом сигнал на шельфе начинает взаимодействовать с дном раньше, но мы не знаем глубины расположения оси звукового канала, поэтому будем считать, что излучённый паромом сигнал распространяется по границе «вода-дно» до лазерного деформографа начиная с глубин 35 м, а по воде не распространяется. 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.

Далее в соответствии с работой [68], проведём анализ полученных результатов. От точки №2 до конечной точки №11 изменение уровня сигнала для лазерного деформографа «север-юг» с учётом направления на источник составило величину, примерно равную:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{11.4 / \cos 32^\circ}{1.39 / \cos 22^\circ} = 9.5 \text{ дБ}$$

Если считать, что от точки № 11 до лазерного деформографа сигнал распространяется по закону цилиндрической расходимости, то составляющая, описывающая фактор геометрической (цилиндрической) расходимости, составит величину:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{\sqrt{155.72}}{\sqrt{16.26}} = 4.9 \text{ дБ}$$

Разница в 4.6 дБ может быть отнесена к средним диссипативным потерям в канале, сначала в водной среде, а затем на границе «вода-дно». Будем считать, что

от точки №11 до глубин 35 м сигнал проходит путь длиной около 151 км в воде по звуковому каналу, а от глубин 35 м до лазерного деформографа сигнал проходит путь длиной около 5 км по границе «вода-дно», и немного по границе «земля-воздух». В соответствии с [69] будем считать, что для данного сигнала потери на распространение в морской среде будут иметь величину 0.0002 дБ/ км. Поэтому на дистанции 151 км диссипативные потери составят ничтожно малую величину - 0.03 дБ. Остальные потери около 4.57 дБ составляют разницу потерь при распространении сигнала от точек №2 и №11 по границе «вода-дно», так как от данных точек до деформографов по шельфу сигнал движется разными путями. Разница может быть связана с тем, что осадки на данных участках имеют различные характеристики. Для построения адекватной модели необходимо изучить свойства осадков на всём шельфе при проведении дополнительных широкомасштабных экспериментальных исследований, что в настоящее время сделать невозможно.

Рассмотрим случай 2. Считаем, что от точки №2 сигнал до лазерного деформографа проходит по закону цилиндрической расходимости. От точки №11 сигнал проходит до дна по закону сферической расходимости, а далее по границе «вода-дно» – по закону цилиндрической расходимости. В этом случае можно записать разницу потерь на геометрическую расходимость в таком виде:

$$\Delta L_1 = 10 \lg \frac{3.3 + \sqrt{155.72}}{\sqrt{16.26}} = 5.9 \text{ дБ}$$

Разница в 3.6 дБ может быть отнесена к средним диссипативным потерям при распространении сигнала по границе «вода-дно» на дистанции 139.46 км (155.72 км - 16.26 км). На этой дистанции потери на распространение составят величину около 0.026 дБ/км. По аналогии с [68] оценим коэффициент поглощения на данной дистанции. Коэффициент поглощения найдём из выражения

$$20 \lg e^{-\alpha(r_2 - r_{11})} = 3.6 \text{ дБ}$$

где α - коэффициент поглощения, r_2 и r_{11} - расстояния от точек №2 и №11 до лазерного деформографа. Откуда следует, что $\alpha \approx 0.000003 \text{ м}^{-1}$.

Отметим, что, приняв за основу сферическую расходимость, мы получим $\Delta L_1 = 10 \lg(155.72/16.26) = 9.8$ дБ, что больше ΔL_1 , т.е. сигнал от точки № 11 до точки № 2 точно не распространяется только по сферическим законам.

Как видно из таблицы 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 парама на мелкой воде (длина гидроакустической волны на частоте 20 Гц равна около 75 м). Снизить погрешность может применение третьей оси - вертикальной. 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). Учёт всех особенностей возможен только при точном знании о структуре морского дна и характеристиках пород морского дна, угла наклона морского дна и т.п., большинства информации которой нет на момент проведения исследования. После проведения ряда экспериментальных работ по определению упругих параметров морского дна и построения его акустической модели можно более точно решить задачу по пеленгу надводного судна, аналогично модели, описанной в [70].

Тем не менее, мы можем утверждать, что: 1) сигнал, создаваемый в воде паромом, точно не распространяется до лазерного деформографа только по сферическим законам; 2) полученный очень малый коэффициент затухания ($\alpha=0.000003 \text{ м}^{-1}$) при распространении сигнала по границе «вода-дно» для случая, когда сигнал от парама распространяется до дна по сферическим законам, а затем по границе «вода-дно» по цилиндрическим законам, показывает, что: а) основная энергия по границе «вода-дно» переносится, в основном, незатухающими волнами рэлеевского типа, б) данная модель распространения сигнала от парама до лазерного деформографа не совсем верна; 3) наиболее подходящей моделью

распространения сигнала является модель №1 - распространение сигнала по звуковому каналу до шельфовой области моря, а затем по границе «вода-дно» в виде волны рэлеевского типа до лазерного деформографа.

Максимальные «дальности слышимости» паромы в каналах деформографов «север-юг» и «запад-восток» составляют 170 и 150 км. Наибольшую дальность обеспечивает ориентированный по направлению «север-юг» маятниковый деформограф - до 290 км.

Представленные результаты убедительно демонстрируют перспективность применения двухкоординатных береговых лазерных деформографов для определения направления на источники низкочастотных сейсмоакустических колебаний. Использование более двух пространственно-разнесённых приборов, объединённых в синхронную измерительную систему, позволит определять координаты источников и осуществлять их пространственную селекцию.

3.2 РЕГИСТРАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДЕФОРМОГРАФОВ

Как было показано, практическое решение задач обнаружения и мониторинга проявлений различных природных процессов и событий антропогенного фактора продолжительное время выполняется в ТОИ ДВО РАН с применением комплекса береговых измерительных систем, использующих лазерно-интерференционные методы. Присутствие сигнала от проходящих судов и других моторных средств, излучающих гидроакустические шумы в близлежащей акватории, стало обычным явлением. Одним из качественных дополнений исследования распространения колебательных процессов на границе геосфер стала работа по регистрации источников гидроакустического излучения системой пространственно-разнесённых береговых лазерных деформографов.

Для проведения экспериментальных исследований был задействован береговой двухкоординатный лазерный деформограф, расположенный на МЭС

«м. Шульца» [9] и мобильный лазерный деформограф [16]. Мобильный лазерный деформограф был установлен в прибрежной области на скальном основании в крайней точке мыса Гамова, имеющей координаты $42^{\circ}33'17''$ СШ и $131^{\circ}13'3''$ ВД. Ориентировка плеча мобильного деформографа составила 40° к линии меридиана. На рисунке 3.7 показан мобильный лазерный деформограф, установленный на территории маяка Гамов перед проведением эксперимента.



Рисунок 3.7 – Мобильный лазерный деформограф в рабочем режиме на м. Гамова

Мобильный лазерный деформограф построен по принципу неравноплечего интерферометра Майкельсона, как и стационарные деформографы, и в рамках данного эксперимента был собран с длиной измерительного плеча 6 метров. На вставке в левой части рисунка 3.7 показана оптическая часть деформографа. Скамья с оптической частью была жестко закреплена в скальной породе. Отражатель смонтирован на упругом основании. Световод между оптической скамьей и отражателем выполнен из полипропиленовых труб. Все элементы

системы изолированы специальными материалами для исключения мгновенного воздействия на показания прибора факторов окружающей среды. Расстояние между лазерными деформографами на м. Шульца и м. Гамова составило 5,74 км. Синхронизация измерительных систем выполнялась посредством подключения к обоим записывающим компьютерам внешних двухсистемных приемников GlobalSat GLONASS, синхронизирующих записывающую аппаратуру один раз в секунду.

Для генерации тональных и сложных гидроакустических сигналов применялись обе, имеющиеся на вооружении лаборатории Физики геосфер, низкочастотные излучающие системы ГИ-1 [21] и ГИ-2 [26].

При разработке плана экспериментальных работ было принято во внимание пространственное расположение береговых измерительных устройств. Так как основным измерительным устройством в эксперименте являлся двухкоординатный береговой лазерный деформограф расположенный на м. Шульца, то расположение станций гидроакустического излучения определялось относительно его местоположения. Были выбраны 4 станции излучения, находящиеся на расстоянии 10 км от деформографа в соответствии с диаграммой направленности его главной 52,5 метровой измерительной компоненты. Общая схема эксперимента приведена на рисунке 3.8. Метками ДЛД и МД обозначено местоположение двухкоординатного лазерного деформографа и мобильного деформографа, соответственно. Метками 1-4 обозначены станции излучения, в которых в течение нескольких дней проводилось излучение разными излучающими системами.

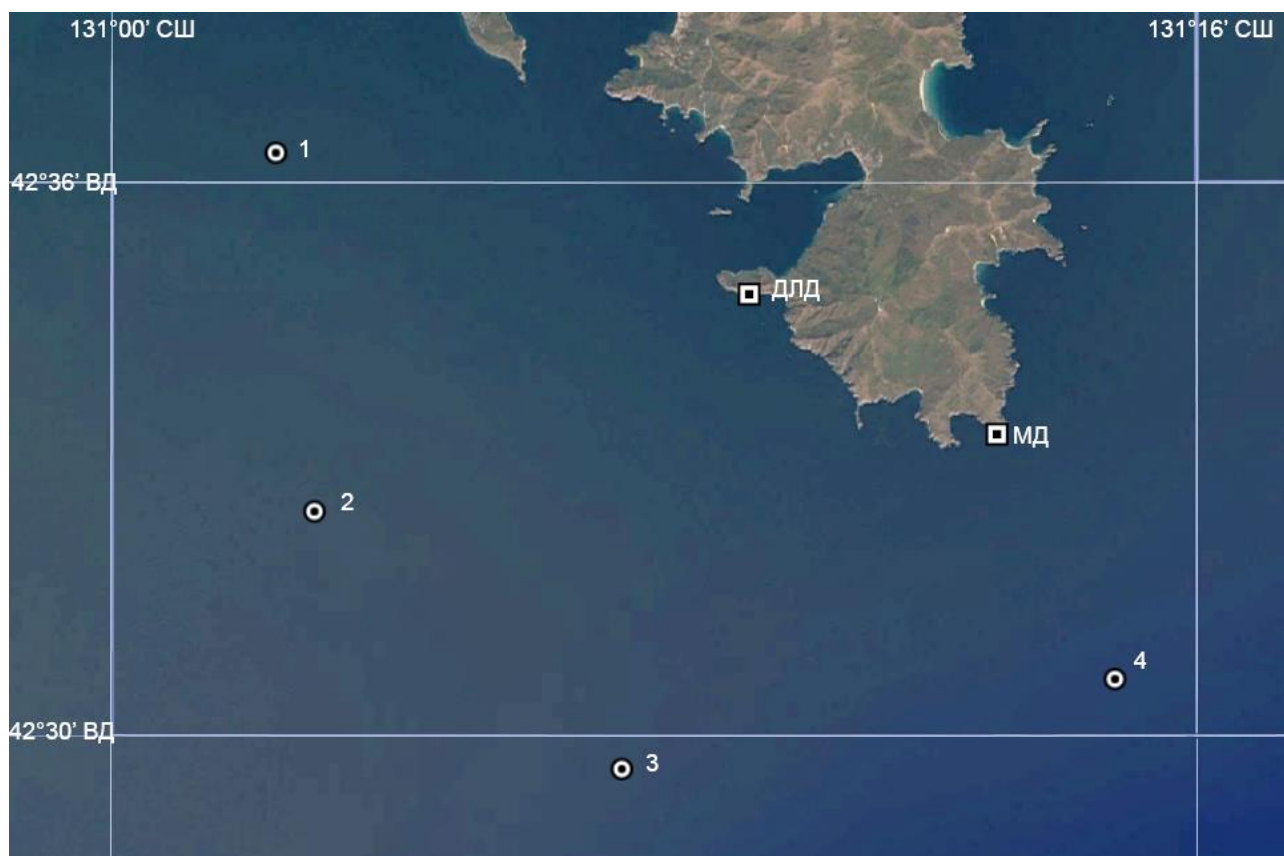


Рисунок 3.8 – Схема проведения эксперимента. 1-4 – Станции излучения. ДЛД – двухкоординатный лазерный деформограф. МД – мобильный деформограф.

В таблице 3.2 приведены координаты станций излучения и расстояние от них до измерительных систем.

Таблица 3.2. Координаты станций излучения и их удалённость от лазерных деформографов.

№ станции	Координаты станций излучения	Расстояние от ДЛД, км	Расстояние от МД, км
1	42° 36' 20,3" СШ; 131° 2' 25,3" ВД	10	16,5
2	42° 32' 26,9" СШ; 131° 2' 59,9" ВД	10	13,5
3	42° 29' 39,4" СШ; 131° 7' 31,7" ВД	10	10
4	42° 30' 37,9" СШ; 131° 14' 47,3" ВД	10	5,5

В дни проведения эксперимента лазерные деформографы работали в режиме непрерывного измерения. Судно приходило в точку измерения и ложилось в дрейф.

Работа с излучателями проводилась в соответствии с методикой, учитывающей теорию акустической мощности приповерхностного источника. Работа гидроакустического излучателя ГИ-2 производилась при глубине погружения 18 м, где его резонансная частота составляет 22 Гц. Максимальная излучающая мощность излучателя ГИ-1 на частоте 33 Гц соответствуют глубине погружения 15 м. В эксперименте были исследованы результаты работы излучателя при разных глубинах погружения, составивших 9, 12 и 15 м.

Экспериментальные работы были проведены в октябре 2015 г. При проведении работ на каждой из четырех станции применялась описанная методика излучения.

При работе на станции, излучатель ГИ-2 заглублялся на установленную глубину 18 м и производилось излучение гидроакустического сигнала, имеющего следующую форму: тональное излучение сигнала – 300 с, пауза 30 с, излучение М-последовательности 319 с. Общая продолжительность излучаемого сигнала составляла 649 с. Прием сигнала с каждой станции был уверенно выполнен всеми измерительными системами.

На рисунке 3.9 показаны динамические спектрограммы лазерных деформографов, расположенных на м. Шульца и мобильного деформографа, развернутого на м. Гамова при работе гидроакустического излучателя на станции 1. На спектрограммах всех деформографов присутствует приходящий сигнал, как тональный, так и фазоманипулированные с паузами между ними. При анализе сигнала с других станций излучения, на динамической спектрограмме мобильного лазерного деформографа принимаемый сигнал проявляется крайне слабо, в связи с высокой зашумленностью частотного диапазона, в котором работает гидроакустический излучатель. Тем не менее пики сигналов при спектральном анализе отдельных участков стабильно присутствуют в течение всего времени гидроакустического излучения.

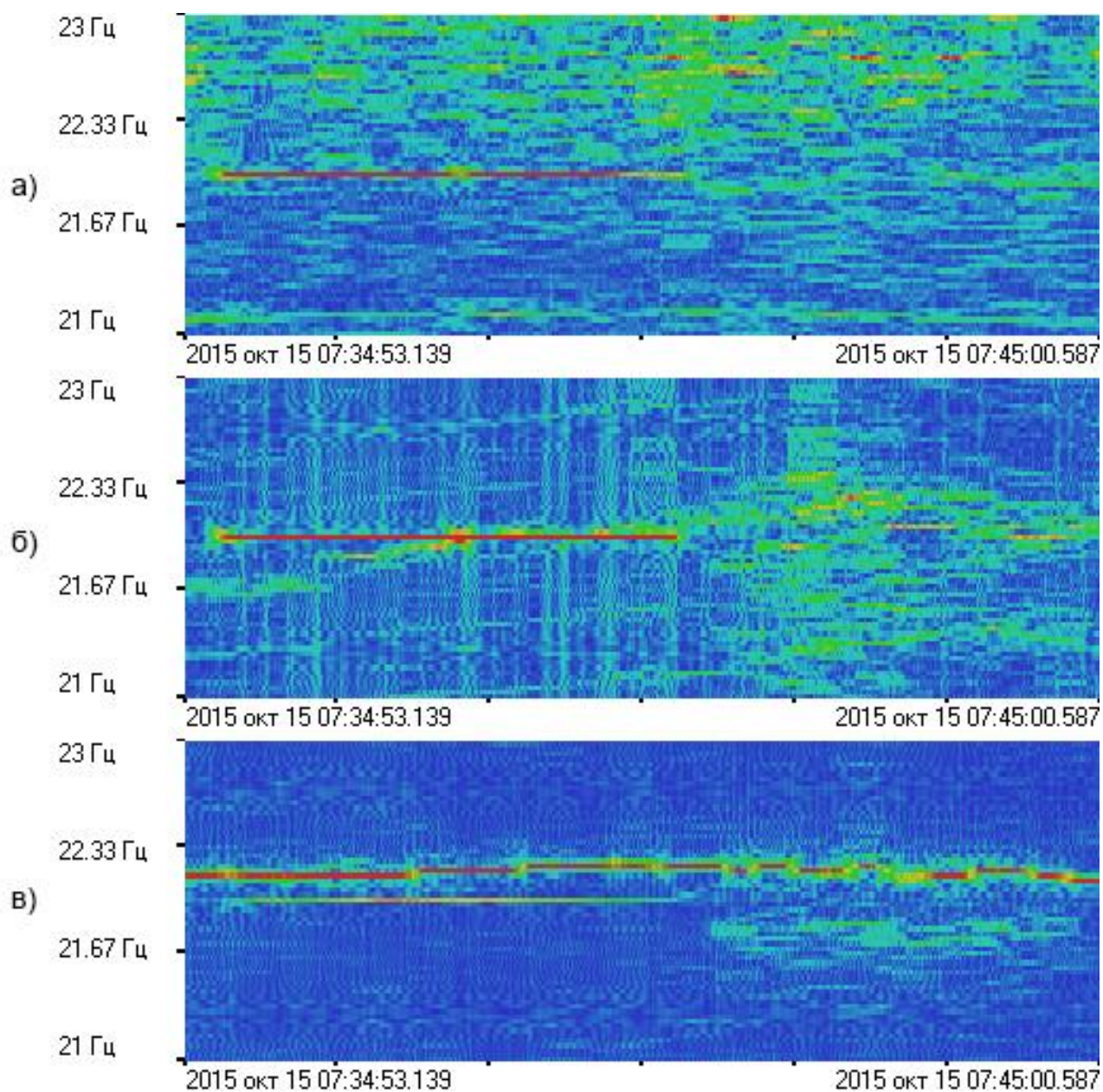


Рисунок 3.9 – Динамические спектрограммы лазерных деформографов при работе гидроакустического излучателя на ст. 1: а) лазерный деформограф 52,5 м. СЮ, б) лазерный деформограф 17,5 м ЗВ, в) мобильный лазерный деформограф.

Проведем анализ записей деформографов при работе излучателя на всех станциях излучения и представим сравнительную таблицу с величинами амплитуды сигнала, регистрируемого лазерными деформографами. С учетом того, что участок излучения тонального сигнала составляет 300 с, то для исследования возьмем одинаковые участки записи лазерных деформографов длиной 50000

отсчетов. При частоте дискретизации данных 1000 Гц, длительность такого участка записи равна 70 с.

На рис. 3.10 приведены спектры записи соответствующих участков лазерных деформографов, находящихся на м. Шульца и мобильного лазерного деформографа при работе гидроакустического излучателя ГИ-2 на станции 1.

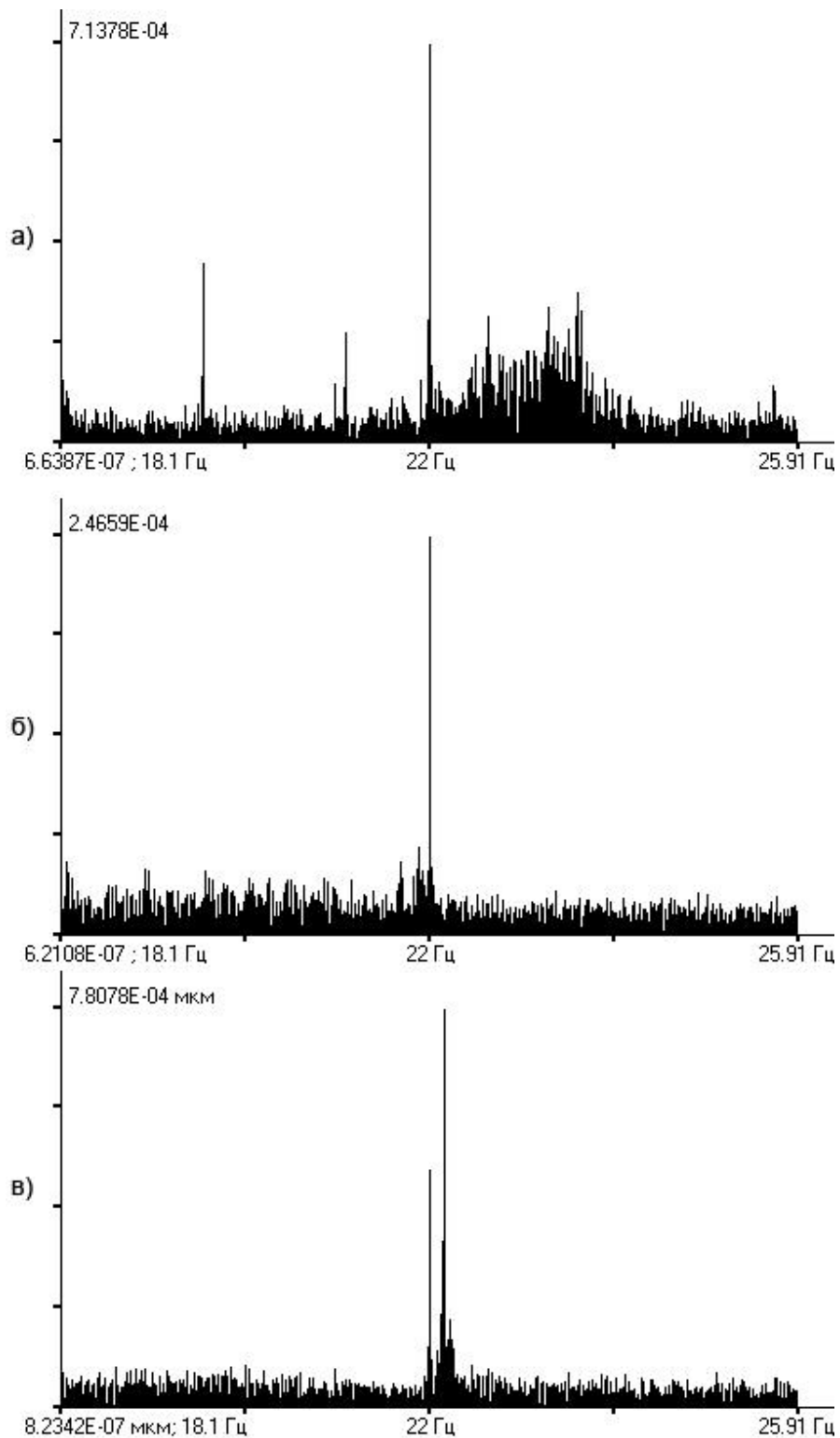


Рисунок 3.10 – Спектры, полученные при обработке синхронных участков записи лазерных деформографов при работе излучателя на станции 1 : а) лазерный деформограф 52,5 м. СЮ, б) лазерный деформограф 17,5 м ЗВ, в) мобильный лазерный деформограф.

В таблице 3.3 приведены сводные результаты измерения амплитуды сейсмоакустического сигнала, регистрируемого лазерными деформографами в результате работы на станциях источника низкочастотного гидроакустического излучения.

Таблица 3.3. Величины амплитуды принимаемого сигнала лазерными деформографами при работе излучателя ГИ-2 на станциях 1–4.

№ ст.	Амплитуда СЮ, нм	Амплитуда ЗВ, 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 результатам приема береговыми лазерными деформографами сигналов, генерируемых гидроакустическим излучателем ГИ-2, показано, что метод регистрации источника гидроакустического излучения системой пространственно-разнесенных береговых лазерных деформографов реализуем и при соответствующих доработках имеет значительные перспективы. Из результатов представленным в таблице 3.3 хорошо видно, что величина амплитуды сигнала, регистрируемая мобильным лазерным деформографом увеличивается, по мере приближения станций излучения к местоположению мобильного деформографа. В то же время станции излучения находились на одинаковом расстоянии от стационарного измерительного комплекса ДЛД. Вариации амплитуды принятого сигнала в данном случае зависят от пространственного положения измерительных осей лазерных деформографов, характеризующимися разными диаграммами направленности. Измерение разнонаправленными лазерными деформографами использует принцип поляризации сейсмоакустических сигналов, трансформирующихся из гидроакустических сигналов. Значения амплитуды принятого сигнала, указанного в таблице 3.3, также подтверждают изменение

местоположения источника гидроакустического сигнала в соответствии с данной теорией.

Работы с гидроакустическим излучателем ГИ-1 были проведены вторым этапом на станции излучения № 3. Излучение проводилось с погружением излучателя на глубину 9 м и 15 м для исследования излучаемой мощности. На рис. 3.11 приведены динамические спектрограммы лазерного 52,5-метрового деформографа СЮ и мобильного лазерного деформографа при работе ГИ-1 на станции 23, равноудаленной от обоих лазерных деформографов.

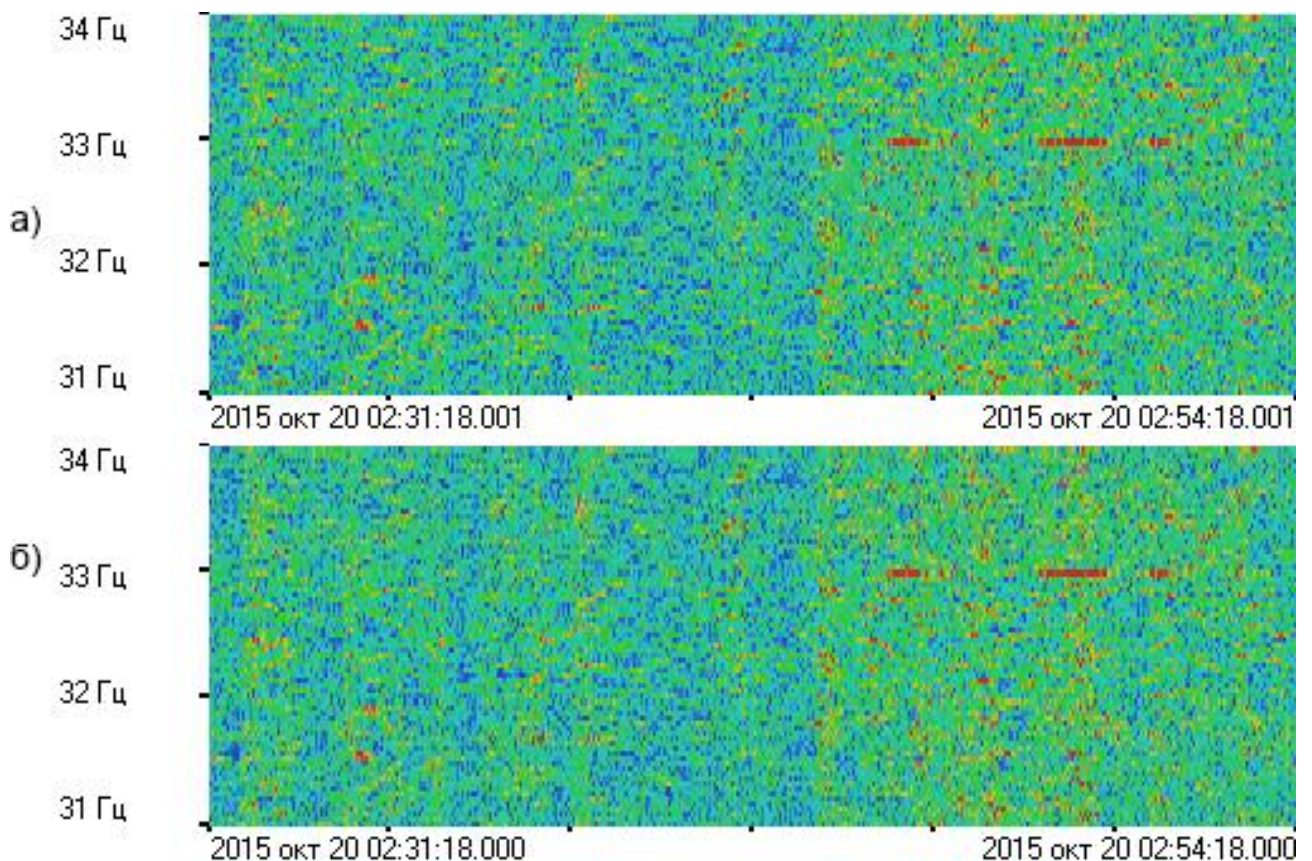


Рисунок 3.11. – Динамическая спектрограмма при работе излучателя ГИ-1 на ст. 3: а) лазерный деформограф 52,5 м. СЮ, б) мобильный лазерный деформограф

Излучение гидроакустического сигнала при глубине погружения излучателя 9 м проводилось в 02:31 UTC, излучение при глубине погружения 15 м было выполнено начиная с 02:47 UTC. В зависимости относительной излучаемой

мощности точечного источника с частотой излучения 33 Гц от его заглубления [22] мощность излучения на глубине 9 м почти в два раза ниже. В записях лазерных деформографов при этой глубине работы излучателя сигнал не регистрируется. При работе излучателя на глубине 15 м амплитуда сигнала, записанного мобильным деформографом, составила 0,236 нм, а деформографом СЮ 0,246 нм. Полученные результаты на порядок меньше, чем при работе системы ГИ-2, что также подтверждает различающуюся мощность излучающих систем. Результаты исследования были опубликованы в журнале «Подводные исследования и робототехника» [71].

3.3 ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХКООРДИНАТНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДЕФОРМОГРАФОМ

При наличии неопределенных данных визуального наблюдения позволяет определить наличие поверхностного источника гидроакустического излучения в акватории. Но нет точных данных о его местоположении и скорости. Был проведен эксперимент, позволяющий точно привязаться к источнику излучения. Регистрация сигнала проводилась береговым двухкоординатным лазерным деформографом, что с использованием регистрации вариации параметров модуляции амплитуды исследуемого сигнала на разнонаправленных компонентах лазерных деформографов, позволяет определить направление на источник или область генерации сигнала.

В акватории Залива Петра Великого был проведен эксперимент по исследованию вариаций амплитуды гидроакустического сигнала, зарегистрированного компонентами двухкоординатного лазерного деформографа, генерируемого перемещающимся с одинаковой скоростью по акватории гидроакустического излучателя. Покажем возможности двухкоординатного лазерного деформографа по регистрации такого сигнала и его пеленгации.

В качестве источника излучения использовался излучатель ГИ-1 с усилением корпуса и наличием в хвостовой части стабилизирующих поверхностей. Для уменьшения плавучести с целью уменьшения колебаний на волнении и течении использованы несколько металлических грузов, устанавливаемых в основании излучателя. В результате при буксировке гидроакустический излучатель стабилизируется в направлении движения судна, что позволило выполнять серии гидроакустических излучений при движении судна-носителя по траектории. Контроль амплитуды излучения выполнялся гидрофоном, расположенным на расстоянии 1 м от геометрического центра излучателя.

План экспериментальных исследований заключался в проведении непрерывной серии излучения гидроакустического сигнала при движении судна по круговой траектории относительно береговой приемной системы с одинаковым удалением от неё и регистрация сейсмоакустического сигнала лазерным деформографом. Эксперимент проводился 5 августа 2017 г. Предварительно была определена траектория движения судна, равноудаленная на всем своем протяжении от берегового комплекса на 3000 м. Судно останавливалось в районе начала траектории движения и командой обеспечения проводились подготовительные работы с погружением излучающей системы на соответствующую глубину. После этого судно начинало движение по заданной траектории с постоянной скоростью около 3 км/ч. Начальная точка излучения находилась со смещением на угол около 30 градусов относительно оси 52,5-метровой компоненты лазерного деформографа. Затем траектория движения излучателя пересекала ось данной компоненты и распространялась вплоть до пересечения оси компоненты 17,5-метровой компоненты лазерного деформографа. Синхронизация сигналов проводилась посредством оригинального программного обеспечения, использующего данные GPS/ГЛОНАСС-модулей на источнике излучения, при записи сигнала контрольного гидрофона, и на приемной станции. Сигнал излучения носил циклический характер. Первоначально проводилось тональное излучение в течение 300 с и после паузы 30 с излучалась М-последовательность, длительность. 155 с.

После паузы 30 с цикл излучения повторялся. Проведем анализ сигнала тонального излучения для определения возможности пеленга перемещающегося по акватории объекта.

В результате проведенных экспериментальных работ была получена непрерывная регистрация гидроакустического сигнала двухкоординатным береговым лазерным деформографом при перемещении излучателя по окружности с одинаковым удалением от излучающей системы. На рисунке 3.12 приведены динамические спектрограммы синхронных участков записи контрольного гидрофона и компонент двухкоординатного берегового лазерного деформографа. На спектрограмме записи контрольного гидрофона показаны цифровые отметки, обозначающие начала очередного пакета излучения. При оценке спектрограмм, можно сделать выводы об уменьшении уровня амплитуды принимаемого сигнала при прохождении источника излучения участка траектории, близкого к углу 45 градусов, по отношению к направлению осей лазерного деформографа, что связано с их диаграммой направленности.

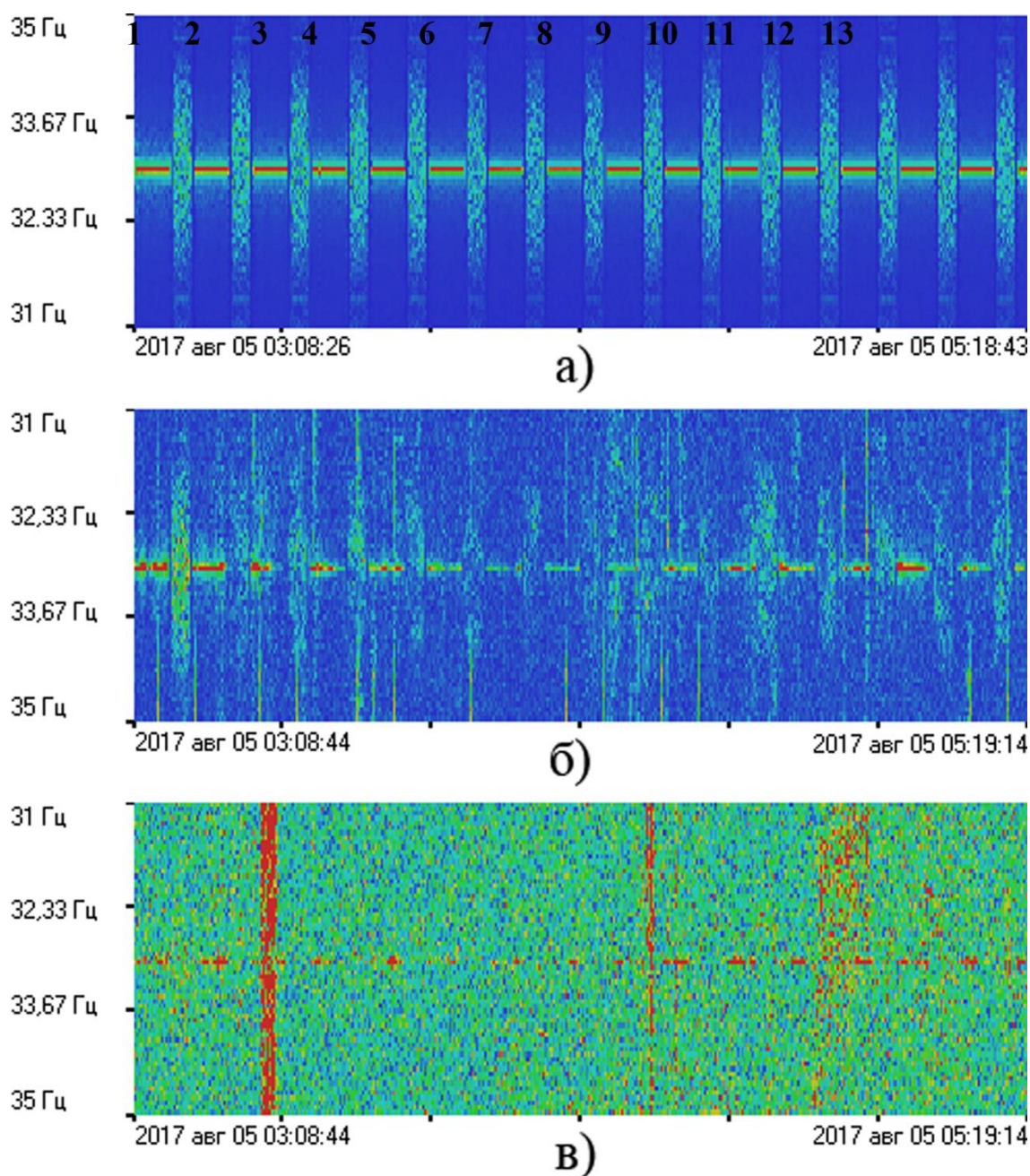


Рисунок 3.12 – Динамические спектрограммы синхронных участков записи:
 а) контрольный гидрофон, цифрами обозначено время начала излучения
 очередного пакета сигнала, б) лазерный деформограф 52,5-м «север-юг»,
 лазерный деформограф 17,5 м «запад-восток».

Направление на источник излучения определялось по данным 52.5 и 17.5-метровых осей лазерного деформографа. Выбирался временной отрезок длиной 50000 отсчетов, что при частоте дискретизации 1000 Гц имеет длительность равной

51 с. Для каждого временного отрезка длиной 300 с, определялись амплитуды сигналов излучателя в данных измерениях 52.5-метрового и 17.5-метрового лазерных деформографов. Как было показано ранее, из-за различия поверхностей установки компонент лазерного деформографа, коэффициент их отношения при одинаковом внешнем воздействии составляет 2,8. Это отношение мы использовали при определении направления на источники различных сигналов – гидроакустических, сейсмоакустических, геофизических и т.п. В нашем случае пеленг определялся по тангенсу: $tg\alpha = 2.8 * a_{17.5} / a_{52.5}$, где α - угол между направлением на источник сигналов и осью 52.5-метрового лазерного деформографа, $a_{17.5}$ - амплитуда спектральной составляющей 17.5-метрового лазерного деформографа, $a_{52.5}$ - амплитуда спектральной составляющей 52.5-метрового лазерного деформографа.

По результатам анализа величины амплитуды каждой компоненты лазерного деформографа при движении гидроакустического излучателя составлена Таблица 3.4. В таблице приведены амплитуды акустического сигнала, регистрируемого лазерным деформографом, и направление на источник, определенного по результатам полученных данных.

Таблица 3.4. Амплитуды акустического сигнала, регистрируемого компонентами лазерного деформографа, при движении гидроакустического излучателя от ст. 1 к ст. 13.

№ ст.	Амплитуда СЮ, нм	Амплитуда ЗВ, нм	Пеленг, °
1	0,20	0,046	32,11
2	0,21	0,028	19,91
3	0,23	0,028	11,39
4	0,23	0,013	8,93
5	0,22	0,015	10,97
6	0,18	0,021	18,24
7	0,18	0,025	21,78
8	0,18	0,038	30,00
9	0,056	0,016	39,6
10	0,11	0,037	43,01
11	0,13	0,09	63,39
12	0,083	0,075	68,49
13	0,037	0,20	86,26

По результатам проведенного эксперимента покажем схематически трек перемещения буксируемого излучателя с визуальными результатами пеленгации на основании амплитудной модуляции регистрируемого сигнала на компонентах двухкоординатного лазерного деформографа (рисунок 3.13). Угломерная шкала, показанная на рисунке, имеет направление 0 градусов в соответствии с пространственным положением 52,5-метровой компоненты двухкоординатного лазерного деформографа.

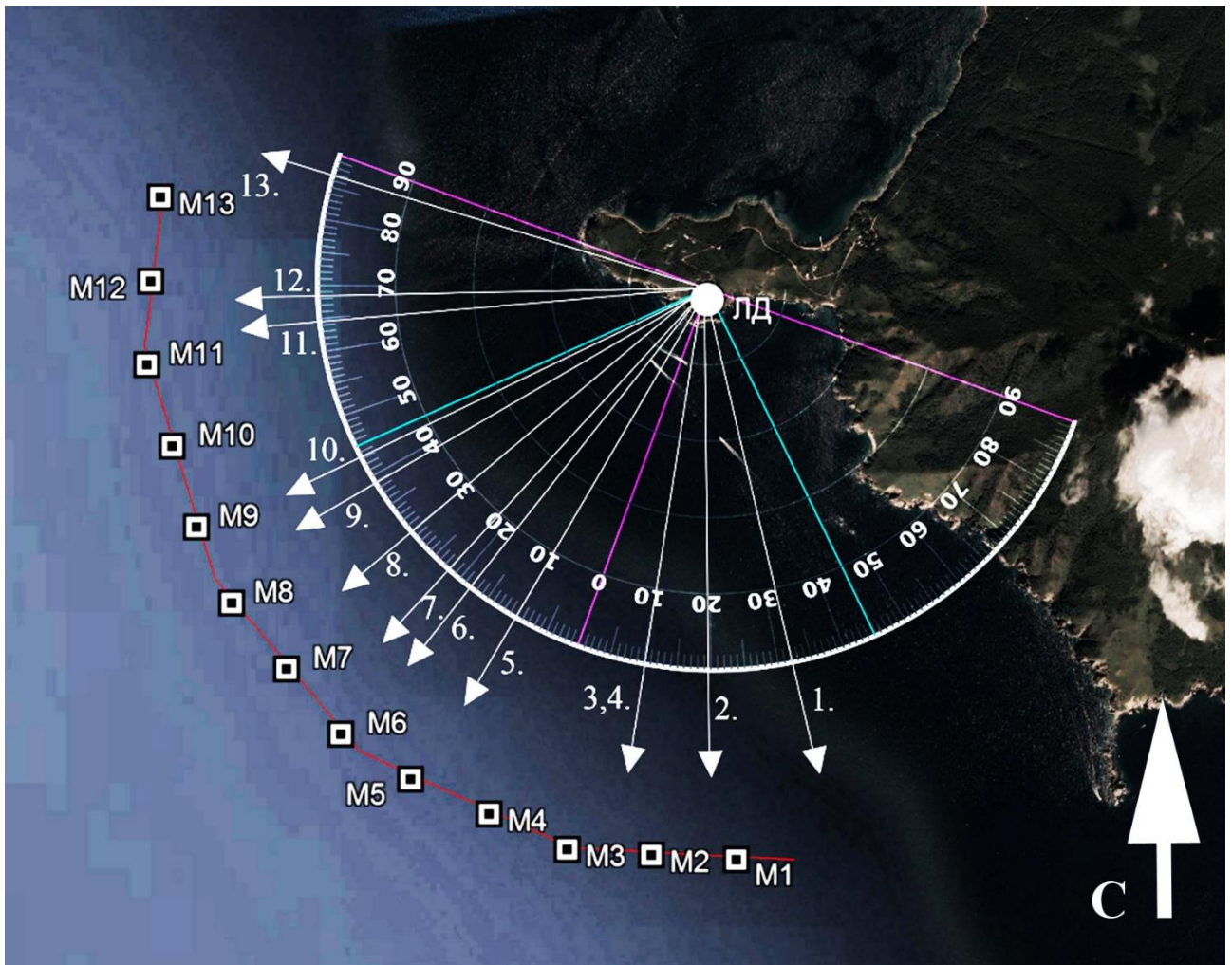


Рисунок 3.13 – Схематическая карта с результатом пеленгации сигнала гидроакустического излучателя. Квадраты M1-M13 – местоположение начала очередного излучения. Стрелки 1-13 – результат пеленгации.

По результатам анализа результатов проведенного эксперимента, ошибка в определении направления на источник гидроакустического излучения, перемещающегося в шельфовой области, находится в пределах от 0.2% до 10.5% [72]. Данная погрешность вполне сопоставима с полученными ранее результатами по определению направления на судно, удаляющееся 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). Учёт всех особенностей возможен только при точном знании о структуре морского дна и характеристиках пород морского дна, угла наклона морского дна и т.п.

3.4 ВЫВОДЫ

Показана возможность регистрации и контроля различных искусственных источников низкочастотного гидроакустического излучения береговыми средствами измерений. Представленные результаты убедительно демонстрируют перспективность применения двухкоординатных береговых лазерных деформографов для определения направления на источники низкочастотных гидроакустических колебаний.

В результате проведенных экспериментов получены экспериментальные величины амплитуд сейсмоакустических сигналов, генерируемых на разных частотах гидроакустическими источниками излучения, и зарегистрированные разнонаправленными и пространственно-разнесенными лазерными деформографами. Данные результаты демонстрируют практически важную возможность контроля источника гидроакустического излучения при его

перемещении по контролируемой акватории береговыми измерительными системами. При этом контроль может осуществляться совмещением двух разных методов измерения: 1) метод пространственно-разнесённых лазерных деформографов; 2) метод амплитудной модуляции сигнала разнонаправленных компонент лазерных деформографов. Полученные результаты показали перспективность применения системы лазерных деформографов для регистрации источников низкочастотного гидроакустического излучения вдоль побережья шельфовых зон.

ГЛАВА 4. ТОМОГРАФИЯ МОРСКОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕРЕГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДЕФОРМОГРАФОВ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В низкочастотной области сейсмоакустические поверхностные волны становятся доминирующим механизмом переноса акустической энергии в шельфовой зоне [28, 32, 73]. Это знание можно использовать при проведении экспериментальных работ по изучению строения земной коры шельфовых зон различных морей. Чем ниже частота сигнала, тем большая часть его энергии проникает в дно и тем глубже его проникновение в донные осадочные слои. Такое проникновение может достигать сотни метров, а при очень низких частотах излучаемых сигналов - до границы Мохоровичича. Используемые в ТОИ ДВО РАН низкочастотные гидроакустические излучающие системы работают в диапазоне частот порядка 20–35 Гц. При таких частотах длины волн в воде составляют около 40–75 м, а в твердой среде при скорости упругих волн порядка 3000 м/с волны имеют длину около 100–150 м. В этом случае имеет место значительная глубина проникновения данных сигналов в земную кору. Благодаря этому характеристики такой волны зависят от параметров дна, а значит, при анализе принятых сигналов можно получить информацию о физических свойствах дна исследуемого водоема.

Методы и подходы использования низкочастотных сигналов в интересах диагностики структуры морского дна активно развиваются уже на протяжении более чем сорока лет. Развиваются методы, помогающие решать томографические и инверсионные задачи при изучении структуры и состава морского дна на основе использования низкочастотных гидроакустических излучателей и различных приемных систем [74-77]. Результаты этих и других многочисленных исследований позволяют рассматривать сейсмоакустику как самостоятельное и перспективное направление морской геофизики. В нашей стране различные авторы решение таких проблем называют как: томография дна океана, диагностика дна океана, сейсмоакустическое профилирование и др. [77]. За рубежом на протяжении уже многих лет общепринят термин «геоакустическая инверсия». Геоакустическая

инверсия — это процесс оценивания параметров морского дна по результатам геоакустического моделирования, основанного на натуральных измерениях [78]. Любая задача геоакустической инверсии является весьма непростой обратной задачей, относящейся к классу некорректных [79]. Важным этапом решения задач геоакустической инверсии являются использование в экспериментах источников звука и приемных систем, обладающих необходимыми свойствами [80].

В современных исследованиях томографии морской земной коры можно выделить следующие направления: 1) разработка низкочастотных гидроакустических излучателей, ориентированных на выполнение томографических задач, связанных с изучением структуры и состава верхнего слоя морской земной коры; 2) выполнение комплексных экспериментов по томографии морского дна на основе использования низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых сейсмоакустических приёмных систем; 3) выполнение комплексных экспериментов по томографии морского дна на основе использования низкочастотных гидроакустических излучателей и донных сейсмоакустических приемных систем; 4) другие дистанционные методы исследования структуры и состава морской земной коры для акваторий, покрытых льдом; 5) другие дистанционные методы исследования структуры и состава морской земной коры для любых акваторий; 6) исследование закономерностей распространения гидроакустических сигналов различных частот в шельфовых областях морей различных конфигураций; 7) решение модельно-теоретических задач, связанных с изучением структуры и состава морской земной коры.

Какие же успехи уже достигнуты в этих направлениях? В первом направлении значительных успехов достигли авторы работ [77, 81]. Разрабатывались и испытывались различные гидроакустические излучатели монопольного типа на основе пьезокерамических элементов различной конструкции. Исследовались когерентные методы сейсмоакустического зондирования шельфовой и прибрежной зоны на ближних расстояниях [82]. Такие методы являются типичной современной схемой при выполнении диагностики

морского дна, особенно при применении импульсных источников излучения. Использование таких сигналов в качестве “инструментов” зондирования морского дна позволяет реализовать достаточно высокую разрешающую способность и глубину проникновения при относительно низких, в сравнении со стандартным подходом на основе источников ударного типа, уровнях излучения и в более высоком частотном диапазоне [83].

Во втором направлении исследований, когда исследуется возможность томографии шельфовой области малой глубины береговыми средствами, в последние годы работы проводились преимущественно в ТОИ ДВО РАН. Известны некоторые исследования, связанные с использованием взрывных источников. Один из них связан с регистрацией потерпевшего аварию аргентинского подводного корабля [84]. Специальное исследование распространения взрывного сигнала показала ослабленность высоких частот в сейсмических волнах, регистрируемых на берегу [85].

В третьем направлении работы ведутся многими коллективами, среди которых можно выделить следующие. В статье [86] представлены экспериментальные результаты сейсмоакустического профилирования с использованием широкополосных сигналов от буксируемого излучателя в Каспийском море в интервале глубин до дна ~ 1000 м. Прием сигналов осуществлялся стандартной буксируемой цифровой сейсмокозой. В [87] проводится комплексная обработка экспериментальных данных, включающая определение времени прихода, представление с помощью годографов, полученных методом преломленных волн. Исследуются перекрестные корреляции сейсмического шума [88, 89] или звуков от пневматических выстрелов [90] на множестве сейсмографов для получения трехмерной томографической модели скоростей сейсмических волн. Получение и исследование сейсмических профилей полученных с использованием сейсмических кос [90-92]. Перекрестные методы исследование с сейсмокозами и донными сейсмографами [93].

По тематике четвертого направления можно выделить работы по изучению закономерности распространения волнового возмущения в неоднородной среде, включающей слоистую Землю, жидкий волновод и покрывающий слой льда [94]. На основе анализа взаимно-корреляционной функции сигналов, принятых в двух разнесенных в пространстве точках, оценены скорости различных мод. В работе [95] представлены результаты анализа модовой структуры естественного шумового поля, наведенного в системе «литосфера–гидросфера–ледовый покров». Показано, что мониторинг сейсмоакустического шумового фона в условиях мелкого моря при наличии ледового покрова позволяет исследовать параметры геофизической среды томографическими методами. Демонстрируется возможность выделения в принимаемом сигнале отдельных мод, распространяющихся в системе ледяной покров– слой воды – слой наносов – упругое полупространство, а также томографической оценки характеристик дна, слоя воды и льда в активном режиме [96, 97].

По пятому направлению дистанционных методов можно выделить следующие работы [98], в которой описан высокоразрешающий сейсмоакустический комплекс для исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна. В работе [99] использованы экспериментальные данные, полученные на вертикальной гидрофонной решетке во время эксперимента с взрывными источниками звука. По результатам эксперимента показаны масштабы акустического проникновения в осадочные породы. Среди существующих методов глубинного сейсмического зондирования в последние годы активно развивается метод пассивной поверхностно-волновой томографии [100, 101], использующей естественный микросейсмический шум в качестве источника информации о среде. Также для этих задач используют широкополосные шумы проходящих судов [102, 103].

К шестому направлению можно отнести такие работы, как [104], где исследуются дисперсионные зависимости акустических волн, распространяющихся в условиях, близких к условию «мелкого» моря, покрытого

льдом. Исследование распространения звука в шельфовой области Южно-Китайского моря для анализа возможных вариаций в разные сезоны года [105] и решение подобной же задачи в Черном море [106]. Проблема вариаций гидрологических условий, влияющих на потери звука при распространении по стационарной трассе [107] изучалась также в Японском море. Распространение акустического сигнала из шельфовой области в глубокое море в зависимости от гидрологических условий [108].

Задачи исследования методов модовой томографии при восстановлении характеристик дна мелкого моря на примере совместной реконструкции рельефа дна и скорости звука в дне показаны в публикации [109, 110]. В лабораторных условиях была изучалась вертикальная структура короткомодовых импульсов вблизи критических толщин гидроакустических волноводов постоянной и переменной глубины с различными моделями дна [111]. Работы можно отнести к седьмому описанному ранее направлению.

Как показывает предварительный обзор, любое зондирование слоев осадков или слоев водной среды проводят с использованием технологии излучения сигналов на выбранных частотах и их приема различными приемниками, желательно широкополосными. Широкополосные приемные системы используются для того, чтобы избежать возможного искажения принятой информации. Промежутки времени между моментом излучения и приема необходимо измерять очень тщательно для точного определения размеров слоев, что невозможно сделать в случае гармонических или импульсных сигналов. В подобных исследованиях предпочтительно использовать сложные, фазоманипулированные сигналы (М-последовательности), применение которых в гидроакустических и сейсмоакустических томографических и инверсионных исследованиях позволяет определять времена прихода с высокой точностью. Кроме того, затухание сигнала не сильно влияет на результат обработки, так как основной этап обработки не связан со спектрально-временным изучением поведения сигнала, а связан со сверткой принятого и излученного сигналов, что

позволяет применять эффективно данную методику даже при значительном шуме, амплитуда которого может быть больше амплитуд принятых гидроакустических или сейсмоакустических сигналов.

4.1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Большинство экспериментальных работ выполненных в рамках исследования возможности томографии земной коры были сделаны в акватории, прилегающей к МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Поэтому создание методики проведения экспериментов первоначально относилось к одному полигону исследования на МЭС «м. Шульца» и прилегающей к нему акваторией моря. Но в последствии проводились исследования и в других областях залива Петра Великого с проведением исследовательских работ в различные сезоны, что в первую очередь связано с тем, что такие исследования актуальны в связи с задачами по освоению Арктики, которые стоят перед Российской Федерацией. Учитывая то, что значительная часть Арктики покрыта льдом, данные методы должны быть ориентированы на выполнение изыскательских работ без разрушения ледяного покрова и с наименьшим экологическим воздействием на окружающую среду. Некоторые наработки по применению были в дальнейшем использованы при исследовании возможности подледного применения метода. Основная часть метода измерения заключается в том, что приёмная система не стоит на дне, как во всех ранее применяемых методах, а расположена на берегу. Если методика работы при расположении приемных датчиков на морском дне в виде кос основана на обработке отраженных сигналов, то методика работы при расположении одного приемника на 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. Установка на берегу одной компоненты лазерного деформографа позволяет выполнять продолжительную регистрацию полей сейсмоакустических волн в диапазоне от 0 Гц (условно) до 1000 Гц. Установка лазерного деформографа в подземном варианте обеспечивает исключение влияния факторов окружающей среды на измерительный процесс и может быть использована для постоянного применения измерительной системы на полигоне. Применение двух взаимно перпендикулярных лазерных деформографов и использовании принципа синхронной регистрации сигналов обоих компонент дает возможность регистрации сигнала, генерируемого гидроакустическим излучателем, в двух координатах. Развитие методики проведения исследования показало необходимость оперативного проведения измерений в заданной области. В этом случае хорошо показала себя возможность применения поверхностного варианта лазерного деформографа (мобильного). Для увеличения чувствительности и увеличения величины, регистрируемых гидроакустических сигналов, оптическое измерительное плечо лазерного деформографа может быть увеличено.

Для проведения экспериментальных работ излучения и приема гидроакустического сигнала предварительно назначались координаты ряда станций излучения. Станции располагались либо по одинаковому радиусу от береговой приемной станции, либо если исследуется протяженная трасса распространения гидроакустического сигнала, то назначаются станции с кратным расстоянием при удалении от приемной станции.

В выбранных точках намеченной трассы проводится излучение фазоманипулированных сигналов, которые принимаются береговыми лазерными деформографами. При обработке производится свертка полученных записей лазерных деформографов с записями контрольного гидрофона или с компьютерным математическим сигналом. Свертка осуществляется посредством встроенной в программу Deformograph процедуры с применением автокорреляционной функции. Поскольку в качестве основного сигнала выступает практически незашумленная запись контрольного гидрофона, регистрирующего

излучаемый сигнал рядом с работающим излучателем, то с использованием автокорреляционной функции с данными регистрации лазерными деформографами позволяет выделить максимумы прихода сигнала из общей записи деформографа, несмотря на наличие фоновых шумов различного диапазона частот. В программе реализована процедура автокорреляционной функции, нормированная по количеству отсчётов:

$$r(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) \cdot x_2(n + j)$$

где $x_1(n)$ – запись контрольного гидрофона, $x_2(n)$ – запись лазерного деформографа с временным сдвигом.

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”.

4.2 РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ТОМОГРАФИИ МОРСКОГО ДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕРЕГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДЕФОРМОГРАФОВ

Предварительные результаты на основании которых были сделаны первые выводы о перспективности методов регистрации акустических сигналов лазерным деформографом были озвучены еще на XVI сессии Российского акустического общества [112]. В докладе была описана возможность томографических исследования дна шельфа с помощью низкочастотных излучателей и трехкоординатной системой лазерных деформографов. Тогда же последовательно исследовались отражающие свойства донных осадков шельфа Японского моря в акватории, прилегающей к МЭС м. Шульца [113]. Одним из первых поставленных экспериментов в рамках исследования возможностей и отработки методики томографических исследований земной коры шельфовых областей летом 2012 г.

были выполнены экспериментальные работы на шельфе Японского моря в акватории, прилегающей к МЭС «м. Шульца» [114]. В качестве приемника сейсмоакустического сигнала использовался береговой лазерный деформограф. Излучение проводилось низкочастотной гидроакустической системой ГИ-1 на частоте 33 Гц. На рис. 4.1 приведена схема эксперимента.

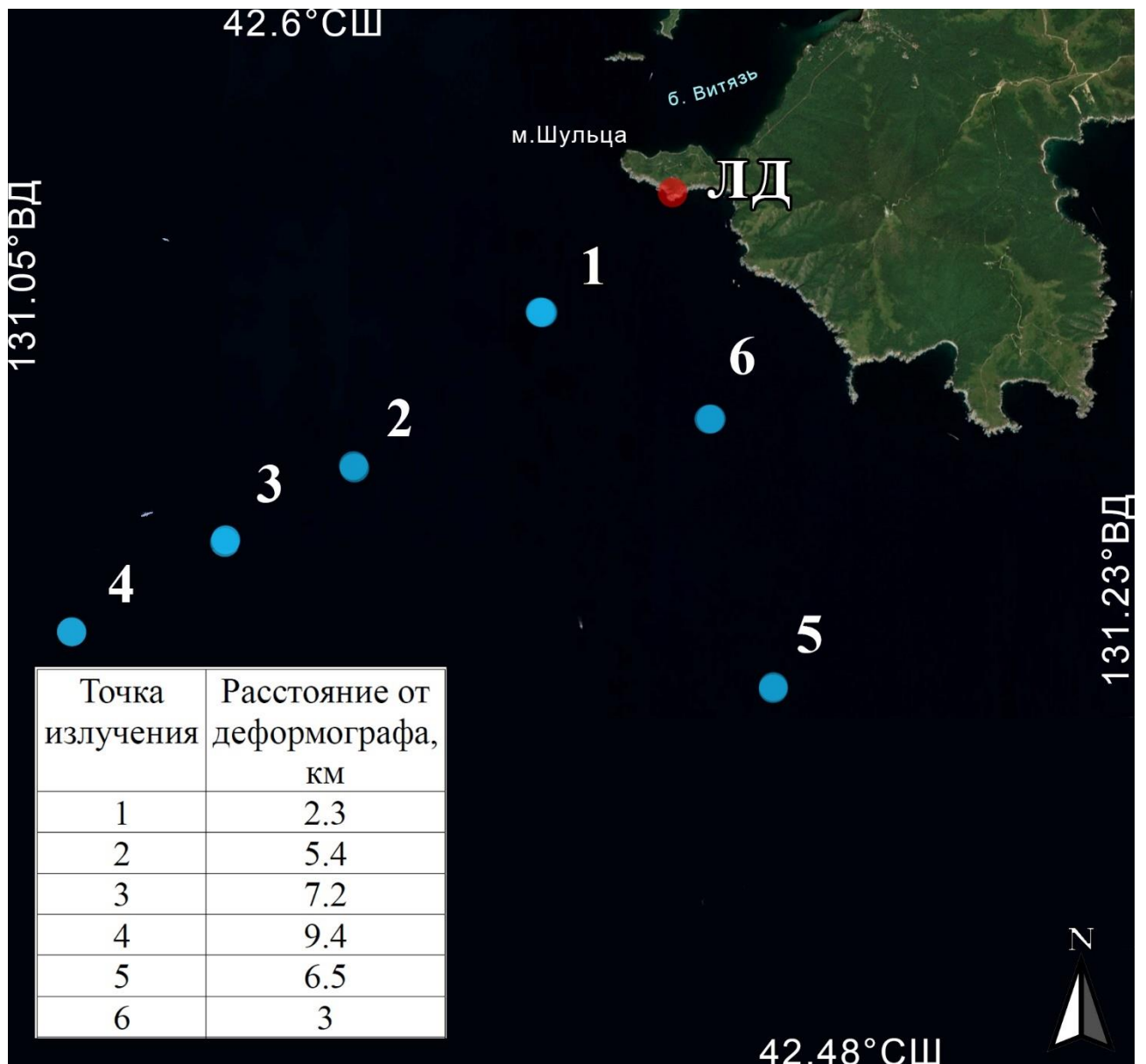


Рисунок 4.1 – Схема эксперимента 09 мая 2012 г. 1-6 – станции излучения, ЛД – лазерный деформограф.

План эксперимента был подготовлен для исследования других задач. В рамках общего плана работ выполнялись гидрологические исследования. Поэтому положение станций излучения в первом эксперименте носит достаточно хаотический характер касательно расположения и направленности измерительных осей береговых измерительных систем. Согласно проведенным измерениям, в поверхностном слое воды (3–5 м) наблюдался термоклин, а при последующем заглублении – плавное изменение температуры и скорости звука. Скорость звука в воде изменялась от 1515 м/с у поверхности моря до 1487 м/с у дна. Для дальнейших расчетов распространения акустического сигнала была принята средняя скорость звука в воде ~1500 м/с.

Анализ первичных данных показал, что лазерным деформографом зарегистрированы все сигналы, излученные низкочастотным гидроакустическим излучателем на всех шести станциях. На рис. 4.2 показана динамическая спектрограмма лазерного деформографа за весь период проведения эксперимента.

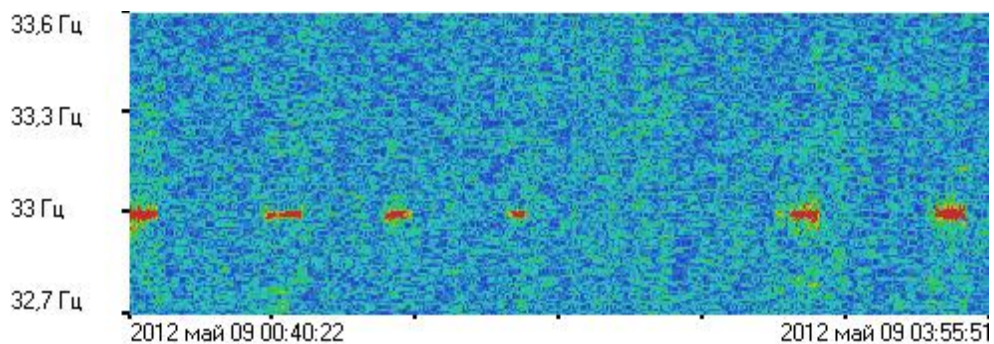


Рисунок 4.2 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа

Отдельно на рис. 4.3 выделен участок спектрограммы, на котором присутствует зарегистрированный сигнал излучения при работе излучателя на станции 1.

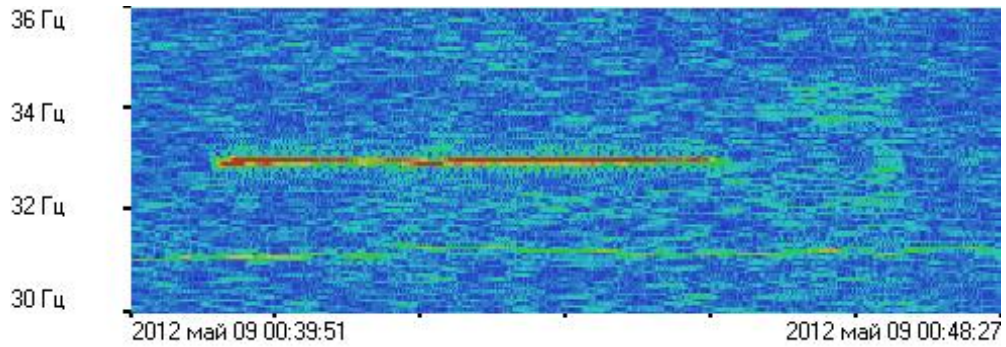


Рисунок 4.3 – Спектрограмма зарегистрированного лазерным деформографом сигнала при работе излучателя на станции 1.

Используя общую методику предварительной обработки данных, проведена свертка принятых лазерным деформографом сигналов с излученным гидроакустическим фазоманипулированным сигналом. Полученные результаты для каждой станции приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Результаты обработки экспериментальных данных.

№ Станции	Время начала излучения, UTC	Время ожидания пика +5:21	Max -1	Δt , с	Max	Δt , с	Max+1	Δt , с
1	0:40:20	0:45:41			4007075	0,697	4007772	0,375
2	1:13:20	1:18:41	5987098	0,302	5987400	0,662	5988062	0,801
3	1:38:20	1:43:41			7309008	0,613	7309621	0,545
4	2:05:20	2:10:41			8958070			
5	3:10:25	3:15:46	13018578	0,219	13018797			
6	3:43:45	3:49:06	15012867	0,336	15012203	0,782	15013985	0,12
№ Станции	Max+2	Δt , с	Max+3	Δt , с	Max+4	Δt , с	Max+5	Время Max
1	4008147	0,796	4008943					00:46:03.075
2	5988863							01:19:03.400
3	7310166							01:41:05.008
4								02:08:34.070
5								03:16:14.798
6	15014105	0,361	15014466	0,176	15014642	0,3	15014942	03:49:29.204

В таблице указано количество времен прихода M-сигнала гидроакустического излучателя к лазерному деформографу. Как видно из таблицы 4.1, при свертке принятого и излученного сигналов лазерным деформографом было

зарегистрировано до семи приходов сигналов М-последовательности на шестой станции. Записи лазерного деформографа проводились с применением сигналов точного времени по GPS Trimble 5700. Применение таких устройств позволяет записывать экспериментальные данные с точностью 1 мкс. К сожалению, на судне, с которого осуществлялось излучение, не применялась система точного времени, что не позволяло объективно оценивать время распространения сигналов от места излучения до места расположения лазерного деформографа. Тем не менее, беря только данные лазерного деформографа, мы можем объективно судить о промежутках времени между приходами сигналов.

Несмотря на то, что на излучающем устройстве не было системы точного времени, существует такая возможность по литературным данным воспроизвести примерный состав и структуру верхнего слоя земной коры зоны излучения и приема данных сигналов и определить наиболее вероятный путь первого прихода с определением времени его распространения от излучателя до лазерного деформографа, далее с учетом результатов свертки определить пути распространения каждого сигнала. В качестве основного материала для обработки выбрана результаты работы излучателя на станции № 6. Во-первых, при работе излучателя на этой станции деформографом было зарегистрировано семь приходов. Во-вторых, станция располагалась почти по оси лазерного деформографа, т.е. лазерный деформограф в данном направлении был наиболее чувствительным.

На рис. 4.4 приведен вертикальный разрез верхнего слоя земной коры по линии м. Шульца–станция 5, построенный по данным [115, 116].

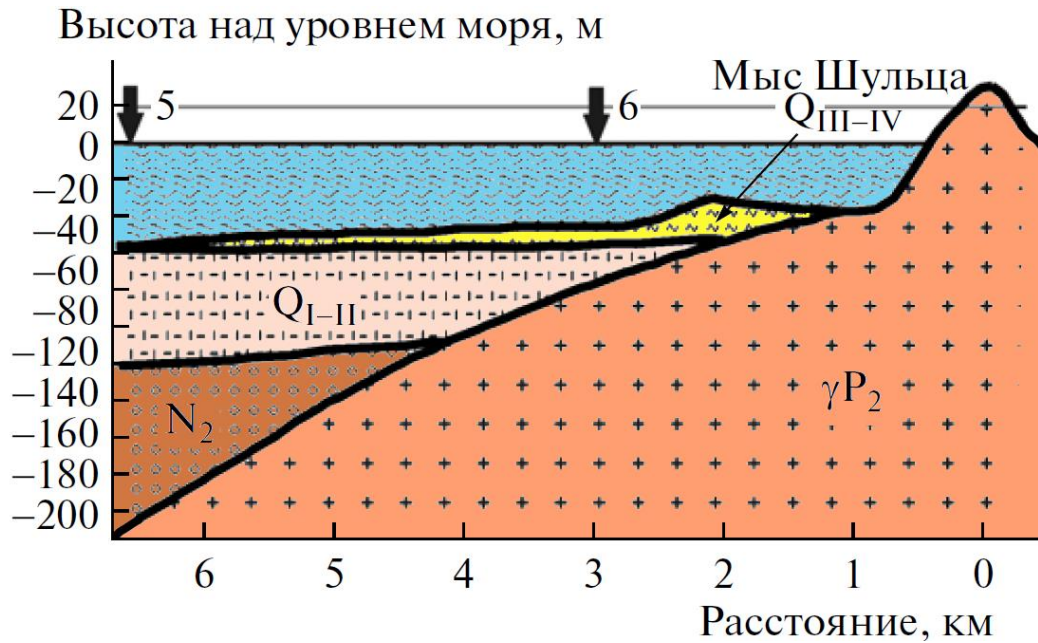


Рисунок 4.4 – Вертикальный разрез верхнего слоя земной коры по трассе распространения акустического сигнала станция 5 – м. Шульца.

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) [117] и подбора значений продольной скорости звука по литологическому составу рыхлого осадка [118]. Определим возможные пути движения излученных гидроакустических сигналов от станции 6 до деформографа, который расположен на м. Шульца. На начальном этапе вычислений для каждого слоя и границ разделов слоев по [115, 116] и 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 сигналов от места излучения до лазерного деформографа. После сопоставления полученных расчетов с результатами свертки и дальнейших вычислений был выбран один из лучших, на наш взгляд, вариантов прохода сигналов.

Вероятный путь движения первого прихода: излученный сигнал пересекает все слои, попадает на границу осадочного слоя нижнего–среднего плейстоцена (Q_{I-II}) и полупространства, сложенного гранитоидами позднепермского возраста (γP_2); по границам $Q_{I-II}-\gamma P_2$ и $Q_{III-IV}-\gamma P_2$ проходит волна Лява, по границам слоев γP_2 –вода и γP_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 осадочном слое позднеплейстоцено-голоценового возраста (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 γP_2 –вода и γP_2 –воздух 2970 м/с. Время движения по данному пути примерно 0.897 с.

Время второго прихода $0.897 + 0.336 = 1.233$ (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 γP_2 проходит волна Лява, по границам слоев γP_2 –вода и γP_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 γP_2 –вода и γP_2 –воздух 2970 м/с.

Время третьего прихода $1.233 + 0.783 = 2.016$ (с). Вероятный путь третьего прихода: излученный сигнал пересекает воду, вдоль слоя Q_{III-IV} распространяется волна продольного типа, по границе γP_2 –вода распространяется незатухающая волна Рэлея и по границе γP_2 –воздух затухающая волна Рэлея 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 незатухающей волны Рэлея на границе γP_2 –вода 1540 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границе γP_2 –воздух 2970 м/с.

Время четвертого прихода $2.016 + 0.120 = 2.136$ (с). Вероятный путь четвертого прихода: излученный сигнал пересекает воду, по границе Q_{III-IV} –вода распространяется затухающая волна Рэлея, по границе γP_2 –вода распространяется незатухающая волна Рэлея и по границе γP_2 –воздух затухающая волна Рэлея достигает лазерного деформографа. При расчетах приняты следующие скорости волн: скорость звука в воде 1500 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границе Q_{III-IV} –вода 1890 м/с, скорость незатухающей волны Рэлея на границе γP_2 –вода 1540 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границе γP_2 –воздух 2970 м/с.

Время пятого прихода $2.136 + 0.361 = 2.497$ (с). Вероятный путь пятого прихода: излученный сигнал пересекает воду, по границе Q_{III-IV} –вода распространяется незатухающая волна Рэлея, по границе γP_2 –вода распространяется затухающая волна Рэлея и по границе γP_2 –воздух затухающая волна Рэлея достигает лазерного деформографа. При расчетах приняты следующие скорости волн: скорость звука в воде 1500 м/с, скорость незатухающей волны Рэлея на границе Q_{III-IV} –вода 900 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границе γP_2 –вода 2970 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границе γP_2 –воздух 2970 м/с.

Время шестого прихода $2.497 + 0.176 = 2.673$ (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 γP_2 проходит волна Лява, по границе γP_2 –вода распространяется затухающая волна Рэлея и по границе γP_2 –воздух затухающая волна Рэлея 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 Стоунли 410 м/с, скорость волны Лява 3790 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода и γP_2 –воздух 2970 м/с.

Время седьмого прихода $2.673 + 0.300 = 2.973$ (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 γP_2 проходит волна Лява, по границе γP_2 –вода распространяется

незатухающая волна Рэлея и по границе γP_2 –воздух затухающая волна Рэлея 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 Стоунли – 410 м/с, скорость волны Лява 3790 м/с, скорость незатухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода 1540 м/с, скорость волны Рэлея на границе γP_2 –воздух 2970 м/с.

Проведение первого эксперимента показало перспективную возможность применения метода в проведении томографических исследований земной коры морского дна. В результате этого исследования сделаны выводы о необходимости применения синхронизации работ по излучению и измерению акустических сигналов. Увеличения мощности излучаемого сигнала. По полученным результатам и сделанным выводам проведена подготовка и дальнейшее проведение серии экспериментальных работ.

4.3 ТОМОГРАФИЯ МОРСКОГО ДНА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

По результатам предварительных работ по томографии морского дна были сделаны выводы, что для более качественного исследования строения морского дна необходимо применять более мощные источники гидроакустического излучения. При проведении следующего эксперимента, была применена гидроакустическая излучающая система ГИ-2, предназначенная для генерации гидроакустических сигналов различной сложности в полосе частот порядка 1 Гц при центральной частоте полосы в диапазоне 19 - 26 Гц (в зависимости от глубины погружения излучателя). В качестве приемной системы также использовался береговой измерительный комплекс на МЭС «м. Шульца» на базе лазерного деформографа.

Для отработки технологии диагностики морского дна с помощью низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых лазерных

деформографов были выбраны две станции излучения (рисунок 4.5). Излучение обеспечивалось с гидрографического судна Тихоокеанского военно-морского флота России «Маршал Геловани» при погружении излучателя на глубину 17 м (четверти длины излучаемой волны), для получения максимума характеристики, направленной вертикально вниз [119-121].



Рисунок 4.5 – Схема расположения станций гидроакустического излучения 1 и 2 относительно лазерного деформографа (ЛД).

Станция 1 находилась на расстоянии 17,3 км от берегового приемника в шельфовой области Японского моря с постепенно увеличивающейся глубиной моря до 90 м. Толщина осадочных пород в прибрежной зоне составляет около 25 м. В точке излучения толщина осадочного слоя характеризуется шириной до 360 м [114]. Станция 2 была расположена на расстоянии 16 км от деформографа. По этой линии примерно 30 % трассы распространения сигнала перекрыто гранитными породами береговой и прибрежной части п-ова Гамова. Пакет излученного сигнала также имел вид: тонового излучения и два периода фазоманипулированного сигнала разной длительности, с паузами между ними. На рисунке 4.6. приведена динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа при работе излучателя на ст. 1, на ней виден зарегистрированный сигнал в виде одного участка тонового излучения и двух последовательных участков М-последовательности.

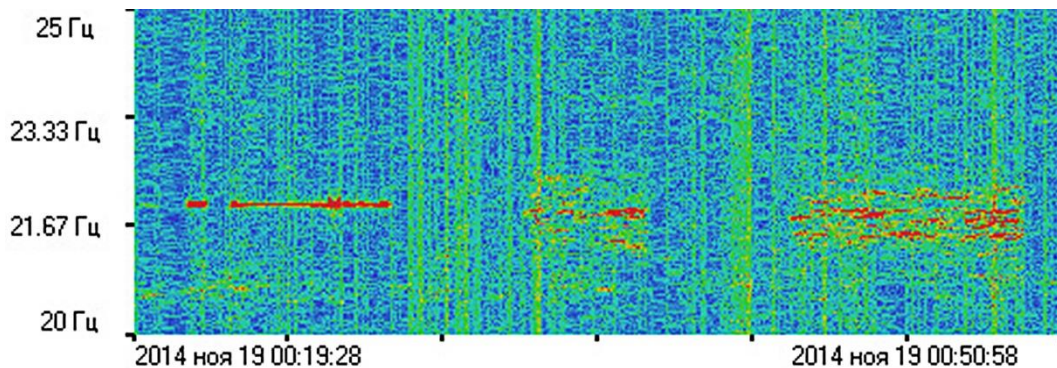


Рис. 4.6 – Динамическая спектрограмма участка записи лазерного деформографа при работе гидроакустического излучателя на несущей частоте 22 Гц

Для определения времени прихода излученных акустических сигналов на береговые станции данные были обработаны методом свертки с записями контрольного гидрофона каждой станции излучения. На рисунке 4.7 приведены результаты свертки первой М-последовательности излучаемого сигнала при работе излучателя на станциях 1 и 2. Выявлено от 5 до 7 максимумов прихода сложного фазоманипулированного сигнала (М-последовательности).

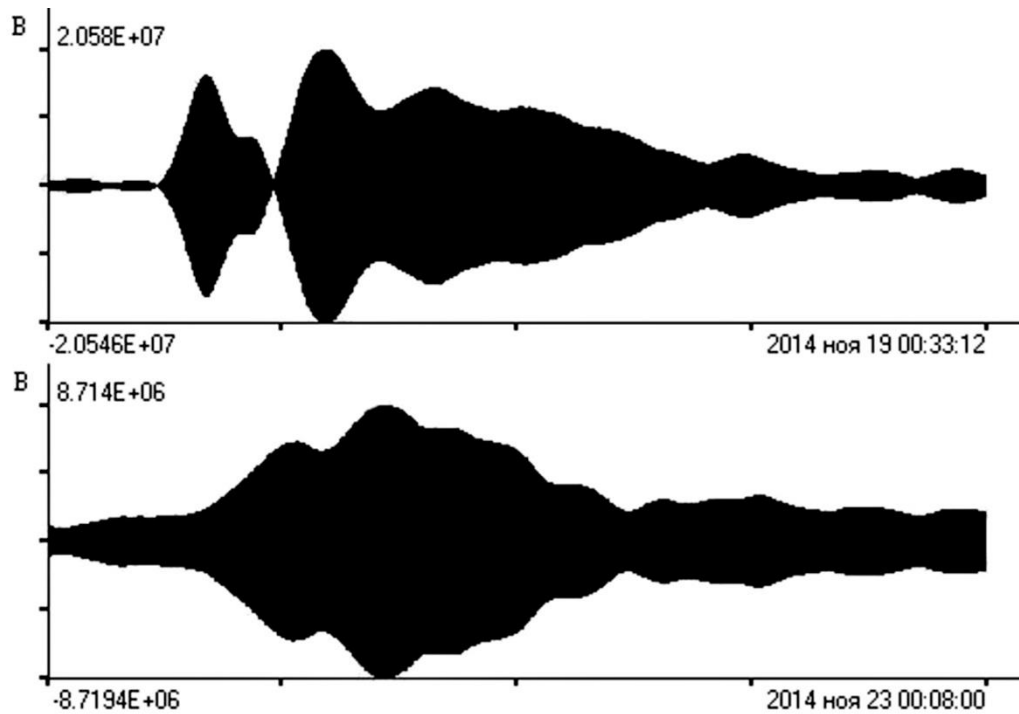


Рис. 4.7 – Результат свертки первой М-последовательности с данными лазерного деформографа при работе на станциях 1 (вверху) и 2 (внизу)

Исследованы времена прихода каждого максимума первой М-последовательности сигнала излучения на ст. 1. Последовательность распространения каждого прихода М-последовательности описывается в соответствии с геологическими особенностями морского дна в шельфовой области Японского моря возле п-ова Гамова. В ходе эксперимента скорость звука в воде варьировала от 1459 м/с у поверхности моря до 1452 м/с у дна.

Проанализируем времена регистрации максимумов излучения на ст. 1. Расстояние между станцией излучения и береговой станцией равно 17,3 км. Учитывая факт работы излучателя на глубине в четверть длины излучаемой волны, можно считать, что вдоль поверхности воды сигнал не распространяется, а сразу проходит в дно. Сигнал распространяется в водной среде максимум от излучателя до дна. Среднее время его распространения в воде при глубине моря 91 м и глубине погружения излучателя 18 м составляет 0,05 с.

Рассмотрим результаты регистрации максимумов приходов сигнала со станций после начала излучения на компоненту лазерного деформографа «север–юг». Были использованы расчетные данные о скоростях распространения акустических сигналов в коренных и осадочных слоях морского дна и в пограничных областях прибрежной зоны п-ова Гамова, полученные нами при проведении первой подобной работы [114]. Поэтому за основу также была взята такая же модель верхнего слоя морской земной коры.

Станция 1. Первый приход сигнала зарегистрирован через 2,9 с. Вероятный путь сигнала: пересекает все слои и попадает в полупространство γP_2 , сложенное гранитоидами, на глубине 350 м от поверхности моря. Пусть в соответствии с [114] скорости затухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода и γP_2 –воздух будут равны 2970 м/с. Тогда после расчета скорость волны продольного типа первого прихода в полупространстве γP_2 составила 5650 м/с.

Время второго прихода сигнала составляет 4,2 с. Вероятный путь сигнала: он проходит в дно и после пересечения верхних литифицированных и рыхлых верхних осадочных слоев N_2 , Q_{I-II} и Q_{III-IV} движется дальше по границе полупространства γP_2 и осадочных слоев в виде волны Лява, затем по границам γP_2 –вода и γP_2 –воздух достигает лазерного деформографа в виде затухающей волны Рэлея. Если скорости затухающей волны Рэлея на этих границах равны 2970 м/с, то при расчетах получим, что скорость распространения волны Лява на границе слоев равна 3680 м/с. Она близка к полученной в работе [114] (3790 м/с).

Третий приход сигнала зарегистрирован через 6,5 с. Вероятный путь третьего сигнала после пересечения водного слоя и верхних осадочных слоев: распространение продольной волны в слое N_2 и далее в виде затухающих волн Рэлея на границах γP_2 –вода и γP_2 –воздух. Скорости распространения затухающей волны Рэлея приняты 2970 м/с. Тогда расчетная скорость продольной волны в осадочном слое N_2 составляет 2380 м/с. Данный результат согласуется с литературными данными [114].

Четвертый приход сигнала отмечен через 9,6 с. Путь этого сигнала после пересечения водного слоя, вероятнее всего, проходит в виде продольной волны в осадочном слое Q_{III-IV} со скоростью 1700 м/с и в виде затухающей волны Рэлея на слоях γP_2 –вода и γP_2 –воздух при скорости распространения 2970 м/с.

Пятый приход сигнала зарегистрирован через 12,5 с. Такое время близко к скорости распространения сигнала в воде. Но, вероятнее всего, излученная волна пересекает водный слой сначала по границе Q_{I-II} –вода, затем вдоль границы Q_{III-IV} –вода и по границе γP_2 –вода распространяется затухающая волна Рэлея, по границе γP_2 –воздух она достигает лазерного деформографа. Тогда скорость затухающей волны Рэлея на границе Q_{I-II} –вода составит 1400 м/с, а на границах γP_2 –вода и γP_2 –воздух – 2970 м/с.

Полученные результаты распространения акустического сигнала хорошо согласуются с приводимыми в литературных источниках [109, 114].

Станция 2. После анализа времен максимумов прихода излучаемых сигналов обнаружено, что при регистрации сигнала со ст. 2 сигнал по трассе доходит быстрее, чем с предыдущей станции. Время первого прихода сигнала после начала излучения на ст. 2 составляет 2,6 с. В соответствии с геологической моделью, принятой в [105], сигнал после пересечения водного слоя и осадочного слоя Q_{I-II} распространяется в виде продольной волны в полупространстве γP_2 и в последней фазе распространения на границе γP_2 –воздух – в виде затухающей волны Рэлея с известной скоростью 2970 м/с. Тогда расчетная скорость распространения в полупространстве γP_2 составит 7000 м/с.

Расстояние между ст. 2 и береговой станцией измерения – 16,2 км. Разница в скорости распространения гидроакустического сигнала, трансформирующегося в дно, зависит от строения дна по каждой из трасс распространения. Заметим, что на восточном берегу Гамовского каньона, где находится ст. 2, замечены следы недавней тектонической активности [115], а третья часть акустической трассы расположена в зоне отсутствия осадочных донных пород.

Акустическая трасса распространения сигнала от станции имеет довольно сложный рельеф. Расстояние до берега от станции излучения составляет не более 10 км. В районе станции излучения примерно на глубине 460 м от поверхности воды находится полупространство γP_2 (гранитоиды). Над ним не более 1 км в сторону берега лежит нижний более плотный осадочный слой N_2 толщиной не более 20 м. Далее на расстоянии 7 км расположен слой осадочных пород Q_{I-II} толщиной до 380 м. Оставшиеся 8 км акустическая трасса проходит по гранитоидам морского дна и суши, а также их границам с водой и воздухом.

Последующие максимумы сигнала от ст. 2 имеют разницу в приходах от 2 с и более, всего приходов 6–7. Их оценка имеет некоторую сложность вследствие возможных переотражений сигнала в условиях описанной геологической модели.

4.4 РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОМОГРАФИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ШЕЛЬФОВЫХ ОБЛАСТЕЙ

В начале исследований возможности томографии морского дна береговыми измерительными системами применялась методика генерации гидроакустического сигнала со стороны открытой части Японского моря. Дальнейшие исследования планировалось проводить с учетом покрытия водной поверхности морским льдом в зимнее время года. Для этих целей планировалось использовать акваторию бухты Витязь, закрытую от прямого воздействия ветровых волн открытой части Японского моря и частично покрывающуюся зимой ледовым покровом.

В эксперименте (рисунок 4.8), проведенном в октябре 2016 года, в качестве приемной системы, как и раньше использовалась система береговых лазерных деформографов [121, 122], только сонаправленных. Угловой отражатель одного лазерного деформографа расположен на блоке, который жёстко соединён со скальным основанием м. Шульца (ЛД), а угловой отражатель другого лазерного деформографа расположен на блоке, который располагается на песчаной подушке толщиной около 1 м, лежащей на верхнем слое земной коры м. Шульца, состоящем

из дресвы (МД). В качестве излучающей системы использовался гидроакустический излучатель ГИ-1.



Рисунок 4.8 – Схема эксперимента 10 октября 2016 г.

Излучатель опускали на глубину 11 м с борта НИС “Малахит”, который стоял на якорю. В воде излучённый сигнал записывался контрольным гидрофоном, который располагался в 1 м от излучателя. Работа компьютера, отвечающего за излучение, и запись контрольного гидрофона синхронизовались ГЛОНАСС-модулем, обеспечивающим временную привязку 1 мс. Модуль аналогичного типа располагался на регистрирующем компьютере, на который поступали данные с лазерных деформографов.

Полученные экспериментальные данные помещали в базу экспериментальных данных и впоследствии обрабатывали на основе ранее созданного пакета прикладных программ Deformograph. В ходе обработки выполнена свёртка данных контрольного гидрофона с данными лазерных деформографов СЮ и МД. Графическое представление результатов свёртки приведено на рисунке 4.9, а численные значения приведены в таблице 4.2.

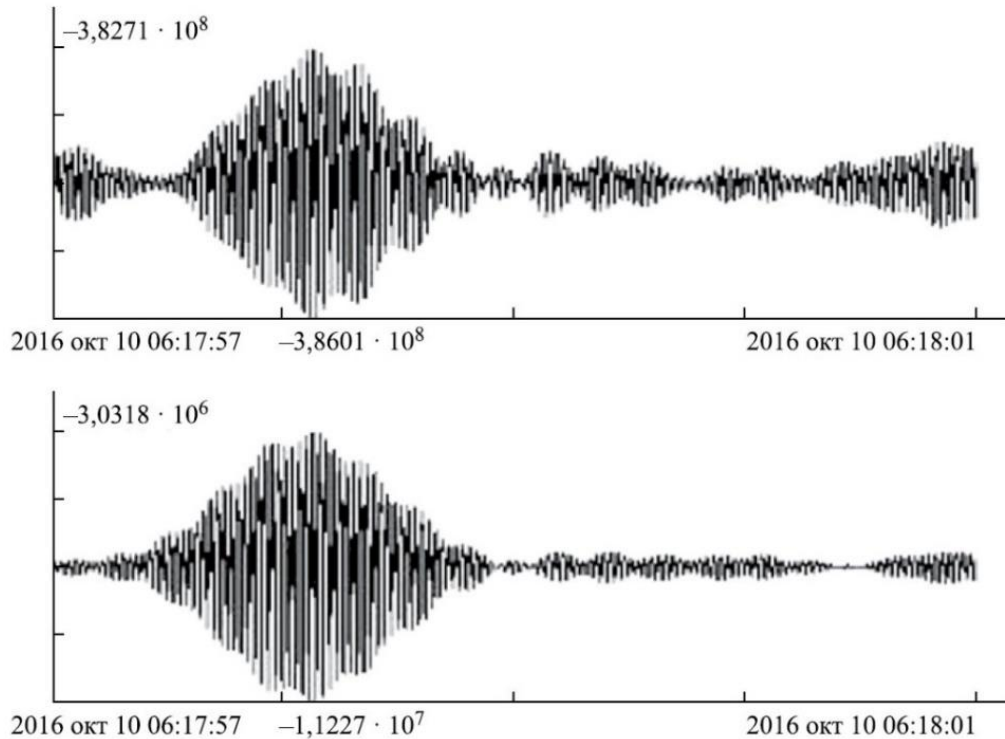


Рисунок 4.9 – Графическое представление результатов свёртки лазерных деформографов СЮ (верхний) и МД (нижний).

На полученных графиках выявлены максимумы приходов сигнала каждого цикла излучения. Относительно главного максимума (отсчёт, max) прихода выявлены максимумы ($\text{max} - 2$, $\text{max} - 1$, $\text{max} + 1$, $\text{max} + 2$) меньшей амплитуды, соответствующие приходу сейсмических волн, распространяющихся по различным путям. Всего было выделено пять максимумов приходов.

Таблица 4.2. Результаты обработки данных деформографов. Свёртка.

Де- фор- мо- граф	Время начала изл-я, UTC (гидрофон)	Отсчёт max-2	Δt , с	Отсчёт max-1	Δt , с	Отсчёт max	Отсчёт max+1	Δt , с	Отсчёт max+2	Δt , с
СЮ	06:17:58.486	1331513	0,258	1331771	0,172	1331943	1332151	0,208	1332377	0,226
МД	06:17:58.486	1331563	0,207	1331770	0,178	1331948	1332162	0,214	1332392	0,230

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 можно утверждать, что на пути распространения сигнала от точки излучения до лазерных деформографов земная кора имеет следующее строение: водный слой–слой осадков–полупространство. Будем считать, что модель среды, описанная в работе [114], приемлема и для б. Витязь, т.е. слой осадков состоит из осадков позднеплейстоцено-голоценового возраста (Q_{III-IV}), а полупространство представлено гранитоидами позднепермского возраста (γP_2). Для этой модели рассмотрим все возможные пути движения сигнала от места излучения до лазерных деформографов. За основу верхней границы вода–дно и верхний слой земной коры–воздух примем модель, представленную на рисунке 4.10, построенную по карте с учётом изменений глубин и рельефа местности по трассе излучение–приём. Длина трассы получилась следующей: по границе вода–дно 2650 м, по границе воздух–земля 800 м.



Рисунок 4.10 – Изменение границ вода–дно и верхний слой земной коры–воздух на участке излучение–приём.

Учитывая, что время первого прихода от начала излучения определено с ошибкой, рассчитаем данное время при решении систем уравнений, полученных при рассмотрении первого и второго приходов, а также временного интервала между первым приходом и вторым, который определён точно. Рассмотрим все вероятные пути распространения сигналов для деформографов СЮ и МД.

Вероятный путь первого прихода: по границе слой Q_{III-IV} – полупространство γP_2 (длина пути x) распространяется волна Лява (примем скорость волны Лява равной 3790 м/с), по границе вода–полупространство γP_2 и по границе воздух–полупространство γP_2 распространяется волна Рэлея затухающего типа (скорость затухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода и γP_2 –воздух примем равной 2000 м/с). Напишем уравнение для первого прихода:

$$t_1 = \frac{x}{3790} + \frac{2650+800}{2000} - \frac{x}{2000} \quad (4.1)$$

где x – длина слоя Q_{III-IV} на интервале точка излучения–центральный узел лазерных деформографов.

Вероятный путь второго прихода: по границе слой Q_{III-IV} –вода (длина пути x) распространяется волна Рэлея затухающего типа (примем скорость волны Рэлея затухающего типа на границе Q_{III-IV} –вода в соответствии с [114] равной 1890 м/с), по границе вода–полупространство γP_2 и по границе воздух–полупространство γP_2 распространяется волна Рэлея затухающего типа (скорость затухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода и γP_2 –воздух примем равной 2000 м/с). Напишем уравнение для второго прихода:

$$t_2 = \frac{x}{1890} + \frac{2650+800}{2000} - \frac{x}{2000} \quad (4.2)$$

Вероятный путь третьего прихода: по границе слой Q_{III-IV} –вода (длина пути x) распространяется волна Рэлея затухающего типа (примем скорость волны Рэлея затухающего типа на границе Q_{III-IV} –вода равной 1890 м/с), по границе вода–полупространство γP_2 распространяется волна Рэлея незатухающего типа (скорость незатухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода примем равной 1540 м/с), по

границе воздух–полупространство γP_2 распространяется волна Рэлея затухающего типа (скорость затухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода примем равной 2000 м/с). Напишем уравнение для третьего прихода:

$$t_3 = \frac{x}{1890} + \frac{2650-x}{1540} + \frac{800}{2000} \quad (4.3)$$

Вероятный путь четвертого прихода: по границе слой Q_{III-IV} –вода (длина пути x) распространяется волна Рэлея незатухающего типа (примем скорость волны Рэлея незатухающего типа на границе Q_{III-IV} –вода в соответствии с [114] равной 900 м/с), по границе вода–полупространство γP_2 и по границе воздух–полупространство γP_2 распространяется волна Рэлея затухающего типа (скорость затухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода и γP_2 –воздух примем равной 2000 м/с). Напишем уравнение для четвертого прихода:

$$t_4 = \frac{x}{900} + \frac{2650+800-x}{2000} \quad (4.4)$$

Вероятный путь пятого прихода: по границе слой Q_{III-IV} –вода (длина пути x) распространяется волна Рэлея незатухающего типа (примем скорость волны Рэлея незатухающего типа на границе Q_{III-IV} –вода в соответствии с [114] равной 900 м/с), по границе вода–полупространство γP_2 распространяется волна Рэлея незатухающего типа (скорость незатухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода примем равной 1540 м/с), по границе воздух– полупространство γP_2 распространяется волна Рэлея затухающего типа (скорость затухающей волны Рэлея на границах γP_2 –вода примем равной 2000 м/с). Напишем уравнение для пятого прихода:

$$t_5 = \frac{x}{900} + \frac{2650-x}{1540} + \frac{800}{2000} \quad (4.5)$$

Решая систему уравнений (4.1), (4.2) с уравнением $t_2 = t_1 + 0,258$, получим для деформографа СЮ:

$$x = 972 \text{ м, } t_1 = 1,495 \text{ с, } t_2 = 1,753 \text{ с,} \quad (6)$$

а для деформографа МД из системы уравнений (4.1), (4.2) и уравнения $t_{2М} = t_{1М} + 0,207$, получим:

$$x = 780 \text{ м}, t_1 = 1,541 \text{ с}, t_2 = 1,748 \text{ с}, \quad (6)$$

Далее для деформографов СЮ и МД имеем:

$$t_3 = 2,004 \text{ с}, t_{3,табл} = 1,925 \text{ с}, \text{ ошибка } 4,1\%;$$

$$t_4 = 2,319 \text{ с}, t_{4,табл} = 2,133 \text{ с}, \text{ ошибка } 8,7\%;$$

$$t_5 = 2,570 \text{ с}, t_{5,табл} = 2,359 \text{ с}, \text{ ошибка } 8,9\%;$$

$$t_3 = 2,027 \text{ с}, t_{3,табл} = 1,926 \text{ с}, \text{ ошибка } 5,2\%;$$

$$t_4 = 2,202 \text{ с}, t_{4,табл} = 2,140 \text{ с}, \text{ ошибка } 2,9\%;$$

$$t_5 = 2,481 \text{ с}, t_{5,табл} = 2,37 \text{ с}, \text{ ошибка } 4,7\%.$$

Экспериментальные результаты, полученные при регистрации двумя береговыми лазерными деформографами фазоманипулированных сигналов, создаваемых в воде низкочастотным гидроакустическим излучателем с центральной частотой излучения 33 Гц, позволили построить модель верхнего слоя морской земной коры с определением скоростей волн поверхностного типа на трассе излучатель–приёмник. Вариации в приходах сигналов к лазерному деформографу СЮ и лазерному деформографу МД связаны с различным расстоянием от точки излучения до данных деформографов, а также с различным строением верхнего слоя земной коры, на которых расположены их устои. Толщину слоя осадков мы брали малой по сравнению с длиной слоя. При вводе толщины слоя осадков, равной 50 м, и с учётом скорости распространения в нём продольной волны, равной 1740 м/с [114], ошибка резко возрастает. Как показывают дополнительные акустические измерения, слой осадков имеет толщину около 6–7 м, а длину около 1 км.

В расчетах присутствует небольшая погрешность из-за того, что было принято положение лазерных деформографов в одной точке. Если учесть

расположение отражателей лазерных деформографов на расстоянии 105 м друг относительно друга, то длина участка x возрастает для обоих деформографов. Тем не менее полученные данные деформографов имеют хорошее совпадение с дополнительными промерными данными.

Таким образом можно утверждать, что при выделенных пяти максимумов приходов, распространяющихся по различным путям, строение верхнего слоя земной коры б. Витязь состоит из слоя осадков позднеплейстоцено-голоценового возраста Q_{III-IV} , имеющего толщину не более 10 м и полупространства гранитоидов позднепермского возраста γP_2 .

4.5. ТОМОГРАФИЯ МОРСКОГО ДНА В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Для исследования акваторий, покрытых льдом, подходят как активные, так и пассивные акустические методы [114, 123, 125-129]. Активные акустические методы ориентированы на применение низкочастотных гидроакустических излучателей, способных генерировать в воде сигналы различной сложности. В отличие от использования пневматических пушек, взрывных источников и стримеров, применение гидроакустических излучателей является наиболее экологически безопасным для окружающей среды и биоты. В настоящее время в одной из главных технологий по изучению структуры и состава морской земной коры с целью поиска полезных ископаемых приемные системы располагаются в виде распределенных по дну датчиков. Такое расположение приемных систем является сложной задачей для покрытых льдом акваторий, особенно без его предварительного разрушения. Для преодоления данного затруднения возможно расположение приемных систем во льду [128] или на берегу [114, 123].

Эксперимент, описанный в последнем разделе, предполагалось повторить в разные времена года, в том числе и в зимнее время, опуская гидроакустический излучатель с поверхности ледового покрытия. Но аномально теплая зима 2016-2017

гг. создала условия, которые не позволили сформировать на поверхности бухты Витязь устойчивое ледовое покрытие.

Так как стационарные лазерные деформографы невозможно использовать для решения инверсионных задач многих акваторий. Для решения различных задач, не требующих высокого метрологического обеспечения, был создан мобильный лазерный деформограф, описанный ранее, длина рабочего плеча которого может варьироваться в зависимости от поставленных задач. Рассмотрим особенности применения мобильного лазерного деформографа в зимних условиях для решения задач по изучению структуры и состава морской земной коры [130-133].

Перед началом эксперимента на берегу Амурского залива Японского моря в точке с координатами $43^{\circ}11,754'$ СШ и $131^{\circ}55,141'$ ВД был установлен мобильный лазерный деформограф (рисунок 4.11). В термостабилизированном помещении 1, в котором поддерживалась температура с точностью 0,5 град, располагалась основная часть интерферометра Майкельсона. Угловой отражатель размещался в термоизолированном боксе 2. Между точками 1 и 2 луч лазера распространялся в пенопропиленовых трубах (3). Компьютер с аналого-цифровым преобразователем размещался в отапливаемом помещении 4, в котором также находился оператор. Вся аппаратура запитывалась от переносного генератора, обеспечивающего на выходе стабильное переменное напряжение величиной 220 В. Цифровая система регистрации лазерного деформографа регистрировала изменение расстояния между основным узлом интерферометра (точка 1) и угловым отражателем (точка 2) с точностью 0,3 нм. При длине измерительного плеча, равной 6 м, предельная чувствительность мобильного лазерного деформографа составляла величину

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,3 \text{ нм}}{6 \text{ м}} = 5 \cdot 10^{-11}.$$



Рисунок 4.11 – Береговой пункт наблюдения: 1 – помещение основного интерференционного узла мобильного лазерного деформографа; 2 – бокс отражателя; 3 – лучевод; 4 – лабораторное помещение

На расстоянии 3150 м от места постановки мобильного лазерного деформографа в точке с координатами $43^{\circ} 12,391'$ СШ и $131^{\circ} 52,984'$ ВД в соответствующий пропил во льду на глубину 12 м был спущен низкочастотный гидроакустический излучатель электромагнитного типа ГИ-1, который создавал в воде гармонические и сложные фазоманипулированные (М-последовательности) сигналы с центральной частотой 33 Гц. Вся дополнительная аппаратура излучающей системы располагалась в стоящем на льду микроавтобусе (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Станция гидроакустического излучения в Амурском заливе

Схема эксперимента приведена на рис. 4.13.

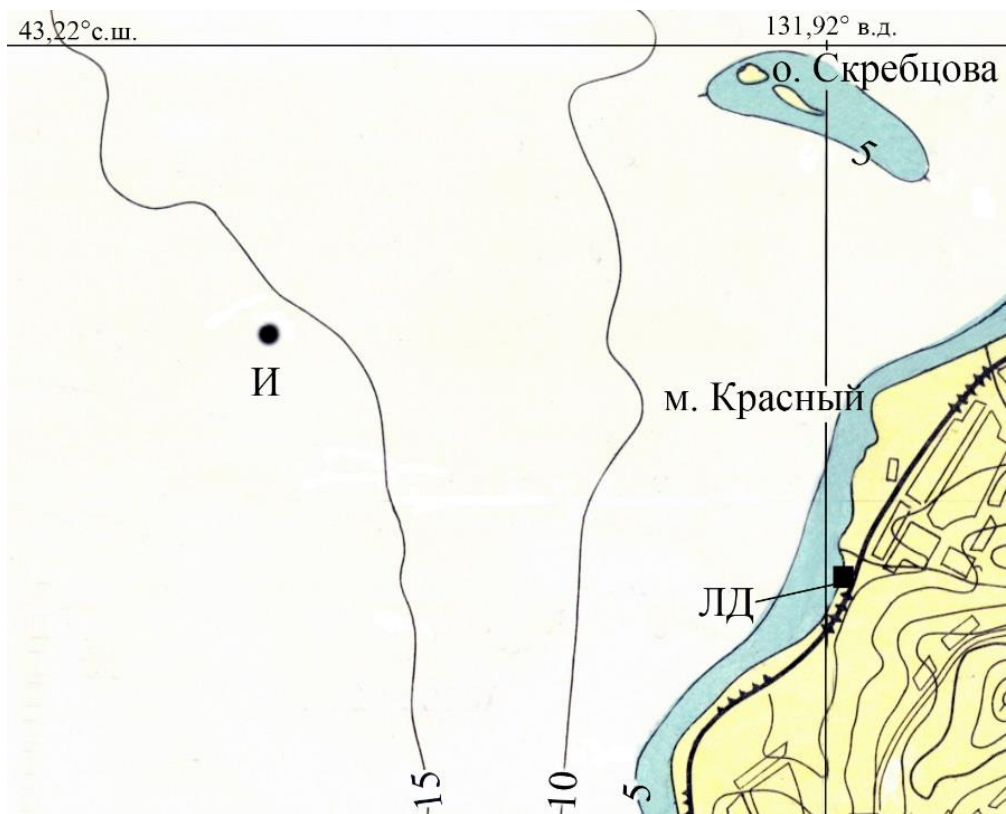


Рисунок 4.13 – Схема проведения эксперимента. И – излучатель; ЛД – мобильный лазерный деформограф.

Перед началом эксперимента на компьютере была построена модель сигнала для излучения, состоящая из тонового сигнала длительностью 300 с, паузой 30 с и одного фазоманипулированного сигнала. Излучающий пакет был общей длительностью 485 с. Дополнительно после каждой серии излучения отдельно выполнялось излучение одного фазоманипулированного сигнала. На рисунке 4.14 приведены динамические спектрограммы записей контрольного гидрофона и мобильного лазерного деформографа при работе гидроакустического излучателя.

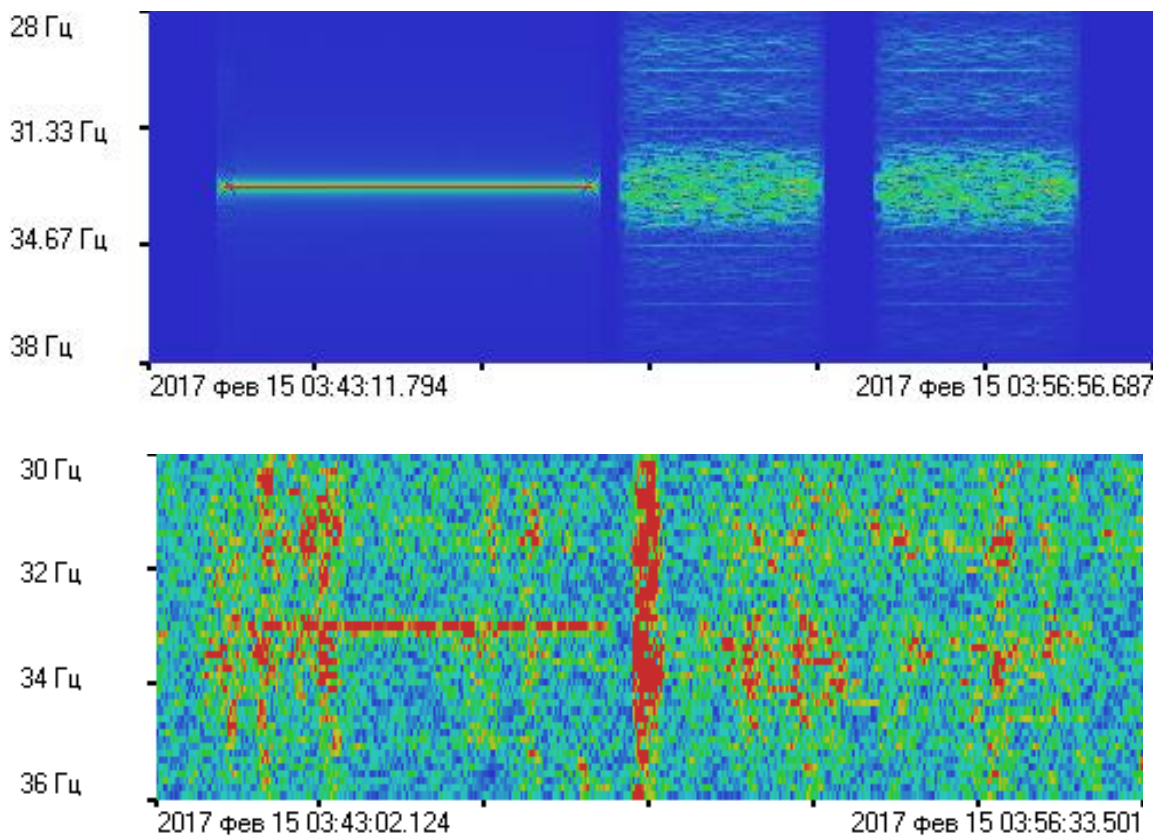


Рисунок 4.14 – Динамические спектрограммы излучаемого сигнала: а) контрольный гидрофон; б) мобильный лазерный деформограф.

Полученные записи контрольного гидрофона и мобильного лазерного деформографа были подвергнуты дополнительной обработке в лаборатории, которая сводилась к свертке записи контрольного гидрофона с записью лазерного деформографа. Один из результатов свертки представлен на рисунке. 4.15.

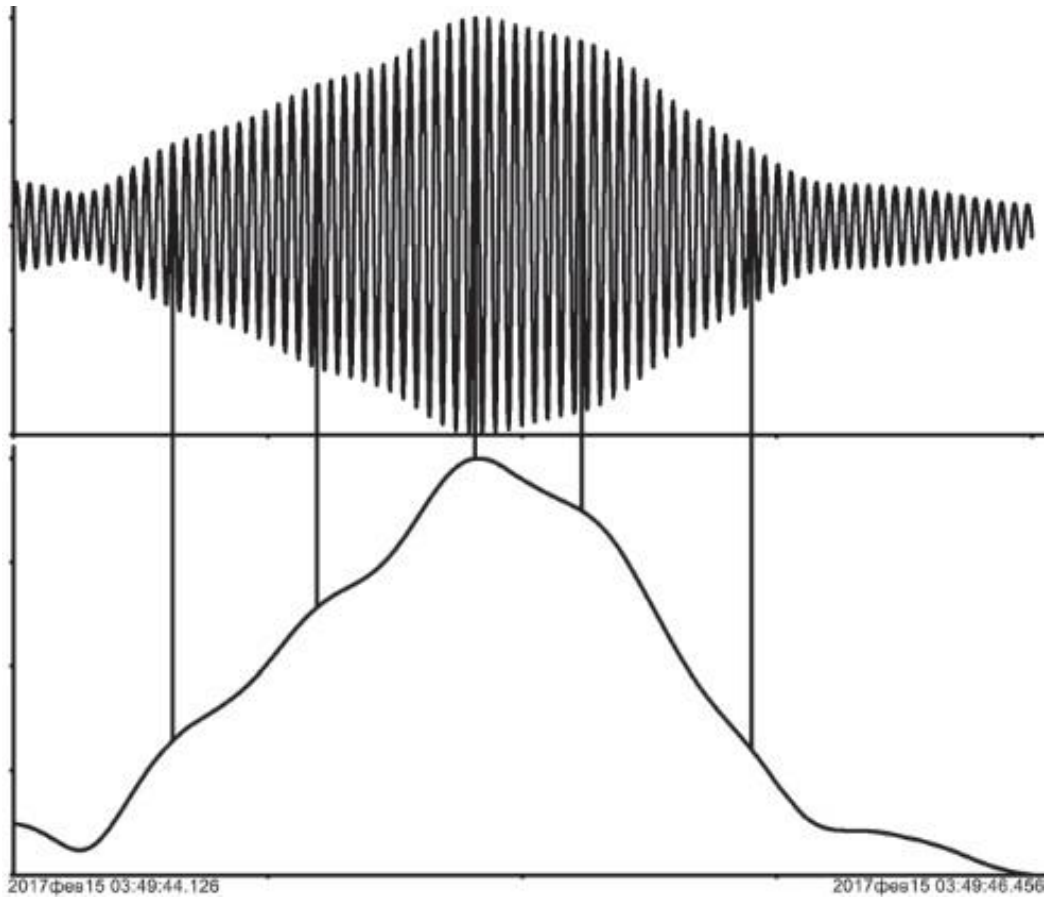


Рисунок 4.15 – Результат свёртки М-последовательности с данными мобильного лазерного деформографа. Зимний эксперимент.

Применение систем точного времени в излучающей системе и в мобильном лазерном деформографе позволило объективно оценить времена приходов зарегистрированных сигналов с точностью 1 мс. Уверенно было зарегистрировано пять приходов.

В мае 2017 г. эксперимент был повторен [134] при отсутствии ледяного покрова. Мобильный лазерный деформограф и низкочастотный гидроакустический излучатель располагались в тех же точках и работали в тех же режимах, что и в феврале 2017 г. В ходе дополнительной обработки полученных данных с применением низкочастотной фильтрации в каждой серии также было выделено по пять максимумов значительной амплитуды. На рисунке 4.16 приведен

результат обработки майского эксперимента, а в таблице 4.4 приведены сравнение результатов поиска корреляции сигналов.

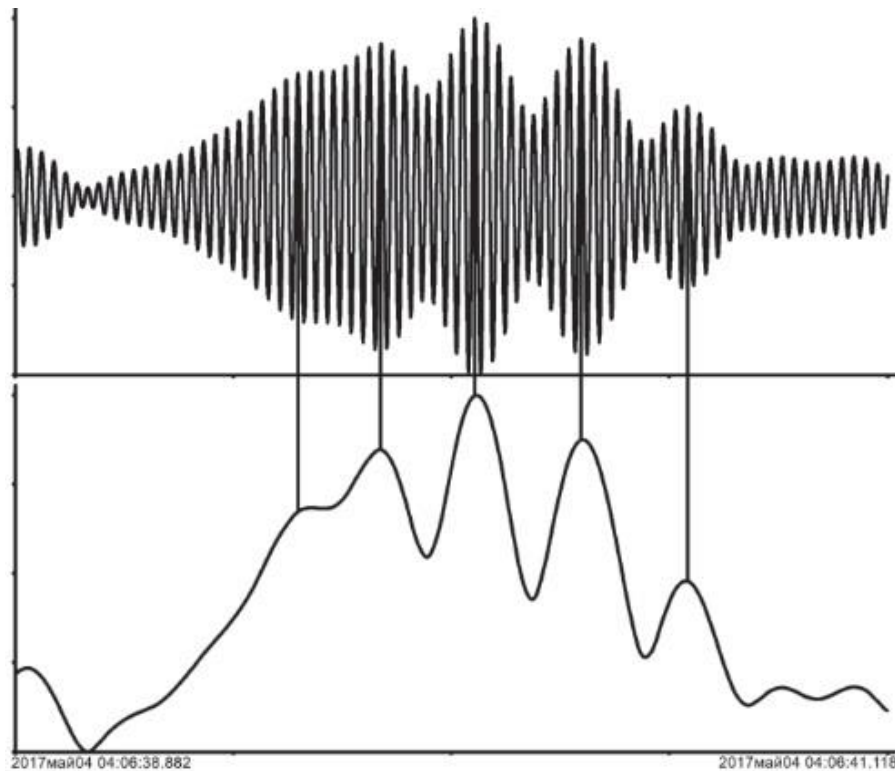


Рисунок 4.16 – Результаты свёртки данных мобильного лазерного деформографа с данными контрольного гидрофона. Весенний эксперимент.

Таблица 4.4. Результаты свёртки данных зимнего и весеннего экспериментов.

Месяц Излучения	Время начала излучения, UTC	Отсчет мах – 2	$\Delta t, c$	Отсчет мах – 1	$\Delta t, c$	Отсчет мах	$\Delta t, c$	Отсчет мах + 1	$\Delta t, c$	Отсчет мах + 2
Февраль	03:49:44.987	560715	0.268	560983	0.331	561314	0.241	561555	0.422	561977
Май	04:06:38.671	477605	0.212	477817	0.242	478059	0.27	478329	0.273	478602

С целью интерпретации полученных экспериментальных данных приведем модель верхнего слоя морской земной коры на трассе «излучение-прием» (рисунок 4.17), построенную по данным скважинного бурения недалеко от гидроакустической трассы и данным сейсмоакустических исследований,

выполненных с помощью спаркера и высокочастотного профилографа «GeoPulse Subbottom Profiler» [116].

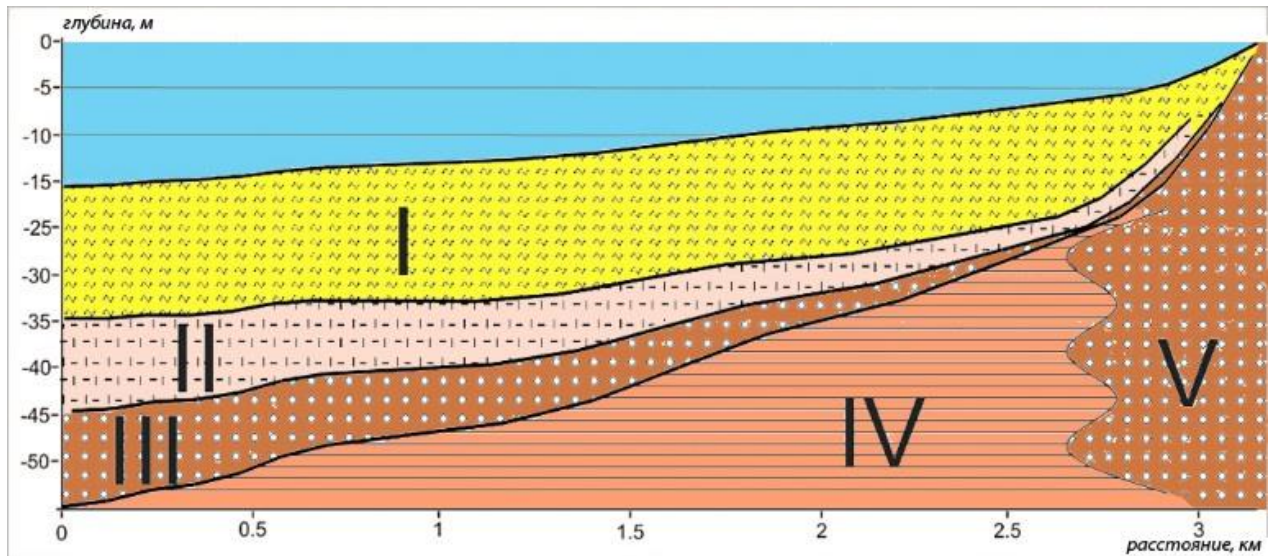


Рисунок 4.17 – Геологический разрез «излучение-прием»: I – осадочный слой, состоящий из илов пелитовых и илов алевритовых; II – осадочный слой песков; III – гравийно-галечный слой; IV – пестроцветные глины; V – Владивостокская свита.

По результатам изучения керна определены состав и возраст донных осадков и восстановлены условия их формирования. Верхний осадочный слой состоит из илов пелитовых и илов алевритовых с примесью щебня и обрывков водорослей до глубины около 35 м. Далее слой песка мощностью 10 м, гравийно-галечный слой мощностью около 15 м. На глубине более 59 м находится слой пестроцветных глин. Слои песка и гравийно-галечный имеют локальное расположение по Амурскому заливу в углублениях в слое пестроцветных глин. Мощность слоя пестроцветных глин не установлена. Однако по геофизическим данным региона южная часть депрессии залива заполнена кайнозойскими отложениями мощностью более 2500 м, залегающими на верхнепермских вулканогенно-осадочных породах и прорывающих их гранитоидами. Пески и гравийно-галечный слой обнажаются на берегу, где была установлена приемная станция. По данным геологических

исследований на берегу верхние осадочные слои представлены Владивостокской свитой, состоящей из андезитов, дацитов, риолитов и их туфов, туффиты, песчаники, алевролиты, туфоконгломераты и углистые аргиллиты.

Учитывая то, что длина излученной гидроакустической волны примерно равно 45 м, т.е. половина гидроакустической волны равна 22,5 м, то по воде, при изменении глубины моря с 15 до 0 м, сигнал до берега практически не распространяется. Учитывая малую толщину слоев по сравнению с расстоянием между излучателем и приемником, можно грубо считать, что все сигналы, соответствующие каждому приходу, прошли расстояние минимум 3200 м. Тогда в зимнем эксперименте эти приходы соответствуют наименьшим скоростям около 2600, 2140, 1750, 1550 и 1280 м/с. В весеннем эксперименте эти приходы соответствуют скоростям около 2250, 1950, 1700, 1480 и 1300 м/с. Учитывая то, что в каждом эксперименте мы выделили по пять приходов сигналов, то мы с полным основанием можем считать, что излученный гидроакустический сигнал распространяется в виде поверхностных волн рэлеевского типа по границам слоев «вода-слой I», «слой I – слой II», «слой II – слой III», «слой III – слой IV» «слой IV – слой V», скорости которых с глубиной увеличиваются. Мы рассчитали только минимальные усредненные скорости приходов, которые могут только увеличиться при более сложных путях распространения излученных сигналов.

Для получения адекватной картины в зимний период наблюдения эксперимент был повторен в феврале 2018 г. Все приборы располагались в тех же точках и работали в тех же режимах, что и в феврале и мае 2017 г. На рисунке 4.18 приведен вид одной из сверток излученного сигнала с принятым сигналом. По временам прихода и количеству приходов полученные результаты подтверждают результаты 2017 г.

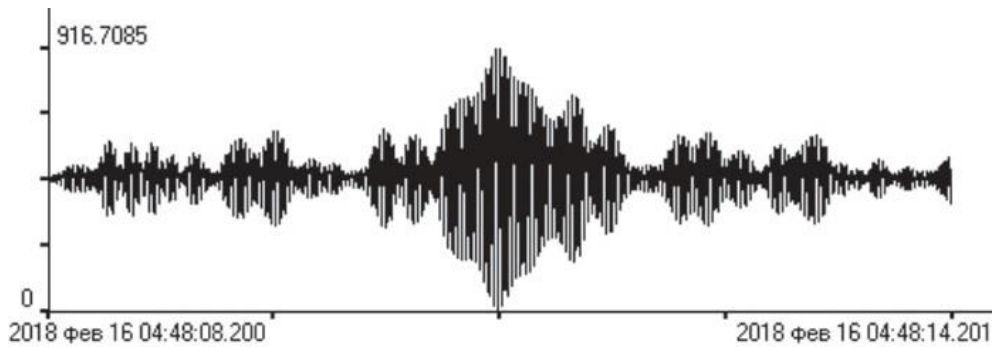


Рисунок 4.18 – Результат свертки данных мобильного лазерного деформографа с данными контрольного гидрофона. Зима 2018 г.

При получении комплекса набора данных исследуемой шельфовой области моря при решении обратной инверсионной задачи можно получить модель земной коры идеально совпадающей с реальной моделью земной коры. Одна из технологий проведения подобных экспериментов связана с применением буксируемых низкочастотных гидроакустических излучателей, непрерывно излучающих фазоманипулированные сигналы с временной привязкой.

4.6. ПРИМЕНЕНИЕ БУКСИРУЕМОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В РАБОТАХ ПО ТОМОГРАФИИ МОРСКОГО ДНА

Первые исследования с применением буксируемого излучателя по исследованию томографии морского дна были проведены в летнее время в б. Витязь залива Посьета [135].

В качестве буксируемой системы был применен гидроакустический излучатель ГИ-1. Для обеспечения его буксировки был разработан новый балансный блок со стабилизирующими поверхностями из полиметилметакрилата, в который подвешивался сам излучатель. Конструкция обеспечивала устойчивое положение по горизонтали излучателя при возможной скорости его буксировки до

3 узлов в час. На рисунке 4.19 приведена сцена подготовки буксируемого излучателя к спуску.



Рисунок 4.19 – Подготовка буксируемого излучателя ГИ-1 к спуску.

Запись контрольных гидрофонов велась на линейный вход звуковой карты ноутбука NEC PC-VA75H с максимальной чувствительностью. В ходе эксперимента судно двигалось по траектории, приведённой на рис. 4.20. Приём излучённого сигнала осуществлялся в воде контрольным гидрофоном, а на берегу тремя лазерными деформографами, обозначенными на рисунке обозначением ЛД. Судно непрерывно находилось в движении по заранее определенной траектории, по которой судно удалялось и затем приближалось вдоль оси лазерного деформографа.

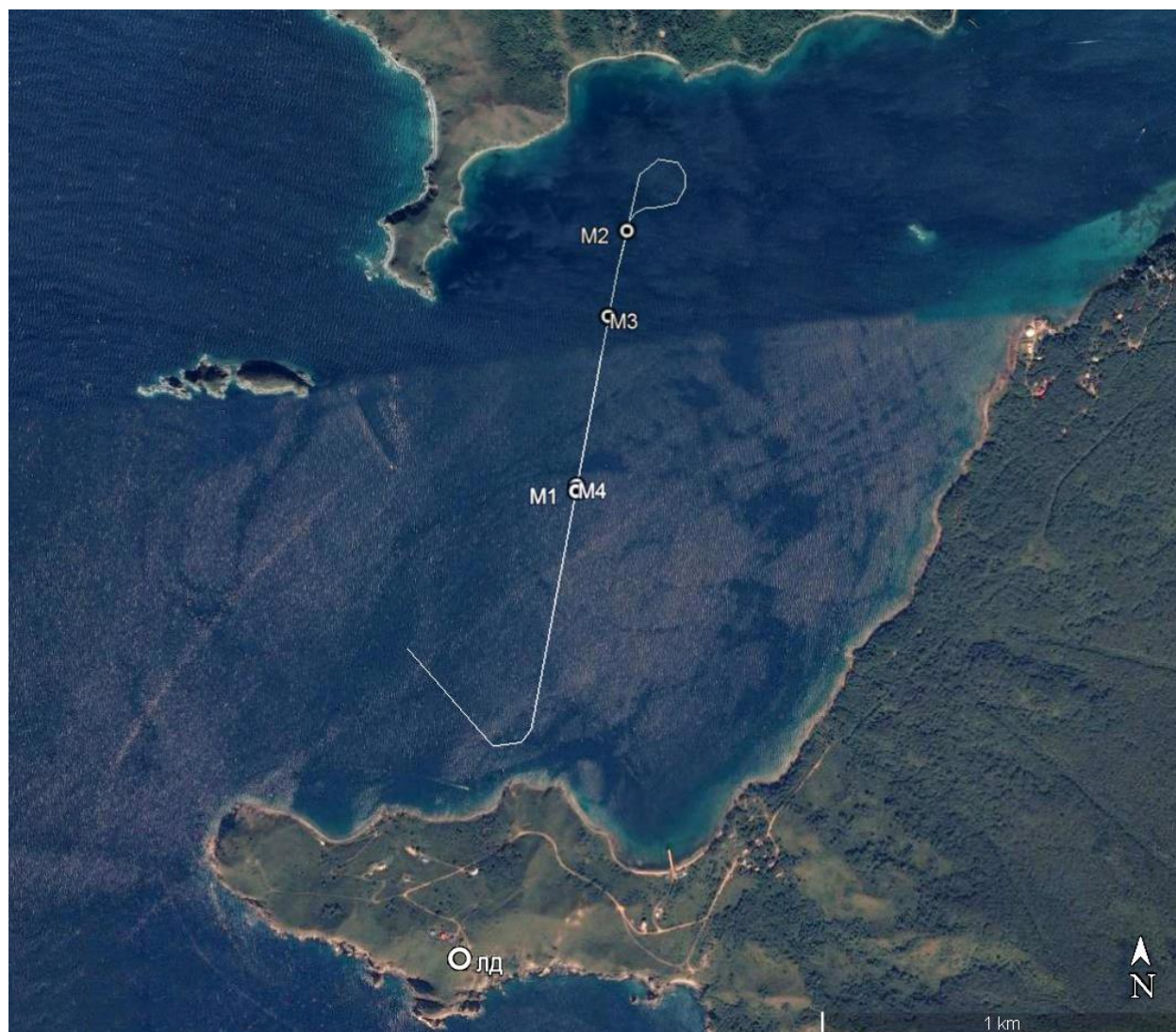


Рис. 4.20 – Карта экспериментального полигона. М1, М2, М3, М4 – точки начала излучения М-последовательности. ЛД – система лазерных деформографов.

Полученные экспериментальные данные заносились в базу экспериментальных данных для последующей обработки и анализа. На первом шаге обработки выполнялся спектральный анализ для визуального представления регистрации излучённых сигналов приёмной аппаратурой. На втором шаге выполнялась свёртка сигналов, принятых контрольным гидрофоном с сигналами, зарегистрированными тремя лазерными деформографами, расположенными на м. Шульца.

После свёртки экспериментальных данных, записанных контрольным гидрофоном, с экспериментальными данными трёх лазерных деформографов было установлено, что из точек излучения М1, М2, М3 и М4 до приёмных систем, расположенных на м. Шульца, пришло, в основном, три сигнала с некоторой задержкой друг от друга (см. таблица 4.5).

Таблица 4.5. Результаты свёртки.

Точка	Деформограф	Расстояние до точки начала излучения, м	Время начала излучения UTC (гидрофон)	Отсчет мах – 1	Δt , с	Отсчет мах	Δt , с	Отсчет мах + 1
М1	МД	1328	23:01:28.374	1471787	0.332	1472119	0.274	1332151
М1	ЗВ	1304		1471701	0.181	1471882	0.121	1472003
М1	МД	1378		1472000	0.152	1472152		
М2	МД	2068	23:07:58.269	1862770	0.180	1862950		
М2	ЗВ	2041		1862366	0.180	1862546	0.120	1862666
М2	СЮ	2118		1862334	0.617	1862951	0.182	1863133
М3	МД	1822	23:14:25.625	2249260	0.150	2249410		
М3	ЗВ	1797		2250412	0.212	2250624		
М3	СЮ	1872				2249473	0.179	2249652
М4	МД	1344	23:18:13.603	2476924	0.211	2477135	0.151	2477286
М4	ЗВ	1316		2476908	0.240	2477148	0.181	2477329
М4	СЮ	1394		2476956	0.151	2477107	0.181	2477288

Было предположено, что два прихода обусловлены двумя волнами рэлеевского типа (затухающая и не затухающая), распространяющиеся по границе «вода-дно», а третий приход связан с приходом волны Стоунли, распространяющейся по границе «осадки-гранит» (или Лява, распространяющейся по границе «осадки-полубесконечное гранитное пространство»). Предварительно построенная модель структуры морского дна приведена на рис. 4.21. Выбрано большое превышение над шумом, поэтому не все приходы отождествлены.

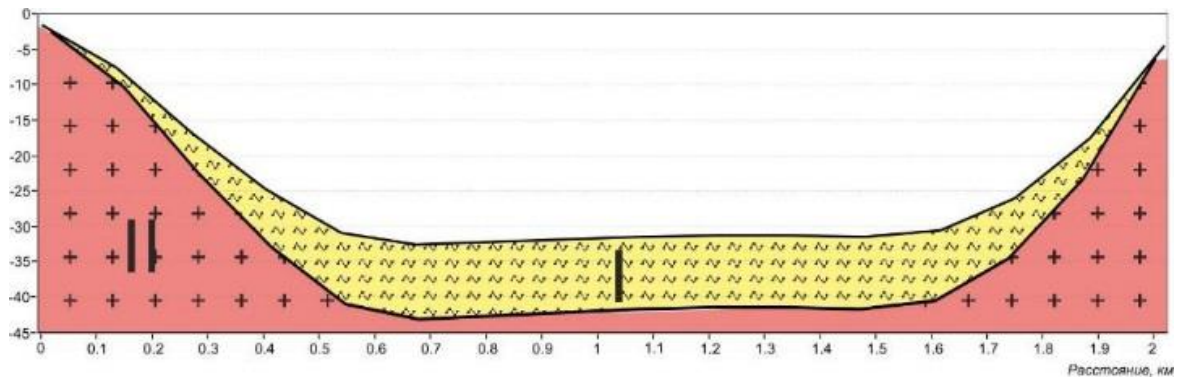


Рисунок 4.21 – Разрез земной коры бухты Витязь по трассе излучения.

При более точном моделировании необходимо учитывать, что по мере излучения расстояние от точки излучения до деформографов менялось (скорость буксировки составляла от 2 до 2.1 м/с), а также расположение устоев лазерных деформографов и свойства пород, на которых они расположены, поскольку один из устоев лазерного деформографа СЮ1 расположен на гранитной скале, а второй на суглинке. Один устой лазерного деформографа СЮ2 расположен на суглинке, а другой устой на песчаной подушке, которая лежит на суглинке. Оба устоя лазерного деформографа ЗВ расположены на суглинке. Работы были продолжены со стороны открытой части Японского моря на большем удалении от измерительного полигона.

Если методика излучения в бухте Витязь заключалась в приближении и удалении от 52,5-метрового берегового лазерного деформографа (с учетом его оси направленности), то в открытой части Японского моря применялась методика перемещения низкочастотного гидроакустического излучателя по траектории окружности, равноудаленной в каждый момент времени от берегового измерительного комплекса [136, 137].

План экспериментальных исследований заключался в проведении непрерывной серии излучения гидроакустического сигнала при движении судна по круговой траектории относительно береговой приемной системы с одинаковым удалением от неё и регистрация сейсмоакустического сигнала

разнонаправленными компонентами лазерных деформографов. Эксперимент проводился 5 августа 2017 г. По сути, во время эксперимента, представленного в главе 3, решалась еще одна задача. На рис. 4.22 приведена схема движения излучателя относительно измерительного комплекса. Точки М1-М16 указывают последовательность и местоположение начала генерации М-последовательности очередного пакета сигнала.

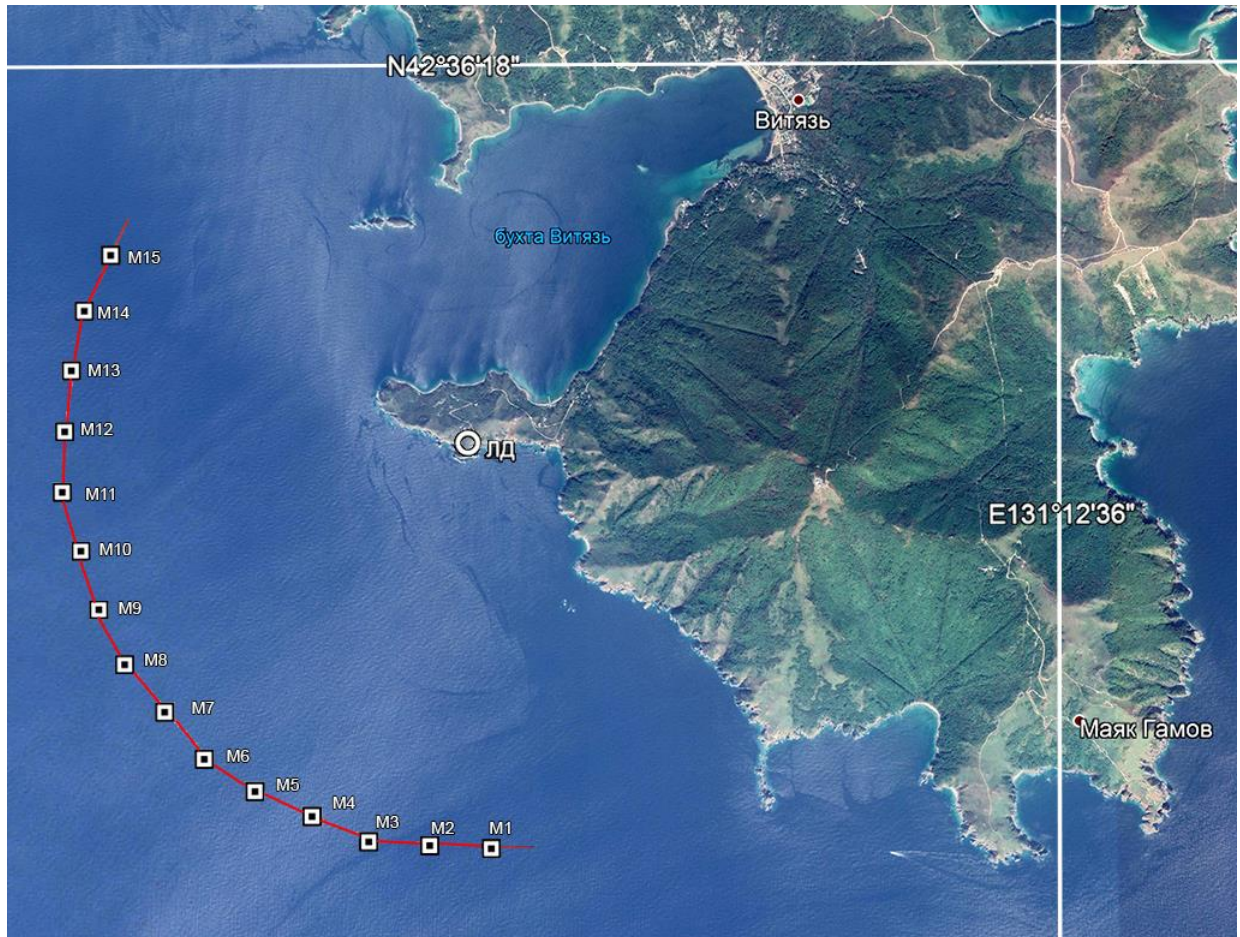


Рисунок 4.22 – Карта схема проведения эксперимента 05 августа 2017 г.

Сигнал излучения носил циклический характер. Первоначально проводилось тональное излучение в течение 300 с и после паузы 30 с излучалась М-последовательность, длительностью 155 с. После паузы 30 с цикл излучения повторялся. На расстоянии 1 м от геометрического центра гидроакустического излучателя был прикреплен контрольный гидрофон для регистрации возможных вариаций мощности работы излучателя. Синхронные динамические

спектрограммы гидроакустических и сейсмоакустических сигналов, зарегистрированных контрольным гидрофоном и береговыми лазерными деформографами в рамках эксперимента, были приведены на рисунке 3.25

На рис. 4.23 приведены результаты свертки результатов записи контрольного гидрофона и лазерных деформографов.

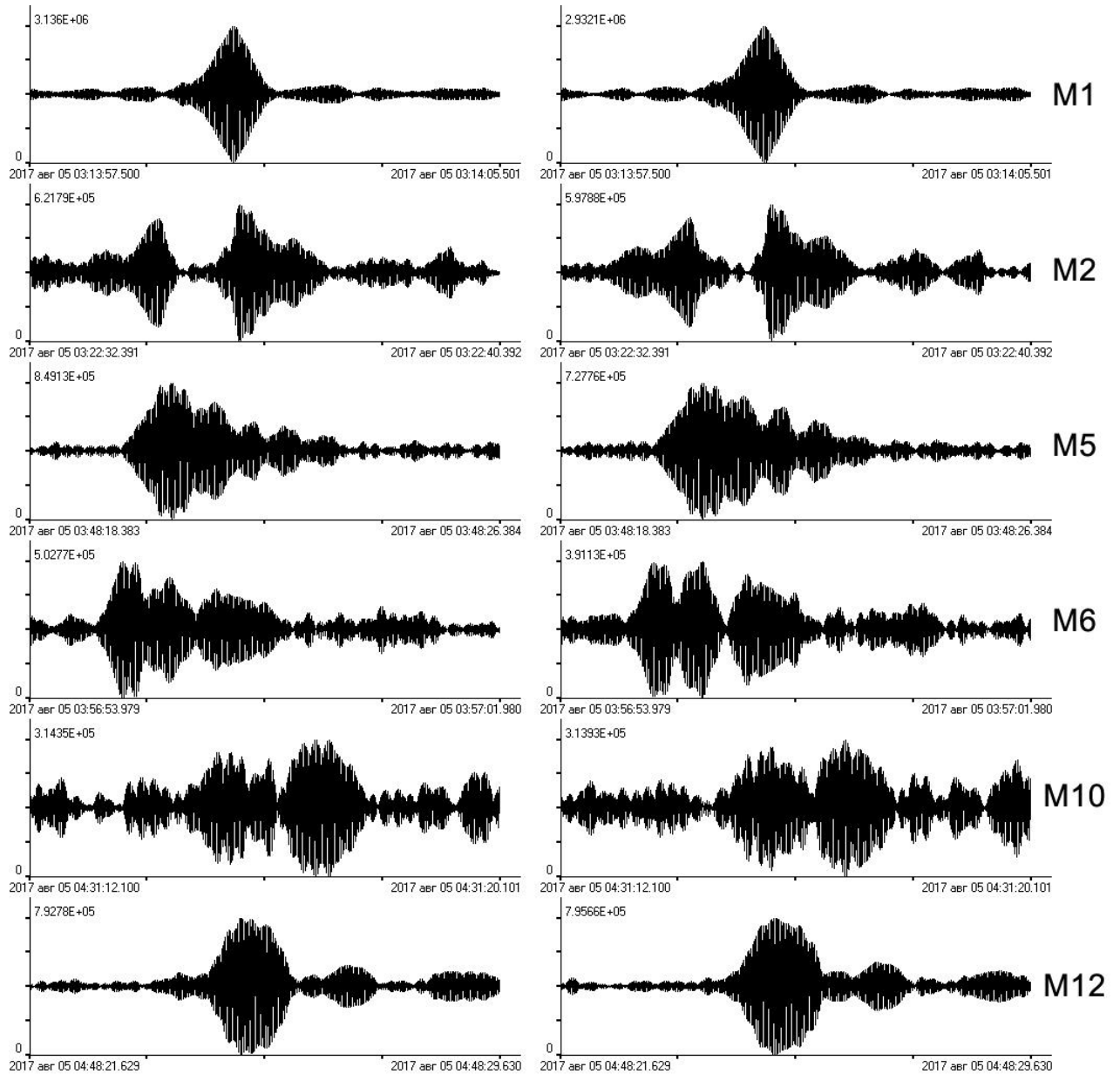


Рисунок 4.23 – Свертки сигналов, принятых лазерными деформографами «север-юг» (левый столбец) и «запад-восток» (правый столбец) с сигналами контрольного гидрофона на станциях излучения M1, M2, M5, M6, M10, M12.

Сигналы зарегистрированы лазерными деформографами «север-юг» и «запад-восток», с сигналом записанным контрольным гидрофоном в разных точках излучения (взяты выборочно). В правой части рисунка приведены названия соответствующей М-последовательности.

При анализе полученных результатов были сделаны следующие выводы: 1) Свертки данных лазерного деформографа «север-юг» с данными контрольного гидрофона идентичны сверткам данных лазерного деформографа «запад-восток» с данными контрольного гидрофона, что говорит только о том, что все получилось идеально. 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. На рисунке 4.24 представлены модели земной коры, полученные при «ручной» обработке полученных простейших результатов свертки.

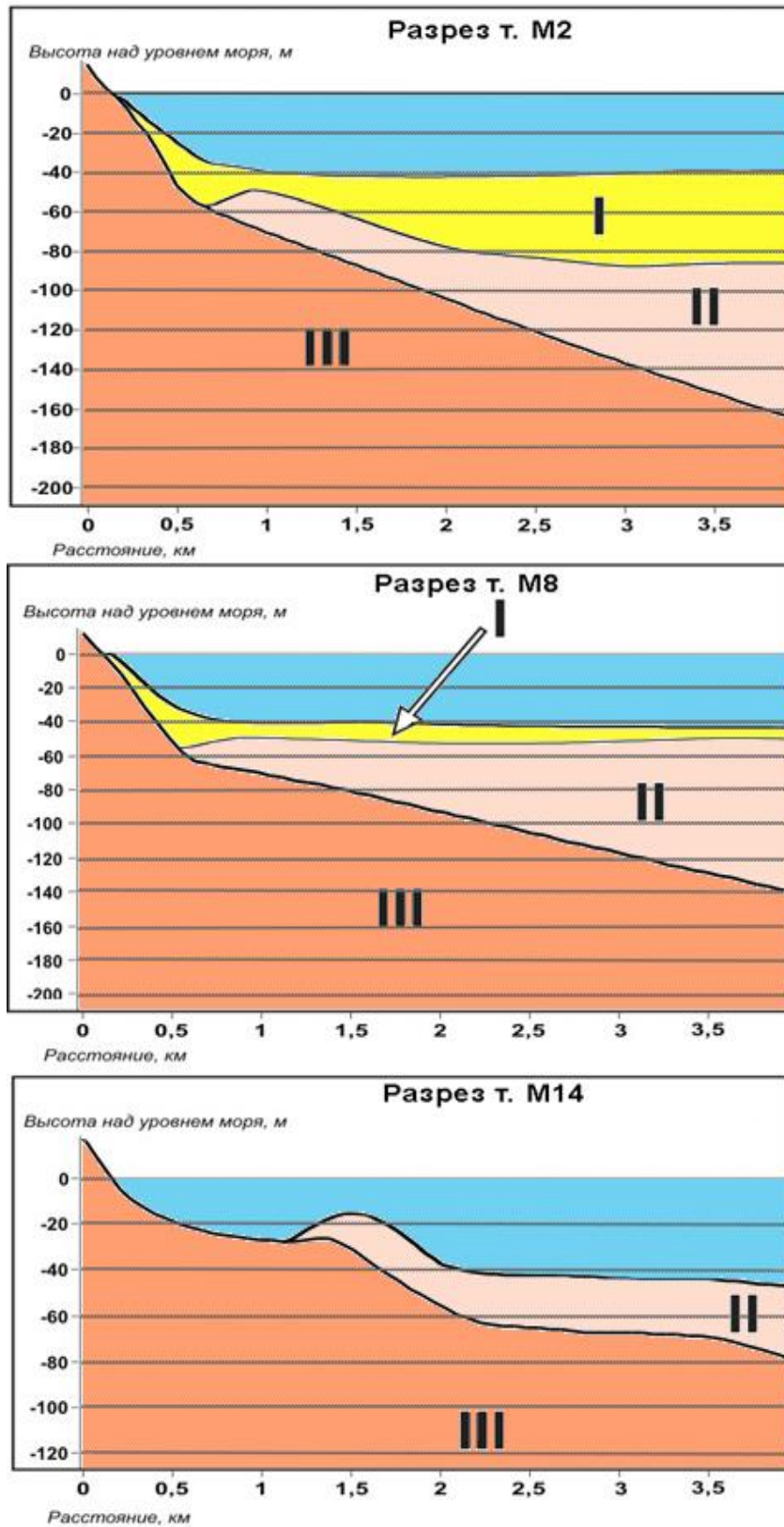


Рисунок 4.24. Модели верхнего слоя морской земной коры по трассе излучения гидроакустического сигнала

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.

4.7 ВЫВОДЫ

На основе применения береговых лазерных деформографов и широкополосных низкочастотных гидроакустических излучателей, работающих в частотных диапазонах 19-26 и 25-40 Гц, разработана и создана технология изучения структуры и состава морской земной коры шельфовых зон вплоть до границы Мохоровичича, предназначенная также для ее применения на акваториях, покрытых льдом, без его разрушения.

По экспериментальным данным, полученным в различных районах шельфа Японского моря в теплые и холодные времена года построены модели исследуемых участков морской земной коры вплоть до фундамента с определением основных параметров распространяющихся волн на трассе «излучение-прием».

ГЛАВА 5. ТАЙФУНЫ И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ «ГОЛОС МОРЯ»

Среди катастрофических процессов и явлений Земли тропические циклоны занимают далеко не последнее место, но учитывая колоссальный ущерб экономике стран при их прохождении по населенным областям с момента зарождения в тропических областях до полного разрушения в северном полушарии земного шара, а также частоту возникновения, можно их отнести к одним из самым катастрофических явлений Земли. Тропические циклоны, зарождающиеся в северо-западной части Тихого океана, называются тайфуны. Страны, через территории и акватории которых проходят тропические циклоны, нуждаются в хорошем долгосрочном и краткосрочном прогнозе зарождения, развития и распада тайфунов. В связи с интересом по уменьшению вероятного воздействия тайфунов через физические процессы, понижающие его энергоёмкость, остро стоит задача по развитию дистанционных методов мониторинга первичных и вторичных явлений и процессов, колебаний и волн, возникающих в тропических циклонах. Этот интерес связан с решением ряда задач по выявлению разномасштабных процессов и явлений в различных направлениях науки, от гидрофизических до биологических.

Приоритетные задачи по изучению тропических циклонов (тайфунов) в современных исследованиях отводятся контактными (буйковые станции, региональные метеостанции и т.п.) и дистанционным методам, связанным со спутниковым мониторингом [138]. В работе [139] рассматриваются механизмы зарождения и интенсификации таких опасных вихревых явлений, как тропические циклоны, а также процессы их электромагнитного взаимодействия с ионосферой Земли. При анализе различных экспериментальных данных были получены новые результаты. Так, например, в работах [140, 141] на основании анализа экспериментальных данных о вертикальных профилях температуры в районе прохождения урагана Катрина и вариаций потоков галактических космических

лучей установлена взаимосвязь изменений температуры на уровне тропопаузы с изменением уровня ионизации атмосферы космическими лучами.

Но данные методы могут быть не совсем надёжными. Контактные методы подвержены большим ошибкам из-за ограниченного динамического диапазона или малой чувствительности применяемой аппаратуры. Спутниковый мониторинг даёт хорошие результаты при изучении процессов, протекающих в динамически слабоактивных средах. Но это нельзя точно утверждать для зон перехода геосфер, где преобладает резкое изменение глубин, чередование островов, морей и части материков, где динамические процессы протекают крайне бурно, и как раз в этих зонах и, в основном, проходят тайфуны. Спутниковые методы исследования подвержены большим ошибкам и нуждаются в коррекции по результатам наземных наблюдений. Таким образом, при изучении динамических процессов, происходящих в данных зонах, необходимо опираться не только на спутниковые методы исследований различных процессов, но и на дистанционные методы мониторинга земного базирования, в основе которых могут быть гидрофизические (распространение возмущений в водной среде), либо сейсмоакустические (распространение возмущений в океанической земной коре с выходом в земную кору зоны перехода) методы исследования.

К гидрофизическим возмущениям, возникающим в зоне действия тропического циклона и распространяющимся на значительные расстояния, необходимо отнести морские поверхностные ветровые волны или волны зыби, а также нелинейные образования в виде одиночных волн различной амплитуды, скорость которых может быть на порядок больше скорости волны зыби. Характеристики морских волн, такие как амплитуды, периоды, направления движения, зависят от скорости ветра, продолжительности его воздействия на акваторию, а также характеристик этой акватории, таких как её площадь, глубины. Ветровые волны, образуемые тайфунами, имеют период в диапазоне от 3 до 30 с. По дисперсионным характеристикам ветровых волн, вышедших из зоны действия тайфунов, можно вычислить основные энергетические характеристики тайфунов и определить пеленг на область генерации поверхностных ветровых волн. Кроме

прогрессивных морских ветровых волн, которые можно использовать для дистанционного гидрофизического метода мониторинга тайфунов, образуются стоячие ветровые волны, которые мало информативны для гидрофизического мониторинга.

Прогрессивные морские ветровые волны при своём движении взаимодействуют с дном на малых глубинах, начиная с глубин, равных примерно половине длине ветровой волны, и образуют первичные микросейсмы, периоды которых соответствуют периодам прогрессивных морских волн [142]. Стоячие морские волны генерируют в земной коре вторичные микросейсмы, период которых равен половине периода прогрессивных морских волн [143]. Стоячие морские ветровые волны могут образовываться в тыльной части циклона (тайфуна), в шельфовых областях при отражениях прогрессивных морских волн, а также в тыльной части островов из-за рефракционных процессов прогрессивных морских волн. Обобщенное описание генерации микросейсм было выполнено Хассельманом [144]. Соответствующие возмущения, распространяющиеся в атмосфере, были названы микробаромами [145], физическим механизмом генерации которых является нелинейное взаимодействие полей морских ветровых волн, проявляющиеся как раз в период изменения направления воздействия воздушных масс на поверхность моря при движении вихря над экваторией. В иностранной литературе понятие микробаром достаточно распространено и используется для многих колебательных инфразвуковых процессов. довольно популярной является так же сфера изучения, так называемых, микробаром, в диапазоне от 0.15–0.3 Гц, процессы образования микробаром в диапазоне 0.15–0.3 Гц был описан в работах [145, 146] как генерация посредством столкновения поверхностных волн океана с равной длиной волны, а также было использовано правило Бернулли для объяснения распространения образованных ими микросейсм по морскому дну до наземных систем наблюдения. Более расширенно теория генерации этих микросейсм с использованием двухмерной модели генерации волн описана в работе [147].

В работе [148] было показано, что микробаромы и вторичные микросейсмы имеют один источник, которым изначально считалось место с наибольшей скоростью ветра в циклоническом вихре, т. е. центральная часть вихря. Но в результате дальнейших исследований [149-151] оказалось, что место возникновения вторичных микросейсм и микробаром обычно совпадает с тыловой областью циклонических образований и не связано с их центральной областью.

В работе [152] показано, как на основе полученной информации по вариациям параметров первичных микросейсм при решении инверсионной задачи с использованием обобщённых дисперсионных уравнений [153], анализе нелинейных составляющих и эффекта Доплера, определить скорость и направление движения тайфуна в конкретной точке с последующим построением его траектории. Мониторинг, построенный на данном анализе, можно отнести к сейсмоакустическим методам мониторинга. Но учитывая то, что скорость распространения микросейсм минимум на порядок выше скорости поверхностных ветровых волн, предпочтение мы вынуждены отдать сейсмоакустическому мониторингу. Кроме того, затухание микросейсм незначительное, поэтому возможен данный мониторинг практически на любых планетарных расстояниях при использовании современных высокочувствительных средств, например, лазерных деформографов [150].

Создание сейсмоакустических методов мониторинга может частично базироваться на информации, получаемой по зонам образования «прибойного шума» в частотном диапазоне от 1 до 5 Гц, который образуется вблизи морских побережий и связан с взаимодействием морских ветровых волн [154, 155]. В работах [156, 157] показано, что появление инфразвука связано с разрушением (коллапсом) морских волн в прибрежной зоне, и его параметры зависят от топографических и батиметрических характеристик этой зоны, а амплитуда данных колебаний прямо пропорциональна амплитудам океанских ветровых волн. В работе [158] назвали инфразвук в диапазоне от 1 до 5 Гц «прибойным шумом», который генерируется вдоль достаточно протяженной береговой линии и может распространяться на значительные расстояния от морского побережья.

Очень интересны инфразвуковые возмущения в частотном диапазоне 5-10 Гц, возникающие при взаимодействии морского волнения с вихревой составляющей тропических циклонов, и, названные впоследствии «голосом моря», которые впервые обнаружил В.В. Шулейкин [159]. В его работе эти инфразвуковые колебания в и проведены первые интерпретации механизмов появления этих инфразвуковых колебаний.

Первые теоретические исследования, описывающие механизмы возникновения «голоса моря» при обтекании волн ветровым потоком, были опубликованы в работе Н.Н. Андреева [160], в которой обтекание ветром гребней волн моделируется обтеканием цилиндра. Данное допущение считается довольно грубым, хоть и совпадает по порядку полученной величины с экспериментальными данными В.В. Шулейкина. Впоследствии появились другие работы, в которых рассматривается механизм возникновения инфразвука при обтекании воздушным потоком взволнованной поверхности моря. Так, в 2013 г. А.Г. Семенов [161] предлагает и более тщательно описывает физическую модель генерации инфразвуковых волн в диапазоне 2.1–7.5 Гц, где возникновение инфразвуковых волн связывается с обтеканием воздушным потоком трехмерных впадин морской поверхности при сильном шторме. Но при этом экспериментальных наблюдений акустических волн такого диапазона частот в натуральных условиях в мире до сих пор выполнялось достаточно мало и в основном их результаты наблюдения носили описательный характер.

В статье В.Г. Перепёлкина [162] в 2015 г. описываются колебания высокочастотного инфразвука в диапазоне 2–16 Гц, частично соответствующего диапазону «голоса моря», наблюдавшихся в акватории Черного моря. Исследовались различные параметры зарегистрированного инфразвукового сигнала, и на основании метеорологических данных были сделаны предположения, что для объяснения наблюдаемых инфразвуковых сигналов необходимо исследовать механизм излучения инфразвука в атмосферу стоячими поверхностными морскими волнами, образующимися в результате нелинейного

взаимодействия поверхностных ветровых морских волн (или волн зыби), распространяющихся в противоположных друг к другу направлениях. В работе [163] предложен механизм образования сигналов «голос моря» как результат взаимодействия разнонаправленных поверхностных волн, генерируемых при повороте направления ветра в атмосферном вихре над морем, вызывающих нелинейное взаимодействие поверхностных волн, распространяющихся в противоположных друг к другу направлениях с образованием второй гармоники в виде стоячей поверхностной волны.

Роль циклонов в образовании инфразвуковых колебаний вследствие возникновения интерференции волн различного направления и стоячих волн подробно рассматривается в работе [164]. В своей работе в 2016 г. А.С. Запевалов проводит анализ генерации в водную среду инфразвукового излучения морскими поверхностными волнами. Анализ проводится для ситуации, когда источником инфразвука являются поверхностные волны с частотами, близкими к частотам доминантных волн [165].

В 2014 г. Ф. Блом в своей работе [166] представил модель генерации и распространения микробаром на расстоянии от центра циклона в горизонтальной плоскости. Экспериментальные данные наблюдения микробаром в период прохождения урагана Эрнесто были представлены в работе [167].

Соответственно в выполненных ранее работах появление различных колебаний инфразвукового диапазона связано с несколькими совпадающими гидрометеорологическими факторами, вызванных крупными циклоническими образованиями. Повышенный интерес к данным инфразвуковым возмущением может быть связан с возможным их влиянием на психофизическое состояние человека [168].

Сам по себе атмосферный сигнал «голос моря» не имеет перспектив для его использования в дистанционном мониторинге, но микросейсмический сигнал «голос моря» имеет колоссальные перспективы для его использования в дистанционном микросейсмическом мониторинге [169]. Покажем зависимость

данных микросейсмических колебаний от параметров движения тайфунов в близлежащей акватории и возможность их регистрации лазерными деформографами. Определим зависимость и корреляцию микросейсм «голос моря» от других микросейсм, а также зависимость от метеорологических условий в точке их наблюдения.

Принимая во внимание, что микросейсм «голос моря» при своем распространении должны относиться к поверхностным волнам, то изучим возможность определения области генерации данных колебаний по данным двухкоординатного лазерного деформографа.

Также одним из представленных результатов стало слишком раннее прекращение предупреждения опасности тропических циклонов международными метеорологическими агентствами, в то время, когда они еще сохраняют свою структуру и разрушительную силу.

Для достижения всех результатов дополнительно использовались архивы метеорологических и спутниковых данных [170, 171], а также проводилось сравнение с модельными данными генерации ветра в приповерхностной части моря [172], находящихся в открытом доступе.

5.1. ТАЙФУНЫ: КАТЕГОРИИ И ТРАЕКТОРИИ

Траектории тайфунов в точности никогда не повторяются, но зачастую они имеют похожие ветви своего распространения. По траектории перемещения тайфуны делятся на группы. Одни тайфуны уходят на материк и над ним заполняются и прекращают свое существование. Большинство же тропических циклонов возникают в Тихом океане и имеют обратную ветвь перемещения, обладающей параболическими характеристиками. Небольшая часть тайфунов стремящихся выйти на материк, но при выходе на его территорию не заполняются, а начинают перемещение в северо-восточном направлении, смещаясь в дальнейшем к берегам Японии или пересекая Корейский полуостров. При этом

варианте движения циклонического вихря циклон активно воздействует на акваторию Японского моря. При этом после пересечения циклоническими вихрями продолжительного участка суши, будь это материковая часть Китая при перемещении тайфуна Чабя в июне-июле 2022 г. или территория Корейского полуострова (тайфуны Данас, 2019 г., Чан-хом 2015 г.), потерявший силу тропический циклон вновь набирает силу в результате подпитки значительно нагревающимися в летний период поверхностями морей северо-западной части Тихого океана. При этом ведущие метеорологические агентства перестают определять тропический циклон как тайфун, переводя его в разряд тропического циклона до ураганной силы и не принимая во внимание его увеличивающуюся мощность даже на кратковременный период времени.

Покажем это на примере прохождения тайфуна Чан-хом в период с 13 июля 2015 г [173, 174]. На рис. 5.1 приведена траектория перемещения тайфуна Чан-хом до перевода его в разряд тропической депрессии.



Рисунок 5.1 – Траектория перемещения тайфуна Чан-Хом до снижения его категории до тропической депрессии.

Метеорологические агентства прекратили сопровождение тайфуна Чан-хом в 00:00 13 июля 2015 г. переводя его в разряд внетропического циклона. На схеме приведен последний участок траектории центра тайфуна, на основе данных Joint Typhoon Warning Center NOAA, построенный с использованием шкалы Саффира-Симпсона. Шкала используется с 1973 года и основывается на показаниях скорости ветра в циклоне, включая оценку штормовых волн. По шкале Саффира-Симпсона тайфуны делятся на пять категорий: 5 категория – максимальная скорость ветра более 70 м/с, 4 категория – 58-70 м/с, 3 категория – 50-58 м/с, 2 категория – 43-49 м/с, 1 категория – 33-42 м/с. Также есть дополнительная классификация к шкале, определяющая тропический шторм со скоростью ветра от 18 до 32 м/с и тропическая депрессия, имеющая максимальную скорость ветра менее 17 м/с.

Хотя при перемещении тайфуна Чан-хом из акватории Желтого моря на Корейский полуостров он и начал терять свою энергию, тем не менее еще находясь над акваторией Желтого моря уже появилось первое влияние его восточным крылом на акваторию Японского моря. На основании метеорологических баз данных GFS и WAVEWATCH III глобальных систем прогноза погоды можно восстановить перемещение области циклона в районе Японского моря с целью отслеживания изменения инфразвукового сигнала, регистрируемого лазерным деформографом, связанного с этим перемещением.

Развивая тему прекращения отслеживания циклонического вихря метеорологическими агентствами, показанного на рисунке 5.1, покажем, что несмотря на распад структуры облачной системы вихря тайфуна, в атмосфере не прекращается перемещение воздушных масс в направлении области низкого атмосферного давления в приповерхностном слое. На рисунке 5.2а) показан спутниковый снимок Himawari-8 [171] тайфуна Чан-хом в тот период времени, когда его разряд был понижен до тропической депрессии. Вихревая структура циклона на спутниковом снимке наглядно присутствует, при этом облачность в южной части циклона частично рассеялась. Рисунок 5.2б), построенный на основании метеорологических баз данных Global Forecast System и WAVEWATCH III [172], демонстрирует область сильного ветра в приповерхностной области

западной и центральной частях Японского моря, простирающуюся вплоть до южного побережья Приморского края. Красным многоугольником на рисунке обозначено расположение лазерно-интерференционного измерительного комплекса.

Используя данные автоматической метеостанции, непрерывно работающей на МЭС «м. Шульца», указанной на рисунках красным многоугольником, приведем изменение скорости и направления ветра в точке проведения метеонаблюдений (рисунок 5.3).

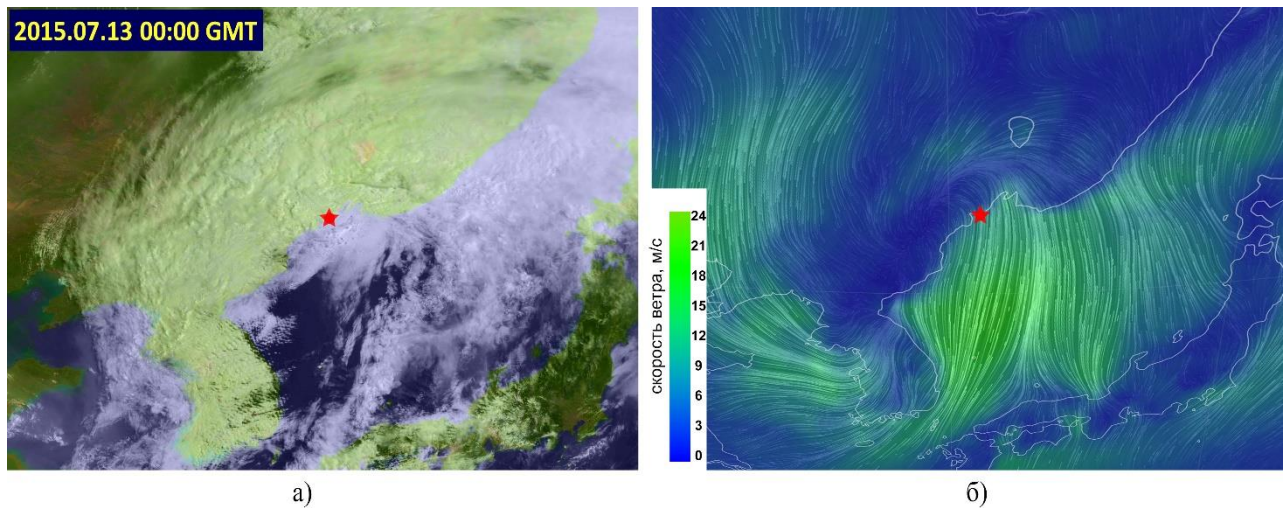


Рисунок 5.2 – Сравнение спутникового снимка облачности и поля скорости ветра в приповерхностной области атмосферы при прохождении тайфуна Чан-хом 13 июля 2015 г. Многоугольником показано местоположение измерительного комплекса.

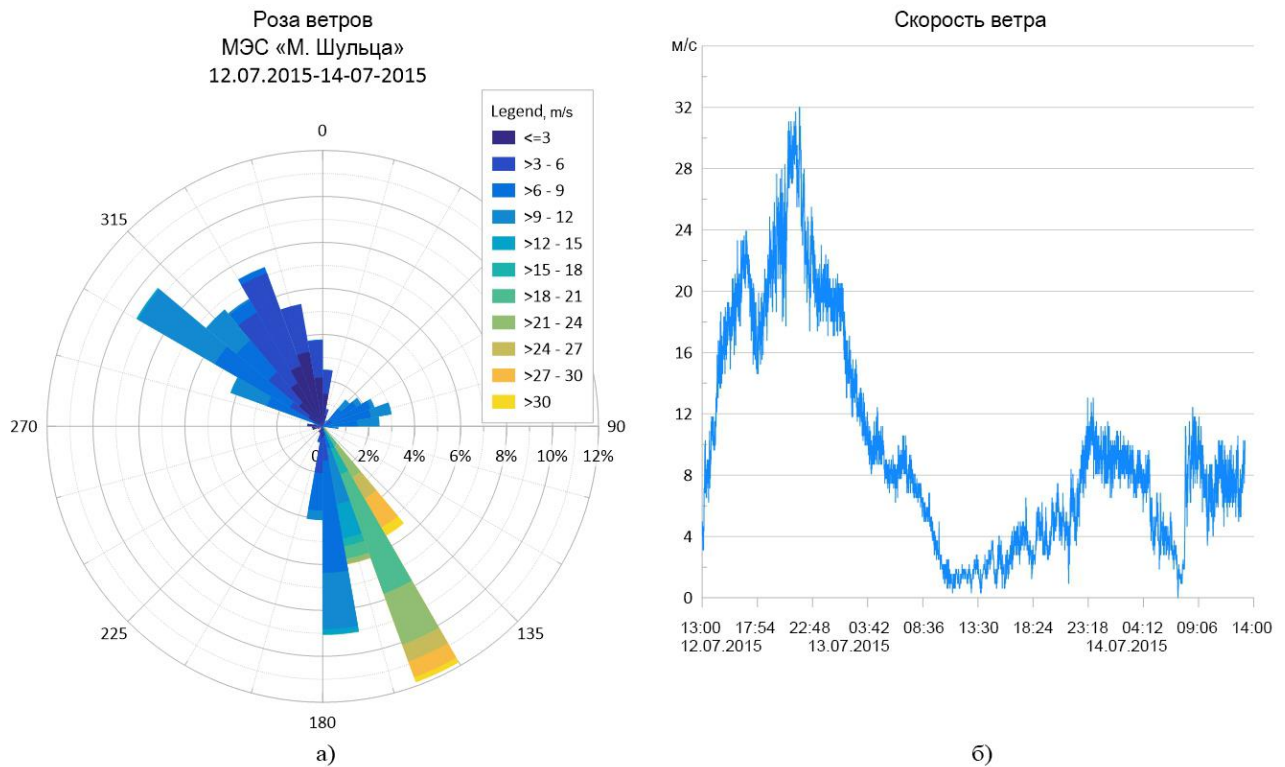


Рисунок 5.3 – Роза ветров и скорость ветра на метеостанции МЭС «м. Шульца» в период с 13:00 12.07.2015 г. по 14:00 14.07.2015 г.

Из анализа рисунка 5.3а) видно, что в течение двух суток на область измерительного полигона влияют ветра различных направлений, что характеризует проход циклонического вихря через точку измерения. При этом, около трети времени этого периода преобладает ветер юго-восточного направления при скорости, достигающей более 30 м/с. Анализируя рисунок 5.3б) делаем вывод, что в период времени с 17:00 12.07.2015 г. по 02:00 13.07.2015 г. тропический циклон Чан-хом по шкале ураганных ветров соответствует категории тропического шторма, достигая в своем пиковом воздействии в 22:46 12.07.2015 практически значения урагана первой категории.

При перемещении области пониженного давления тайфуна в северо-восточном направлении вдоль побережья Приморского края соответственно происходит смещение области сильного ветра в том же направлении что и было зарегистрировано при исследовании возможности определения местоположения области генерации микросейсмических сигналов «голос моря» [175].

5.2. ОТКРЫТИЕ МИКРОСЕЙСМ «ГОЛОС МОРЯ». ТАЙФУН ЛАЙОНРОК

В конце августа 2016 г. на Приморский край обрушился супертайфун «Лайонрок». В преддверии прихода тайфуна разные мировые метеорологические агентства давали противоречивую информацию о траектории его движения. Европейские эксперты смещали центр тайфуна в восточном направлении от Приморского края. Японское метеоагентство напротив прогнозировало прохождение тайфуна южнее Токио, вследствие чего планировалось, что не будет оказано влияния тайфуна на Приморский край. В данном конкретном случае тайфун перемещался по крайне уникальной траектории.

Вернемся к определению групп тайфунов по траектории их распространения. Треки большинства тропических циклонов, возникающих в Тихом океане, делятся на три категории [176]. Это прямолинейно распространяющиеся тайфуны, когда тайфун остается в низких широтах и оказывает преимущественное влияние на территории юго-восточной Азии. Имеющие обратную ветвь и обладающие параболическими характеристиками. Преимущественно тайфуны данного типа оказывают влияние на территорию Дальнего Востока Российской Федерации. И североориентированные тайфуны, остающиеся в средних широтах Тихого океана, что происходит преимущественно в начале и конце сезона тайфунов. Другие авторы [177] выделяют дополнительно до 8 кластеров на поверхности земного шара, в которых зарождаются тайфуны и имеют соответствующие дальнейшие траектории распространения. Некоторые тайфуны достигая восточного берега материка не заполняются, а поворачивают на северо-восток и перемещаются к берегам Японии или пересекают Корейский полуостров, при этом активно влияя на акваторию Японского моря. Иногда при пересечении продолжительного участка суши, например Корейского полуострова, потерявший силу тропический циклон вновь набирает силу в результате подпитки значительно нагреваемой летом поверхностью Японского моря. Но мировые метеорологические агентства при этом перестают определять тропический циклон как тайфун, переводя его в разряд

тропического циклона до ураганной силы и не принимая во внимание его увеличивающуюся мощность даже на кратковременный период времени.

В статье [178] были приведены первые результаты деформационных проявлений колебаний «голос моря». На рисунке 5.4 показана траектория тайфуна Лайонрок, изменение его категории по шкале Саффира-Симпсона на шестичасовых отметках и место расположения измерительного комплекса.

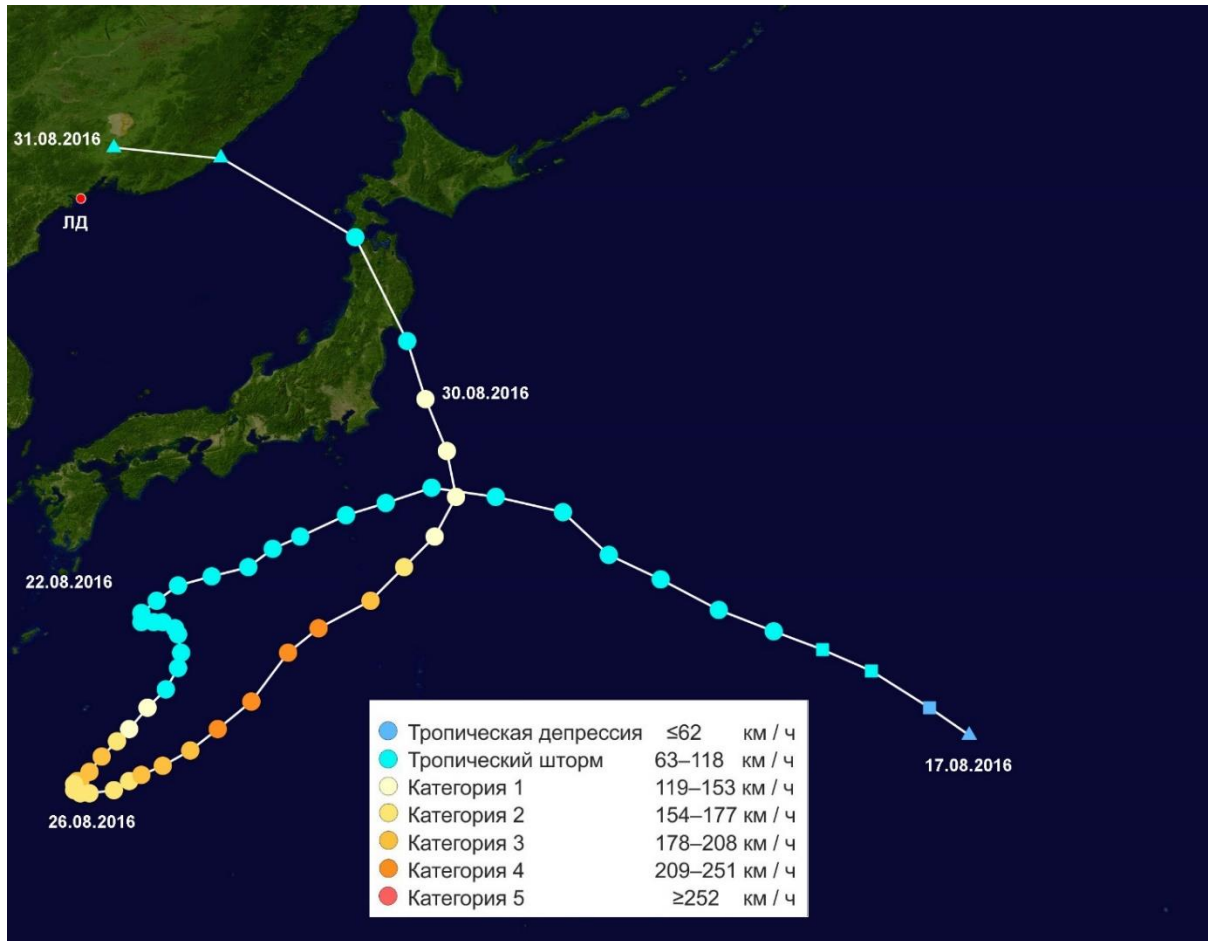


Рисунок 5.4 – Траектория движения тайфуна Лайонрок в августе 2016 г. ЛД – место расположения измерительного комплекса.

Траектория перемещения тайфуна была действительно не прогнозируема до самого его разрушения. Лайонрок стал первым тайфуном за время официального наблюдения, который зашел в сторону Японского моря со стороны региона Тохoku о. Хоккайдо. Согласно рисунку 5.4 тайфун вошёл в Японское море 30 августа, просуществовав над ним немного и, выйдя на территорию Приморского края,

заполнился и прекратил существование. Была проведена обработка экспериментальных данных лазерно-интерференционного измерительного комплекса, начиная с момента вхождения тайфуна в зону Японского моря. На рис. 5.5 приведены динамические спектрограммы синхронных записей лазерного деформографа (б), лазерного нанобарографа (в) в диапазонах «голос моря» (1-15 Гц, лазерный деформограф и 6,5-10 Гц лазерный нанобарограф) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а) в диапазоне ветровых морских волн (2-20 с).

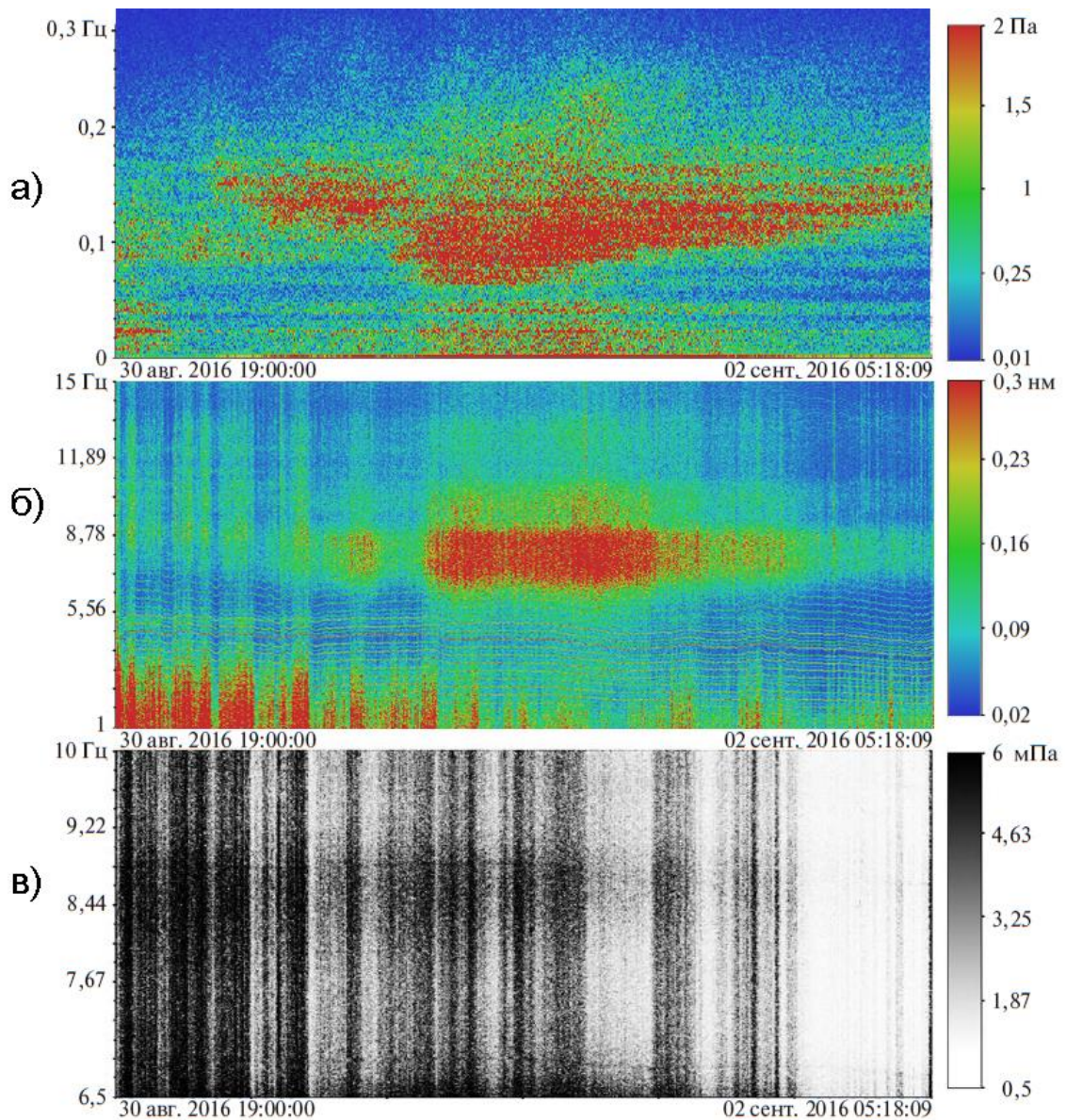


Рисунок 5.5 – Синхронные записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а), лазерного деформографа (б) и лазерного нанобарографа (в).

На рисунке 5.6 показаны роза ветров и вариации скорости ветра в районе измерительного полигона в период с 15:00 29.08.2016 г. по 03:00 02.09.2016 г.

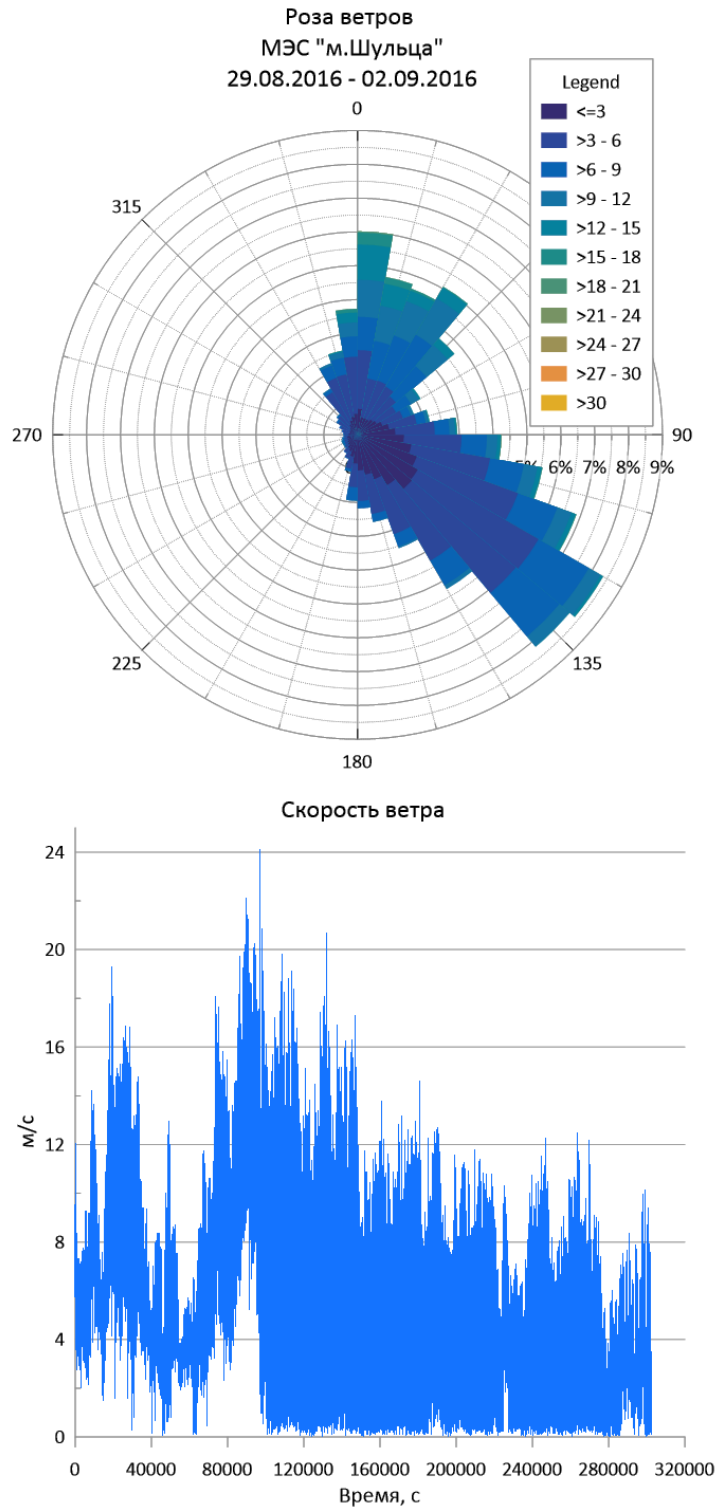


Рисунок 5.6. – Изменения направления и скорости ветра в районе измерительного полигона на МЭС «м. Шульца» в период 29.08.2016 15:00 –02.09.2016 03:00.

Отметим, что уровень сигнала диапазона «голос моря» в записи лазерного нанобарографа имеет низкий уровень, поэтому для контраста изображение спектрограммы представлено в монохромном виде. Присутствие его в атмосфере будет в дальнейшем изучаться другими контактными средствами измерений. Основное внимание уделим анализу обработанных данных лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, тем более, что лазерным деформографом зарегистрированы уникальные сигналы диапазона «голос моря», анализ которых совместно с анализом данных лазерного измерителя вариаций гидросферного давления позволил установить физику их возникновения. Как видно из рис.5.5 в записи лазерного деформографа выделяются 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. Из динамической спектрограммы, полученной при обработке записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, можно выделить начало прихода наибольшего периода морской волны, равного 15 с. В дальнейшем происходит постепенное уменьшение периода морских волн до 7 с. Примерное начало прихода данных волн - 31 августа 16 ч 20 мин, а условный конец - 02 сентября 10 ч 15 мин. Анализируя данные рисунка 5.6 можно отметить, что в это время практически стих местный ветер, порывы которого за сутки до этого достигали 17 м/с. В результате можно сделать некоторые выводы что возникшие колебания диапазона «голос моря» трансформируются в колебания земной коры на соответствующих частотах и их возникновение не связано с воздействием местного ветра. При этом начало мощных колебаний диапазона «голос моря» совпадает с приходом волн зыби с места действия тайфуна с естественным временным запаздыванием, связанным с временем распространения от места их возникновения до места их регистрации. Изменение периодов волн зыби от 15 до 7 с связано с дисперсионным законом.

Вместе с исследованием данных микросейсмических колебаний в периоды влияния тропических циклонов, дополнительно был рассмотрен период, когда в северной части Японского моря господствовал сильнейший внетропический

циклон, имевший скорости ветра более 30 м/с. По данным лазерного деформографа были отмечены аномальные сигналы, которые можно отнести к обнаруженным микросейсам «голос моря» [179].

5.3. ИНФРАЗВУКОВЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ТАЙФУНАМИ

В серии статей [180-187] продолжено исследование данных лазерных деформографов на предмет выявления микросейсмических инфразвуковых колебаний «голос моря». Был проведен анализ базы данных тайфунов, проходящих в северо-западной части Тихого океана и оказавших непосредственное влияние на Дальневосточный регион России. По результатам анализа был проведен отбор синхронных данных. всех измерительных приборов, входящих в комплекс за периоды времени прохождения тайфунов в районе измерительного полигона. Периоды времени и названия исследуемых тайфунов приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Периоды обработки данных наблюдения за тайфунами.

№	Название тайфуна	Период обработки данных
1	Болавен (Bolaven)	28.08.2012-31.08.2012
2	Санба (Sanba)	17.09.2012-20.09.2012
3	Матмо (Matmo)	25.07.2014-28.07.2014
4	Чан-хом (Chan-hom)	12.07.2015-15.07.2015

Обработка полученных экспериментальных данных лазерно-интерференционного комплекса включала в себя несколько этапов. Для начала был определен временной промежуток относительно полигона наблюдения, когда в данных лазерных деформографов появлялся шум на частоте «голос моря». При исследовании динамических спектров в периоде частот «голос моря» сначала визуально были выявлены непосредственно инфразвуковые возмущения и определены их временные характеристики. Для синхронности интерпретации

экспериментальных данных была определена воображаемая линия на земной поверхности, соответствующая 35° с.ш., относительно которой рассматривалось время начала воздействия циклонического вихря и на основании данных движения тайфуна от Японского метеорологического агентства [170] составлена комплексная карта траекторий смещения рассматриваемых тайфунов (рисунок 5.7), с обозначением полусуточных интервалов времени их движения по стандартному времени UTC.

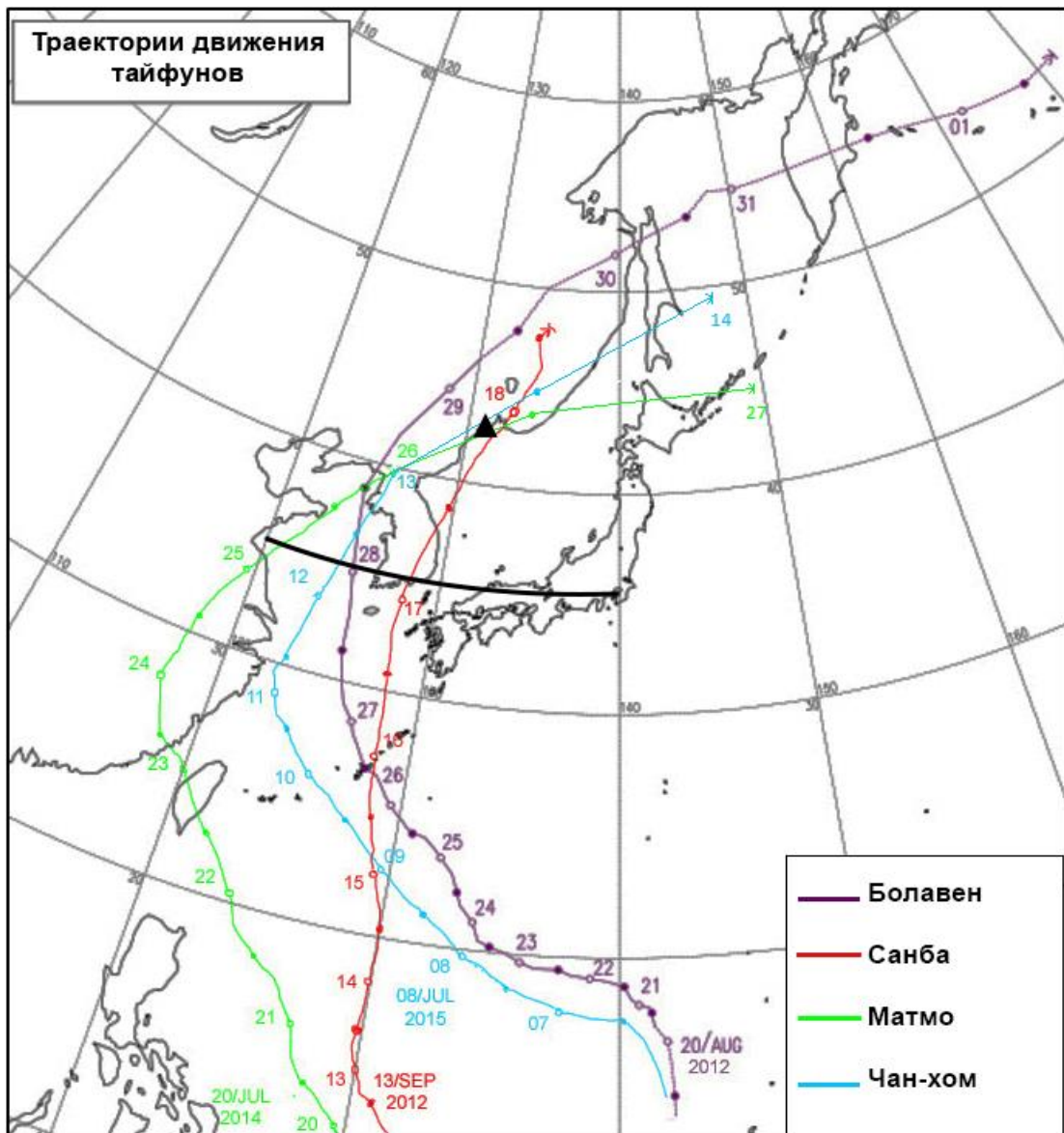


Рисунок 5.7 – Комплексная схема траекторий движения тайфунов: ▲ – место расположения измерительного комплекса, ● – 00:00 (UTC), ○ – 12:00 UTC, жирная линия – 35° СШ, воображаемая линия начала воздействия циклонического вихря на полигон.

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.

Первоначальная обработка данных с лазерных деформографов включала в себя совмещение данных с частотой дискретизации 1000 Гц за каждый час рассматриваемого временного промежутка в один большой файл, затем проводилось удаление скачков сбросов и анализ сигнала на возможные ошибки в работе установок. В заключение на данные деформографов был наложен низкочастотный фильтр Хэмминга длиной 1500 с граничной частотой 60 Гц и выполнена децимация рядов наблюдения до граничной частоты 60 Гц для выявления инфразвуковых возмущений в частотном диапазоне «голоса моря», и полосовой фильтр Хэмминга с граничными частотами от 0.05 до 0.5 Гц для поиска микросейсм, генерируемых морскими ветровыми волнами (волнами зыби), что позволило устранить избыточность объема данных и исключить влияния высокочастотных спектральных компонент.

Для каждого тайфуна были выделены три основных периода развития инфразвуковых колебаний: развитие, максимальное возмущение и затухание. На рисунке 5.8 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.

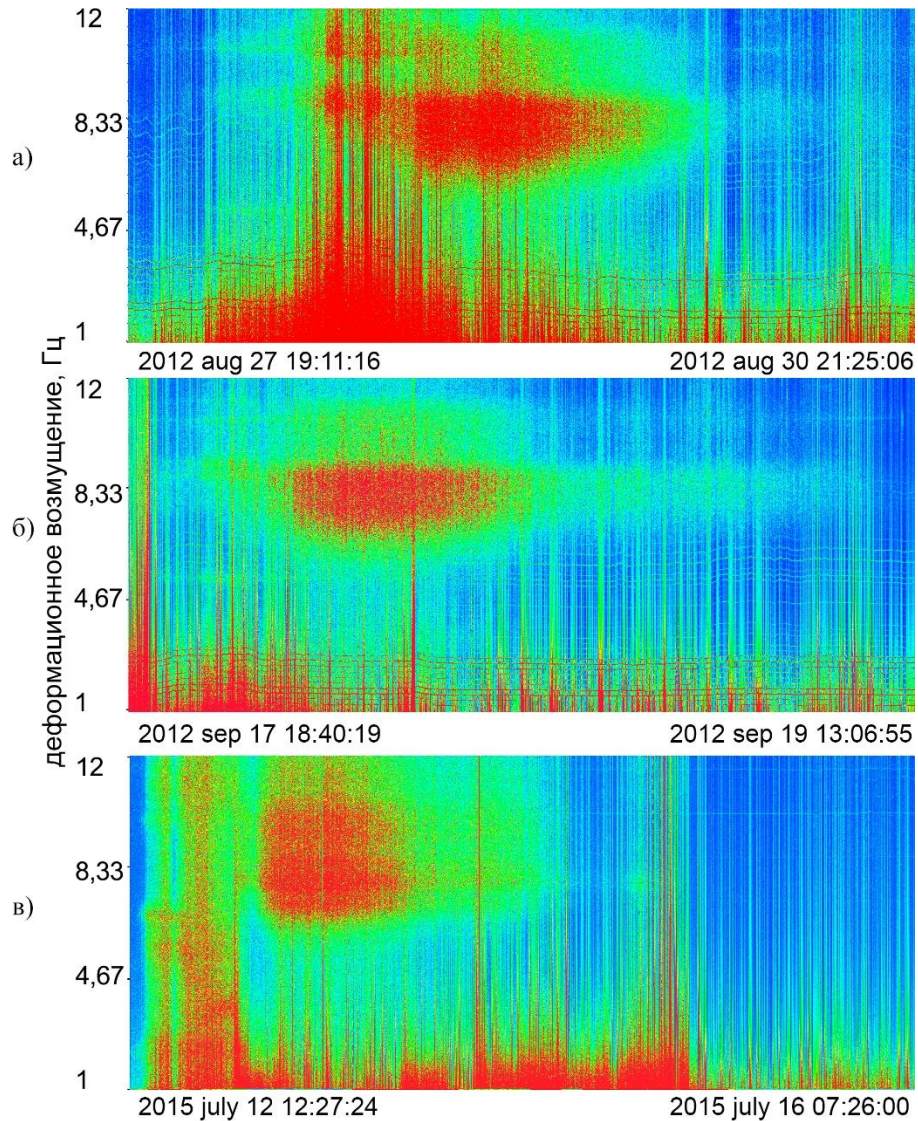


Рисунок 5.8. – Динамические спектрограммы данных лазерного деформографа в диапазоне частот «голос моря»: а) Тайфун Болавен, б) Тайфун Санба, в) Тайфун Чан-хом

Полученные спектрограммы иллюстрируют периоды проявления исследуемого сигнала при движении источника относительно измерительного комплекса. 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. Для этого были получены динамические спектрограммы лазерного деформографа в диапазоне частот от 0.01 до 0.5 Гц (рисунок 5.9),

демонстрирующие инфразвуковые сейсмические сигналы (микросейсмы), связанные с влиянием морского волнения на береговую линию в зоне перехода.

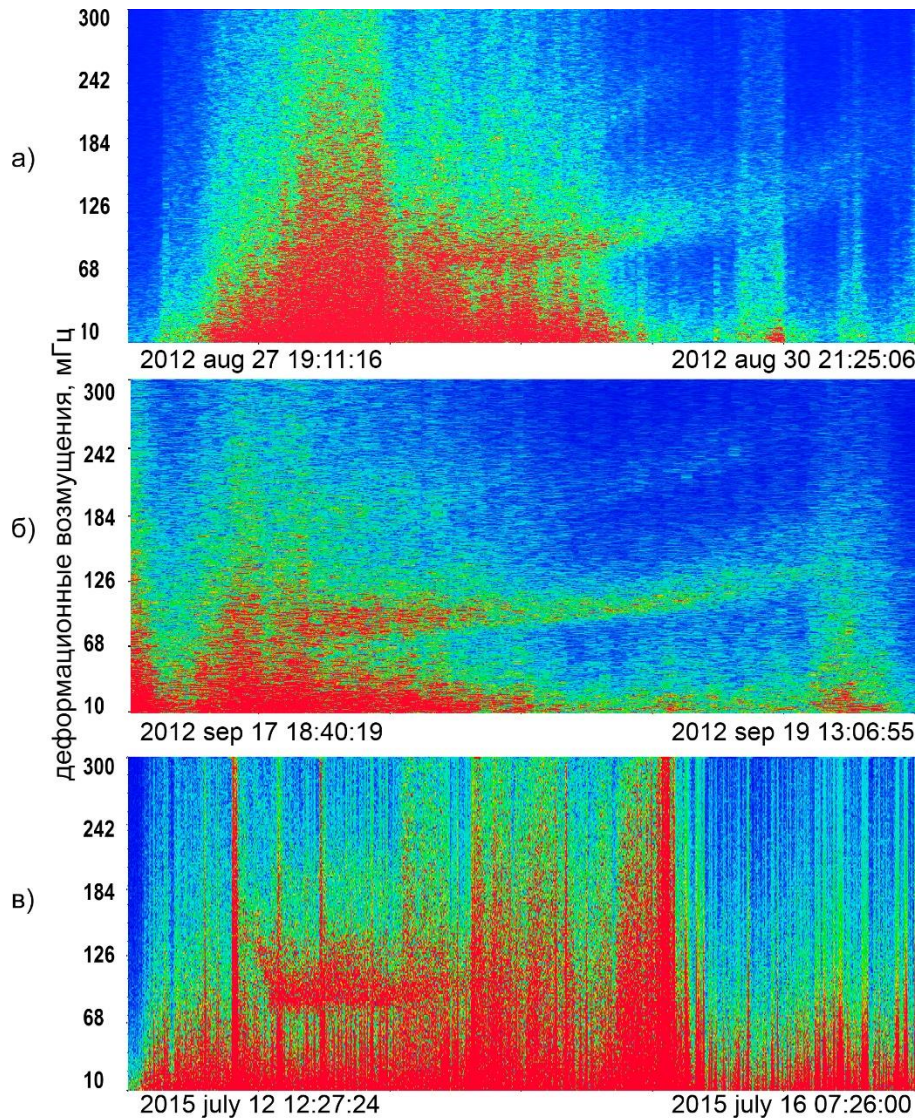


Рисунок 5.9. – Динамические спектрограммы лазерного деформографа в диапазоне частот первичных и вторичных микросейсм: а) Тайфун Болавен, б) Тайфун Санба, в) Тайфун Чан-хом

Покажем некоторые синоптические характеристики по данным метеорологических наблюдений при перемещении атмосферных вихрей вблизи региона.

Тайфун Болавен.

28 августа 2012 г. в 03:25 возникает шум в диапазоне 1-2.5 Гц, а также узкополосные колебания с центральными частотами около 5.3, 9.1 и 10.7 Гц. Глаз

тайфуна находится над Жёлтым морем и выходит на Корейский п-ов. На м. Шульца ветер южный/юго-западный, 1-2 м/с.

Далее шум в диапазоне 1-2.5 Гц преобразуется в шум в диапазоне 1-4.5 Гц с ростом уровней сигналов, достигая своего максимума в 14:53 28 августа. Наблюдается усиление колебаний с центральными частотами 9.1 и 10.7 Гц. Тайфун вышел на Приморский край (Россия). Мощный хвост тайфуна находится на севере Жёлтого моря. Разрежённые хвосты тайфуна в Японском море. На м. Шульца ветер юго-восточный, 14-16 м/с.

До 19:26 28 августа уровень шума в диапазоне 1-4.5 Гц постоянный. Происходит периодическое усиление-ослабление интенсивности сигналов с центральными частотами 9.1 и 10.7 Гц. Основная центральная часть тайфуна почти ушла с Приморского края на Китай и Хабаровский край (Россия). Небольшой хвост тайфуна на юге Приморского края и северо-востоке Японского моря. На м. Шульца ветер юго-восточный, 16-18 м/с.

До 22:10 28 августа уровень шума падает, частотный диапазон 1-4.5 Гц преобразуется в частотный диапазон 1-2.5 Гц. Падает уровень колебаний с центральными частотами 9.1 Гц и 10.7 Гц. Возникают мощные колебания в частотном диапазоне 6.5-9.3 Гц с центральной частотой порядка 8 Гц, которые в дальнейшем мы будем называть микросейсмами «голос моря». Север Приморского края, Китай и Хабаровский край находятся под тайфуном. Циклонические хвосты остались на востоке и северо-востоке Японского моря. Через Корейский полуостров в Японское море проник мощный передний фронт очередного тайфуна, но центр которого находится еще над о. Тайвань. На м. Шульца ветер юго-восточный, 20-25 м/с.

Наибольший размах микросейсмы «голос моря» по частотному диапазону достигли в 06:00 29 августа (6.5-9.5 Гц, красное ядро). Тайфун над Китаем, Монголией, Хабаровским краем. Приморский край почти весь чистый. Небольшие хвосты у Японии и на севере Японского моря. На м. Шульца максимальный юго-восточный ветер, 33 м/с.

29 августа 18:00 основное ядро микросейсм «голос моря» не наблюдается. Над Приморским краем и Японским морем свободная от облаков атмосфера. На юге Жёлтого моря находится глаз нового тайфуна, передний фронт которого над Корейским полуостровом. На м. Шульца ветер западный, 8-10 м/с.

Низкочастотного шума в диапазоне 1-2.5 Гц нет. Колебания в диапазоне 6.5-9.3 Гц со временем по интенсивности падают, также сужается их частотный диапазон до 7.5-8.5 Гц. К 23:30 30 августа они почти полностью затухли. Тайфун находится в Охотском море. На м. Шульца ветер северо-западный, 2-4 м/с.

Лазерный деформограф уверенно регистрирует первичные и вторичные микросейсм. Первичные микросейсм с периодом порядка 12 с начинают регистрироваться прибором 28 августа 23:00 28 августа, период которых постепенно уменьшался до 5 с (20:30 30 августа). Вторичные микросейсм уверенно регистрируются лазерным деформографом примерно в то же время (23:00 28 августа) с периодом около 6 с. Постепенно период и интенсивность их падают и практически не регистрируются в 00:30 30 августа. При этом период их равен около 4 с, а период первичных микросейсм в это же время примерно равен 8 с.

Таким образом, время возникновения мощных колебаний в частотном диапазоне 6.5-9.3 Гц почти совпадает со временем прихода мощных первичных микросейсм. Период и мощность первичных микросейсм падает и слабо регистрируется прибором уже в 20:30 30 августа. Чуть позже (23:30) практически не регистрируются колебания в диапазоне 7.5-8.5 Гц. Можно отметить, что скорость местного ветра за этот же период наблюдений (28 августа 22:10 – 30 августа 23:30, возникновение и пропадание микросейсм «голос моря») от 20-25 м/с возрастает до 32-33 м/с (29 августа 6:00, наибольший размах микросейсм «голос моря» по частотному диапазону), а затем постепенно падает до 2-4 м/с. В этот период наблюдений в районе м. Шульца действуют только хвосты тайфуна.

Тайфун Санба.

17 сентября 02:20 усиливается фоновый шум, что приводит к возрастанию всех спектральных компонент и расширению отдельных частотных диапазонов. Так диапазон от 1-2.5 Гц постепенно расширяется до диапазона 1-4.5 Гц.

Наблюдаются колебания в узких частотных диапазонах с центральными частотами 9.1, 10.7 и 11.3 Гц. 11:00 глаз тайфуна вышел с юга на юг Корейского полуострова. Передний фронт тайфуна занимает весь Корейский полуостров, Приморский край, север и северо-запад Японского моря, о. Сахалин, Охотское море с выходом на Камчатку. При падении уровня шума интенсивность данных возмущений падает и почти пропадает 17 сентября в 07:15. 07:00 глаз тайфуна вышел на север Корейского полуострова. На м. Шульца ветер северо-восточный, 6-8 м/с (2:20).

17 сентября 08:20 появился шум с центральной частотой 5.3 Гц. Глаз тайфуна на шельфе Японского моря у побережья Южной Кореи. Передний фронт тайфуна закрывает Приморский край, о. Сахалин, Охотское море, п-ов Камчатку, северную и западную части Японского моря. На м. Шульца ветер северо-восточный, 5-6 м/с.

17 сентября 20:00 тайфун ушёл на территории Хабаровского края, Китая, Монголии, севера и центральной части Приморского края. Юг Приморского края центр тайфуна покинул. В центре Японского моря хвост тайфуна. На шельфе Корейского полуострова небольшой хвост тайфуна. На м. Шульца ветер северо-восточный, 13-16 м/с.

17 сентября 22:35 возникает шум в диапазоне 1-4.5 Гц и колебания в узких полосах с центральными частотами 5.3, 9.1 и 10.7 Гц. Слабо проявляется колебания с центральной частотой 11.3 Гц. Тайфун освободил почти весь Приморский край. «Глаз» тайфуна над о. Сахалин. В центре Японского моря один хвост и небольшой хвост у побережья Корейского полуострова. На м. Шульца ветер северо-восточный, 20-23 м/с.

18 сентября в 00:10 возникают микросейсмы «голос моря», частотный диапазон в максимуме которого простирается от 6 до 9.5 Гц с центральной частотой (по интенсивности) 8 Гц. Колебания микросейсм «голос моря» сильно затухают к 18:00 18 сентября и слабо прослеживаются до 10:00 19 сентября с центральной частотой около 8.5 Гц. Расположение глаза тайфуна и переднего фронта почти не изменилось. Хвост над центром Японского моря. Вдоль побережья Корейского полуострова с выходом на м. Шульца растянулся еще один хвост тайфуна. В Жёлтом море небольшая атмосферная депрессия, которая через север Корейского

полуострова достигает юга Приморского края. На м. Шульца ветер северо-восточный, 18-21 м/с (00:10), северо-западный, 6-9 м/с (18 сентября 18:00) и северный, 3-4 м/с (19 сентября 10:00).

18 сентября в 18:00 снижается интенсивность центральной части микросейсм «голос моря». Хвост тайфуна на севере Корейского полуострова, у южных берегов Приморского края, в Японском море, вблизи Кореи, который в дальнейшем распадается, образуя вихрь. Через о. Хоккайдо на север и затем на о. Сахалин распространился передний фронт нового тайфуна.

19 сентября в 10:00 микросейсм «голос моря» практически не регистрируется.

17 сентября около 23:30 возникли мощные первичные микросейсм с периодом около 12 с и вторичные микросейсм с периодом около 6 с. Затем период их уменьшался. В 03:50 19 сентября на записи лазерного деформографа плохо прослеживаются вторичные микросейсм. При этом их период упал до 4.2 с, а период первичных микросейсм в это время равен 8.5 с. Первичные микросейсм стали плохо прослеживаться на записи лазерного деформографа в 07:30 19 сентября. При этом их период стал равным около 7.5 с.

Таким образом, время (18 сентября 00:10) возникновения микросейсм «голос моря» почти совпадает со временем (17 сентября 23:30) прихода первичных микросейсм с максимальным периодом 12 с (вторичные микросейсм 6 с). На м. Шульца скорость ветра около 18-21 м/с. Микросейсм «голос моря» сильно затухает к 18:00 18 сентября. Ветер к этому времени падает до 6-9 м/с. Окончательно затухают микросейсм «голос моря» к 10:00 19 сентября. На м. Шульца скорость ветра падает до 2-3 м/с. К 7:30 19 сентября первичные микросейсм упали до 7.5 с и плохо прослеживаются. Вторичные микросейсм не видны.

Тайфун Чан-хом.

11 июля 15:00. Возникает шум в диапазоне 1-2.5 Гц. Глаз тайфуна на юге Жёлтого моря. Передний фронт тайфуна занимает Корейский полуостров и выходит на юг Приморского края. На м. Шульца ветер южный, 6-8 м/с.

12 июля 14:00. Шум в диапазоне 1-2.5 Гц усиливается и расширяется до диапазона 1-4.5 Гц. Глаз тайфуна на севере Корейского полуострова. Передний фронт (вихрь) простирается от севера Жёлтого моря, КНР, Хабаровский край, Приморский край, центр Японского моря и через южные острова Японии проходит в Тихий океан. На м. Шульца ветер юго-восточный, 10-12 м/с.

12 июля 14:30. Шум в частотном диапазоне 1-4.5 Гц. Возникают колебания с центральными частотами 5.3, 9.1 и 10.7 Гц. На м. Шульца ветер юго-восточный, 15-19 м/с.

12 июля 17:20. Глаз тайфуна над югом Приморского края. Японское море вдоль побережья Корейского полуострова свободное от облачности. На м. Шульца ветер юго-восточный, 17-20 м/с.

13 июля 02:50. Возникают мощные микросейсм «голос моря» в частотном диапазоне от 7 до 9 Гц. Других колебаний не наблюдается. Далее частотный диапазон микросейсм «голос моря» быстро расширяется до 6-11 Гц (13 июля 06:00). 14 июля 10:00 частотный диапазон микросейсм «голос моря» уменьшен до 7-9 Гц и пропадает в 10:00. Глаз тайфуна на севере Приморского края. Центр, юг и запад Японского моря чистые. Хвост тайфуна простирается по дуге с Жёлтого моря, Корейский полуостров, центр Приморского края, восточная часть Японского моря, Японские острова и далее в сторону юга Тихого океана. На м. Шульца ветер юго-восточный, 9-11 м/с.

14 июля 04:20. Возникают слабые сигналы с центральными частотами 9.1 и 10.7 Гц. Хвост тайфуна на севере Приморского края. Юг Приморского края свободный от облачности. На м. Шульца ветер северо-западный, 9-11 м/с.

14 июля 23:18. Окончательно пропадает слабый фон микросейсм «голос моря». Тайфун ушёл из Приморского края и Японского моря. В Японском море вдоль Корейского полуострова простирается маленькая атмосферная депрессия. На м. Шульца ветер северо-восточный, 8-11 м/с.

15 июля 03:45. Пропадают сигналы с центральными частотами 9.1 и 10.7 Гц. Со временем сигналы с центральными частотами 9.1 Гц иногда появляются вновь.

Атмосферная ситуация почти не изменилась. На м. Шульца ветер северо-восточный, 10-14 м/с.

13 июля с 03:00 лазерным деформографом регистрируются первичные микросейсм с периодом около 7.2 с и вторичные микросейсм с периодом около 3.7 с. Со временем периоды их растут и 13 июля примерно в 05:30 периоды их стали, соответственно, 10.5 и 5.3 с. Они уверенно регистрируются с неизменными периодами до 20:00 13 июля. Затем в спектре пропадают вторичные микросейсм, а первичные микросейсм с периодом около 10 с прослеживаются до 04:30 14 июля. К этому времени их период немного упал до 9.3 с.

Таким образом, время (13 июля 02:50) возникновения микросейсм «голос моря» почти совпадает со временем (13 сентября 03:00) прихода первичных микросейсм с максимальным периодом 7.2 с (вторичные микросейсм 3.7 с). На м. Шульца скорость ветра около 9-11 м/с. Далее частотный диапазон микросейсм «голос моря» быстро расширяется до 6-11 Гц (13 июля 06:00), что связано с ростом периодов первичных и вторичных микросейсм, периоды которых к 05:30 13 июля стали равны 10.5 и 5.3 с, соответственно. Вторичные микросейсм не регистрируются уже с 20:00 13 июля. Первичные микросейсм уверенно регистрируются лазерным деформографом до 04:30 14 июля. Микросейсм «голос моря» пропадают примерно в 10:00 14 июля.

Тайфун Матмо.

На спектрограммах инфразвуковых возмущений, генерируемых этим тайфуном, мы наблюдаем самые слабые проявления исследуемых сигналов в низкочастотном диапазоне, которые начали развиваться 26 июля 2014 года около 10:00 и имели примерно одинаковую интенсивность в течение всего временного промежутка его проявления. Центр тайфуна в этот период находился в Японском море ближе к острову Хоккайдо на широте 45° с.ш. Пиковая частота составляла 7,8 Гц. Полное затухание возмущений произошло 26 июля в 23:00.

В соответствии с временным периодом представленных динамических спектрограмм инфразвуковых колебаний были подготовлены графики скорости ветра, регистрируемой в точке наблюдения во время влияния каждого из тайфунов.

На рисунке 5.10 показаны осциллограммы скорости ветра с периодом измерения 1 с.

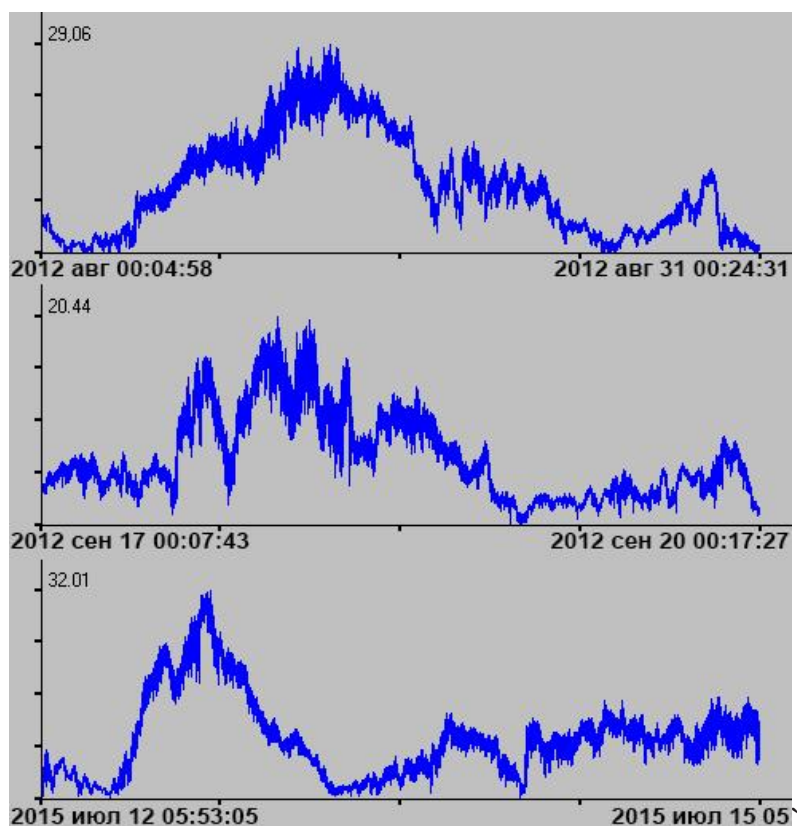


Рисунок 5.10 – Осциллограммы записи скорости ветра в периоды регистрации микросейсмического сигнала в диапазоне «голос моря». Сверху-вниз: тайфун Болавен (2012), тайфун Санба (2012), тайфун Чан-хом (2015)

При сопоставлении с данными скорости ветра, в спектре выделяются импульсные возмущения инфразвукового диапазона частот, влияющие на весь низкочастотный спектр данных, происходящих во время превышения скорости ветра отметки 15 м/с, что вероятнее всего связано с резонансными явлениями при взаимодействии сильного ветра с сооружениями и постройками на мысе Шульца. Резонирующие частоты 8 и 11 Гц проявляются на лазерном деформографе «запад–восток», 12.3 и 14.3 Гц – на лазерном нанобарографе, и 12 Гц – на лазерном деформографе «север–юг». Эти возмущения соответствуют началу ветрового влияния при подходе зоны низкого давления тайфуна к измерительному полигону.

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.

По результатам комплексного анализа всех собранных данных, в области от западного побережья и к центральной части Японского моря, происходит генерация волн зыби с периодом от 12 с. Период морских волн постепенно уменьшается со временем при перемещении тайфуна в сторону Охотского моря. При прохождении центра основного вихря по материк в море возникает так называемый вихревой хвост, первоначально оказывающий ветровое влияние, начиная от западной части Японского моря, при входе тайфуна в его акваторию, к его центральной части. Далее вихревой хвост географически перемещается ближе к восточной части Японского моря и вытягивается по направлению к северной части моря. Данные этих наблюдений также получены при анализе данных спутникового наблюдения. При расположении вихревого хвоста по направлению юго-запад–северо-восток, происходит наибольшее взаимодействие возбуждаемого им ветра с волнами зыби и генерация сигналов «голос моря», что подтверждает синхронность спектрограмм диапазонов ветровых волн и диапазона «голос моря».

Итак, по результатам обработки данных лазерных деформографов в низкочастотном диапазоне выявлено сейсмоакустическое воздействие тайфунов на Дальневосточный регион России. 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». Выявлены локальные частотные шумы, вызванные изменением скорости и направлением ветра в зоне измерений.

5.4 ДИНАМИКА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЛАСТИ ВЛИЯНИЯ ТАЙФУНОВ

В последние годы достигнут значительный прогресс в области дистанционного зондирования Земли из космоса, в том числе для изучения и мониторинга тайфунов в северо-западной части Тихого океана [188].

Спутниковые системы дистанционного зондирования Земли позволяют осуществлять наиболее полный мониторинг тайфунов, что особенно важно при решении задач в обширных и труднодоступных районах океана, а также при ограниченных возможностях прямых измерений [188-190]. Важность космических методов для изучения тайфунов, является фундаментальным, поскольку пространственно-временная изменчивость и случайность процесса их возникновения, а также неопределенность траектории движения ограничивают использование наземных методов. В тоже время дистанционные спутниковые измерения и дистанционные наземные измерения, которые можно причислить к контактными методами, должны дополнять общие результаты. Использование спутниковых данных в видимом диапазоне спектра электромагнитных волн дают нам представление о динамике развития тайфуна в соответствии со структурой облачного покрова; инфракрасные данные позволяют нам измерять температуру, радиолокационные данные позволяют оценить высоту волн, а радиометрические данные в микроволновом диапазоне дают информацию о влажности, силе ветра и температуре [188, 191]. В настоящее время разработан и успешно применяется ряд методов, которые могут быть использованы для анализа полей ветра над океаном, включая штормовые ветры. Наиболее распространенными из них являются активные методы зондирования (радиолокационная съемка, лазерное зондирование) и пассивные (микроволновая радиометрия, инфракрасная съемка и съемка в видимом диапазоне) [188]. Среди дистанционных методов, разработанных

в последнее время, следует отметить следующие: метод дистанционной пространственно-частотной спектрометрии; методы всепогодной радиолокации, включая метод многочастотной регистрации радиоволн [192]. Использование этих методов позволяет изучать различные процессы в приповерхностном слое океана и, в частности, ветровые и волновые поля. Создание полного каталога тропических циклонов и тропических возмущений на основе спутниковых данных позволяет детально изучить их климатообразующую функцию [193-195]. На основе такого каталога были дополнительно отобраны и изучены данные микросейсмического фона, регистрируемого в периоды прохождения других тайфунов вблизи МЭС «м. Шульца», где расположена система береговых лазерных деформографов.

Выше была показана география перемещения тайфунов Лайонрок (2016), Болавен (2014), Санба (2014), Чан-хом (2015) и приведены продолжительные динамические спектрограммы микросейсмических сигналов, возбуждаемых в результате влияния тайфунов в регионе. Дополнительно были исследованы данные деформографа за период с 2012-2019 гг. [196–198]. Оказалось, что в зависимости от траектории распространения тайфуна, а также максимальной силы ветра и времени воздействия на акваторию моря, микросейсмический сигнал «голос моря» может проявляться не только с разной максимальной амплитудой, но и варьироваться в диапазоне частот.

На рисунке 5.7 показана объединенная схема треков тайфунов, в результате влияния которых в регионе фиксировались микросейсмические «голос моря».

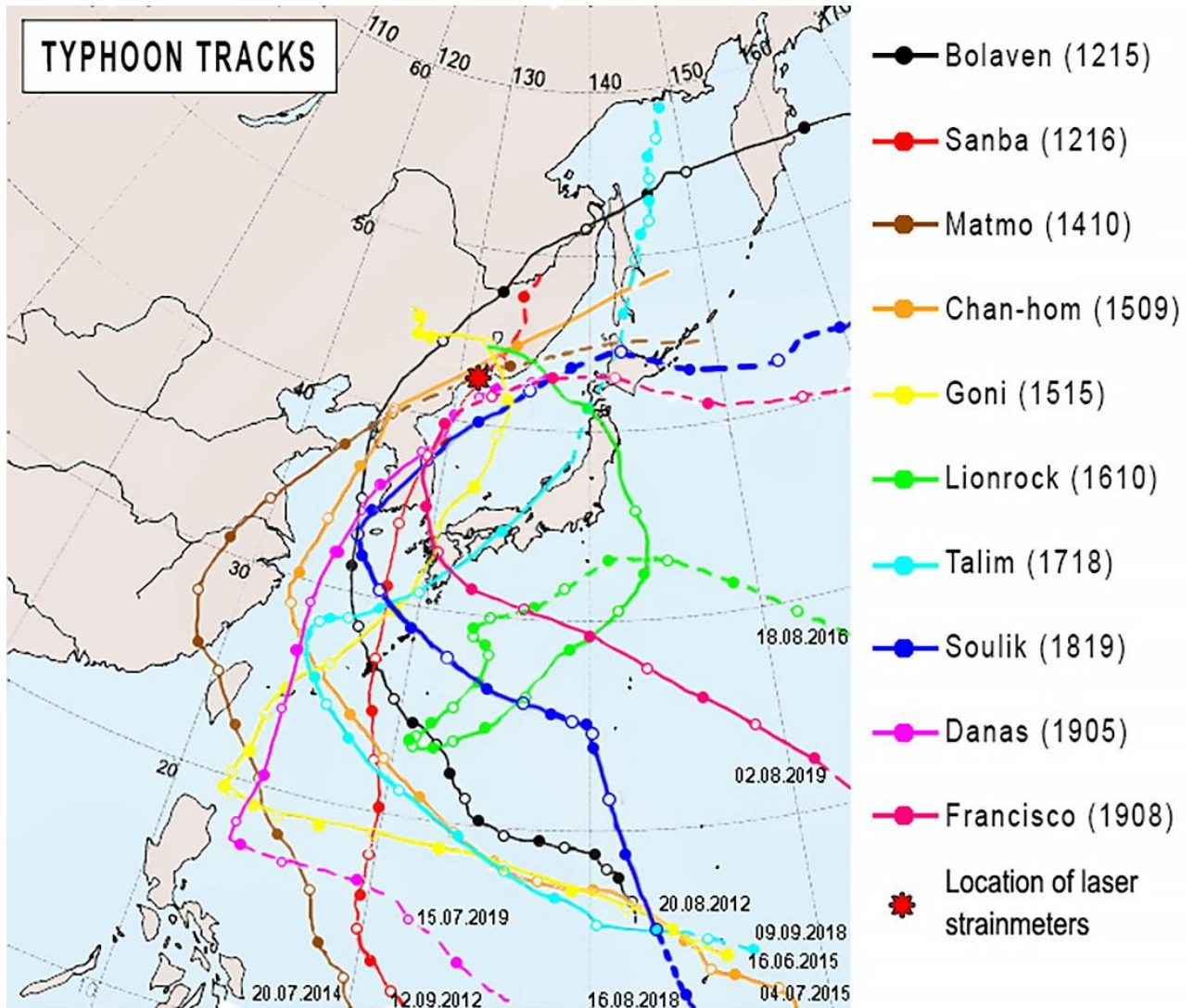


Рисунок 5.7 – Объединенная схема треков тайфунов периода 2012-2019 гг., в результате влияния которых генерировались микросейсмы инфразвуковых колебаний «голос моря».

В таблице 5.2 приведены основные характеристики исследованных тайфунов.

Таблица 5.2. Характеристики тайфунов.

Название тайфуна (год, порядковый номер)	Время наблюдения	Официальное время существования тайфуна	Мин. давление (гПа)	Макс. скорость ветра (м/с)
Болавен (2012 15)	28.08.12-31.08.12	20.08.12-29.08.12	910	51,4
Санба (2012 16)	17.09.12-20.09.12	11.09.12-18.09.12	900	56,6
Матмо (2014 10)	25.07.14-28.07.14	17.07.14-25.07.14	965	36
Чан-хом (2015 9)	12.07.15-14.07.15	30.06.15-13.07.15	935	46,3
Гони (2015 15)	26.08.15-26.08.15	14.08.15-25.08.15	930	51,4

Продолжение таблицы 5.2

Лайонрок (2016 10)	30.08.16-02.09.16	21.08.16-30.09.16	940	46,3
Талим (2018 19)	18.09.17-19.09.17	19.09.17-17.09.17	935	48,9
Соулик (2018 19)	23.08.18-25.08.18	16.08.18-24.08.18	950	43,7
Данас (2019 5)	20.07.19-24.07.19	16.07.19-20.07.19	985	23,15
Франциско (2019 8)	07.08.19-08.08.19	02.08.19-07.08.19	970	36

На схеме трек передвижения каждого тайфуна обозначен своим цветом. Соответствие названия тайфуна и цвета приведено в легенде рисунка, где в скобках также обозначен год и порядковый номер тайфуна в соответствующем году. Начало траектории перемещения центра каждого тайфуна обозначено на рисунке текстом, соответствующим дате (число, месяц, год), а сама траектория перемещения тайфуна разбита кружками и окружностями, где окружность соответствует 00 ч UTC каждого последующего дня, а заполненный цветом круг 12:00 UTC. Время влияния каждого тайфуна на акваторию Японского моря опишем применительно к каждому случаю генерации микросейсм «голос моря». Как следует из объединенной схемы большинство тайфунов, генерирующих микросейсм «голос моря», перемещались через Корейский полуостров с последующим выходом в акваторию Японского моря. Большинство тайфунов, генерирующих микросейсм «голос моря», перемещались через Корейский полуостров с последующим выходом в акваторию Японского моря. При этом появление микросейсм не обусловлено полным нахождением вихря циклона в акватории, как, например тайфун Болавен. Некоторые тайфуны, как например Talim, перемещались вдоль западного побережья Японского архипелага. А тайфуны 2015 и 2016 годов Гони и Лайонрок, двигаясь ближе к японскому острову Хонсю, меняли направление своего движения на северо-западное и выходили на территорию Приморского края России.

Рассмотрим динамику микросейсмических колебаний, возникающих в результате воздействия тайфунов. Во время прохождения тайфуна Лайонрок из записи лазерного деформографа были выделены мощные колебания в полосе частот 6.5–8.5 Гц (с центральной частотой около 7.5 Гц). Начало возникновения данных

мощных колебаний можно определить 31 августа 2016 16:30 UTC, а их условный конец 02 сентября 2016 года 02:50 UTC.

Динамика проявления микросейсмических колебаний во время прохода тайфунов, Болавен, Санба Чан-хом и Матмо описана выше. Описание всех наблюдений объединим позже в сводную таблицу. Рассмотрим результаты генерации микросейсмического сигнала «голос моря» во время оставшихся пяти периодов влияния других тайфунов.

Тайфун Соулик

15 августа 2018 году сформировался девятнадцатый по счету названных тайфун Соулик. Тайфун набрал значительную силу и после прохождения через азиатско-тихоокеанский регион его сопровождение метеорологическими службами велось практически до побережья США. Уникальность перемещения тайфуна была в том, что вслед ему перемещался другой тайфун, с которым тайфун Soulik практически одновременно вышел в акваторию Японского моря. На рисунке 5.8 показаны динамические спектрограммы микросейсмических колебаний в период влияния тайфуна.

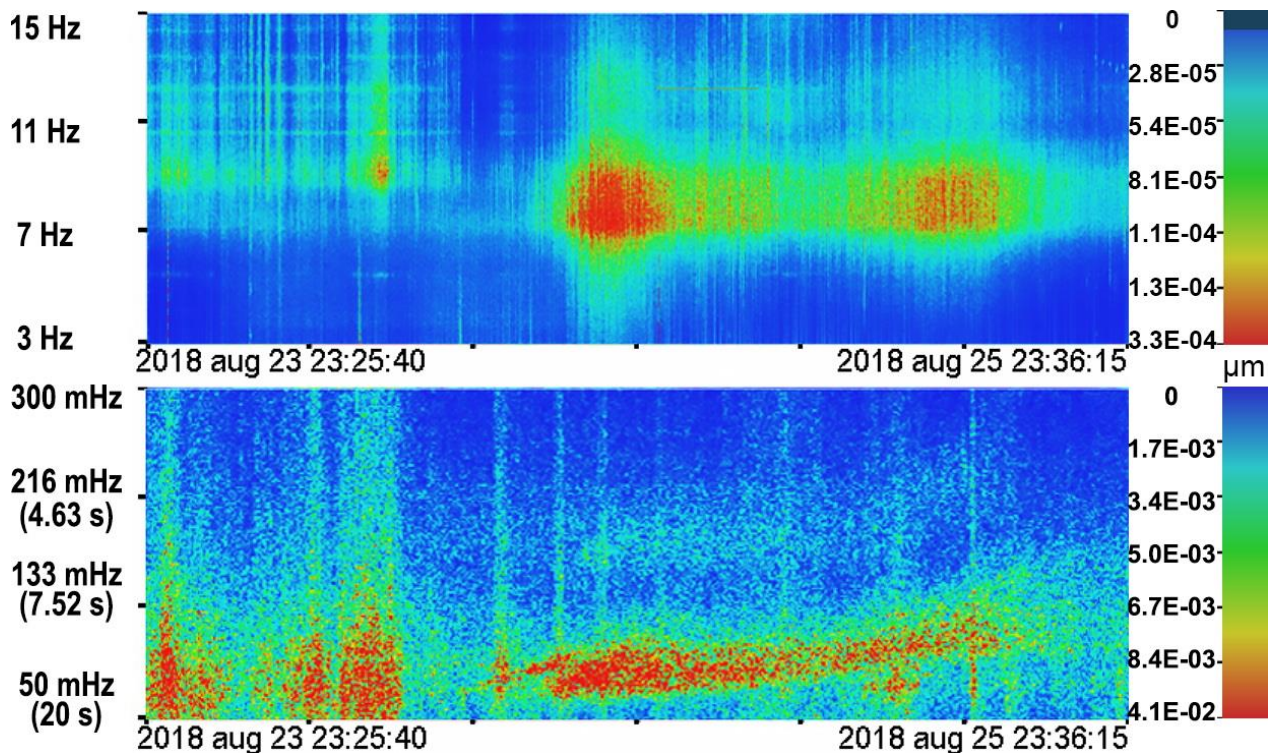


Рисунок 5.8. – Динамические спектрограммы данных лазерного деформографа в период влияния тайфуна Соулик

Инфразвуковые колебания «голос моря» в диапазоне 6.5–9.5 Гц появились в спектре сигнала деформографа в 18:00 24 августа 2018 г. Максимальная амплитуда фиксируется на частоте 7.5 Гц. В это время тайфун уже перемещается в Японское море восточнее измерительного полигона. Максимум сигнала достигается в 22:00. Частотный диапазон незначительно расширился до 9.6 Гц. При этом вихрь тайфуна активно смещается вдоль восточного побережья Приморского края, создавая мощное ветровое давление между своим центром и береговой полосой.

Дальнейшее перемещение вихря тайфуна в северной части Японского моря характеризуется постепенным затуханием инфразвуковых колебаний. Общий диапазон сигнала сокращается до 7–9.6 Гц. При этом максимум перемещается к частоте 8.5 Гц. В спектре сигнала прослеживается небольшое затухание в период времени, когда вихрь тайфуна перемещается к побережью о. Хоккайдо. Где начинает активно терять энергию и разрушаться. Инфразвуковой сигнал затухает около 20:00 25 августа при сохранении частотного диапазона.

В течение всего времени регистрации инфразвуковых колебаний фиксируются микросейсмы ветровых волн с периодом 5.3–5.6 с, развивающиеся в 00:00 24 августа при выходе вихря тайфуна в Японское море с Корейского полуострова. Затухание этих микросейсм происходит одновременно с затуханием микросейсмических колебаний «голос моря» к 20:00 25 августа 2018 г.

Тайфун Данас.

Тропическому циклону Danas хоть и было присвоено имя, поскольку скорость ветра вихря превысила 60 км/ч, но метеорологические агентства не подняли его уровень до статуса «тайфун», оставив в категории тропического шторма. Циклон зародился 11 июля вблизи Марианских островов и пройдя через Корейский полуостров нанес значительный экономический ущерб. На рисунке 5.10 приведены динамические спектрограммы микросейсмических данных в период влияния тайфуна Данас.

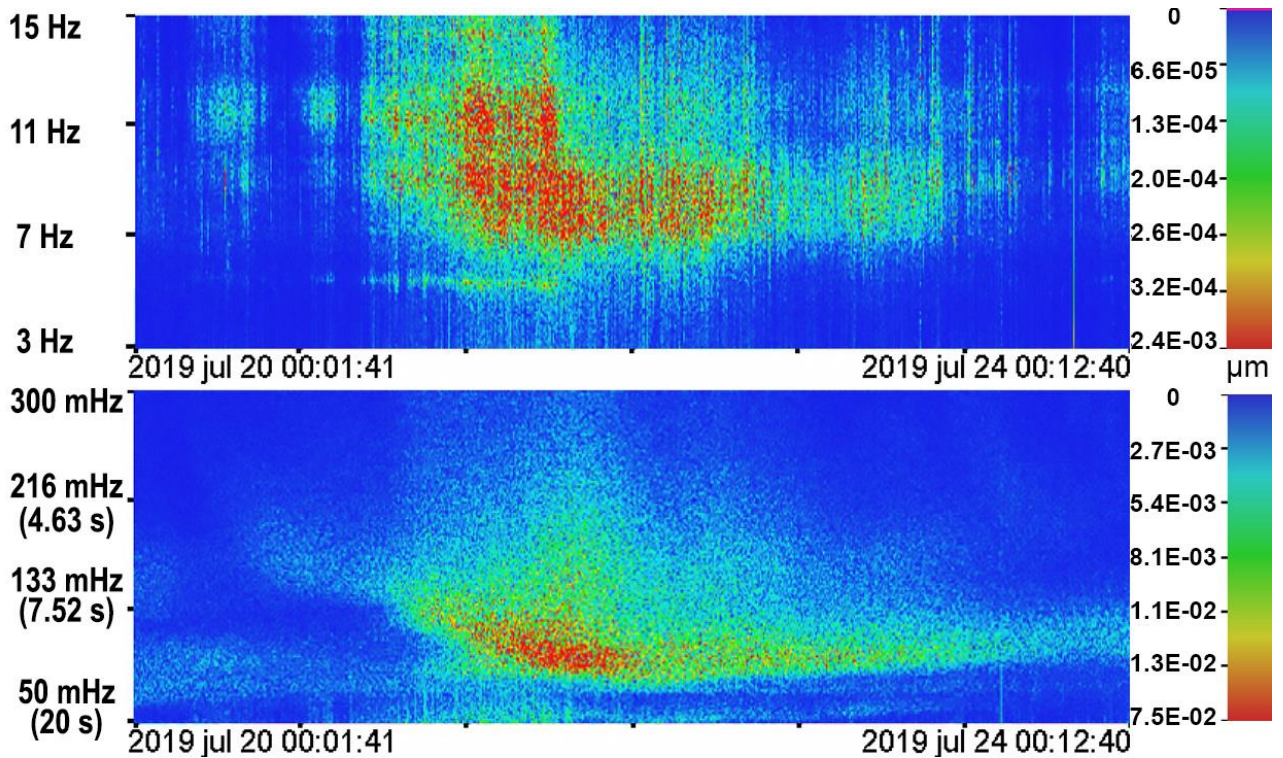


Рисунок 5.9. – Динамические спектрограммы данных лазерного деформографа в период влияния тайфуна Данас

Начало проявлений микросейсм «голос моря», вызванных тайфуном Данас, в спектрограммах наблюдалось 21 июля 2019 года около 6 утра (UTC), пиковая частота в данный период составляла 8 Гц, так же присутствует второй пик на частоте около 11 Гц. Второй сигнал пропадает, когда прекращается ветровое влияние в районе измерительного полигона. Центр тайфуна находился над акваторией Японского моря и перемещался на северо-восток в сторону мыса Поворотный. В это время зона активного ветрового давления фронтальной области вихря оказывает значительное влияние на шельфовую зону вблизи мыса Поворотный.

Максимальная амплитуда колебаний наблюдается в 17:00 21 июля 2019 года и имеет две пиковых частоты 8.5 и 11 Гц. Центр тайфуна находится около юго-восточного побережья Приморья. Затухание сигнала начинается в 10:00 22 июля 2019 года на протяжении последующих суток с пиковой частотой 8 Гц, Тайфун уже потерял статус урагана и в как тропическая депрессия продолжает движение на северо-восток вдоль побережья Приморского края.

В ходе наблюдения также регистрировались микросейсмы ветровых волн. При этом также заметны несколько волновых процессов, связанных как с ветровым волнением, приходящим из открытой части Японского моря, так и с изменяющимся направлением их движения.

Тайфун Франциско

Тайфун Франциско был довольно небольшим тропическим циклоном, который уже через двое суток после формирования перешел в разряд тропической депрессии. 7 августа, когда циклон проходил по акватории Японского моря, то уже позиционировался как внетропический циклон. На рис. 5.10 приведены динамические спектрограммы лазерного деформографа в диапазонах проявления микросейсм «голос моря» и ветрового волнения.

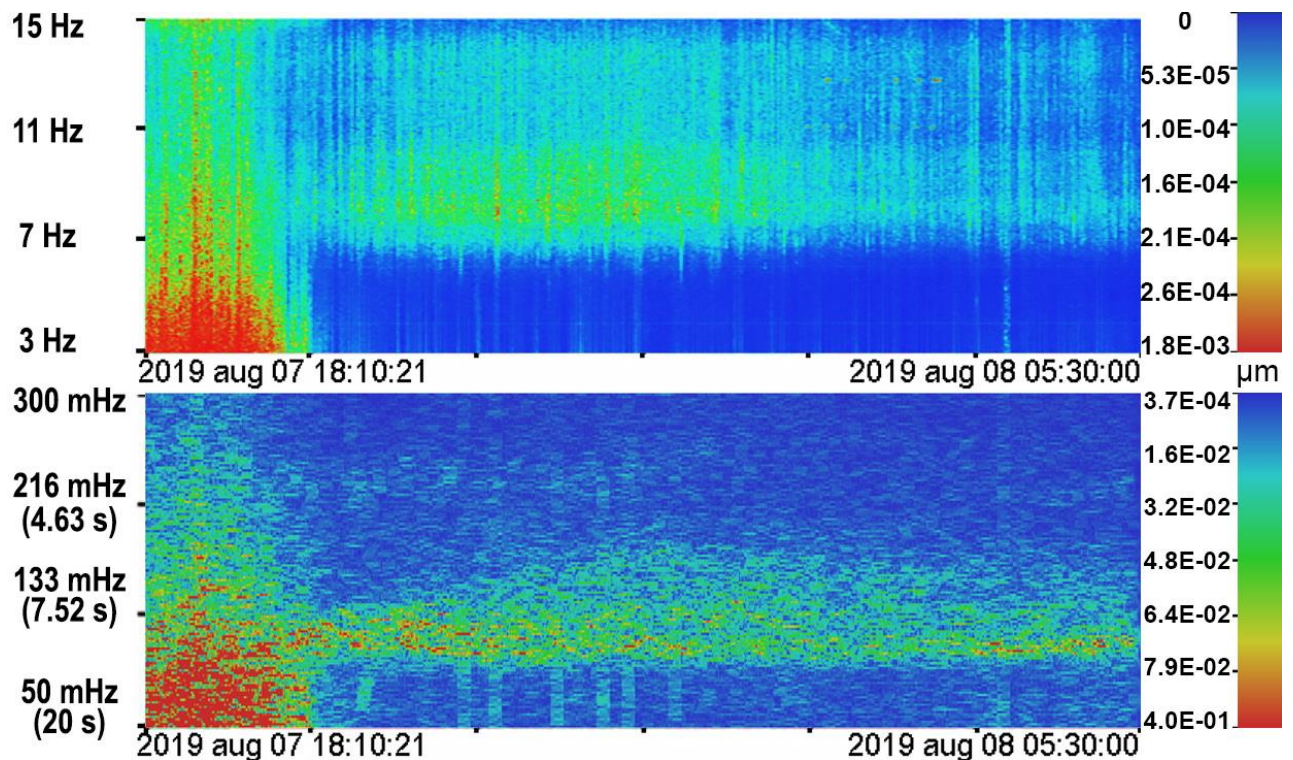


Рисунок 5.10. – Динамические спектрограммы данных лазерного деформографа в период влияния тайфуна Франциско

Проявления микросейсм «голос моря» во время прохождения тайфуна Франциско были довольно кратковременными. Они начались в 20:00 (UTC) 7 августа 2019 года и продолжались около 10 ч. Связано это скорее всего с тем, что тайфун за сутки преодолел все Японское море следуя на северо-восток от

Корейского полуострова. Пиковая частота инфразвуковых колебаний микросейсм «голос моря» в течение этого времени составляла 8.3 Гц.

Тайфун Гони.

Тайфун Гони, зародившийся 14 августа 2015 года восточнее Марианских островов, перемещался преимущественно в западном направлении и 21 августа резко поменял свое направление движения на север. Пройдя акваторию Японского моря, циклон пересек береговую линию Приморского края и стремительно переместился вглубь материка, достаточно быстро прекратив ветровое воздействие на акваторию Японского моря. На рис. 5.11 приведена спектрограмма инфразвукового сигнала «голос моря», возникшего в результате прохождения тайфуна.

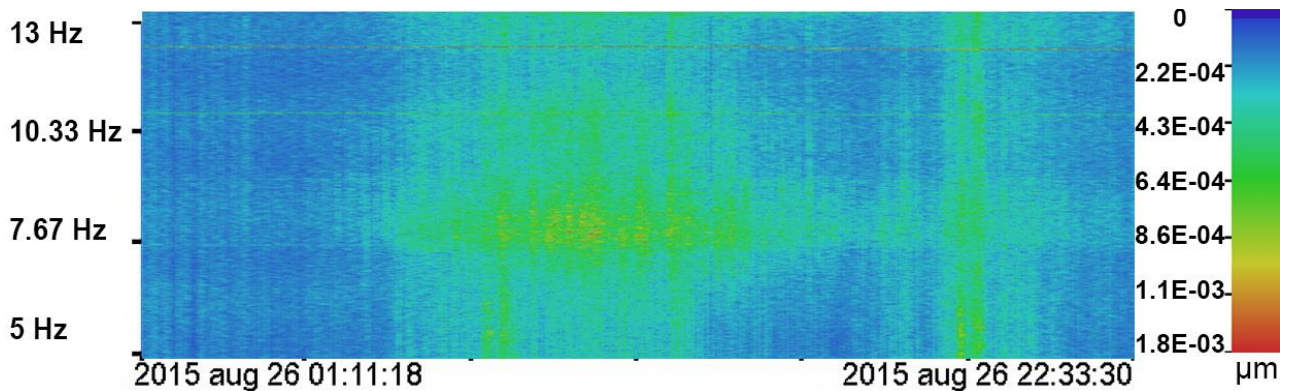


Рисунок 5.11 – Динамическая спектрограмма данных лазерного деформографа в период влияния тайфуна Гони.

Начало развития исследуемых инфразвуковых колебаний пришлось на утро 26 августа 2015 года, около 4:00 (UTC). Центр тайфуна в этот период находится над акваторией Японского моря и двигался в сторону мыса Поворотный на юге Приморского края. Пиковая частота общего диапазона колебаний составляла 7.95 Гц.

Наивысшая активность микросейсм наблюдалась около 10:00 утра (UTC) с пиковой частотой примерно 8.05 Гц. Центр тайфуна движется на север. Затухание начинаются в 20:00 (UTC) в момент выхода центра тайфуна на материковую зону Приморского края.

Тайфун Талим.

Талим стал восемнадцатым названным тайфуном 2017 года. Он зародился 6 сентября 2017 года. Траектория перемещения тайфуна напрямую практически не затрагивала территорию Приморского края. После изменения направления 15.09.2017 тайфун перемещался вдоль Японского архипелага, захватывая западной частью вихря акваторию Японского моря. На рис. 5.12 приведены динамические спектрограммы лазерного деформографа в области инфразвуковых колебаний «голос моря» и ветровых волн при движении тайфуна Talim в Японское море.

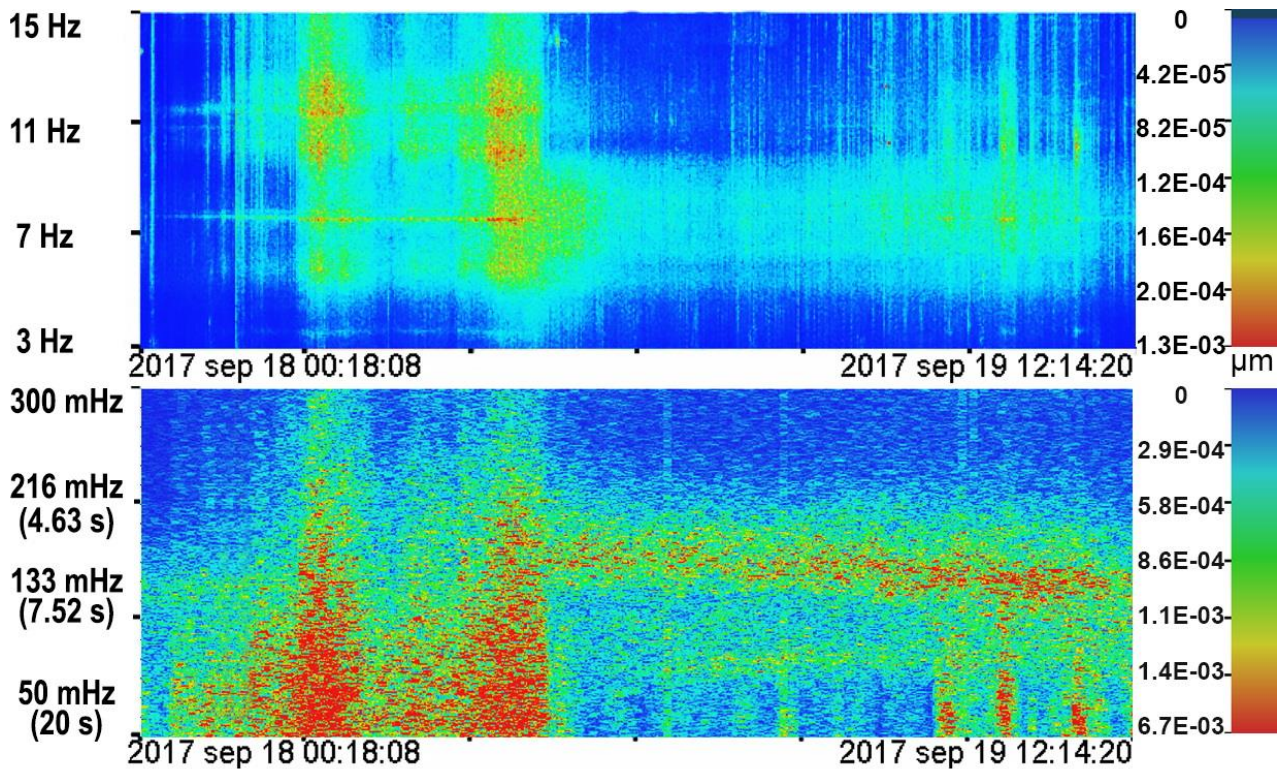


Рисунок 5.12 – Синхронные динамические спектрограммы данных лазерного деформографа в период влияния тайфуна Talim.

Начало проявлений исследуемых колебаний приходится на 05:00 18.09.2017. Центр тайфуна в этот временной промежуток находился над о. Хоккайдо и движется на север, а его вихревые потоки оказывают значительное влияние на акваторию Японского моря. Пиковая частота 8.9 Гц. Общий диапазон инфразвуковых колебаний составляет 7.6–10.5 Гц.

Самые сильные проявления наблюдаются в 13:00 (UTC) 18 сентября 2017 года с пиковой частотой 8.86 Гц. Центр тайфуна находится над южным побережьем о. Сахалин и продолжает движение на север. Тыловая часть тайфуна продолжает влиять на северную часть Японского моря. При этом циклон продолжает затягивать атмосферные массы, что вызывает преобладающие ветра юго-западного направления по всей акватории Японского моря. Постепенное затухание проявлений микросейсм «голос моря» наблюдаются с 18:00 (UTC) 18.09.2017 и продолжается вплоть до 12:00 19.09.2017.

В результате комплексного анализ данных лазерных деформографов 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. Предполагая наличие зависимости диапазона частот проявления данных микросейсм от траекторий перемещения атмосферного вихря была построена сравнительная таблица, в которой приведены диапазоны частот регистрируемых микросейсм и их частотные характеристики.

Таблица 5.3. 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 эти периоды диапазон инфразвуковых колебаний находится в полосе шириной менее 2 Гц. Отдельные диапазоны инфразвуковых колебаний достигают ширины до 4.5 Гц с длительностью более суток. Если обратить внимание на схему перемещения тайфунов в регионе, то можно заметить, что два тайфуна Болавен и Чан-хом из рассматриваемого списка 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.

Итак по сравнительным результатам спектрального анализа экспериментальных данных регистрации микросейсмических колебаний «голос моря», возникающих при влиянии мощных атмосферных вихрей в Японском море, получены зависимости распределения частотных диапазонов данных микросейсмических сигналов в зависимости от траектории движения циклонов.

5.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ МИКРОСЕЙСМ «ГОЛОС МОРЯ»

С целью решения задачи по определению областей генерации микросейсм «голос моря» обрабатывались данные двухкоординатного лазерного деформографа при прохождении трех тайфунов, траектории движения которых различались, через акваторию Японского моря [198-204]. Сводная схема траекторий тайфунов приведена на рисунке 5.13.

Исследовались амплитуды сигналов микросейсмических колебаний, зарегистрированных на обоих компонентах двух координатного лазерного деформографа. Предварительная обработка первичных данных включала в себя предварительное удаление аппаратных сбросов, применение низкочастотного фильтра Хэмминга длиной 1500 с граничной частотой 60 Гц и выполнении децимация рядов наблюдения до граничной частоты 60 Гц. Таким образом реализуется устранение избыточности данных в верхнем диапазоне частот для уменьшения времени обработки необходимого для исследования диапазона частот.

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.

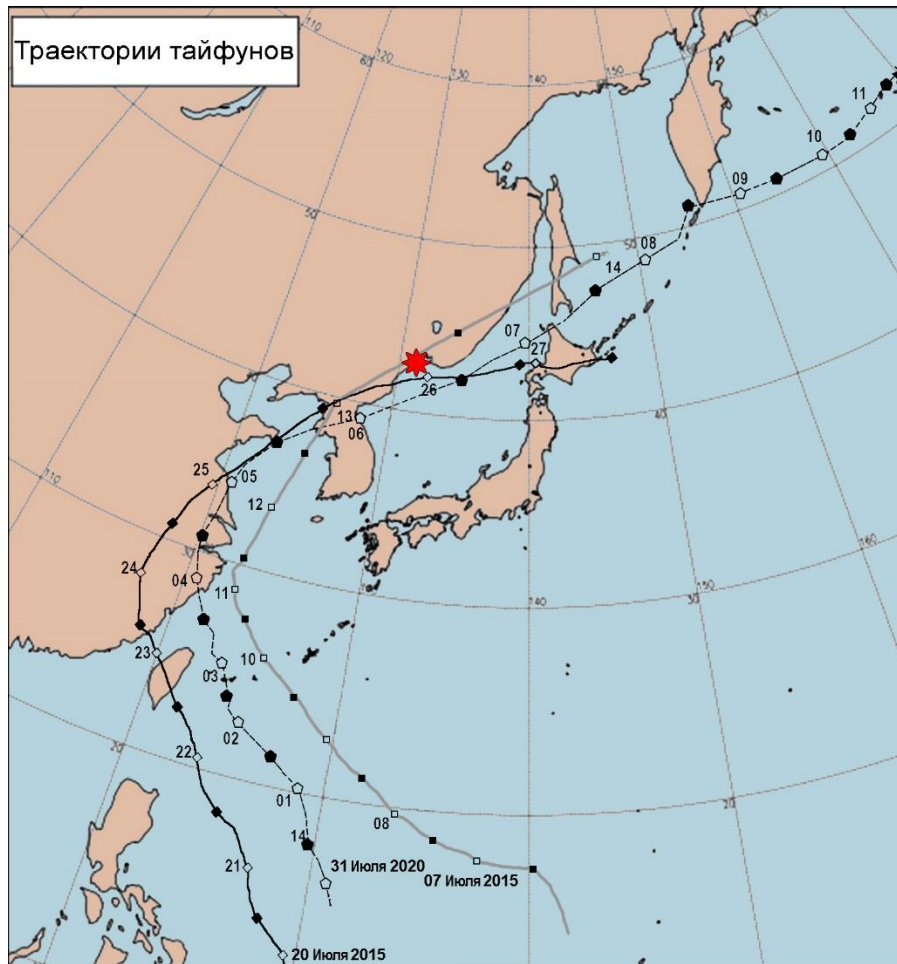


Рисунок 5.13 – Траектории тайфунов, где: красная отметка — местоположение лазерных деформографов; ■—Тайфун Чан-хом; ◆—Тайфун Матмо; ●—Тайфун Хагупит

Тайфун Чан-хом. Для определения зон генерации микросейсм “голос моря” обрабатывались данные двухкоординатного лазерного деформографа во время влияния тайфуна Чан-хом в районе измерительного полигона в период с 13 по 14 июля 2015 г. Описание особенностей проявления микросейсмических сигналов данного тайфуна показано ранее. Их генерация началась после начала воздействия сильного ветра тыльной части циклона на западную часть акватории Японского моря. При смещении области ветра вдоль побережья в район м. Поворотный в юго-

восточной части Приморского края, сигнал продолжает наблюдаться с достаточно большой амплитудой до 22:00 13.07.2015. После этого амплитуда значительно уменьшается и стабильно регистрируется в течение 10 ч. В это время центр тайфуна переместился на север Японского моря, а ветер концентрировался вдоль восточного побережья Приморского края.

На рисунке 5.14 приведены синхронные динамические спектрограммы данных деформографов в диапазоне регистрируемых микросейсмических сигналов в период влияния тайфуна Чан-хом.

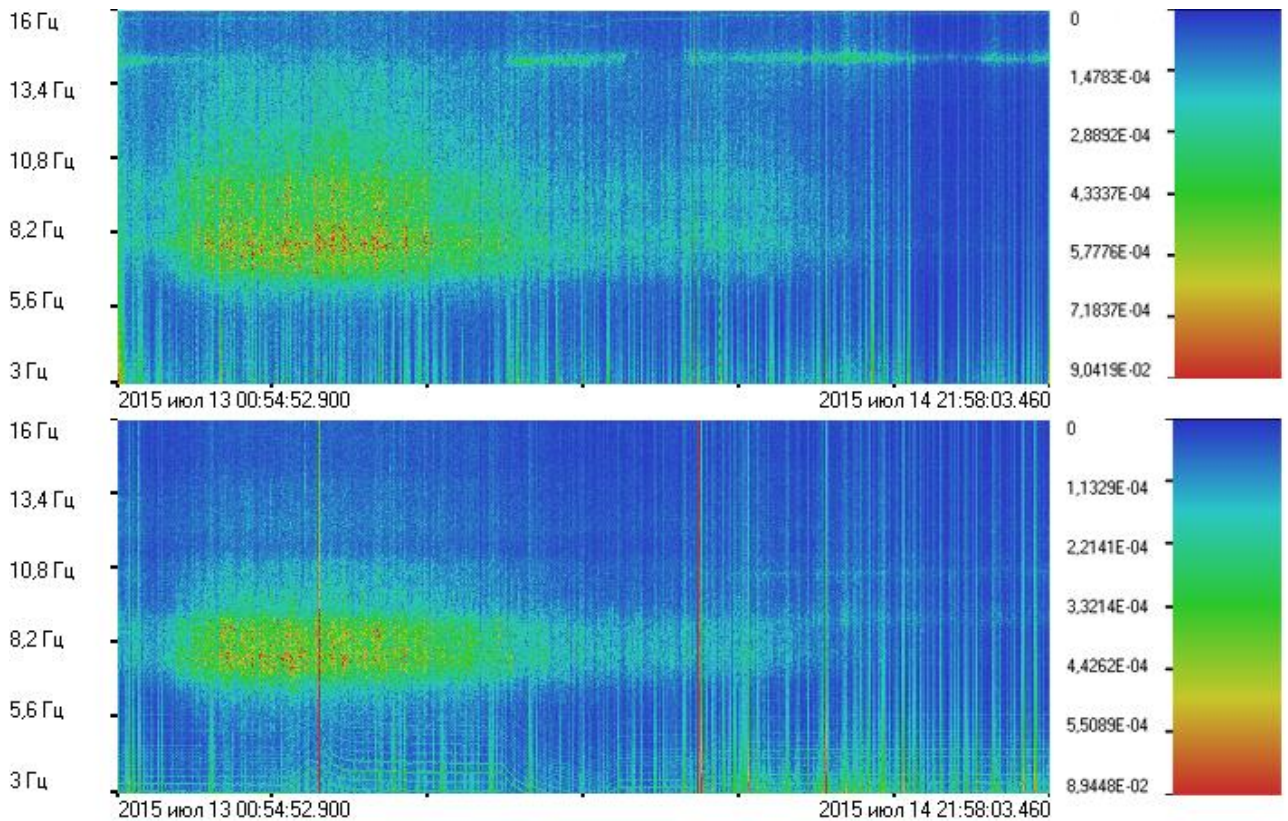


Рисунок 5.14 – Динамические спектрограммы микросейсм «голос моря» по данным 52,5-метрового лазерного деформографа (вверху) и 17,5-метрового лазерного деформографа (внизу) в июле 2015 г.

По результатам обработки данных были получены последовательности изменения величины амплитуды микросейсмического сигнала «голос моря» [205]. На рисунке 5.15 приведены вариации амплитуды микросейсмического сигнала «голос моря», зарегистрированного обоими компонентами двухкоординатного лазерного деформографа.

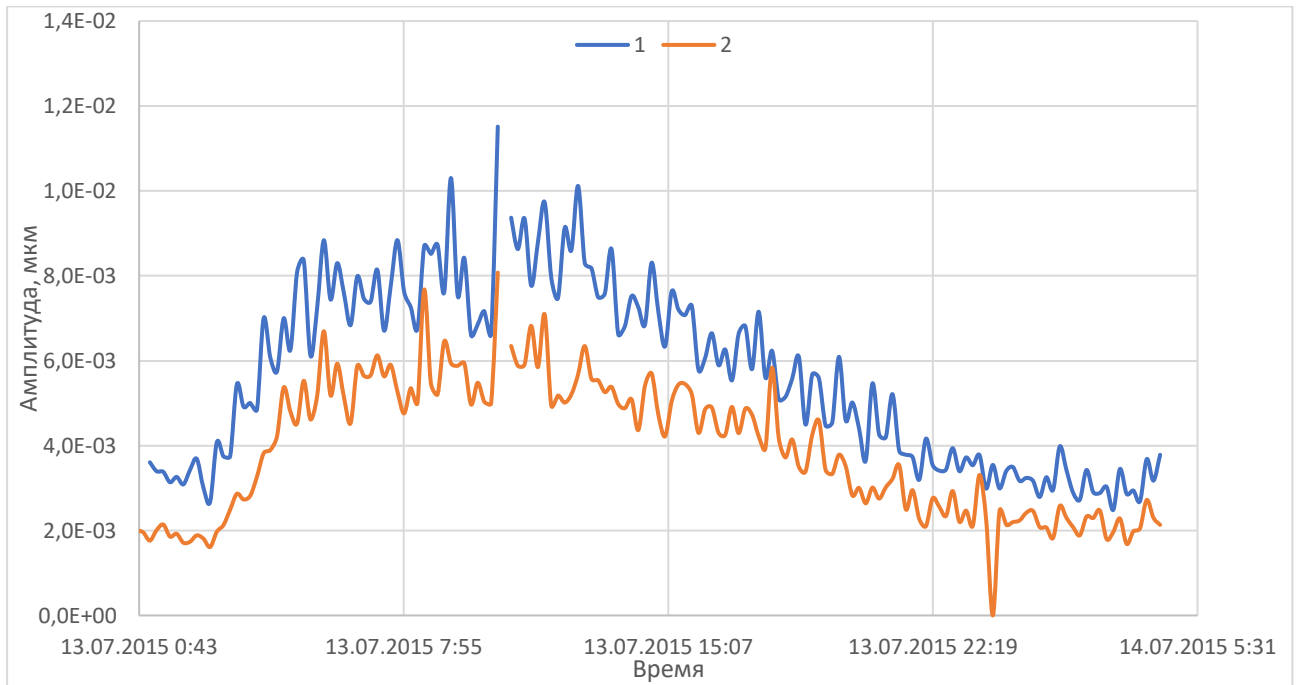


Рисунок 5.14. Вариация амплитуды микросейсмического сигнала «голос моря», регистрируемого лазерными деформографами в период прохождения тайфуна Чан-хон: 1 – вариации амплитуды сигнала, регистрируемого 52,5 метровым лазерным деформографом; 2 – вариации амплитуды сигнала, регистрируемого 17,5 метровым лазерным деформографом.

Области генерации микросейсм «голос моря» приведены на рис. 5.15. Последовательность их появления в зависимости от передвижения поля ветра обозначена цифрами от 2 до 6. Видно, что 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.

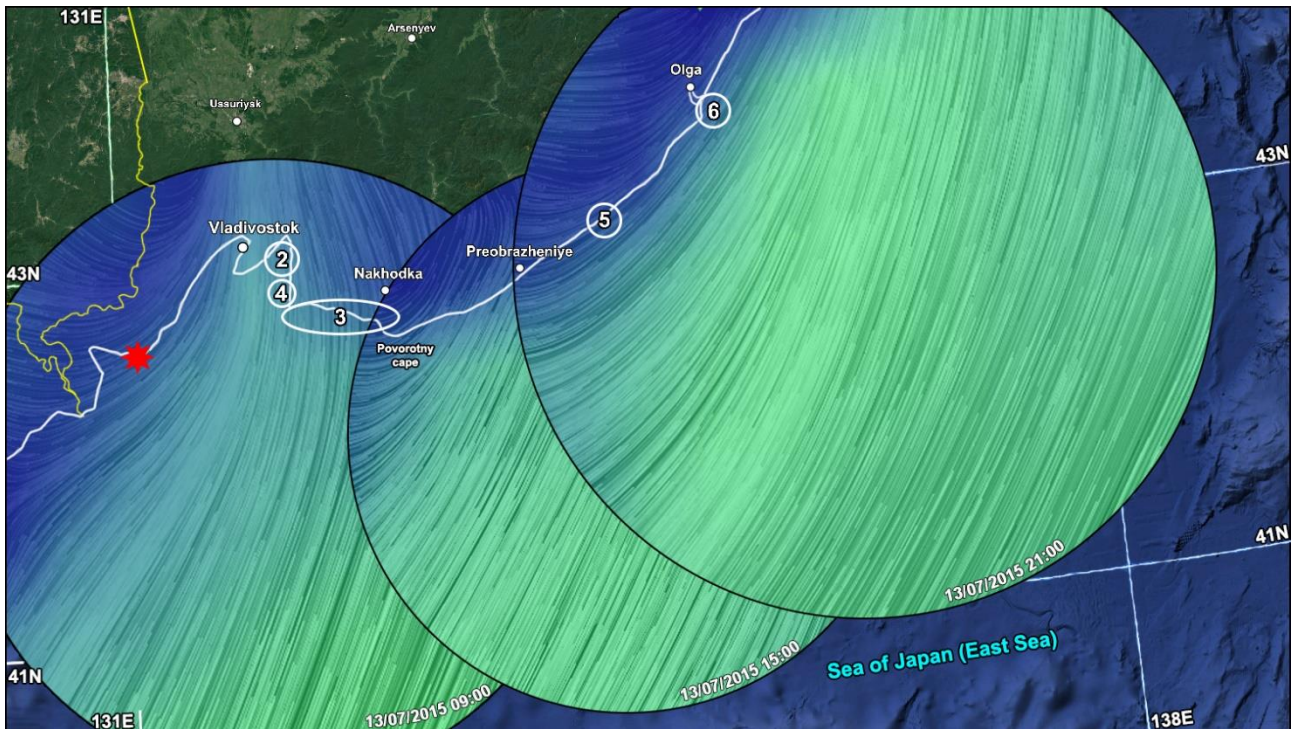


Рисунок 5.15 – Области генерации микросейсм «голос моря».

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

Красной отметкой указано место расположения двухкоординатного лазерного деформографа.

Тайфун Матмо. Тайфун при выходе в Японское море растратил большую часть своей энергии над юго-восточным азиатским регионом, в результате чего международные метеорологические службы перевели тайфун в разряд атмосферной депрессии. Тем не менее тропический циклон имел еще достаточно энергии для воздействия на морскую поверхность и генерацию в акватории Японского моря высоких волн. Тайфун снова набрал силу при переходе через Японское море. Область тайфуна растянулась до формы атмосферного фронта, но приблизившись к островам Японии, атмосферный вихрь снова принял компактную форму и задержался практически на сутки у восточного побережья японского острова Хоккайдо. Все это время вплоть до момента прекращения влияния тайфуна на акваторию Японского моря наблюдался сигнал микросейсм «голос моря», время наблюдения которых находилось в период 26–27.07.2014 г. По данным

двухкоординатного лазерного деформографа, динамические спектрограммы сигнала которого приведены на рисунке 5.16.

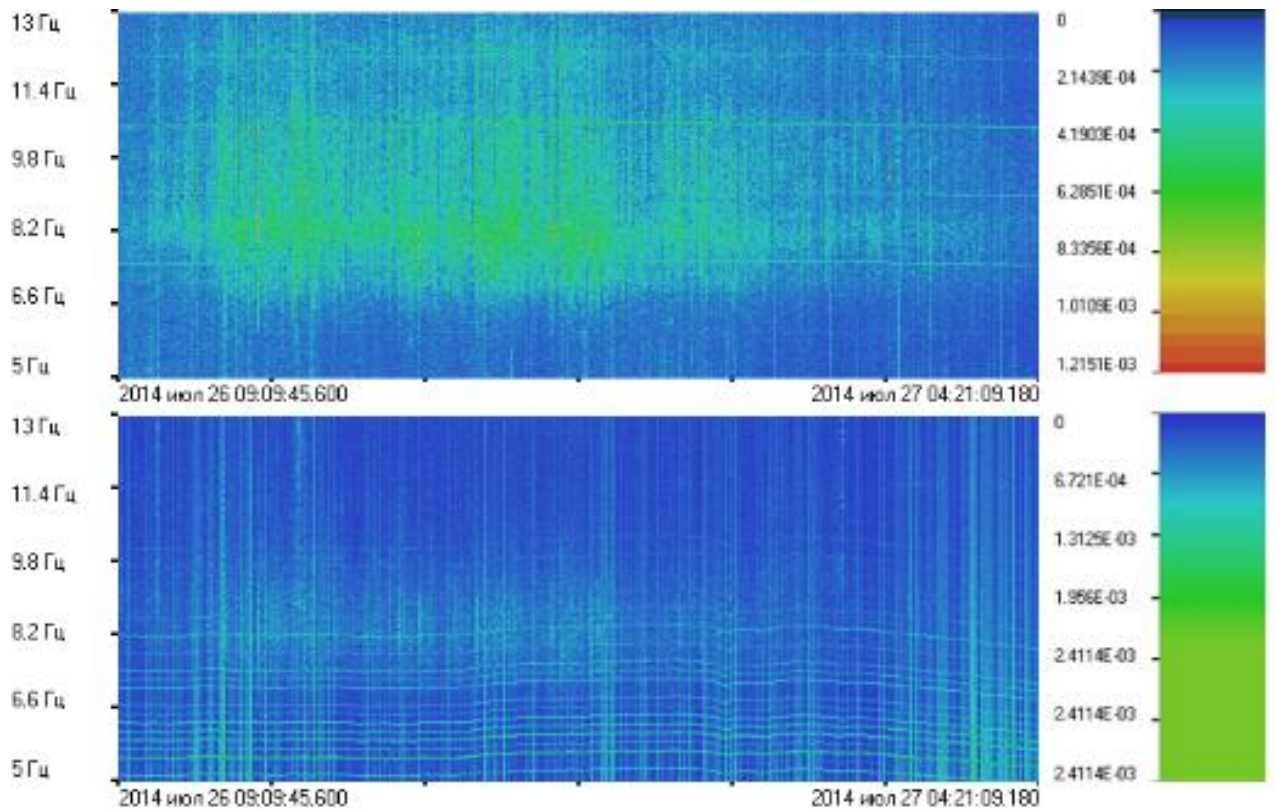


Рисунок 5.16 – Динамические спектрограммы микросейсм «голос моря» по данным 52,5-метрового лазерного деформографа (вверху) и 17,5-метрового лазерного деформографа (внизу) в июле 2014 г.

По результатам обработки сигнала в данных обоих лазерных деформографов были определены области генерации микросейсм «голос моря» во время нахождения тропического циклона в западной акватории от японского острова Хоккайдо (рисунок 5.17). Полученные области формировались в шельфовой области западного побережья японского острова и постепенно смещались с севера на юг до полного затухания.

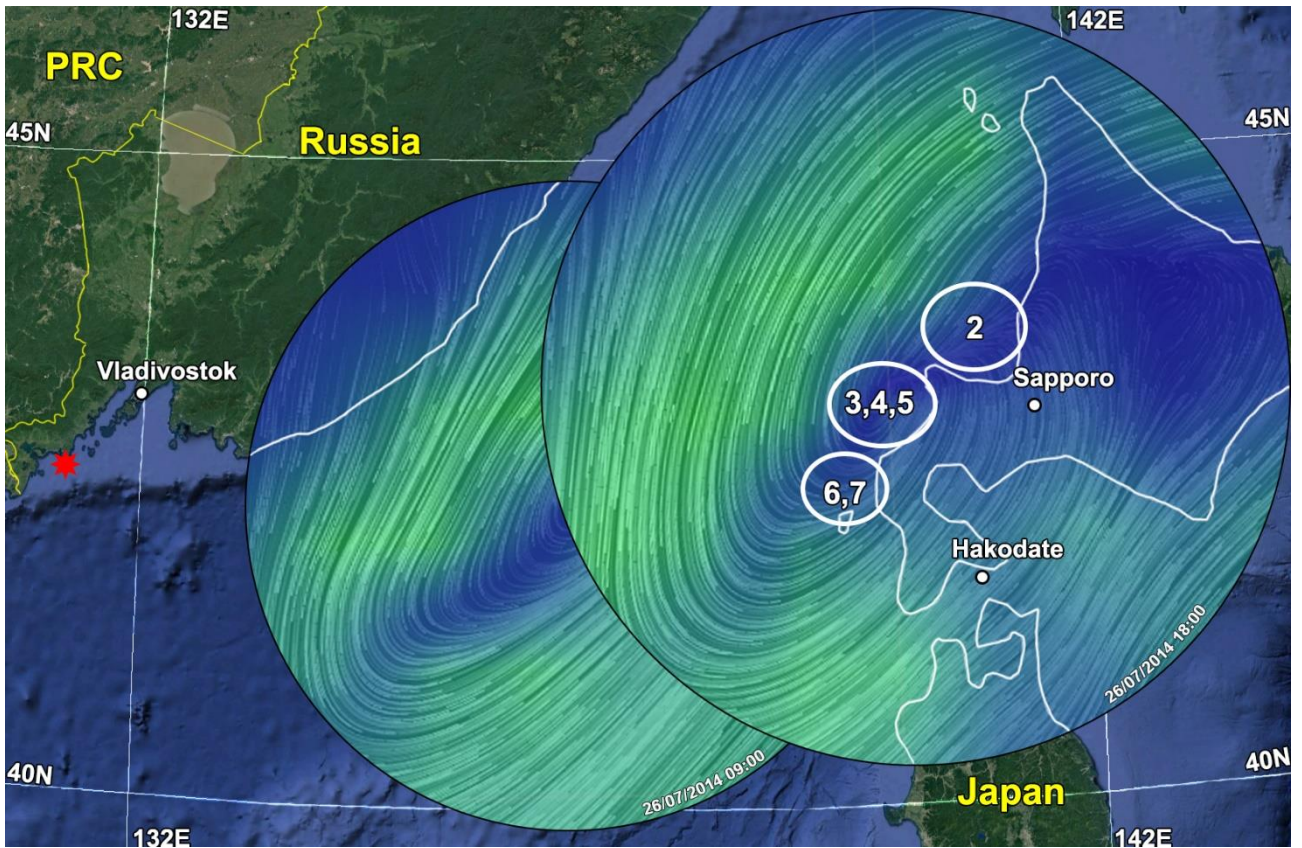


Рисунок 5.17 – Области генерации микросейсм “голос моря”. 2–7 – последовательные (по времени) области генерации микросейсм.

Красной отметкой указано место расположения двухкоординатного лазерного деформографа.

Тайфун Хагунит. Тайфун, перемещался по Японскому морю вдоль Приморского края 06-07.08.2020 г. Он также, как и большинство тайфунов, растерял большую часть своей энергии до выхода в Японское море. По карте ветрового давления было определено, что центр тайфуна вышел в Японское море с Корейского полуострова в Восточно-Корейский залив. Перед его заходом на Корейский полуостров мощный боковой рукав вихря уже разгонял волны от Корейского пролива до места выхода в Японское море. После выхода тайфуна в Японское море появилось мощное ветровое воздействие в обратном направлении с севера на юг. Тайфун переместился в центральную часть Японского моря менее чем за 6 ч, не создав там значительных волн, во взаимодействии с которыми генерируются инфразвуковые микросейсмические колебания «голос моря». На

рисунке 5.18 приведены динамические спектрограммы зарегистрированного сигнала обоих лазерных деформографов.

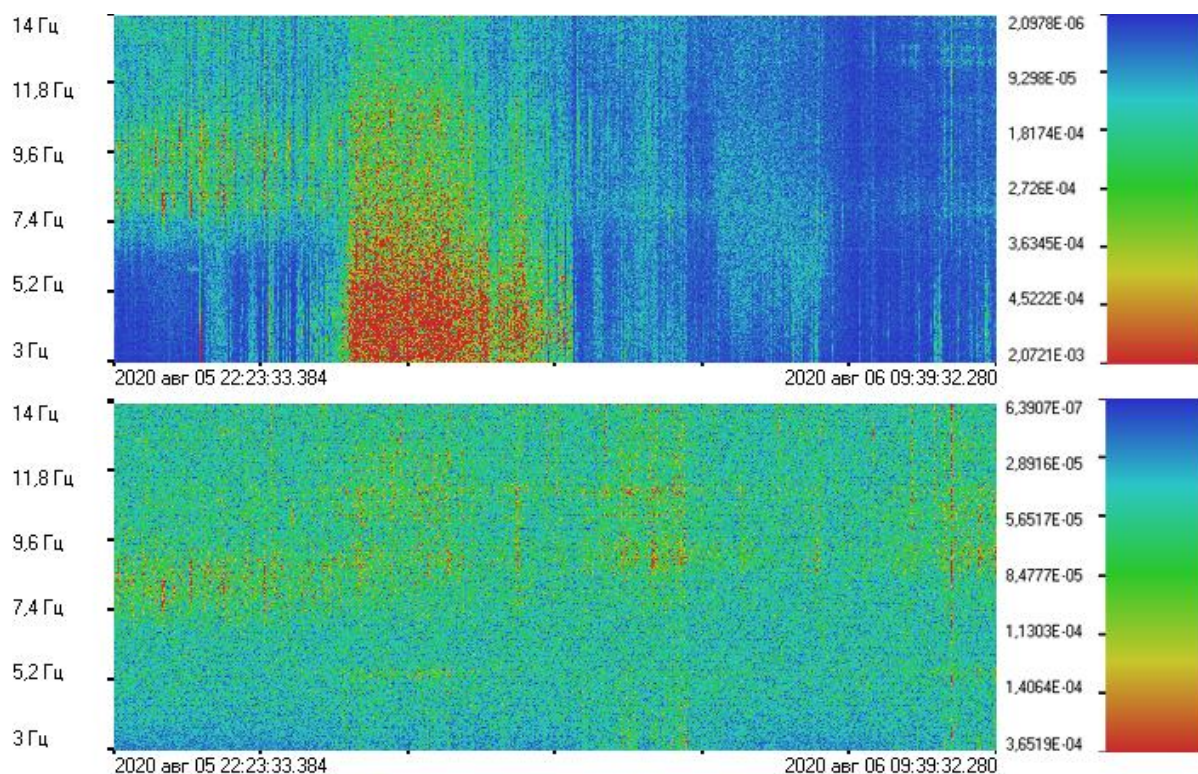


Рисунок 5.18 – Динамические спектрограммы микросейсм «голос моря» по данным 52,5-метрового лазерного деформографа (вверху) и 17,5-метрового лазерного деформографа (внизу) в августе 2020 г.

По данным двухкоординатного лазерного деформографа было установлено, что микросейсм «голос моря» наблюдались меньше суток. Сигнал начал формироваться в акватории Восточно-Корейского залива, смещаясь вдоль восточного побережья КНДР и затухая в районе залива Цзинчэн. Области генерации микросейсм, определенные по данным двухкоординатного лазерного деформографа, приведены на рисунке 5.19.

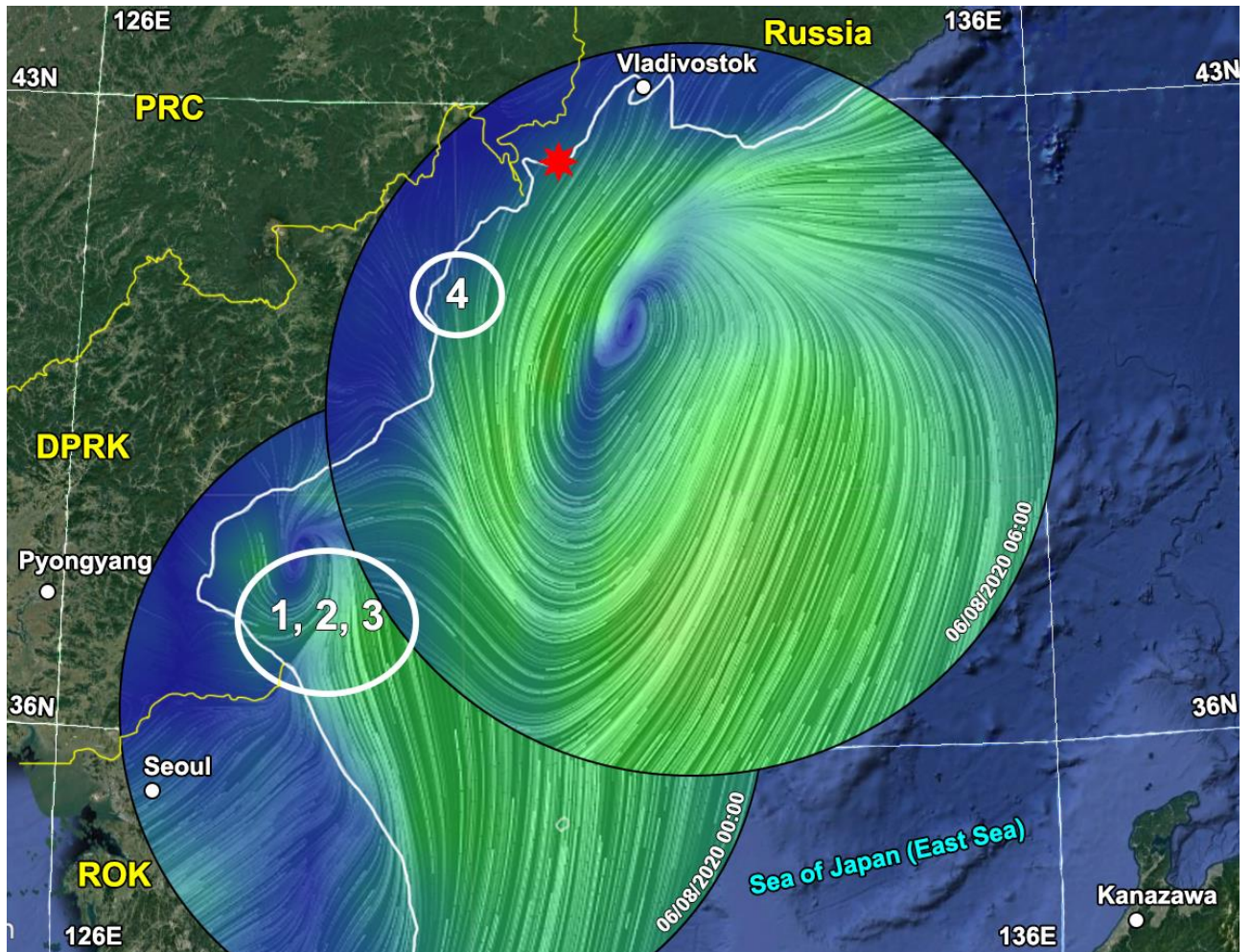


Рисунок 5.19 – Области генерации микросейсм «голос моря».

1–4 – последовательные (по времени) области генерации микросейсм.

Красной отметкой указано место расположения двухкоординатного лазерного деформографа.

5.6. ВЫВОДЫ

При исследовании микросейсмического фона, регистрируемого береговыми лазерными деформографами, были обнаружены микросейсмические колебания в диапазоне частот от 6 до 11 Гц, генерирующиеся в периоды воздействия на акваторию моря мощных тропических циклонов. Данные микросейсмические колебания получили название «микросейсмсы «голос моря»» в соответствии с названием аналогичных по частоте колебаниями в атмосфере.

Выявлена взаимосвязь между микросейсмическими колебаниями вызванными морскими волнами зыби с микросейсмическими колебаниями «голос моря». Исчезновение микросейсм «голос моря» коррелирует с исчезновением первичных микросейсм и слабо коррелирует с исчезновением вторичных микросейсм. При этом процесс развития и затухания этих микросейсмических колебаний не связано с вариациями скорости и направления ветра на измерительном полигоне, так как эти вариации не совпадают с максимальными амплитудами микросейсм «голос моря».

По результатам статистических исследований архивных данных микросейсмических колебаний за 10 лет определено несколько групп тайфунов, частотные диапазоны проявления микросейсм «голос моря» которых зависят от их траектории перемещения в акватории Японского моря, а ширина частотного диапазона микросейсм зависит от длительности воздействия на акваторию моря.

На основе возможности применения двухкоординатного лазерного деформографа для определения направления на источник сигнала при его трансформации в шельфовой области моря определены зоны генерации микросейсмических колебаний «голос моря» в прибрежных областях 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 // В сборнике: Физика Геосфер. материалы докладов. 2011. С. 251-255.
2. Долгих Г.И., Копвиллем У.Х., Павлов А.Н. Интерференционные измерения малых смещений / Владивосток, 1981. - 47 с. - Деп. в ВИНТИ 14.05.81, № 2488-81.
3. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Мукомел Д.В., Швец В.А., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс / Материалы докладов II Всерос. Симп. "Сейсмоакустика переходных зон". - Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2001. - С.15–18.
4. Долгих Г.И., Батюшин Г.Н., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы «Атмосфера – Гидросфера – Литосфера» / Приборы и техника эксперимента. - 2002. – N 3. - С.120-122.
5. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Овчаренко В.В., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерно-интерференционный метрологический комплекс / сборник трудов XVIII сессии РАО. - М.: ГЕОС, 2006. - Т. 2. - С.38–42.
6. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.В., Овчаренко В.В., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерно-интерференционный комплекс / Дальневосточные моря России кн. 4 "Физические методы исследований" - М.: Наука, 2007. - С.15–48.
7. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Применение лазерно-интерференционного комплекса в океанологических исследованиях / Материалы международной научно-

технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». - 2005. - С. 143–148.

8. 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.

9. Долгих Г. И., Ковалев С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В. Двухкоординатный лазерный деформограф / Физика Земли. - 1998. - № 11. - С.76–81.

10. 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.

11. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Дальнаука, 2009. - 202 с.

12. Долгих Г.И. Аппаратно-программные комплексы геодинимического мониторинга / Тихоокеанская геология. - 2012. - Т. 31. - N 1. - С.71–79.

13. Jahr T., Kroner C., Lippman A. Strainmeters at Moxa observatory, Germany / Journal of Geodynamics. - 2006. - Т. 41. - N 1-3. - С.205–212.

14. Милуков В.К., Клячко Б.С., Мясников А.В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н. Лазерный интерферометр-деформограф для мониторинга движений земной коры / ПТЭ. - 2005. - N 6. - С.87–103.

15. 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 экспериментов. - 2013. - N 2. - С.138–139.

16. Долгих С.Г., Долгих Г.И., Чупин В.А., Яковенко С.В. Применение мобильного лазерного деформографа / Фотоника. – 2016. - N 6. С.82-87.

17. Долгих С.Г., Долгих Г.И. Мобильный лазерный интерферометр. Патент на полезную модель RU 80939 U1, 27.02.2009. Заявка № 2008139573/22 от 06.10.2008.
18. Кузнецов В. П. Нелинейная акустика в океанологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 264 с.
19. V.M. Sharapov, Zh.V. Sotula, I.V. Chornoshiy, L.G. Runickaya, K.V. Bazilo Electroacoustic transducer / Pat. 56932 Ukraine. 25.01.11, N 2.
20. Spindel R.C. Acoustic Source Technology. First International Meeting on Global Acoustic Monitoring of the Ocean. Abstracts, SCOR WG'96, - 1992, - La Jolla, California, - C.56-58
21. Пенкин С.И. Разработка низкочастотных излучателей и их применение в технических системах для акустической томографии океана / В сб. Морские технологии ИПМТ ДВО РАН. - Владивосток.: Дальнаука, 2001. - Вып.4. – С.149–166.
22. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990. - 320 с.
23. Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Л.: Машиностроение, 1970. – 752 с.
24. Справочник машиностроителя в шести томах. Изд. 2-е испр. и доп. М.: Машгиз, Т. 3. 1955.
25. Пенкин С.И. Морской вибрационный источник / Сб. Морские технологии ИПМТ ДВО РАН, Владивосток. – 2003. N 5. - 4 с.
26. 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. – N 4. – С.137-141.
27. Dolgikh G.I. Pendulum-type laser strainmeter / Earthquake Science. – 2015. – N 4. – С.311-317.

28. Долгих Г.И., Чупин В.А. Экспериментальная оценка преобразования гидроакустического излучения в сейсмоакустическую волну // Акустический журнал. 2005. Т. 51. № 5. С. 628-632.
29. Долгих Г.И., Батюшин Г.Н., Долгих С.Г., Дзюба В.П., Чупин В.А. Трансформация сейсмоакустической энергии в гидроакустическую // Доклады Академии наук. 2008. Т. 243. № 6. С. 815-816.
30. Akal Tuncay, Jensen F.V. Ocean seismo-acoustic propagation // Progr. Congr. Acoust. Symp. Underwater Acoust. Halifax; London, 1987. P. 493–500.
31. Долгих Г.И., Давыдов А.В., Кабанов Н.Ф. Применение лазерных деформографов в гидроакустике // Акустический журнал. 1995. Т. 41, №2. С. 235–239.
32. Долгих Г.И. Некоторые результаты экспериментального исследования сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых низкочастотным гидроакустическим излучателем // Акустический журнал. 1998. Т. 44, №3. С. 358–361.
33. Чупин В.А. Исследование трансформации энергии акустических волн на границе геосфер // В сборнике: Физика геосфер: Восьмой Всероссийский симпозиум, 2-6 сентября 2013 г. С. 228-230.
34. Долгих Г.И., Плотников А.А., Долгих С.Г., Чупин В.А., Яковенко С.В. Взаимодействие низкочастотных гидроакустических волн с ветровыми морскими волнами // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430. №2. С.257-260.
35. Борисов С.В., Кабанов Н.Ф., Рутенко А.Н. Экспериментальные исследования флуктуаций акустического поля на стационарных трассах // Акустический журнал. Т. 42. № 3. С. 359-364.
36. Рутенко А.Н. Сезонная изменчивость флуктуаций интенсивности и фазы низкочастотных гидроакустических сигналов, распространяющихся в шельфовой зоне Японского моря // Акустический журнал. Т. 43. № 1. С. 98-105.

37. 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 XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Том Выпуск 2. Дальнаука. Владивосток, 2020. С. 50-73.
38. Долгих Г.И. Разработка технологии томографии земной коры шельфа и глубокого моря на основе применения береговых лазерных деформографов и широкополосных низкочастотных гидроакустических излучателей // Ученые записки Физического факультета Московского университета, 2017. №5, 1750804.
39. 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 // В сборнике: Физика геосфер. Сборник научных статей по избранным материалам XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток, 2020. С. 50-73.
40. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И.П. Голямина. – Москва: «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с.
41. Исакович, М.А. Общая акустика: учебное пособие / М.А. Исакович; под редакцией В.А. Григоровой, Н.А. Райской. – Москва: «Наука», 1973. – 496 с.
42. 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 Acoustic Society of America. 2017. 142 (4). P. 1990–1996.
43. 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. T. 10. № 9. С. 3183.
44. 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.

45. Marsh H.W., Shulkin M. Shallow water transmission // Journal Acoustic Society of America. 1962. V. 34. P. 863.

46. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.

47. 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.

48. Dreo R., Trabattoni A., Stinco P., Micheli M., Tesei A. Detection and Localization of Multiple Ships Using Acoustic Vector Sensors on Buoyancy Gliders: Practical Design Considerations and Experimental Verifications// IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2023. V. 48, №2, pp. 577-591.

49. Morley M.G., Dosso S.E., Chapman N.R. Array element localization using ship noise // Journal Acoustical Society of America. 2009. V. 125, P.1403–1409.

50. Zak A. Ships classification basing on acoustic signatures // WSEAS TRANSACTIONS on SIGNAL PROCESSING. 2008. V. 4. № 4. P. 137-149.

51. Орлов Д.А., Турчин В.И. Измерение характеристик приемных антенных решеток в условиях мелкого моря // Акустический журнал. 2001. Т. 47, № 5. С. 698-705.

52. Scholte, J.G., 1947. The range of existence of Rayleigh and Stoneley waves. Geophysical Journal International , 5(5), 120–126.

53. Liang, M.; Wang, L.; Yu, G.; Ren, Y.; Peng, L. Study on a Detection Technique for Scholte Waves at the Seafloor. Sensors 2022, 22, 5344. <https://doi.org/10.3390/s22145344>

54. Trabattoni A., Barruol G., Dréo R., Boudraa A. Ship detection and tracking from single ocean-bottom seismic and hydroacoustic stations // *Journal Acoustical Society of America*. 2023. V. 153. P. 260–273
55. Zhao S., Zhang J., Wang Z., Huang H., Hu J., Guo C. Improving Scholte-wave vibration signal recognition based on polarization characteristics in coastal waters // *Journal of Coastal Research*. 2020. V. 36. № 2. P 382–392.
56. Zhao S., Gu D., Guo C., Wang X., Zhang, J. Propagation characteristics of seismic waves in shallow sea sedimentary layers // *Journal of Coastal Research*. 2023 V. 39. № 1. P. 32–44.
57. Долгих Г.И., Копвиллем У.Х., Павлов А.Н. Интерференционные измерения малых смещений // Деп. в ВИНТИ, 1981. №2488-81. - 47 с.
58. Долгих Г.И., Копвиллем У.Х. Измерение низкочастотных морских шумов в диапазоне 0,01-100 Гц при помощи сейсмоакустического канала в прибрежной зоне // Научный отчет, 1985, - № Гос. регистрации 81067363. - 107 с.
59. Долгих Г.И., Копвиллем У.Х., Павлов А.Н. Наблюдение периодов собственных колебаний Земли лазерным деформометром // *Известия АН СССР. - Физика Земли*, 1983. - № 2. - С. 15-20.
60. Давыдов А.В., Долгих Г.И., Запольский А.М., Копвиллем У.Х. Регистрация гидроакустических колебаний лазерным деформометром // Тез. Докл. II межотр. Акуст. Сем. «Модели, алгоритмы, принятие решений». - М.: Акуст. Ин-т, 1988. - С. 122.
61. Давыдов А.В., Долгих Г.И. Исследование случайных процессов в сейсмоакустике методом длиннобазовой лазерной интерферометрии // Тез. Докл. III Всесоюзн. Конф. «Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов». - М.: Наука, 1988. - С. 95-96.

62. Давыдов А.В., Долгих Г.И. Акустический мониторинг переходной зоны океан-материк лазерными деформографами // Акустический журнал, 1994. - Т. 40, № 3. - С. 466-467.
63. Долгих Г.И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов // Письма в ЖТФ. 2011. Т.37. Вып. 5. С. 24-30.
64. 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.
65. Чупин В.А., Бородин А.Е., Долгих Г.И. Возможности двухосевых лазерных деформографов по регистрации сейсмоакустических сигналов, создаваемых морскими объектами // Фундаментальная наука – Военно-Морскому Флоту. Т. 2. Материалы круглого стола в рамках VII Международного военно-морского салона. 1 июля 2015 г. – М.: Техносфера, 2016. С. 189-193.
66. 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.
67. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Дальнаука, 2009. 202 с.
68. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Спектральные характеристики гидроакустических каналов речных судов // Вестник НГУ. 2014. №6(1). С. 63-69.
69. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Судостроение. Л.: 1978. 129 с.
70. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка шумности движущихся источников на основе идентификации акустической модели морского дна // Акустический журнал 2013. Т. 59. № 6. С. 722–734.
71. 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., Ярошук И.О.

Регистрация источников гидроакустического излучения системой пространственно-разнесенных лазерных деформографов // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4 (42). С. 62-70.

72. Чупин В.А., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., 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.

73. Давыдов А.В., Долгих Г.И., Кабанов Н.Ф. Применение лазерных деформографов в гидроакустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 235–239.

74. Tolstoy A. Volumetric (tomographic) three-dimensional geoacoustic inversion in shallow water // Journal Acoustic Society of America. 2008. Vol. 124, N 5. P. 2793–2804.

75. Yang J., Jackson D.R., Tang D. Mid-frequency geoacoustic inversion using bottom loss data from the Shallow Water 2006 Experiment // Journal Acoustic Society of America. 2012. V. 131. № 2. P. 1711–1721.

76. Yardim C., Gerstoft P., Hodgkiss W.S. Sequential geoacoustic inversion at the continental shelfbreak // Journal Acoustic Society of America. 2012. V. 131. № 2. P. 1722–1732.

77. Авербах В. С., Боголюбов Б.Н., Заславский Ю.М., Лебедев А. В., Марышев А.П., Постоенко Ю.К., Таланов В.И. Применение сложных фазоманипулированных сигналов для сейсмоакустического зондирования грунта гидроакустическим источником // Акустический журнал. 1999. 45, №1. С. 5-12.

78. Tolstoy A. J. Volumetric (tomographic) three-dimensional geoacoustic inversion in shallow water // Journal Acoustic Society of America. 2008. 124, N5. P. 2793.

79. Акустика дна океана / под ред. Купермана У. и Енсена Ф. М.: Мир. 1984.

80. Wang Z., Ma Y., Kan G., Liu B., Zhou X., Zhang X. An Inversion Method for Geoacoustic Parameters in Shallow Water Based on Bottom Reflection Signals // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. P. 3237.
81. Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н., Вировлянский А.Л., Лебедев А.В., Малеханов А.И. Марышев А.П., Таланов В.И. Перспективные методы и технические средства сейсмоакустического зондирования шельфа и береговой зоны океана // *Фундаментальные исследования океанов и морей*. М.: Наука. 2006. Т. 2. С. 491-511.
82. Smirnov I.P., Kalinina V.I., Khil'ko A.I. Reconstruction of the Sea Bottom Parameters for Coherent Seismoacoustic Sounding: I. Decision Rules // *Acoustical Physics*. 2018. V. 64. P. 49–57.
83. Калинина В.И., Смирнов И.П., Малеханов А.И., Хилько А.И. Когерентная морская сейсмоакустика: новые подходы к реконструкции структуры донных слоев в шельфовых акваториях // *Известия РАН. Серия физическая*. 2017. Т. 81. № 8. С. 1020–1027.
84. Heyburn R., Bowers D., Green D.N. Seismic and hydroacoustic observations from recent underwater events in the South Atlantic Ocean // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 223. № 1. P. 289–300.
85. Stevens J.L., Hanson J., Nielsen P., Zampolli M., Le Bras R., Haralabus G., Day S.M. Calculation of Hydroacoustic Propagation and Conversion to Seismic Phases at T-Stations // *Pure and Applied Geophysics*. 2021. V. 178. P. 2579–2609.
86. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое профилирование морского дна с использованием широкополосных сигналов // *Океанология*. 2013. Т.53, № 6. С. 843-850.
87. Rodriguez, A. Manuel-Lazaro, A. Carlosena, A. Bermudez, J. del Rio and S. S. Panahi Signal processing in ocean bottom seismographs for refraction seismology // *IEEE*

Transactions on Instrumentation and Measurement. 2006. V. 55, № 2. P. 652-658. doi: 10.1109/TIM.2006.870107.

88. Hable S., Sigloch K., Stutzmann E., Kiselev S., Barruol G. Tomography of crust and lithosphere in the western Indian Ocean from noise cross-correlations of land and ocean bottom seismometers // *Geophysical Journal International*. 2019. V. 219. P. 924–944.

89. Tikhotskii S. A., Presnov D. A., Sobisevich A. L., Shurup A. S. The Use of Low-Frequency Noise in Passive Seismoacoustic Tomography of the Ocean Floor // *Acoustical Physics*. 2021, V. 67. N. 1. PP. 91–99.

90. Klyuev M., Schreider A., Zverev A. Shelf Fluvial Paleo Structures: Seabed Seismic Acoustic View. Springer: Nature Switzerland AG, 2023. - 79 p.

91. Giustiniani M, Tinivella U, Parolai S, Donda F, Brancolini G and Volpi V Integrated Geophysical Analyses of Shallow-Water Seismic Imaging With Scholte Wave Inversion: The Northern Adriatic Sea Case Study // *Frontiers in Earth Science* 2020. V. 8. P. 587898.

92. Li X., Zhao K., Zhang H., Yao J., Birdus S., Zhou J Overcoming Shallow Water Imaging Challenges in Australia’s North West Shelf // 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. 2021. V. 2021. P. 1-5.

93. Liu W., Liu Y., Wang J., Zhang J., Wu Z., Yang T. Joint travelttime tomography for seawater based on ocean bottom seismometer and towed streamer observations // *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*. 2024. V. 67. P. 2378-2387.

94. Kugler S., Bohlen T., Forbriger T., Bussat S., Klein G. Scholte-wave tomography for shallow-water marine sediments // *Geophysical Journal International*. 2007. V. 168. № 2. P. 551–570.

95. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л. Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема // *Известия РАН. Серия физическая*. 2017. Т. 81. № 1. С. 76-80.

96. Presnov, D.A., Sobisevich, A.L., Gruzdev, P.D., Ignatiev V. I., Kon'kov A.I., Moreev A.Yu., Tarasov A.V., Shuvalov A.A., Shurup A.S. Tomographic Estimation of Waterbody Parameters in the Presence of Ice Cover Using Seismoacoustic Sources // *Acoustical Physics*. 2019. V. 65. P. 593–602..
97. Sobisevich A.L., Presnov D.A., Zhostkov R.A., Likhodeev D.V., Sobisevich L.E., Shurup A.S., Agafonov V.M. Geohydroacoustic Noise Monitoring of Under-Ice Water Areas of Northern Seas // *Seismic Instruments*. 2018. V. 54. P. 611–618.
98. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С. О локализации геологических отдельностей арктического шельфа на основе анализа модовой структуры сейсмоакустических полей // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 479. № 1. С. 80-83.
99. Дмитриевский Н.Н., Ананьев Р.А., Либина Н.В., Росляков А.Г. Использование сейсмоакустического комплекса для исследований верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в Восточной Арктике// *Океанология*. 2013. Т. 53. № 3. С. 412.
100. Potty G.R., Miller J.H., Lynch J.F., Smith K.B. Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water // *Journal Acoustic Society of America*. 2000 V. 108. № 3. P. 973.
101. Kao H., Behr Y., Currie C. A., Hyndman R., Townend J., Lin F.C., Ritzwoller M. H., Shan S.J., He J. Ambient seismic noise tomography of Canada and adjacent regions: Part I. Crustal structures // *Journal Geophysical Research Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 5865–5887.
102. Gervaise C., Kinda B., Bonnel J., Stéphan Y., Vallez S. Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. V. 131. PP.1999-2010.
103. Koch, R.A.; David, P.K. Geoacoustic inversion with ships as sources // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2005. V. 117. P. 626–637.

104. Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Апробация пассивной поверхностно-волновой томографии глубинных неоднородностей дна океана // Тр. VI Междунар. научно-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2017)” (Владивосток, 2017). С. 544.
105. Liu Y., Meng Z., Chen Y, Chen W. Analysis of the influence of the continental shelf slope in the South China Sea on sound propagation // *Continental Shelf Research*. 2023. V. 262, P. 105042.
106. Mikryukov A., Popov O., Serebryany A. Propagation of pulsed sound signals on a shelf of free tidal sea: effects from coastal eddies and internal waves // *Hydroacoustics*. 2008. T. 11. С. 279-288.
107. Rutenko A.N. Losses during sound propagation on the shelf // *Acoustical Physics*. 2013. V. 59. P. 416–421.
108. Morgunov, Y.N., Bezotvetnykh, V.V., Burenin, A.V., Voitenkom E.A. Study of how hydrological conditions affect the propagation of pseudorandom signals from the shelf in deep water // *Acoustical Physics*. 2016. V.62. P. 350–356.
109. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60. № 4. С. 426.
110. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Щербина А.В. Томографическое восстановление характеристик дна мелкого моря// *Акустический журнал*. 2015. Т. 61. № 5. С. 583.
111. Gurbatov S.N., Vyckov A.E., Vyugin P.N., Gryaznova I.Yu., Deryabin M.S., Kurin V.V., Khilko A.I. Laboratory Physical Simulation of Acoustic Wave Propagation on the Shelf // *Acoustical Physics*. 2020. V.66. P. 384–389.
112. Чупин В.А., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Швец В.А., Яковенко С.В. О возможности применения береговых лазерных деформографов в

томографических исследованиях дна шельфа // Сборник трудов: XVI сессия Российского акустического общества. 2005. С. 275-277.

113. Долгих Г.И., Ярощук И.О., Свининников А.И., Пивоваров А.А., Чупин В.А., Ляшков А.С., Швырев А.Н., Мартынов М.Ю. Исследования отражающих свойств донных осадков шельфа Японского моря // Сборник трудов: XVI сессия Российского акустического общества. 2005. С. 203-206.

114. 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. 321–325.

115. Марков Ю.Д. Южноприморский шельф Японского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1983. 128 с.

116. Самченко А.Н., Карнаух В.Н., Аксентов К.И. Геолого-геофизические исследования верхней части осадочного чехла и геоакустическая модель шельфа залива Посъета (Японское море)// Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 1. С. 65–75.

117. Медведев С.Н., Прокудин В.Г. Реализация метода отраженных волн при сейсмоакустических исследованиях в мелком море// Материалы докл. Шестого Всероссийского симпозиума “Физика геосфер”. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 98–101.

118. Орленок В.В. Морская сейсмоакустика. Учеб. пособие. Калининград: Калининград. ун-т, 1997. 178 с.

119. Чупин В.А. Распространение низкочастотных гидроакустических колебаний на коротких и длинных дистанциях //В сборнике: Физика геосфер: Девятый Всероссийский симпозиум. 21-24 сентября 2015. С. 247-248.

120. Долгих Г.И., Чупин В.А., Будрин С.С. Томографические исследования шельфовых зон // В книге: Моря России: фундаментальные и прикладные

исследования. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. 2019. С. 30-32.

121. 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.

122. 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.

123. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырёв А.Н., Чупин В.А., Ярошук И.О. Развитие технологии томографии земной коры шельфовых областей // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 475. № 2. С. 210-214.

124. Долгих Г.И. Разработка технологии томографии земной коры шельфа и глубокого моря на основе применения береговых лазерных деформографов и широкополосных низкочастотных гидроакустических излучателей // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5. 1750804

125. Авербах В. С., Боголюбов Б. Н., Заславский Ю. М. и др. Применение сложных фазоманипулированных сигналов для сейсмоакустического зондирования грунта гидроакустическим источником. – Акуст. Журнал. 1999. Т. 45. № 1. С. 5–12.

126. Долгих Г. И., Привалов В. Е. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. – Владивосток: ООО «Рея». 2016.

127. Ball Justin S., Godin Oleg A., Evers Laslo G., Lv Cheng. Long-range correlations of microseism-band pressure fluctuations in the ocean // Geophys. J. Int. 2016. V. 206. P.825–834.

128. Преснов Д. А., Жостков Р. А., Шуруп А. С., Собисевич А. Л. Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема // Известия РАН. Сер. Физическая. 2017. Т. 8. № 1. С. 76–80.
129. Diez A., Bromirski P. D., Gerstoft P., Stephen R. A., Anthony R. E., Aster R. C., Cai C., Wiens D. A., Nyblade A. Ice shelf structure derived from dispersion curve analysis of ambient seismic noise, Ross Ice Shelf, Antarctica // *Geophys. J. Int.* 2016. V. 205. P.785–795.
130. 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.
131. 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.
132. 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. T. 55. № 4. С. 369-376.
133. 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.
134. 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.

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

136. Чупин В.А. Томография морского дна береговыми лазерными деформографами // Физика геосфер: Одиннадцатый Всероссийский симпозиум. 2019. С. 205-208.

137. . 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.

138. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф. Космический мониторинг тропических циклонов. – М.: Научный мир. 2014. 508 с.

139. Bondur V.G., Pulinets S.A. Effect of Mesoscale Atmospheric Vortex Processes on the Upper Atmosphere and Ionosphere of the Earth//Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2012. V. 48(9). С. 871-878. DOI: 10.1134/S0001433812090034.

140. Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А. О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина//Доклады академии наук. 2008. Т. 422(2). С. 244-249. DOI: 10.1134/S1028334X08070283.

141. Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина//Исследование Земли из космоса. 2008. № 6. С. 3-11.

142. Wiechert E. «Verhandlungen der zweiten Internationalen Sismologischen Konferenz» Gerlands Beitr. Geophys. Ergänzungsband. 1904. V. 2, C. 41-43,
143. Longuet-Higgins M.S. A theory of the origin of microseisms// Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1950. V. 243. P. 1–35.
144. Hasselmann K.A. A statistical analysis of the generation of microseisms// Reviews of Geophysics. 1963. V.1(2), P. 177-210. DOI:10.1029/RG001i002p00177.
145. Benioff H., Gutenberg B. Waves and currents recorded by electromagnetic barographs//Bulletin of the American Meteorological Society. 1939. V. 20. P. 421–426.
146. Hetzer C.H., Waxler R., Gilbert K.E., Talmadge C.L., Bass H.E. Infrasound from hurricanes: Dependence on the ambient ocean surface wave field // Geophysical research letters. 2008. V. 35.
147. Bowen S.P., Richard J.C. Microseism and infrasound generation by cyclones // The Journal of the Acoustical Society of America. 2003. V. 113. №. 5. C. 2562–2573.
148. Donn W. L., Naini B. Sea wave origin of microbaroms and microseisms// Journal of Geophysical Research. 1973. V. 78(21). P. 4482–4488.
149. Tabulevich V.N., Ponomaryov E.A., Sorokin A.G., Drennova N. N. Standing sea waves, microseisms, and infrasound // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. T. 37. C. 218–226.
150. Willis M. Infrasonic observations of open ocean swells in the pacific: Deciphering the song of the sea // Geophysical Research Letters. 2004. T. 31. C. L19303. DOI:10.1029/2004GL020684.
151. Hetzer C.H., Waxler R., Gilbert K.E., Talmadge C.L., Bass H. E. Infrasound from hurricanes: Dependence on the ambient ocean surface wave field // Geophysical Research Letters. 2008. T. 35. C. L14609. DOI: 10.1029/2008GL034614.

152. Dolgikh G. ., Mukomel D. V. Dependence of microseism variation periods upon the cyclone propagation velocity and direction // *Doklady Earth Sciences*. 2004. T. 394. C. 141–144.
153. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S. Fluctuations of the sea level, caused by gravitational and infra-gravitational sea waves // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. T. 8, DOI:10.3390/jmse8100796.
154. Garcés M., Hetzer C., Merrifield M., Willis M., Aucan J. Observations of surf infrasound in Hawai'i: Surf Infrasound // *Geophysical Research Letters*. 2003. T. 30. C. 2264. DOI: 10.1029/2003GL018614.
155. Le Pichon A. Infrasound from ocean waves observed in Tahiti // *Geophysical Research Letters*. 2004. T. 31. C. L19103. DOI: 10.1029/2004GL020676.
156. Park J., Garcés M., Fee D., Pawlak G. Collective bubble oscillations as a component of surf infrasound // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2008. T. 123. C. 2506–2512. DOI: 10.1121/1.2885743.
157. Garcés M., Aucan J., Fee D. Infrasound from large surf // *Geophysical Research Letters*. 2006. T. 33. C. L05611. DOI: 10.1029/2005GL025085.
158. Arrowsmith S. J. Observations of infrasound from surf in southern California // *Geophysical Research Letters*. 2005. T. 32. C. L09810, DOI:10.1029/2005GL022761
159. Shuleikin V. V. On Sea Voice // *Comptes Rendus Academie des Sciences USSR*. 1935. T. 3. C. 259.
160. Андреев Н.Н. О голосе моря // *Докл. АН СССР*. 1939. Т. 23. № 7. С. 625.
161. Semenov A.G. On “Voice of Sea” Generation Mechanism // *International Journal of Geosciences*. 2013. № 4 С. 116–128.
162. Перепёлкин В.Г. Об опыте регистрации «голоса моря» в акватории черного моря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 6. С. 716–728. DOI: 10.7868/S0002351515050107.

163. Perepelkin V.G., Chunchuzov I.P., Kulichkov S.N., Popov O.E., Repina I.A. Analyzing conditions for the occurrence of the voice of the sea on the basis of infrasound measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. T. 55. С. 73–85. DOI: 10.1134/S0001433819010079.
164. Табулевич В.Н., Пономарев Е.А., Сорокин А.Г., Дреннова Н.Н. Стоячие океанские волны, микросейсмы и инфразвук. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2001. Т. 37. № 2. С. 235–244.
165. Запевалов А.С. Моделирование спектра инфразвукового гидроакустического излучения, генерируемого морской поверхностью в штормовых условиях // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62. № 5. С. 550–555.
166. Blom P., Waxler R. Observations of the refraction of microbaroms generated by large maritime storms by the wind field of the generating storm // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. V. 119. P. 7179–7192.
167. Traer J. Low-frequency acoustic signature of hurricane Ernesto // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2008. V. 123. P. 3624.
168. 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// В книге: *Моря России: фундаментальные и прикладные исследования. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции*. 2019. С. 28-30.
169. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Чупин В.А., Швец В.А. Дистанционный сейсмоакустический мониторинг тропических циклонов // В сборнике: *ФИЗИКА ГЕОСФЕР. Материалы докладов*. 2023. С. 39-41.
170. Japan Meteorological Agency. Best Track Data (Graphics) in 2010s: [Сайт]. URL: http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack_viewer_2010s.html
171. Himawari 8 Data Archive, GMS/GOES9/MTSAT Data Archive for Research and Education: [Сайт]. URL: <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/archive-e.html>

172. Earth: A Global Map of Wind, Weather and Ocean Conditions. [Online]. Available: <https://earth.nullschool.net>
173. Чупин В.А. Микросейсмические колебания как индикатор тропических циклонов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16. № 3. С. 9-17.
174. 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.
175. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Chupin V.A., Shvets V.A. Inter-geosphere interaction in the infrasonic range // *Frontiers in Earth Science*. 2023. Т. 11. С. 1146224.
176. Elsner J.B., Liu K. Examining the ENSO-typhoon hypothesis // *Climate research*. 2003. V. 25. P. 43-54. DOI: 0.3354/cr025043.
177. Camargo S. J., Robertson A. W., Gaffney S. J., Smyth P., Ghil M. Cluster analysis of typhoon tracks. Part I: General properties. // *American Meteorological Society*. 2007. V. 20. P. 3635–3653. DOI: 10.1175/jcli4188.1.
178. Долгих Г.И., Гусев Е.С., Чупин В.А. Деформационные проявления «голоса моря» // *ДАН*. 2018. Т. 481. № 1. С. 95-98.
179. 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.
180. Чупин В.А., Долгих Г.И., Гусев Е.С. Регистрация инфразвуковых возмущений тайфунов лазерными деформографами // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2019.Т. 12. №.1. С. 117-127. DOI: 10.18721/JPM12110.
181. Долгих Г.И., Чупин В.А., Гусев Е.С. Инфразвуковые деформационные возмущения, вызванные тайфунами // *Физика Земли*. 2019. № 5. С. 110-117. DOI: 10.31857/S0002-333720195110-117.

182. 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.
183. 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 // Мат-лы международной научной конференции «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов». 13-23 июня 2019. С. 45-51.
184. 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 // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». 2019. С. 28-30.
185. Dolgikh G., Chupin V. Gusev E. Microseisms of the “Voice of the Sea” // IEEE Geoscience and remote sensing letters. V. 17. № 5. P. 750-754. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2931325.
186. 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.
187. 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. Сборник. 2019. С. 35-40.

188. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф. Космический мониторинг тропических циклонов. –М.: Научный мир, 2014. – 508 С.

189. Eremenko A.S., Kachur V.A. Calculation of pressure in tropical cyclones using satellite data // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. V. 44. P. 588–593. DOI: 10.3103/S1068373919090024.

190. Bondur V.G., Pulinets S.A. Effect of Mesoscale Atmospheric Vortex Processes on the Upper Atmosphere and Ionosphere of the Earth // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2012. V. 48. P. 871–878. DOI: 10.1134/S0001433812090034.

191. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф.–М.: Научный мир. 2009. 692 С.

192. Klemas, V. The role of remote sensing in predicting and determining coastal storm impacts // Journal of coastal research. 2009. V. 25. P. 1264–1275. DOI: 10.2112/08-1146.1.

193. Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000, Т. 13. С. 38–53.

194. Bondur V.G., Pulinets S.A., Kim, G.A. Role of variations in galactic cosmic rays in tropical cyclogenesis: Evidence of Hurricane Katrina // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 422. P. 1124–1128. DOI: 10.1134/S1028334X08070283.

195. Sharkov E.A., Shramkov Y.N., Pokrovskaya I.V. Increased water-vapor content in the atmosphere of tropical latitudes as anecessary condition for the genesis of tropical cyclones // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2012. V. 48. P. 900–908. DOI: 10.1134/S0001433812090162.

196. Chupin V.A., Dolgikh G.I., Gusev E.S., Timosina 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.
197. Чупин В.А., Долгих Г.И., Овчаренко В.В. Вариации микросейсмических колебаний, возбуждаемых тропическими циклонами в Японском море // Физика геосфер: материалы докладов Тринадцатого Всероссийского симпозиума, 11–15 сент. 2023 г. Владивосток, 2023, С. 133-135. DOI: 10.34906/9785604968383.133
198. Чупин В.А., Долгих Г.И., Овчаренко В.В. Вариации микросейсмических колебаний, возбуждаемых тропическими циклонами в Японском море // В сборнике: Физика геосфер. Материалы докладов. 2023. С. 133-135.
199. 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.
200. 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.
201. Долгих Г.И., Чупин В.А., Гусев Е.С. Пеленг тайфунов по зонам генерации микросейсм «голоса моря» // 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 - III»). материалы III Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова. Ростов-на-Дону, 2021. С. 49-52.
202. Чупин В.А., Гусев Е.С. Регистрация лазерными методами инфрагравитационных волн, вызванных тайфунами // В сборнике: Оптические методы исследования потоков. Труды XVI Международной научно-технической конференции. Под общей редакцией Ю.Н. Дубнищева, Н.М. Скорняковой. Москва, 2021. С. 242-246.

203. 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.
204. 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.
205. Чупин В.А. Амплитудно-частотные характеристики высокочастотных инфразвуковых колебаний, генерируемых тайфунами в Японском море // В сборнике: Физика геосфер. 2021. С. 127-129.