*На правах рукописи*

Долгих Станислав Григорьевич

# ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Владивосток 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук в лаборатории физики геосфер.

**Официальные оппоненты:**

**Кульчин Юрий Николаевич**
академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, научный руководитель;

**Кантаржи Измаил Григорьевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства;

**Ковалев Дмитрий Петрович**
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, заместитель директора по научной работе.

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

Защита диссертации состоится «26» мая 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «30» марта 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук В.А. Камзолкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

***Актуальность работы***

Актуальность данной работы связана с необходимостью создания аппаратного комплекса, позволяющего изучать закономерности возникновения, развития и трансформации геосферных процессов и явлений широкого диапазона частот в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» на уровне фона. К такому оборудованию, в первую очередь, относятся приборы, созданные на основе современных лазерно-интерференционных методах: лазерные деформографы, лазерные нанобарографы, лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны. Необходимость применения однотипной аппаратуры, позволяющей исследовать природу возникновения и развития колебаний и волн широкого диапазона частот во всех геосферах одновременно, обозначила необходимость создания лазерно-интерференционного комплекса, позволяющего проводить измерения в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц (и более) с высокой точностью.

Вопросы по изучению трансформации некоторых морских волн на шельфе при переходе в волны земной коры, энергии колебаний и волн, передаваемой из одной геосферы в соседнюю, определения первоисточника некоторых процессов, являются актуальными и по настоящее время. Применение лазерно-интерференционных комплексов в изучении океанологических процессов и их воздействия на земную кору, позволяет получать новые знания о закономерностях генерации, динамики и трансформации волновых полей искусственного и естественного происхождения, о линейных и нелинейных физических процессах широкого частотного диапазона в системе «гидросфера-атмосфера-литосфера».

***Цели и задачи исследований***

Цель настоящей работы заключается в разработке и создании аппаратного комплекса, способного проводить измерения колебаний и волн в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» на уровне фоновых колебаний в широком частотном диапазоне, и проведении экспериментальных исследований по изучению геосферных процессов искусственного и естественного происхождения.

В связи с этим были сформированы следующие задачи:

1. Разработать аппаратуру на основе современных лазерно-интерференционных методов для регистрации вариаций давления атмосферы и гидросферы в широком частотном диапазоне на уровне фоновых колебаний.

2. Разработать лазерно-интерференционные комплексы для мониторинга колебаний и волн геосфер в широком частотном диапазоне на уровне фона, а также методику их установки для проведения экспериментальных работ.

3. Исследовать возможности лазерно-интерференционных комплексов при изучении геосферных процессов широкого диапазона частот.

4. На основе результатов экспериментальных работ, проводимых с использованием лазерно-интерференционного комплекса и различных гидроакустических и сейсмоакустических излучателей, изучить закономерности распространения и трансформации гидроакустических и сейсмоакустических колебаний на границе «вода – верхний слой земной коры».

5. На основе экспериментальных данных, полученных с помощью лазерно-интерференционных комплексов, исследовать закономерности генерации, динамики и трансформации морских волн широкого диапазона частот на границе «гидросфера-литосфера».

6. Изучить взаимодействие низкочастотных гидроакустических волн с более низкочастотными морскими волновыми процессами.

7. Исследовать некоторые аспекты динамики и трансформации ветровых морских (гравитационных морских) волн в зонах перехода геосфер.

8. Изучить закономерности возникновения и динамики морских инфрагравитационных волн в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера».

9. Исследовать особенности проявления цунамигенных землетрясений на записях лазерно-интерференционного комплекса с целью выявления общих закономерностей, характерных для цунамигенных землетрясений.

***Научная новизна***

1. Разработаны и созданы на основе современных лазерно-интерференционных методов лазерный нанобарограф и лазерный измеритель вариаций давления гидросферы для регистрации вариаций давления атмосферы и гидросферы в широком частотном диапазоне с высокой точностью.

2. Разработаны лазерно-интерференционные комплексы для мониторинга вариаций деформаций земной коры, атмосферного и гидросферного давлений, позволяющие существенно увеличить частотный диапазон исследуемых явлений и значительно повысить точность измерения некоторых параметров геосферных процессов на границе «атмосфера-гидросфера-литосфера», подняв её до фонового уровня.

3. Отработана методика проведения экспериментальных работ и исследованы возможности лазерно-интерференционного комплекса при изучении динамики разномасштабных геосферных процессов естественного и искусственного происхождения.

4. Изучены некоторые нелинейные аспекты динамики и трансформации ветровых морских волн при движении их по шельфу убывающей глубины.

5. На основе многолетних экспериментальных данных лазерно-интерференционного комплекса исследованы закономерности возникновения и динамики колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн морского и не морского происхождения.

6. Проведены исследования по изучению закономерностей распространения и трансформации гидроакустических и сейсмоакустических колебаний, создаваемых различными гидроакустическими и сейсмоакустическими излучателями, изучено взаимодействие низкочастотных гидроакустических волн с более низкочастотными морскими волновыми процессами.

7. При анализе экспериментальных данных, полученных с помощью лазерно-интерференционного комплекса, выявлена деформационная аномалия, характерная для цунамигенных землетрясений, по наличию которой можно судить о степени цунамигенности землетрясений и мощности цунами.

***Основные положения выносимые на защиту***

Защищаемые положения:

1. Лазерный нанобарограф и лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, позволяющие регистрировать вариации давления атмосферы и гидросферы в широком частотном диапазоне условно от 0 Гц на уровне фоновых колебаний.

2. Лазерно-интерференционные комплексы, установленные на берегах Японского и Охотского морей, для мониторинга основных параметров геосфер системы «атмосфера-гидросфера-литосфера» в частотном диапазоне практически от 0 (условно) Гц до килогерц на уровне фона.

3. Метод экспериментального исследования характеристик гидроакустических и сейсмоакустических полей, генерируемых низкочастотными гидроакустическими и сейсмоакустическими излучателями и регистрируемые лазерно-интерференционными приборами, позволяющий изучать закономерности трансформации гидроакустических колебаний в сейсмоакустические и воздействие на них более низкочастотных морских волновых процессов на границе «вода – верхний слой земной коры».

4. Методика регистрации ветровых волн при их движении по шельфу убывающей глубины, позволяющая сформулировать представление о динамике и трансформации основных параметров морских ветровых волн и о взаимодействии волновых полей океана с литосферой.

5. Комплексный лазерно-интерференционный метод определения первоисточника разномасштабных геосферных процессов в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» при анализе колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн морского и не морского происхождения.

6. Деформационный метод определения степени цунамигенности землетрясений, основанный на выявлении деформационной аномалии на записях лазерных деформографов, позволяющий определить момент возникновения опасных гидродинамических процессов Земли.

***Практическая значимость результатов***

Создание лазерно-интерференционного комплекса вывело на новый уровень методы и средства дистанционного исследования океана, атмосферы, литосферы и их взаимодействия. Научные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены при выполнении госпрограмм Тихоокеанского Океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН: «Разработка и создание новых методов и средств изучения и прогнозирования катастрофических эндогенных и экзогенных процессов», «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в условиях глубокого и мелкого моря», «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», 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», гранта РНФ № 14-17-00041. «Изучение физики возникновения, динамики, трансформации и пространственно-временной структуры геосферных процессов инфразвукового диапазона», грантов ДВО РАН. В процессе выполнения работы были созданы лазерно-интерференционные комплексы для мониторинга вариаций деформаций земной коры, атмосферного и гидросферного давлений и их взаимодействия. Данные комплексы были установлены на берегу Японского и Охотского морей на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» и на базе СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный».

***Апробация работы***

Основные результаты диссертации были представлены на Всероссийских и международных конференциях: 8 Тихоокеанский/Азиатский оффшорный симпозиум по механике, г. Бангкок, Таиланд, 2008 г.; Международный симпозиум сообщества морских и полярных инженеров, г. Осака, Япония, 2009 г.; Международный симпозиум сообщества морских и полярных инженеров, г. Пекин, Китай, 2010 г.; Международная конференция по геологии и геофизике, г. Пекин, Китай, 2013 г.; Международная конференция научного и технического развития исследований и мониторинга морских биологических ресурсов, г. Владивосток, 2017 г.; Двадцать пятая международная конференция по лазерно-

интерференционным технологиям в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте, г. Новороссийск, 2017 г.; Двадцать шестая международная конференция по лазерно-интерференционным технологиям в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте, г. Новороссийск, 2018 г.; Шестой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2009 г.; Седьмой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2011 г.; Восьмой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2013 г.; Девятый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2015 г.; Десятый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2017 г.; Одиннадцатый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2019 г.

***Публикации***

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в 51 научном труде.

***Личный вклад автора***

Выбор научного направления, создание лезерно-интеференционного копмлекса, организация экспериментальных и теоретических исследований, получение основных результатов и их интерпретация главным образом принадлежат автору. В диссертационной работе используются данные экспериментальных исследований, проводимых с помощью лазерно-интерференционного оборудования, начиная с 2000 года в которых автор принимал непосредственное участие. Также автор принимал активное участие в разработке, создании и установке лазерных деформографов, лазерных нанобарографов, лазерных измерителей вариаций давления гидросферы, лазерных гидрофонов, которые легли в основу создания лазерно-интерференционных комплексов на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» в Приморском крае и МЭС СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный» на о. Сахалин.

Работы по обработке и анализу экспериментальных данных, представленных в диссертационной работе, выполнены автором самостоятельно.

***Объём работы***

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 243 наименования. Работа содержит 275 страниц текста, 13 таблиц и 136 рисунков.

***Благодарности***

Автор выражает глубокую благодарность коллегам из лаборатории физики геосфер Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН за помощь в проведении экспериментальных исследований на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», создание уютной творческой атмосферы, позволившей эффективно работать над диссертацией, а также всех соавторов за сотрудничество и помощь. Сотрудников СКБ САМИ ДВО РАН за помощь в проведении экспериментальных работ на м. Свободный о. Сахалин.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулированы тема диссертационной работы, актуальность, цели и задачи исследований, научная новизна, практическая значимость результатов и апробация работы.

**В первой главе** описываются лазерно-интерференционные приборы для измерения основных параметров системы «атмосфера-гидросфера-литосфера».

**В параграфе 1.1** описываются принцип действия и функциональная схема однокоординатных и двухкоординатных лазерных деформографов. Все лазерные деформографы собраны на основе современных лазерно-интерференционных методах, по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, с использованием качестве источника света частотно-стабилизированного лазера. В неравноплечих лазерных деформографов существует два плеча: измерительное и эталонное. Длина эталонного плеча колеблется в пределах от 0.2 до 0.3 м, а длина измерительного плеча может быть от нескольких метров до километра. Так в состав лазерно-интерференционного комплекса, расположенного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», входят три лазерных деформографа с длинами измерительных плеч 3.5, 17.5 и 52.5 м. Горизонтальный лазерный деформограф с диной измерительного плеча 52.5 м имеет ориентацию север-юг. Второй горизонтальный лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 17.5 м имеет ориентацию запад-восток. Третий лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 3.5 м вертикального типа. Все лазерные деформографы установлены под землей в гидротермоизоляционных помещениях. Неравноплечие лазерные деформографы горизонтального типа были установлены на МЭС СКБ САМИ «м. Свободный» (о. Сахалин), на территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН Приморский край, в г. Соликамске (Урал), в г. Краснокаменске (Читинская область). На МЭС СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный» установлен неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа с длиной измерительно плеча 10.5 м. На территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН Приморский край установлен неравноплечий горизонтальный лазерный деформограф поверхностного типа с длиной измерительного плеча 18 м. Еще один неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа установлен в г. Соликамске (Урал) на глубине 300 м под землей с длиной измерительного плеча 52.5 м. Неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа установлен в г. Краснокаменске (Читинская область) в шахте на глубине 270 м под землей, длина измерительного плеча прибора 50 м.

В последнее время в качестве источника света в лазерных деформографах используются частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры фирмы Melles Griot. На лазерном деформографе неравноплечего типа, установленном на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», с длиной измерительного плеча 52.5 м, был использован такой частотно-стабилизированный лазер. Стабильность частоты этого

лазера находиться на уровне $10^{-9}$. При использовании гидротермоизоляционного помещения, в котором находится оптическая часть лазерного интерферометра, стабильность частоты лазера возрастает на порядок, до $10^{-10}$. При длине измерительного плеча неравноплечего лазерного интерферометра 52.5 м точность измерения смещения составляет 5.2 нм в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц. В процессе выполнения работ оптико-механическая часть неравноплечего лазерного деформографа претерпела изменения. В качестве источника света стал использоваться гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер фирмы Neoark со стабильностью частоты ~ $10^{-12}$. Замена лазера и модернизация оптико-механической части прибора позволили создать практически новый лазерный деформограф неравноплечего типа со следующими техническими характеристиками: точность измерения деформации на базе прибора $10^{-12}$ – $10^{-13}$, точность измерения смещения 5.2 пм в том же частотном диапазоне.

Чувствительность лазерных деформографов неравноплечего типа напрямую зависит от долговременной стабильности частоты лазера и шумов фотоэлектронной аппаратуры. В качестве приемника в системе регистрации лазерных деформографов используется фотодиод ФД 24К. Предельный порог чувствительности определяется дробовым шумом фотоприёмника. Отношение дробного шума фотоумножителя к дробному шуму фотодиода будет примерно равно 50. При использовании фотодиода с учётом его дробового шума предельная чувствительность к абсолютным смещениям зеркал в интерферометре Майкельсона будет порядка $10^{-13}$ м. При оценке чувствительности нельзя пренебрегать воздействием температуры, давления и влажности на лазерные деформографы. Оценка ошибки измерения, вызванная сезонным изменением этих атмосферных параметров, для лазерных деформографов поверхностного типа составляет величину порядка $0.8\times10^{-8}$ м. При изучении колебаний и волн с периодами менее суток ошибка измерений уменьшается на порядок. При установке лазерных деформографов в термоизолированных помещениях ошибка измерений, вызванная вариациями температуры, давления и влажности, уменьшится еще на 1 – 2 порядка.

Во второй части параграфа 1.1 рассматриваются двухкоординатные лазерные деформографы. Двухкоординатные лазерные деформографы можно разделить на два типа: с единым основанием интерференционных узлов и с разнесенными интерференционными узлами. Интерференционные узлы с одним основанием могут быть как с единым источником света, так и с различными источниками света. На МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» работает в непрерывном режиме двухкоординатный лазерный деформограф с разнесенными интерференционными узлами. Данная схема расположения приборов вызвана рельефом местности, где располагается лабораторное помещение. Двухкоординатный лазерный деформограф состоит из двух неравноплечих лазерных деформографов с взаимно перпендикулярными плечами с ориентацией «север-юг» и «запад-восток» и

длинами 52.5 и 17.5 м, соответственно. Синхронные данные с обоих приборов по кабельным линиям поступают в лабораторное помещение.

**В параграфе 1.2** описан, созданный на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона, лазерный нанобарограф. Оптическая схема построения прибора практически идентична оптической схеме неравноплечего лазерного деформографа за исключением чувствительного элемента, в качестве которого применяется блок анероидных коробок (рисунок 1). Блок состоит из трех анероидных коробок, изготовленных из бериллиевой бронзы диаметром 50 мм и толщиной 0.1 мм. Измерительная часть луча проходит между делительной пластиной и системой «кошкин глаз», состоящей из собирающей линзы и блока анероидных коробок с зеркальным напылением. Применение в качестве источника света частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера фирмы Melles Griot с долговременной стабильностью $10^{-9}$, позволяет проводить измерения вариаций атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 50 мкПа в практически неограниченном динамическом диапазоне. Ошибка измерений лазерного нанобарографа на прямую зависит от изменения геометрических размеров анероидной коробки. Изменение размеров возможно под воздействием нескольких факторов: сейсмический шум, изменение влажности и температуры, атмосферного давления. Расчеты изменения размеров анероидной коробки под воздействием сейсмического шума и влажности показали, что эти параметры вносят пренебрежимо малый вклад. Учитывая, что лазерный нанобарограф располагается в термоизолированном помещении, где вариации температуры за 30 суток наблюдения составляют величину порядка 0,1℃, то и вариации температуры не оказывают существенного влияния на показания прибора.

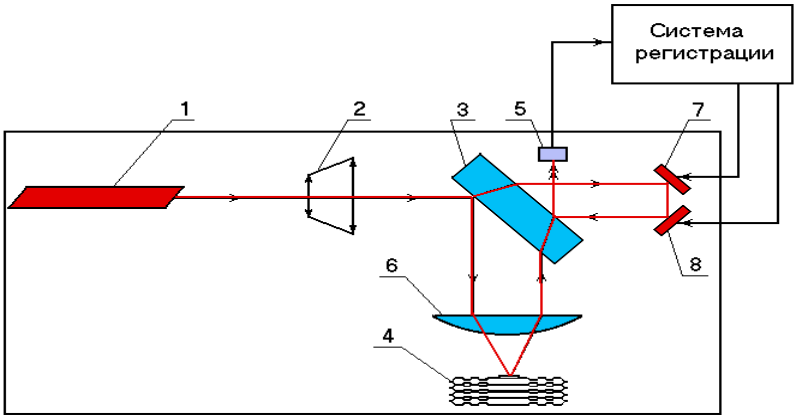


*Рисунок 1 – Оптико-механическая блок схема лазерного нанобарографа. 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 4 – блок анероидных коробок, 5 – фотодиод, 6 – линза, 7 и 8 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах.*

**В параграфе 1.3** описываются, созданные на основе модифицированного интерферометра Майкельсона, лазерные измерители вариаций давления

гидросферы и лазерные гидрофоны. Оптическая схема этих приборов очень похожа на схему лазерного нанобарографа, за исключением чувствительного элемента (рисунок 2). В качестве которого применяется металлическая мембрана, жестко закрепленная по периметру. С одной стороны на мембрану воздействует давление гидросферы, смещая ее цент, это смещение и фиксируется лазерным интерферометром, расположенным внутри прибора. В качестве источников света в лазерных измерителях вариаций давления гидросферы используются частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры фирмы Melles Griot с долговременной стабильностью $10^{-9}$, что позволяет проводить измерения вариаций гидростатического давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 50 мкПа в практически неограниченном динамическом диапазоне.

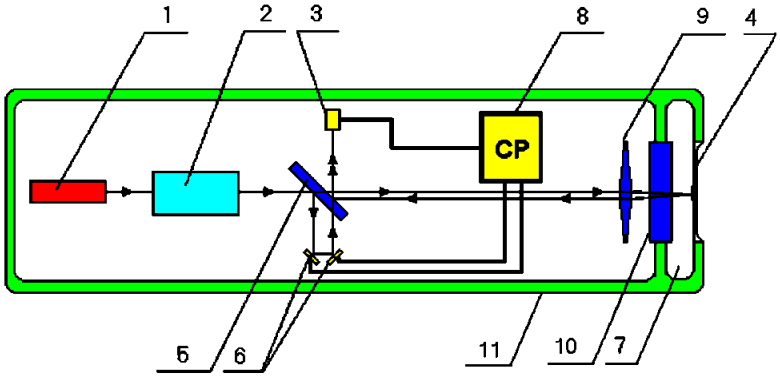


*Рисунок 2 – Оптическая схема лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. 1 – лазер, 2 – оптический затвор и коллиматор, 3 – фотодиод, 4 – мембрана с наклеенным зеркалом, 5 – полупрозрачная плоскопараллельная пластина ПИ-100, 6 – плоскопараллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 7 – компенсационная камера, 8 – система регистрации, 9 – линза, 10 – плоскопараллельная пластина, 11 – герметичный корпус прибора*

В настоящее время создано несколько модификаций данного прибора. С целью улучшения характеристик интерферометра с точки зрения вибро- и удароустойчивости, увеличения времени работы без подстройки интерференции, упрощения настройки оптической части прибора была разработана гибридная схема прибора. В данной схеме вместо делительной пластины применяется делительный куб, что позволило повысить желаемые характеристики. Для исключения возможного влияния температуры на работоспособность прибора разработана система механической компенсации температурного воздействия. В данной схеме вместо оптической скамьи применяются стержни из инвара, коэффициент температурного расширения которого более чем в десять раз меньше, чем у нержавеющей стали. Оптическая часть прибора построена таким образом, что увеличение геометрических размеров креплений элементов оптической части лазерного интерферометра компенсировалось увеличением/уменьшением

геометрических размеров других элементов. Применение механической системы компенсации температурного воздействия позволило продлить работу лазерного измерителя вариаций давления гидросферы без подстройки интерференции. С целью уменьшения габаритов и массы прибора был создан мобильный лазерный измеритель вариаций давления гидросферы. Его конструктивной особенностью является схема расположения оптических элементов на скамье и конструкция корпуса прибора. Корпус прибора изготовлен из нержавеющей стали с крышками с обоих сторон. На одной крышке расположен интерференционный узел, а на второй система регистрации прибора и блоки питания лазера.

Большие геометрические размеры прибора и существенный вес привели к созданию ряда приборов под общим названием лазерный гидрофон. Существенным отличием от лазерных измерителей вариаций давления гидросферы является применение в качестве источника света полупроводникового лазера, который позволил в несколько раз уменьшить габариты и вес прибора, а так же существенно сократить энергопотребление. В лазерных гидрофонах была применена схема равноплечего интерферометра Майкельсона, что позволило повысить точность измерения. Лазерный гидрофон позволяет регистрировать вариации гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц в практически неограниченном динамическом диапазоне с точностью $2.4\times10^{-2}$ Па. Применение в качестве источника света частотно-стабилизированного полупроводникового зеленого лазера LCM-S-111 с длиной волны 532 нм позволило повысить точность измерения без увеличения габаритов и массы прибора. Данный лазерный гидрофон позволяет регистрировать вариации давления гидросферы в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц в практически неограниченном динамическом диапазоне с точностью 0.5 мПа.

**В параграфе 1.4** приведено краткое описание основных результатов 1 главы, в которых описываются созданные на основе современных лазерно-интерференционных методов следующие приборы: 1) лазерные деформографы, позволяющие проводить измерения вариаций микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 Гц (условно) до килогерц с высокой точностью; 2) лазерные нанобарографы, позволяющие измерять вариации атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа; 3) лазерные измерители вариаций гидросферного давления, позволяющие измерять вариации гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Все эти установки относятся к приборам безинерционного типа и дают возможность проводить измерения прямыми методами, которые на много чувствительней параметрических методов

**Во второй главе** описываются лазерно-интерференционные комплексы для измерения вариаций деформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений инфразвукового и звукового диапазонов.

**В параграфе 2.1** описывается созданный на берегу Японского моря лазерно-интерференционные комплекс «м. Шульца» (рисунок 3).

*Рисунок 3 – Лазерно-интерференционный комплекс «м. Шульца». 1 – лазерные деформографы горизонтального типа, 2 – лазерный нанобарограф, 3 – лазерный деформограф вертикального типа, 4 - трёхкомпонентный широкополосный сейсмограф Guralp CMG-3ESPB, 5 - метеостанция AANDERAA, 6 – GPS-приёмникTRIMBLE 5700, 7 – лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, 8 – гидрологический зонд RBRXR-620, 9 – гидрологический зонд AANDERAA, 10 – вертикальная цифровая термокоса, 11 – профилограф ADP (SY-51208); 12 –гидроакустический излучатель, 13 – низкочастотный сейсмоакустический излучатель, 14 – лабораторный пост наблюдений, 15 – емкостный измеритель уровня моря; 16 – маломерное судно, 17 – плавучая платформа, 18 – маломерное судно НИС «Импульс».*

В состав комплекса входят: 1) неравноплечие лазерные деформографы горизонтального типа с длиной измерительных плеч 52.5 м и 17.5 м и ориентацией север-юг и запад-восток, соответственно; неравноплечий лазерный деформограф вертикального типа с длиной измерительного плеча 3.5 м для измерения вариаций микродеформаций верхнего слоя земной коры; 2) лазерный нанобарограф для измерения вариаций атмосферного давления; 3) лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны для измерения вариаций гидростатического давления. Наряду с лазерно-интерференционными приборами в состав комплекса входят: GPS приемник Trimble 5700, широкополосный сейсмограф Guralp CMG-3ESPB, метеостанция ANDERRA, гидрологический зонд RBRXR-620, гидрологический зонд ANDERRA, вертикальная цифровая термокоса, профилограф ADP (SY-51208); гидроакустические излучатели, низкочастотный сейсмоакустический излучатель. Данные со всех измерительных приборов по кабельным линиям поступают в лабораторное помещение для предварительной обработки, накопления и передачи по сети ДВО РАН в институт. Лабораторное

помещение оборудовано системой бесперебойного питания измерительных приборов, позволяющей обеспечить их непрерывную работу в аварийном режиме энергопитания до 1 суток.

**В параграфе 2.2** описывается созданный на берегу Охотского моря лазерно-интерференционные комплекс «м. Свободный» (рисунок 4). В состав комплекса входят: 1) неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа с длиной измерительного плеча 10.5 м и ориентацией север-юг для измерения вариаций микродеформаций верхнего слоя земной коры, 2) лазерный нанобарограф для измерения вариаций атмосферного давления. Оба прибора расположены в термоизолированном помещении. В состав комплекса также входят лазерный гидрофон для измерения вариаций гидросферного давления, GPS-приёмник TRIMBLE 5700, метеостанция. Данные со всех приборов поступают в лабораторное помещение для предварительной обработки и накопления. Лабораторное помещение оборудовано системой бесперебойного питания измерительных приборов, позволяющей обеспечить их непрерывную работу в аварийном режиме энергопитания до 4 ч.

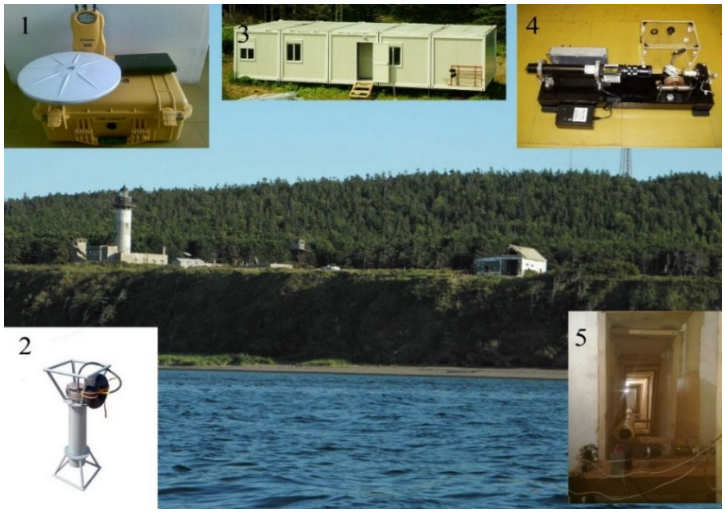


*Рисунок 4 – Лазерно-интерференционный комплекс «м. Свободный». 1 – GPS-приёмник TRIMBLE 5700, 2 – лазерный гидрофон, 3 – лабораторное помещение, 4 - лазерный нанобарограф, 5 - лазерный деформограф горизонтального типа.*

**В параграфе 2.3** приведено краткое описание основных результатов 2 главы, в которых описываются лазерно-интерференционные комплексы на берегах Японского и Охотского морей, в состав которых входят различные лазерно-интерференционные приборы и вспомогательная аппаратура для мониторинга колебаний и волн на границе раздела системы «атмосфера-гидросфера-литосфера».

**В третьей главе** рассмотрены особенности применения лазерно-интерференционного комплекса в гидроакустических исследованиях.

**В параграфе 3.1** рассматриваются закономерности распространения и трансформации гидроакустических колебаний на границе вода-дно. В ходе изучения был проведен ряд экспериментов на лазерно-интерференционном комплексе «м. Шульца» в 2004, 2009 и 2015 годах с применением неравноплечих лазерных деформографов различной ориентации и длины, лазерных измерителей вариаций давления гидросферы и низкочастотных гидроакустических излучателей. В первом эксперименте, проведённом в 2004 году, работы выполнялись с борта маломерного судна с применением гидроакустических излучателей, работающих на частотах 30–40 и 240–270 Гц. Для регистрации сейсмоакустических волн использовался 52.5–метровый лазерный деформограф неравноплечего типа ориентацией север-юг (рисунок 5, точка ЛД). В ходе эксперимента излучение низкочастотных гидроакустических сигналов проводилось на восьми станциях. Причем на станциях 1 и 2 судно стояло на якоре, а на станциях 3–8 находилось в дрейфе (рисунок 5). На станции 1 излучение проводилось на глубинах 5, 12 и 22 м с одинаковой мощностью излучения, на станции 2 излучение проводилось на глубинах 5 и 12 м. На станциях 3, 5 и 7 излучение проводилось на глубине 5 м, а на станциях 4, 6 и 8 - на глубине 21 м. На станции №1 на глубине 5 м излучение тонового сигнала было на частоте 32.2 Гц, на глубине 12 м - на частоте 32 Гц, на глубине 22 м - на частоте 36 Гц. Мощность излучения на всех глубинах была одинакова. На рисунке 6 а) представлена динамическая спектрограмма участка записи неравноплечего лазерного деформографа в момент работы гидроакустического излучателя на 1 станции. Начало и конец приема сейсмоакустического сигнала на спектрограмме обозначены стрелками. При одинаковой мощности излучения наибольший уровень сигнала наблюдается при работе гидроакустического излучателя, погруженного на глубину 12 м. Аналогичная ситуация наблюдалась и в момент работы излучателя на станции 2.

При выполнении экспериментальных работ было проведено гидроакустическое излучение тонального сигнала при движении судна по оси неравноплечего лазерного деформографа ориентации «север-юг» от станции 2 к станции 1. Низкочастотный гидроакустический излучатель был опущен на глубину 15 м с борта катера, двигающегося поперек бухты. В начальной точке излучения расстояние от излучателя до лазерного деформографа составляла 656 м при глубине моря 20.1 м, а в конечной точке расстояние составляло 1718 м при глубине моря 26.6 м. Средняя скорость движения катера составила 0.3 м/с. На рисунке 6 б) приведена динамическая спектрограмма записи неравноплечего лазерного деформографа в момент работы излучателя, где стрелками обозначено начало и конец работы.

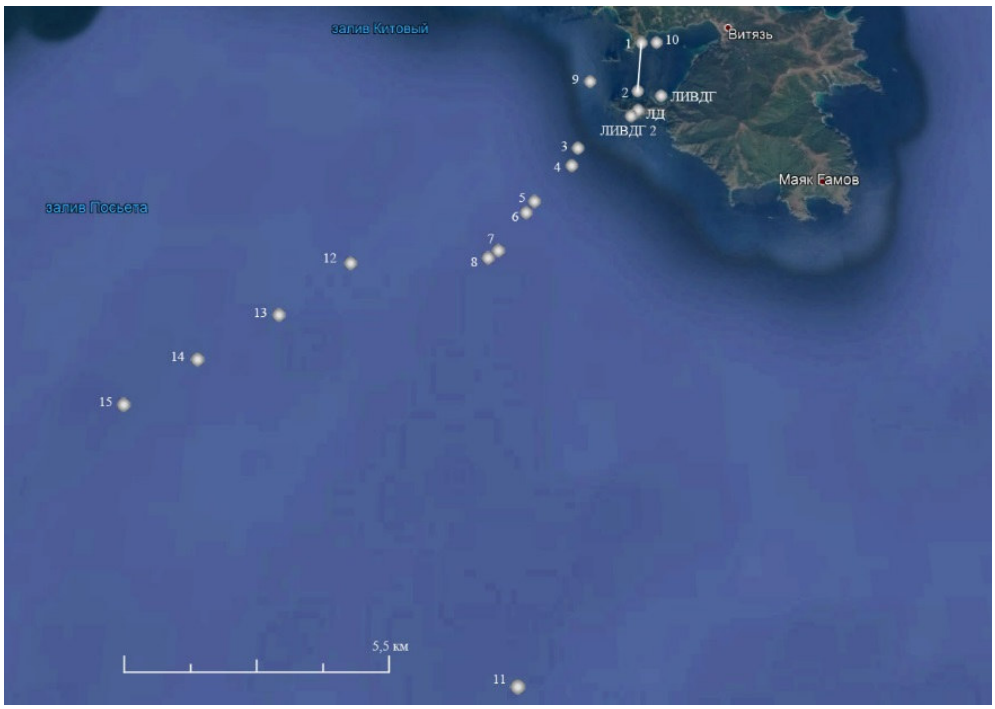


*Рисунок 5 – Расположение станций гидроакустического излучения и установки приемных систем при выполнении экспериментальных работ в 2004, 2009 и 2015 годах.*

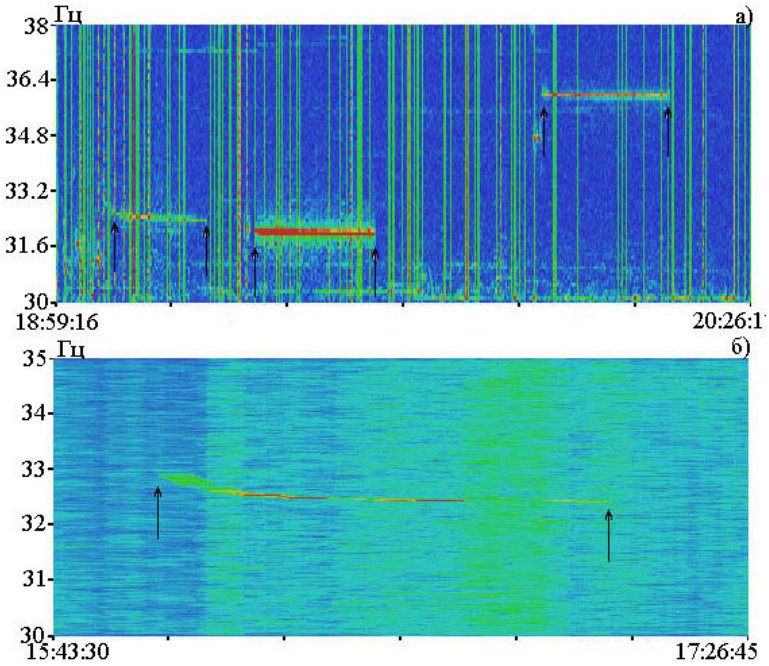


*Рисунок 6 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа в момент работы гидроакустического излучателя за 16 и 17 сентября 2004 г.*

Во втором эксперименте, проведённом в 2009 году, работы выполнялись с борта маломерного судна с применением гидроакустического излучателя, работающего на частотах 30–40 Гц. Для регистрации сейсмоакустических и гидроакустических сигналов использовался 52.5–метровый лазерный деформограф

неравноплечего типа ориентацией север-юг (рисунок 5, точка ЛД) и лазерный измеритель вариаций давления гидросферы (рисунок 5, точка ЛИВДГ). Лазерный деформограф установлен на высоте около 60 м над уровнем моря. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы был установлен в бухте Витязь на расстоянии 200 м от берега на глубине 15 м. В ходе эксперимента излучение низкочастотных гидроакустических колебаний проводилось на двух станциях (рисунок 5). Расстояние от станции 9 до лазерного деформографа составляет около 1.5 км, а до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы около 1.8 км. Расстояние от станции 10 до лазерного деформографа составляет около 2.2 км, а до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы около 1.6 км. Причем станция 9 находилась вне бухты Витязь и была отделена от лазерного измерителя вариаций давления гидросферы частью суши, а станция 10 располагалась в бухте Витязь в прямой видимости от лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. Излучение проводилось на глубинах 5 и 15 м на обоих станциях на частоте 33 Гц с одинаковой мощностью. На рисунке 7 приведены динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (в) в момент работы гидроакустического излучателя на станции 9. А также лазерного деформографа (б) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (г) в момент работы гидроакустического излучателя на станции 10. Стрелками обозначено начало и окончание работы излучателя. Первый сигнал соответствует излучению на глубине 5 м, а второй на глубине 15 м.

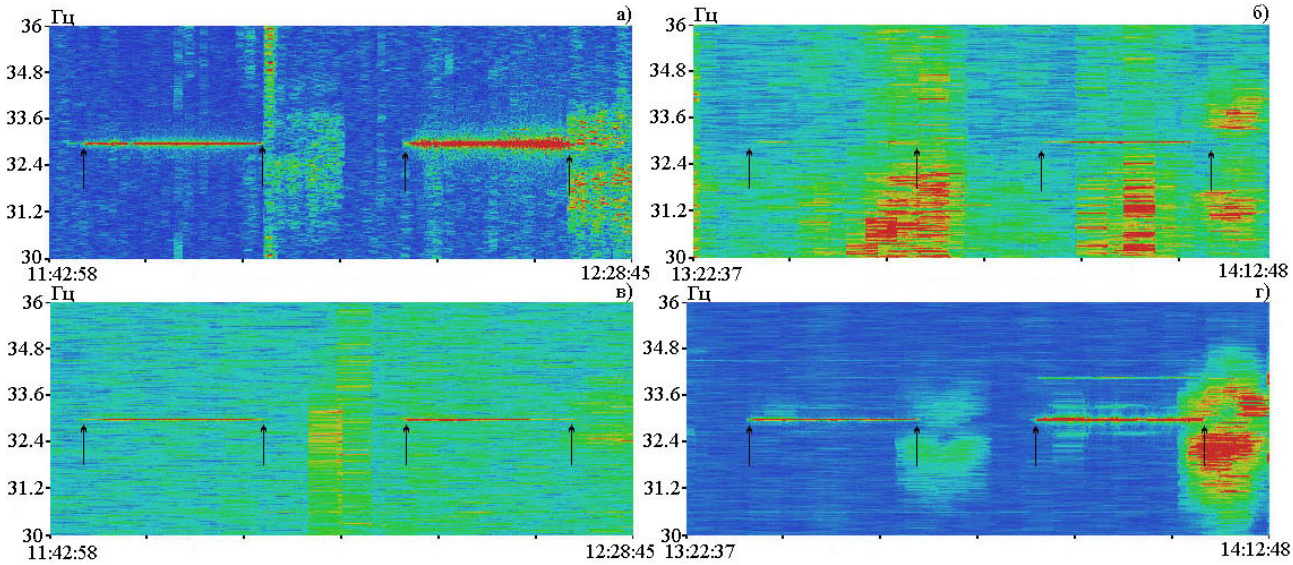


*Рисунок 7 – Динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (а и б) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (в и г) в момент работы гидроакустического излучателя за 07 октября 2009 г.*

На динамических спектрограммах записей лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы видно, что при одинаковой мощности излучения амплитуда принимаемого сигнала при излучении на глубине

15 м больше, чем при излучении на глубине 5 м. При рассмотрении отношения сигнала гидроакустического излучателя к фоновым колебаниям при излучении на станции 9, было выявлено, что при регистрации лазерным деформографом отношение больше, чем при регистрации лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. Это связано с расположением измерительных приборов. Расстояние от гидроакустического излучателя до лазерного деформографа меньше, чем до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. А также то, что на линии от станции 9 до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы нет прямой видимости, трасса преграждается куском суши. При рассмотрении отношения сигнала гидроакустического излучателя к фоновым колебаниям при излучении на станции 10 было выявлено, что при регистрации лазерным деформографом отношение меньше, чем при регистрации лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. Расстояние от гидроакустического излучателя до лазерного деформографа больше, чем до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы.

В третьем эксперименте, проведённом в 2015 году, работы выполнялись с применением гидроакустических излучателей с центральной частотой излучения 22 Гц и 33 Гц, неравноплечего лазерного деформографа с ориентацией север-юг и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. На рисунке 5 точкой ЛД место отмечено установки лазерных деформографов, точкой ЛИВДГ 2 - место установки лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, точками 11–15 обозначены станции работы гидроакустического излучателя. На станции 11 работы велись с помощью гидроакустического излучателя с центральной частотой 22 Гц, на станциях 12–15 работы велись с помощью гидроакустического излучателя с центральной частотой 33 Гц. В качестве приемных систем использовались неравноплечие лазерные деформографы с длинами измерительных плеч 52.5 и 17.5 м и ориентацией север-юг и запад-восток, соответственно, и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, установленного на шельфе на глубине 33 м.

Расстояние от станции 11 до лазерного деформографа было около 15 км, от станции 12 до лазерного деформографа - 8 км, а от станции 15 до лазерного деформографа - тоже около 15 км. При обработке данных лазерных деформографов в момент работы гидроакустического излучателя был обнаружен сейсмоакустический сигнал с частотой, соответствующей частоте излучения на станции 11 при погружении излучателя на глубину 18 м. На спектрограмме записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы пик с частотой 22 Гц не выделяется и его амплитуда не выше фоновых колебаний.

Полученные экспериментальные результаты позволили определить критическую глубину, при которой шельф «запирает» прохождение гидроакустической энергии в воде на частоте 22 Гц. Она очень хорошо совпадает с теоретическими расчётами и равна 17.8 м. Можно ожидать, что с понижением

частоты излучаемого гидроакустического сигнала этот эффект будет проявляться на больших глубинах. Так, например, при излучении гидроакустического сигнала на частоте 1 Гц на шельфе убывающей глубины с аналогичными упругими параметрами морского дна, не будет этого гидроакустического сигнала в воде, начиная с глубин около 390 м.

При выполнении работ на станциях 12–15 работы велись с помощью гидроакустического излучателя с максимальной мощностью на частоте 33 Гц. В ходе работы излучатель выдавал сигнал, состоящий из тонального сигнала и М-последовательности. На всех станциях излучатель погружался на глубину 15 м, мощность гидроакустического сигнала была одинакова. При рассмотрении сигналов неравноплечего лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией север-юг и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в момент работы гидроакустического излучателя на всех станциях были обнаружены сигналы, соответствующие частоте излучения.

На основе экспериментальных работ по исследованию возможностей низкочастотного гидроакустического излучателя с центральной частотой 33 Гц и берегового лазерного деформографа при изучении строения и структуры земной коры, определении основных упругих характеристик пород на трассах излучатель приемник показано, что применение данных систем возможно для диагностики морского дна. В области низких частот сейсмоакустические поверхностные волны становятся доминирующим механизмом переноса акустической энергии в шельфовой зоне, что можно использовать при экспериментальных работах по изучению строения земной коры шельфовых зон различных морей. Поскольку частоты сигналов, излучаемых низкочастотными гидроакустическими излучателями, порядка 20 – 35 Гц, т.е. длина волны в воде около 75–40 м, а в твердой среде при скорости упругих волн порядка 3000 м/с около 150–100 м, то глубина проникновения данных сигналов в земную кору значительная. 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. В данных исследованиях предпочтительно использовать сложные фазоманипулированные сигналы (М-последовательности), применение которых в гидроакустических и сейсмоакустических исследованиях позволяет определить времена прихода с высокой точностью. Кроме того, затухание сигнала не сильно влияет на результат обработки. Это позволяет применять эффективно данную методику даже при значительном шуме, амплитуда которого может быть больше амплитуд принятых гидроакустических или сейсмоакустических сигналов.

**В параграфе 3.2** рассматриваются закономерности распространения и трансформации сейсмоакустических колебаний на границе суша-вода. В ходе

изучения был проведен ряд экспериментов в 2007 и 2016 годах по генерации упругих волн в земной коре низкочастотным сейсмоакустическим излучателем и их приему 52.5–метровым лазерным деформографом ориентацией север-юг на берегу, а также гидроакустических волн, возникающих в результате трансформации упругих волн на границе дно-вода, лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. В первом эксперименте, проведённом в мае 2007 года, низкочастотный сейсмоакустический излучатель был установлен в 100 м от лазерного деформографа под углом 25° относительно его главной оси и в 320 м от лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, установленном на шельфе Японского моря на глубине 27 м. В ходе эксперимента частота излучения сигнала менялась скачками и плавно в частотном диапазоне от 13 до 19 Гц.

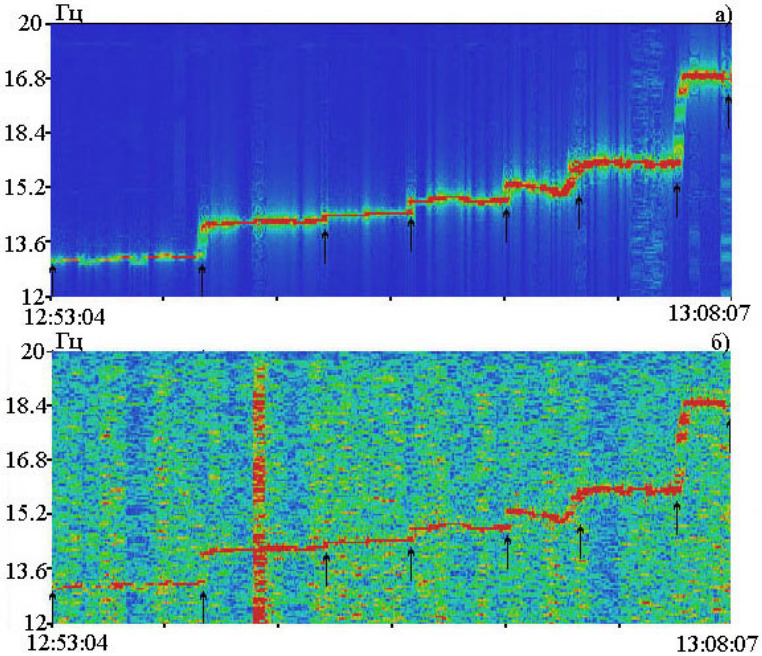


*Рисунок 8 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б) в момент работы сейсмоакустического излучателя за 30 мая 2007 г.*

Излученный сигнал синхронно регистрировался лазерным деформографом и лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. Было выбрано несколько участков синхронных записей измерительных приборов. На рисунке 8 представлены динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б) в первый день эксперимента. На рисунках стрелками отмечены места начала и окончания излучения сигнала на различных частотах.

Во втором эксперименте, проведённом в октябре 2016 года, низкочастотный сейсмоакустический излучатель был жестко закреплен к бетонной плите, установленной на берегу б. Витязь. Расстояние от сейсмоакустического излучателя

до лазерного деформографа было около 680 м, а до лазерного измерителя вариаций гидросферы, установленного на дне б. Витязь на глубине 12 м, около 160 м.

На динамических спектрограммах записей лазерного деформографа (рисунок 9 а) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 9 б) на частоте около 13 Гц стрелками отмечены моменты работы сейсмоакустического излучателя. На спектрограммах видно, что частота во время работы излучателя была нестабильной, плавала в пределах 0.1 Гц в результате чего на спектрограммах записей приборов выделяется два пика с частотами 13.02 и 13.12 Гц.

Воспользуемся полученными экспериментальными данными неравноплечего лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы для оценки сейсмоакустической и гидроакустической энергий. Среднюю по времени плотность энергии упругой волны с учетом диаграммы направленности лазерного деформографа можно записать в виде:

$$\bar{E}_{\text{ув}} = \frac{1}{2\cos^2\Theta}\rho u_{0j\text{д}}^2\omega^2 \qquad (1)$$

где $\rho$ – плотность пород, $\omega = 2\pi\nu$, ν – частота, $u_{0j\text{д}}$ – измеренное смещение лазерным деформографом.

Плотность энергии гидроакустической гармонической волны можно записать в виде:

$$\bar{E}_{\text{ак}} = \frac{P_0^2}{2\rho_{\text{в}}c^2} \qquad (2)$$

где $P_0$ – измеренное лазерным измерителем вариаций давления гидросферы гидроакустическое давление, $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $c$ – скорость звука в воде.

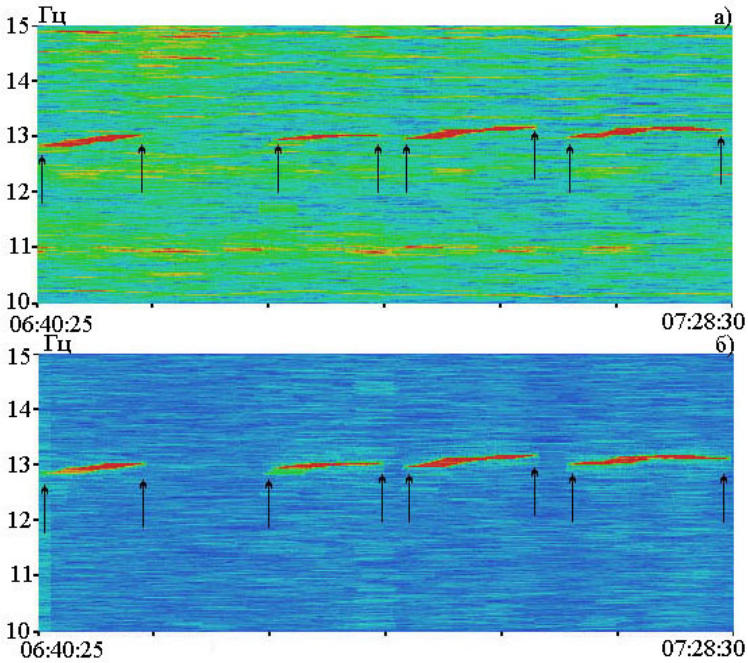


*Рисунок 9 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б) в момент работы сейсмоакустического излучателя за 07 октября 2016 г.*

Из анализа полученных экспериментальных данных лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в момент работы сейсмоакустического при $\Theta = 25^{\circ}$, $\rho = 2000\,\text{кг/м}^3$ следует, что около 0,3% энергии упругих волн трансформируется в энергию гидроакустической волны. При подстановке в расчеты $\rho$ с более высокими значениями данное процентное отношение пропорционально уменьшается.

**В параграфе 3.3** рассматривается вероятность взаимодействия низкочастотных гидроакустических волн с более низкочастотными морскими волновыми процессами. Для этого в октябре 2007 года был проведен эксперимент в бухте Витязь, с применением в качестве приемной системы лазерного гидрофона, а в качестве излучающей системы низкочастотного гидроакустического излучателя, работающего на частоте 245 Гц. Лазерный гидрофон был установлен на глубину 17.5 м, а излучатель на удалении 1000 м на глубине 10 м при глубине моря в данной точке 25 м. Низкочастотный гидроакустический излучатель работал в непрерывном режиме.

При изучении взаимодействия низкочастотных гидроакустических волн с ветровыми морскими волнами будем оценивать применимость прямых и параметрических методов. Рабочий диапазон частот лазерного гидрофона позволяет независимо рассматривать вариации гидросферного давления, вызванного морскими ветровыми волнами и излученными гидроакустическими волнами.

Для этого сравним исходный участок записи лазерного гидрофона до и после обработки, динамические спектрограммы и спектры записей лазерного гидрофона. На рисунке 10 слева приведены (сверху вниз) запись исходного ряда, динамическая спектрограмма и спектр записи лазерного гидрофона, а справа приведены ряд после обработки, его динамическая спектрограмма и спектр обработанного участка записи лазерного гидрофона.

На исходном ряде (рисунок 10 а) лазерного гидрофона видно ветровое волнение с периодом 7.28 с. На динамической спектрограмме и спектре (рисунок 10 в и д) выделяется сигнал гидроакустического излучателя на частоте 244.81 Гц. Обработаем участок записи лазерного гидрофона путем выделения сигнала на частоте излучения и проанализируем изменение его амплитуды со временем (рисунок 10 б). Спектральная обработка участка записи в области излученного сигнала показала наличие двух пиков на частотах 244.66 Гц и 244.95 Гц (рисунок 10 г и е). Появление двух пиков на этих частотах, согласно [Рутенко А.Н. Акустический журнал. 1997. Тот 43. №1], можно объяснить модулирующим воздействием более низкочастотных волн с периодами 6.54 и 7.30 с, что близко к периоду основного ветрового волнения.

Для исключения влияния низкочастотных спектральных составляющих на высокочастотные составляющие, отфильтруем исходный ряд высокочастотным

фильтром Хэмминга с граничной частотой 200 Гц. В спектре отфильтрованного ряда на частоте ветрового волнения обнаружен максимум с амплитудой в четыре раза меньше исходной, а на частоте излученного сигнала обнаружен максимум с той же амплитудой. При выделении сигнала на частоте излучения и анализе вариаций его амплитуды, на спектрограмме обнаружены максимумы на частотах 24466, 244.81 и 245.06 Гц, но их амплитуды почти на четыре порядка меньше, чем в предыдущем случае. При повторной фильтрации не обнаружено максимумов на частоте ветрового волнения, но максимум излученного сигнала остался без изменений. Выделим сигнал на частоте излучаемого сигнала и проанализируем изменение его амплитуды со временем. На спектрограмме выделяются три максимума с теми же частотами, но их амплитуды находятся на уровне шумовых компонент спектра.

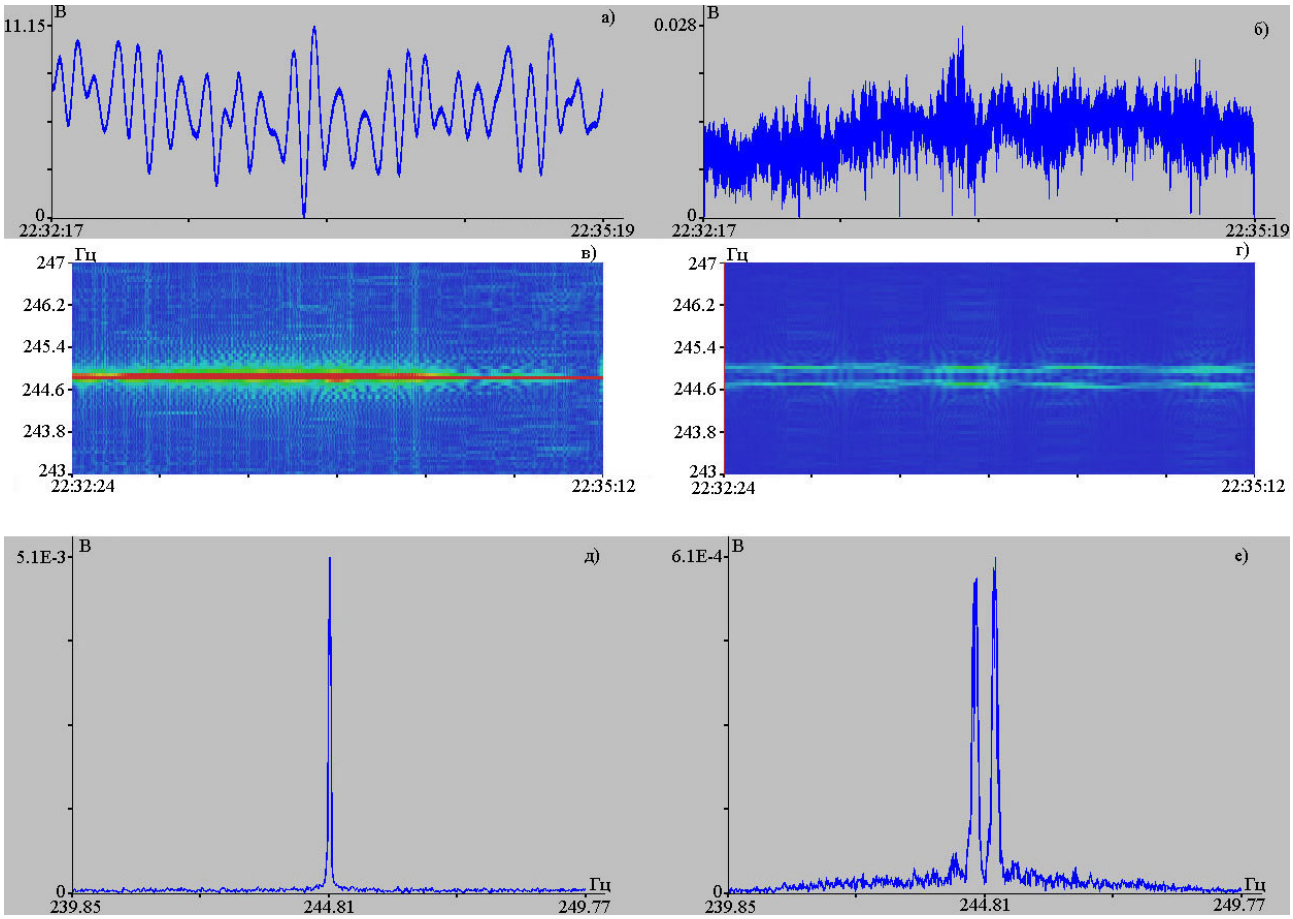


*Рисунок 10 – Участки записей лазерного гидрофона исходного ряда (а) и после обработки (б), динамические спектрограммы исходного сигнала гидроакустического излучателя (в) и после обработки (г), спектрограммы записей лазерного гидрофона исходного сигнала (д) и после обработки (е) во время проведения экспериментальных работ за 16 октября 2007 г.*

Если бы мы не фильтровали ряды данных высокочастотным фильтром Хэмминга с частотой среза 200 Гц, то можно было бы говорить о влиянии ветрового волнения на параметры излученного сигнала. Но дальнейшая фильтрация исходного ряда высокочастотным фильтром указывает на то, что никакой модуляции нет, а присутствует “эффект обработки”, связанный с влиянием низкочастотной спектральной составляющей на высокочастотную часть спектра в области излученного сигнала.

Для проверки построим модельный ряд, состоящий из двух гармоник не связанных друг с другом и со величинами экспериментальных амплитуд. Проведем обработку описанную выше. Из проведенной обработки следует, что в пределах ошибок обработки никакого воздействия ветрового волнения на параметры распространяющегося гидроакустического сигнала нет.

**В параграфе 3.4** приведено краткое описание основных результатов 3 главы, в которых: 1) применение лазерно-интерференционных приборов, гидроакустических и сейсмоакустических излучателей позволили изучить трансформацию волн низкочастотного диапазона и высокочастотного инфразвукового диапазона на границе «вода-дно»; 2) установлено, что около 0,3 % энергии сейсмоакустичеких поверхностных волн переходит в энергию гидроакустических волн на частоте излучаемого сигнала; 3) цикл натурных и модельных экспериментов показал, что морские ветровые волны не оказывают модулирующего воздействия на распространяющиеся гидроакустические волны с частотами около 32, 245 и 321 Гц.

**В четвертой главе** анализируются возникновение, развитие и трансформация колебаний и волн ветрового и инфрагравитационного диапазонов.

**В параграфе 4.1** рассматриваются некоторые аспекты динамики и трансформации ветровых морских волн. Для этого был проведен ряд экспериментов с использованием лазерно-интерференционных приемных систем в бухте Витязь в августе 2011 года и в январе 2012 года. Были установлены два прибора, лазерный измеритель вариаций давления гидросферы и мобильный лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, на глубинах 11.8 и 4.5 м по направлению движения морских ветровых волн. При анализе экспериментальных данных в бухте Витязь было обнаружено ветровое волнение открытой части Японского моря с периодами от 5 до 10 с и генерируемое в бухте с периодами от 2 до 5 с.

Анализ динамических спектрограмм записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, а так же графика изменения скорости ветра в районе бухты Витязь за август 2011 года показал, что ветровое волнение с периодами от 5 до 10 с не так сильно зависит от скорости и направления ветра, как ветровое волнение с периодами от 2 до 5 с. Для примера на рисунке 11 приведены динамические спектрограммы участков записей лазерного измерителя вариаций давления

гидросферы а), мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы б) и график скорости ветра в). Из динамической спектрограммы видно, что ветровое волнение с периодом от 2 до 5 с возникает не сразу, а при воздействии на водную поверхность ветра определенного направления. Так в процессе смены направления ветра и последующего его усиления возникает ветровое волнение с периодом около 2.8 с, которое по истечении некоторого времени развивается до волнения с периодом 4.2 с. Последующее усиление ветра привело к увеличению интенсивности и периода ветрового волнения. Ветровое волнение в диапазоне периодов от 5 до 10 с присутствует на всем участке записи. Изменение направления ветра влияет на ветровое волнение в диапазоне периодов от 2 до 5 с. При анализе динамических спектрограмм участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы установлено, что в начале когда ветер северного направления ветровое волнение присутствует, а затем когда он меняется на южный, то ветровое волнение в диапазоне периодов от 2 до 5 с постепенно затухает.

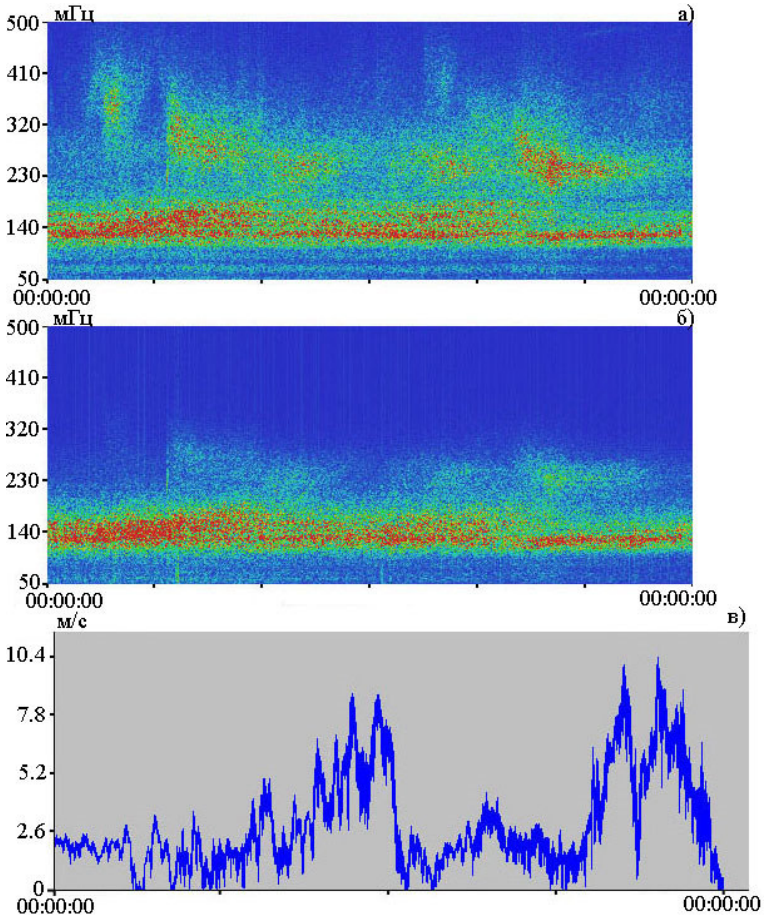


*Рисунок 11 – Динамические спектрограммы участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а), мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б) и график изменения скорости ветра (в) за период с 18 по 20 августа 2011 г.*

Анализ данных за январь 2012 года показывает, что ветровое волнение с периодами от 2 до 5 с принадлежит ветровому волнению, возникающему в бухте

Витязь. На динамической спектрограмме участка записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, приведенной на рисунке 12, в начальный и конечной части присутствует ветровое волнение с периодом от 3.5 до 4 с, а в остальной части его нет. При этом сила ветра оставалась неизменной, менялось только его направление с северо-западного на северо-восточное. Это и привело к тому, что ледяной покров «пригнало» в бухту, а затем разломало и «выгнало» из бухты. В момент времени, когда водная поверхность над прибором была покрыта льдом ветрового волнения с периодом от 3.5 до 4 с не наблюдалось, а когда над прибором открылась вода, прибор стал регистрировать ветровое волнения в данном диапазоне периодом. Ветровое волнение с периодом около 10 с регистрировалось на протяжении всего времени, даже когда водная поверхность бухты была скованна льдом.

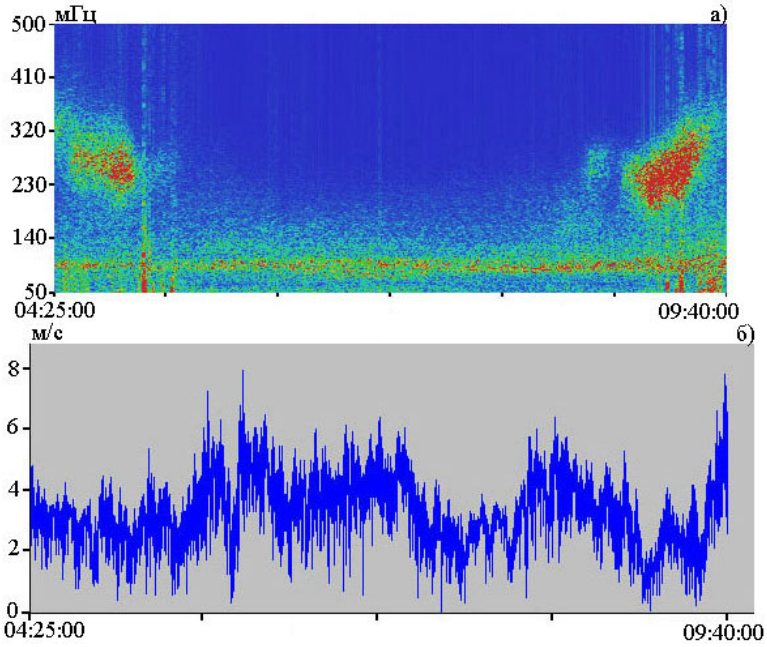


*Рисунок 12 – Динамическая спектрограмма участка записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а) и график изменения скорости ветра (б)за период с 23 по 24 января 2012 г.*

Анализируя данные лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и мобильного лазерного измерителя вариаций гидросферы за август 2011 года основное внимание уделялось динамике ветрового волнения открытой части Японского моря. В результате было выявлено, что периоды и амплитуды ветрового волнения уменьшаются при уменьшении глубины. В диапазоне глубин от 11.8 до 4.5 м ветровая волна взаимодействует с дном, отдавая часть своей энергии верхнему слою земной коры. Данный процесс наблюдался не только при значительных амплитудах, но и при малых амплитудах. При распространении ветрового волнения на исследуемом участке средний процент изменения периодов ветрового волнения

в диапазоне от 5 до 6 с составляет около 6 %, а средний процент изменения периодов ветрового волнения в диапазоне от 6 до 7 с составляет около 7%.

**В параграфе 4.2** исследуется возникновение и динамика колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн. Анализируя экспериментальные данные лазерного деформографа, начиная с 2000 года, основной акцент делался на соотношение амплитуд инфрагравитационных волн и амплитуд морского волнения в зоне перехода. Анализ данных показал зависимость от погодных условий и морского волнения спектральных составляющих в диапазоне периодов от 25 до 50 с. В безветренную погоду над значительной акваторией, вблизи м. Шульца, где установлен лазерный деформограф, данные колебания не наблюдаются. Связь данных колебаний с поверхностным ветровым волнением Японского моря и диапазон периодов позволяют отнести их к инфрагравитационным волнам.

При обработке данных гидрофона было установлено, что ветровые волны, входящие в прибойную зону, сильно моделированы по амплитуде (рисунок 13 нижний). Гидрофон был установлен в прибойной зоне недалеко от 52.5-метрового лазерного деформографа. При обработке данных 52.5-метрового неравноплечего лазерного деформографа были обнаружены микросейсмы, вызванные этим поверхностным волнением (рисунок 13 верхний). Период модуляции и ее глубина могут определять период и амплитуду инфрагравитационных волн.

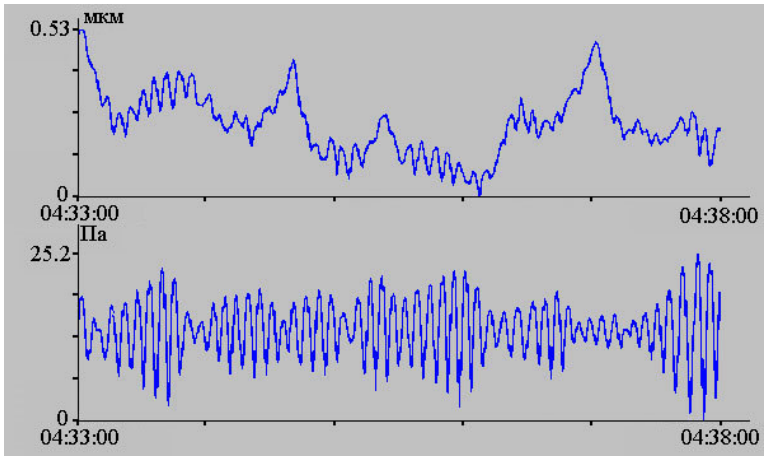


*Рисунок 13 – Синхронные участки записи берегового лазерного деформографа (верхний) и гидрофона (нижний), установленного в прибойной зоне за 8 октября 2000 г.*

Анализ спектрограмм участков записей лазерного деформографа за разные периоды времени, содержащие инфрагравитационные и гравитационные волны, показал, что периоды инфрагравитационных волн остаются неизменными, в то время как периоды прогрессивных и стоячих гравитационных волн могут меняться. На рисунке 14 а) приведена динамическая спектрограмма участка записи 52.5-метрового неравноплечего лазерного деформографа за октябрь 2000 года. При анализе экспериментальных данных было установлено, что период прогрессивных

волн последовательно возрастает с 4.3 до 5.4 с, период стоячих волн возрастает с 2.4 до 2.7 с, а период инфрагравитационных волн остается практически неизменным и равным 42 с. Анализ спектрограммы записи лазерного деформографа показывает, что амплитуды инфрагравитационных волн сравнимы с амплитудами гравитационных волн (рисунок 14 б).

При обработке записей неравноплечего лазерного деформографа за сентябрь 2004 года было установлено, что период прогрессивных волн меняется в пределах от 6 до 8 с, а период инфрагравитационных волн составляет 37.4 с. В мае 2007 года на динамической спектрограмме было заметно изменение прогрессивных волн в пределах от 6.5 до 7.6 с, а период инфрагравитационных волн составлял 48.4 с. При этом амплитуды этих волн были практически равны.

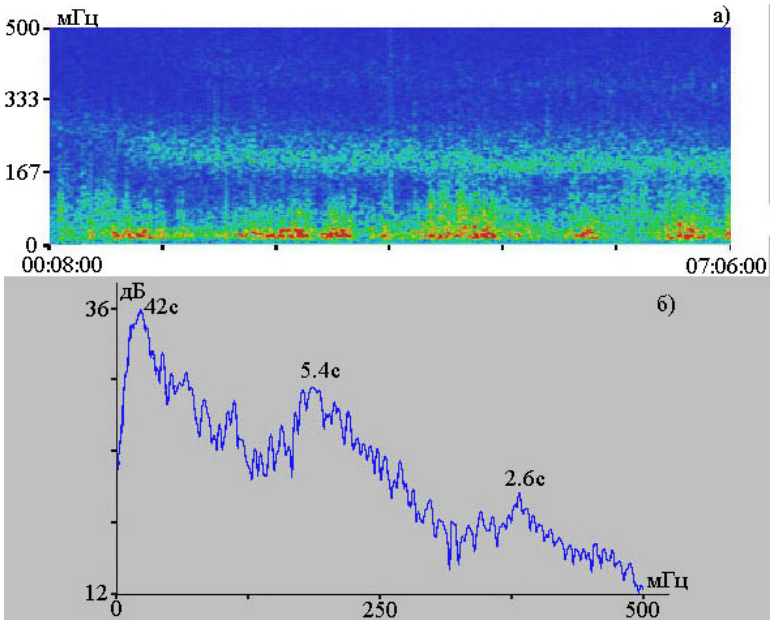


*Рисунок 14 – Динамическая спектрограмма (а) и спектр (б) фрагмента записи лазерного деформографа за 08 октября 2000 года.*

По данным берегового неравноплечего лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией север-юг было установлено, что амплитуды инфрагравитационных волн сравнимы по величине с амплитудами гравитационных волн, а периоды инфрагравитационных волн не зависят от периодов гравитационных волн.

**В параграфе 4.3** рассматриваются колебания и волны диапазона морских внутренних волн не морского происхождения. Так при проведении комплексных экспериментальных исследований на м. Шульца летом 2012 года было установлено, что основным механизмом генерации морских внутренних волн являются атмосферные возмущения. Так летом 2012 года проводился эксперимент по изучению динамических особенностей термоструктуры шельфовой области с помощью термогирлянд. В тот же период времени на берегу регистрировались вариации микродеформаций земной коры неравноплечими лазерными

деформографами ориентацией север-юг и запад восток, и вариации атмосферного давления лазерным нанобарографом. Расстояние от лазерного нанобарографа до термогирлянды было около 4 800 м. Расстояние от лазерного нанобарографа до неравноплечего лазерного деформографа ориентацией север-юг и длиной измерительного плеча 52.5 м составляло 50 м. А расстояние от лазерного деформографа ориентацией запад-восток и длиной измерительного плеча 17.5 м составляло 30 м.

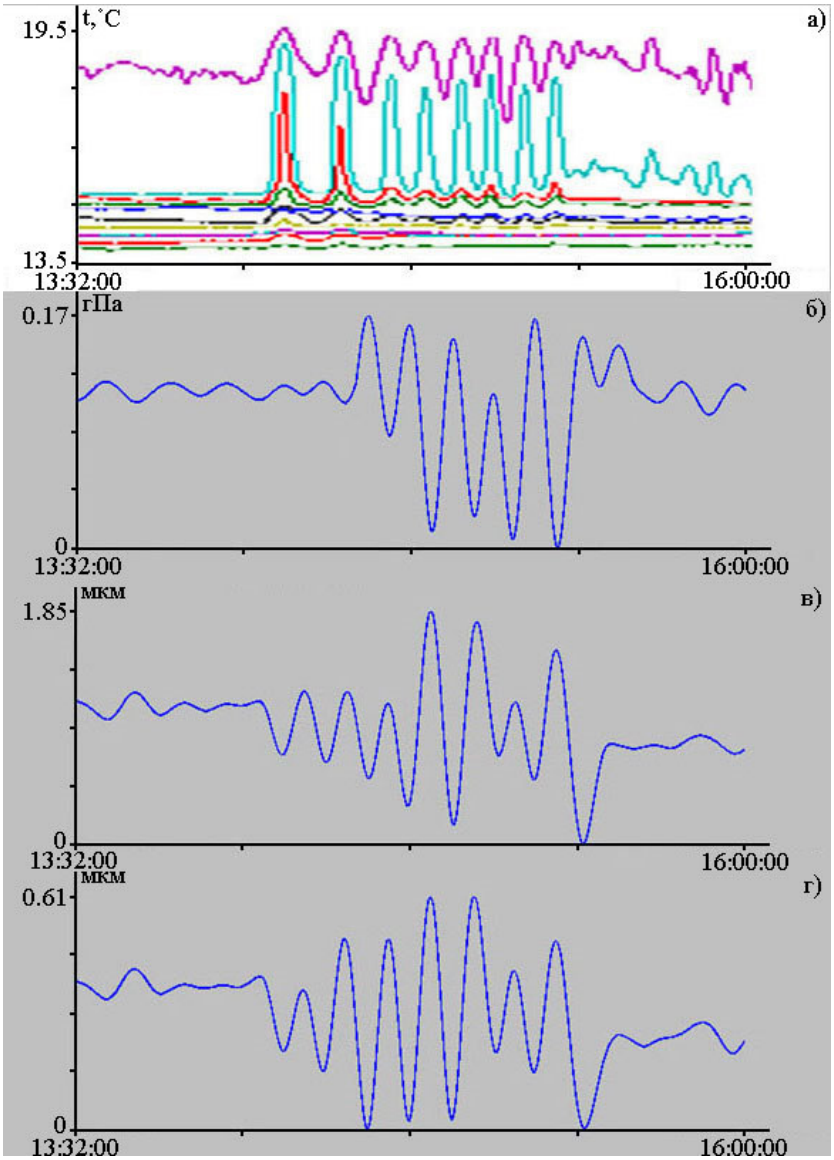


*Рисунок 15 – Синхронные записи термогирлянды (а), лазерного нанобарографа (б) и лазерных деформографов «север-юг» (в) и «запад-восток» (г) за 29 июля 2012 г.*

Анализ экспериментальных данных лазерного нанобарографа и лазерных деформографов показал наличие цуга волн схожего с цугом волн, зарегистрированного термогирляндой. На рисунке 15 приведены запись термогирлянды и отфильтрованные полосовым фильтром в диапазоне

короткопериодных морских внутренних волн записи лазерного нанобарографа и двухкоординатного лазерного деформографа. При спектральном анализе полученных записей была установлена идентичность периодов, равных примерно 9 мин.

Изучение записей лазерного нанобарографа, лазерных деформографов и термогирлянды показывает, что вероятное происхождение колебаний, зарегистрированных термогирляндой, вызвано соответствующими атмосферными, а не гидросферными процессами. На записи лазерного нанобарографа цуг волн был зарегистрирован на 10 мин позже, чем на записи термогирлянды. Анализ большого объема экспериментальных данных лазерно-интерференционных приборов диапазона периодов морских внутренних волн показал, что резкое изменение атмосферного давления сопровождается колебаниями гидросферы и соответственно колебаниями верхнего слоя земной коры, а появление колебаний гидросферы в исследуемом диапазоне почти всегда сопровождается аналогичными колебаниями атмосферы.

Для точной оценки первоисточника тех или иных колебаний в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» учет вклада вариаций давления атмосферы в микродеформации земной коры очень важен. Анализ синхронных данных вариаций атмосферного давления и вариаций микродеформаций земной коры и последующее вычитание атмосферного вклада в деформацию, позволяет выделять тонкие литосферные процессы «замаскированные» атмосферой. Для связи вариаций атмосферного давления с вариациями микродеформаций верхнего слоя земной коры вычислим передаточный коэффициент, отражающий вклад вариаций атмосферного давления в деформацию земной коры. Выберем пятьдесят часовых синхронных участков записи лазерного нанобарографа и лазерного деформографа, в которых график изменения атмосферного давления совпадает с графиком изменения верхнего слоя земной коры. Получаем, что для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 м и ориентацией запад-восток он равен 0.08 мкм/Па, а для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией север-юг он равен 0.203 мкм/Па. Различие передаточных коэффициентов объясняется особенностями установки лазерных деформографов. Устои лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 м расположены на суглинке, также как и один устой лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м, а второй устой расположен на скальной породе. Величины этих коэффициентов зависят от времени года, насыщенности водой пород, на которых установлены лазерные деформографы и других факторов.

Продемонстрируем работоспособность данной методике на участке записи 17.5-метрового лазерного деформографа с 27 по 31 июля 2015 года. Рассмотрим спектры участков записей лазерного нанобарографа, лазерного деформографа и скорректированного участка записи лазерного деформографа. На спектрах участков

записей выделим область основного сфероидального тона Земли $_0S_0$ (рисунок 16). На спектре неоткорректированной записи лазерного деформографа присутствуют максимумы существенной амплитуды, вызванные вариациями атмосферного давления, присутствующие в спектре записи лазерного нанобарографа. В спектре откорректированной записи лазерного деформографа таких максимумов нет. В результате корректировки записи лазерного деформографа «запад-восток» пики, соответствующие собственным колебаниям Земли, стали ярко выражены. Так первый значительный пик соответствует сфероидальному тону $_0S_0$ с экспериментально определенным периодом 20.09 мин, а второй по значению пик соответствует сфероидальному обертону $_1S_3$ с экспериментально определенным периодом 17.51 мин.

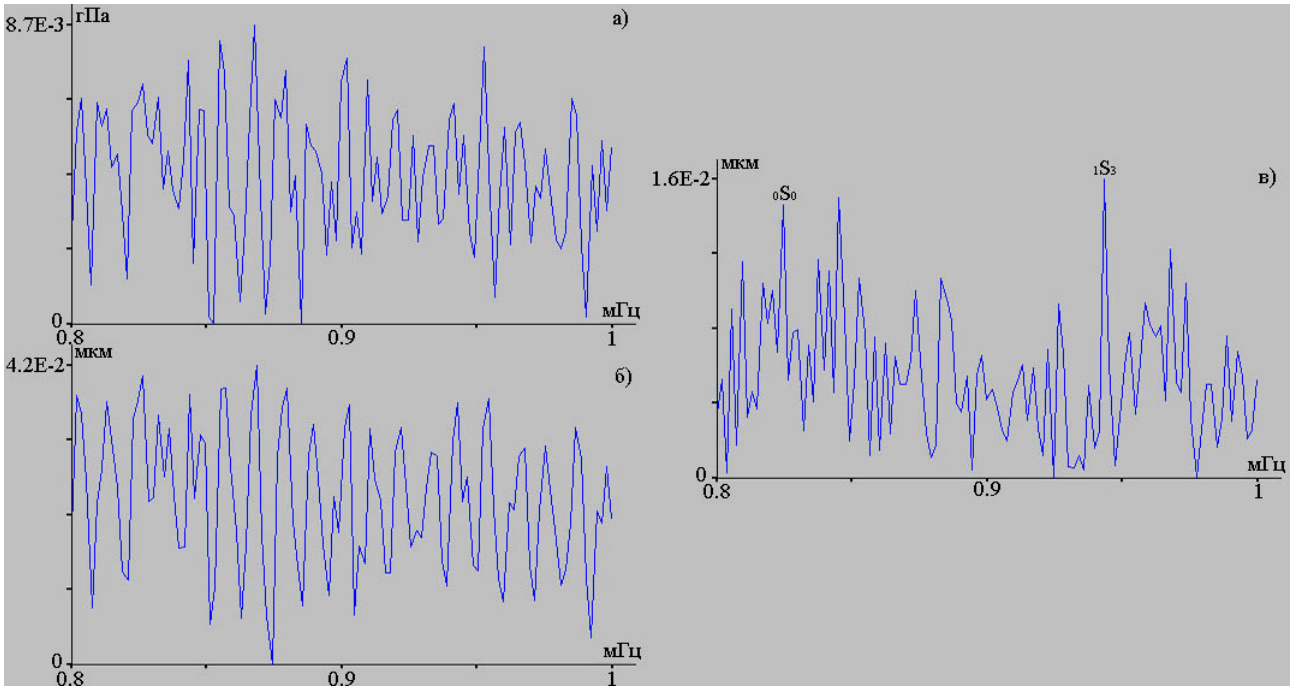


*Рисунок 16 – Спектры участка записи лазерного нанобарографа, участка записи лазерного деформографа «запад-восток», скорректированного участка записи лазерного деформографа «запад-восток» (сверху-вниз)*

Спектральный анализ неоткорректированной записи 17.5-метрового лазерного деформографа и откорректированной записи показал, что данная методика определения вариаций микродеформаций земной коры, вызванная вариациями атмосферного давления и последующее вычитание полученного ряда из исходного позволяет выделить сфероидальные колебания Земли, которые были «замаскированы» более мощными атмосферными процессами.

**В параграфе 4.4** приведено краткое описание основных результатов 4 главы, в которых: 1) по мере распространения по шельфу убывающей глубины ветровая волна при взаимодействии с дном теряет часть своей энергии (передает дну), что приводит к трансформации ее спектра, и энергия в нем перераспределяется в более

высокочастотную область; 2) амплитуды инфрагравитационных волн сравнимы с амплитудами гравитационных волн, а периоды инфрагравитационных волн не зависят от периодов гравитационных волн; 3) колебания давления гидросферы, зарегистрированные лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, практически всегда сопровождаются колебаниями давления атмосферы и синхронно с вариациями атмосферного давления наблюдаются вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры; 4) необходимо учитывать влияние вариаций атмосферного давления на уровень микродеформаций верхнего слоя земной коры, так как после вычета деформации земной коры, вызванной вариациями атмосферного давления, уверенно выделены сфероидальные колебания Земли в рассматриваемом диапазоне периодов, которые были «замаскированы» более мощными атмосферными процессами.

**В пятой главе** анализируются деформационные аномалии сопутствующие возникновению цунами.

**В параграфе 5.1** описывается регистрация деформационной аномалии индонезийского землетрясения 26 декабря 2004 года. При анализе данных неравноплечего лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией север-юг, установленного на юге Приморского края России, была выявлена деформационная аномалия, вызванная этим цунамигенным землетрясением. На записи лазерного деформографа имеется существенное отличие этого землетрясения от многих других. Землетрясение, которые «трясет» дно с периодом от 10 до 30 с не приводит к образованию цунами. Волна цунами могла быть вызвана медленной, но значительной по амплитуде подвижкой морского дна в эпицентре землетрясения. В связи с этим, для регистрации момента возникновения цунами необходимо использовать широкополосную аппаратуру, работающую практически от 0 Гц, способную дистанционно зарегистрировать данную подвижку морского дна. На фрагменте записи лазерного деформографа длительностью около 5 ч (рисунок 17 а) стрелкой обозначено место начала регистрации землетрясения. График содержит колебания и деформационную аномалию, вызванные индонезийским цунамигенным землетрясением. На рисунке 17 б) приведено это же землетрясение в большем масштабе. Деформационная аномалия на базе 52.5-метрового лазерного деформографа составила величину около 59.3 мкм, что составляет величину деформации порядка $1.1 \cdot 10^{-6}$, что значительно больше величины амплитуды суточного прилива в данном регионе.

Анализ записи показал, что произошло резкое увеличение базы деформографа с последующей медленной релаксацией. Учитывая дисперсионное соотношение, связывающее периоды волн и их скорости, и затухание сигнала, можно утверждать, что в эпицентре скорость нарастания деформационной аномалии была выше, а величина значительно больше. Сигнал цунамигенного землетрясения был зарегистрирован через 19 мин 54 с, расстояние от эпицентра до

лазерного деформографа составило примерно 5 500 км. При условии, что землетрясение произошло под водной толщей, что легко определяется по записям сейсмостанций, можно было бы с уверенностью предсказать возникновение цунами. Анализ спектра записи лазерного деформографа выявил, что период первой волны цунамигенного землетрясения равен 42.7 с.

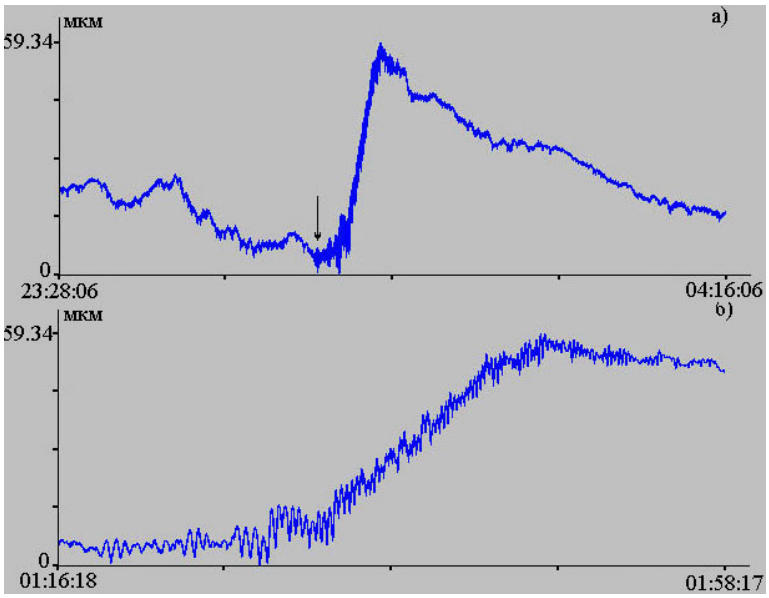


*Рисунок 17 – Фрагмент записи 52.5-метрового лазерного деформографа за 25 – 26 декабря 2004 года. Запись индонезийского цунамигенного землетрясения (а) и выделенный участок записи землетрясения (б)*

Далее отфильтруем полосовым фильтром записи неравноплечего лазерного деформографа цунамигенного и не цунамигенного землетрясения в частотном диапазоне широкополосного сейсмографа. На рисунке 18 приведена отфильтрованная запись индонезийского цунамигенного землетрясения, отфильтрованная запись не цунамигенного землетрясения, и запись широкополосного сейсмографа на японской станции.

При анализе отфильтрованной записи лазерного деформографа и записи широкополосного сейсмографа не обнаружено деформационного сигнала, приведшего к образованию цунами. Деформационная аномалия находится вне рабочего диапазона сейсмографа. При сравнении всех графиков видно, что даже широкополосными сейсмографами отличить цунамигенное землетрясение от не цунамигенного практически невозможно.

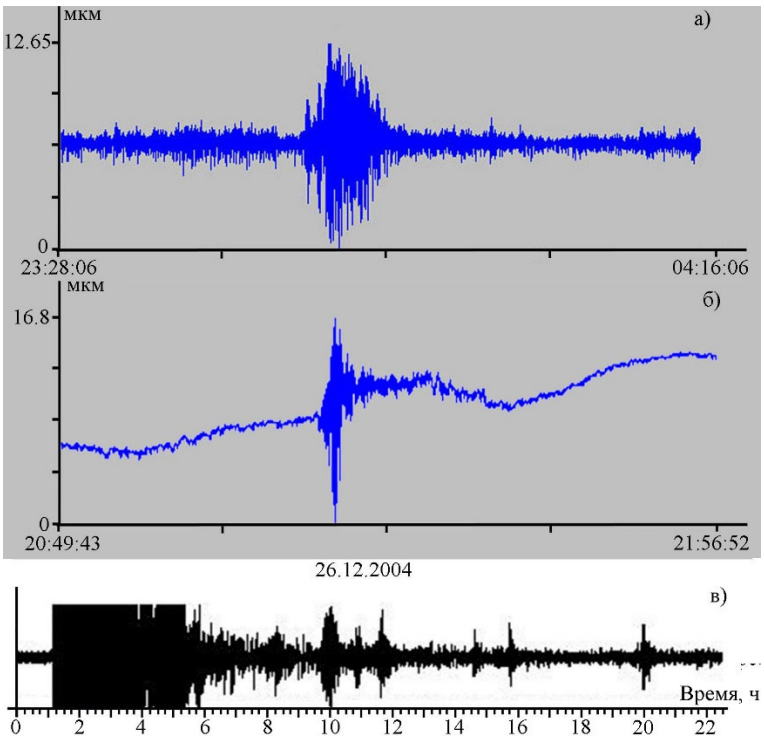


*Рисунок 18 – Отфильтрованная запись индонезийского цунамигенного землетрясения за 25 – 26 декабря 2004 г. (а), отфильтрованная запись не цунамигенного землетрясения за 04 августа 2000 г.(б) и запись широкополосного сейсмографа на японской станции (в)*

**В параграфе 5.2** описывается регистрация деформационных аномалий других подводных землетрясений. С момента запуска 52.5-метрового лазерного деформографа ориентацией север-юг был получен большой объем данных широкого диапазона частот. Проведем анализ данных при регистрации сигналов некоторых цунамигенных землетрясений. Так при анализе данных за 5 сентября 2004 года были зарегистрированы два мощных землетрясения, которые произошли на южном побережье острова Хонсю, Япония. Первое землетрясение с магнитудой 7.2 произошло в 10:07:07 на расстоянии около 75 км к востоку от о. Хонсю, на глубине 20 км от уровня моря. Второе землетрясение с магнитудой 7.5 произошло в 14:57:16 на расстоянии около 130 км к востоку от южной части о. Хонсю, на глубине 10 км от уровня моря. Первое не цунамигенное землетрясение было зарегистрировано лазерным деформографом в 10:13:46 (рисунок 19 а), второе, цунамигенное землетрясение, было зарегистрировано в 15:03:52 (рисунок 19 б).

На рисунке 19 приведены увеличенная запись лазерного деформографа горизонтального типа первого не цунамигенного землетрясения (а, в) и динамическая спектрограмма этого землетрясения (д). Начало землетрясения отмечено стрелкой. На записи нет деформационной аномалии, характерной для цунамигенного землетрясения, а на динамической спектрограмме ярко выражены колебания с периодами около 10 и 16 с.

На записи цунамигенного землетрясения (рисунок 19 б, г) видно, что после начала землетрясения, отмеченного стрелкой, произошло изменение характера записи. Деформационная аномалия возникла примерно через 2.5 мин после начала землетрясения. На базе лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м деформационная аномалия составляет величину 19.2 мкм. На динамической спектрограмме (рисунок 19 е) присутствуют колебания с периодами 10 с и 16 с.

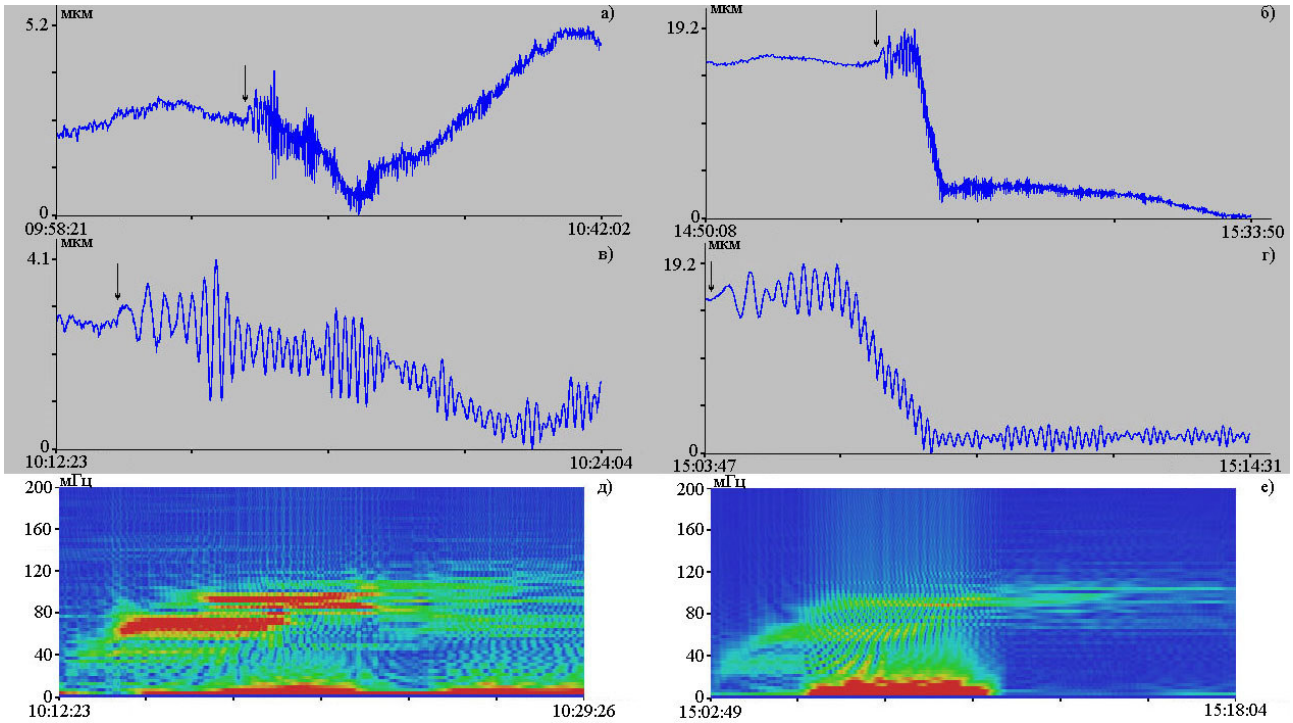


*Рисунок 19 – Фрагменты записей 52.5-метрового лазерного деформографа за 05 сентября 2004 года. Запись не цунамигенного землетрясения (а), выделенный участок записи не цунамигенного землетрясения (в), динамическая спектрограмма не цунамигенного землетрясения (д), запись цунамигенного землетрясения (б), выделенный участок записи цунамигенного землетрясения (г), динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (е).*

Еще одно крупное цунамигенное землетрясения, зарегистрированное лазерным деформографом, с магнитудой 8.8 произошло в 05:46:22 11 марта 2011 года на расстоянии около 105 км к востоку от о. Хонсю, Япония, на глубине 33 км от уровня моря. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован в 05:50:54. На записи лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м деформационная аномалия возникла примерно через 17 мин и составила около 158 мкм (рисунок 20 а, в). На динамической спектрограмме, рисунок 20 д), выделяются колебания с периодами 10 и 16 с. Цунамигенное землетрясение, зарегистрированное лазерным деформографом, с магнитудой 7.5 произошло в 10:02:41 28 сентября 2018 года в центральной части о. Сулавеси, Индонезия, на глубине 10 км от уровня моря. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован в 10:17:54. На записи лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м деформационная аномалия

возникла примерно через 7 мин и составила около 1.44 мкм (рисунок 20 б, г). После землетрясения в начале залива Томини произошел оползень, который и привел к образованию волны цунами. На записи хорошо виден момент начала оползня. На динамической спектрограмме, рисунок 20 е), выделяются колебания с периодами от 20 до 25 с.

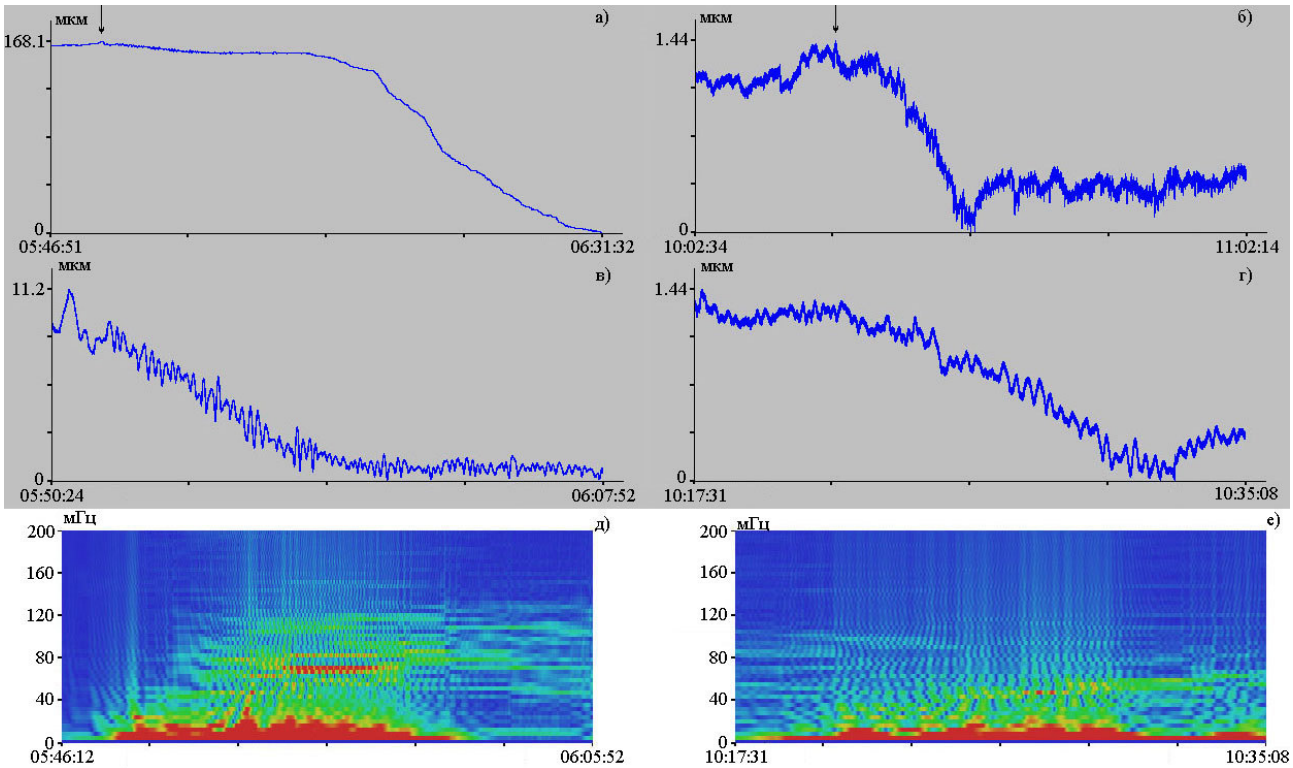


*Рисунок 20 – Фрагменты записей 52.5-метрового лазерного деформографа за 11 марта 2011 года (левый) и 28 сентября 2018 года (правый). Записи цунамигенных землетрясений (а, б), выделенные участки записей цунамигенных землетрясений (в, г), динамические спектрограммы цунамигенных землетрясений (д, е).*

По данным зарегистрированных цунамигенных землетрясений лазерным деформографом в период с 2010 по 2018 года были рассчитаны коэффициенты затухания выделенных деформационных аномалий. Так в этот период времени на записях лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м было выявлено 3 цунамигенных землетрясения в Индонезии, 3 землетрясения у берегов Чили и 3 у западного побережья Северной Америки. Выявленные закономерности, главным из которых является общий закон расходимости, подтверждают факт связи данных деформационных аномалий с процессом генерации цунами. На рисунке 21 приведены участки записей лазерного деформографа в момент регистрации цунамигенных землетрясений у западного побережья Северной Америки. Первое землетрясение было зарегистрировано 28.10.2012 г. его эпицентр находился на расстоянии около 6800 км от лазерного деформографа. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом в 03:23:13 при скорости

распространения 5.94 км/с (рисунок 21 а, б). Второе землетрясение произошло 05.01.2013 г., сигнал этого землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом, установленным на расстоянии более 6500 км в 09:16:31 при скорости распространения 5.92 км/с (рисунок 21 в, г). А третье землетрясение произошло 08.09.2017 г., на записи лазерного деформографа, расположенного на расстоянии около 12150 км, сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 05:34:28 при скорости распространения около 4.48 км/с (рисунок 21 д, е). На всех рисунках присутствует деформационный скачек, характерный для цунамигенных землетрясений. На данном рисунке красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент регистрации землетрясения запись отклонилась от тренда.

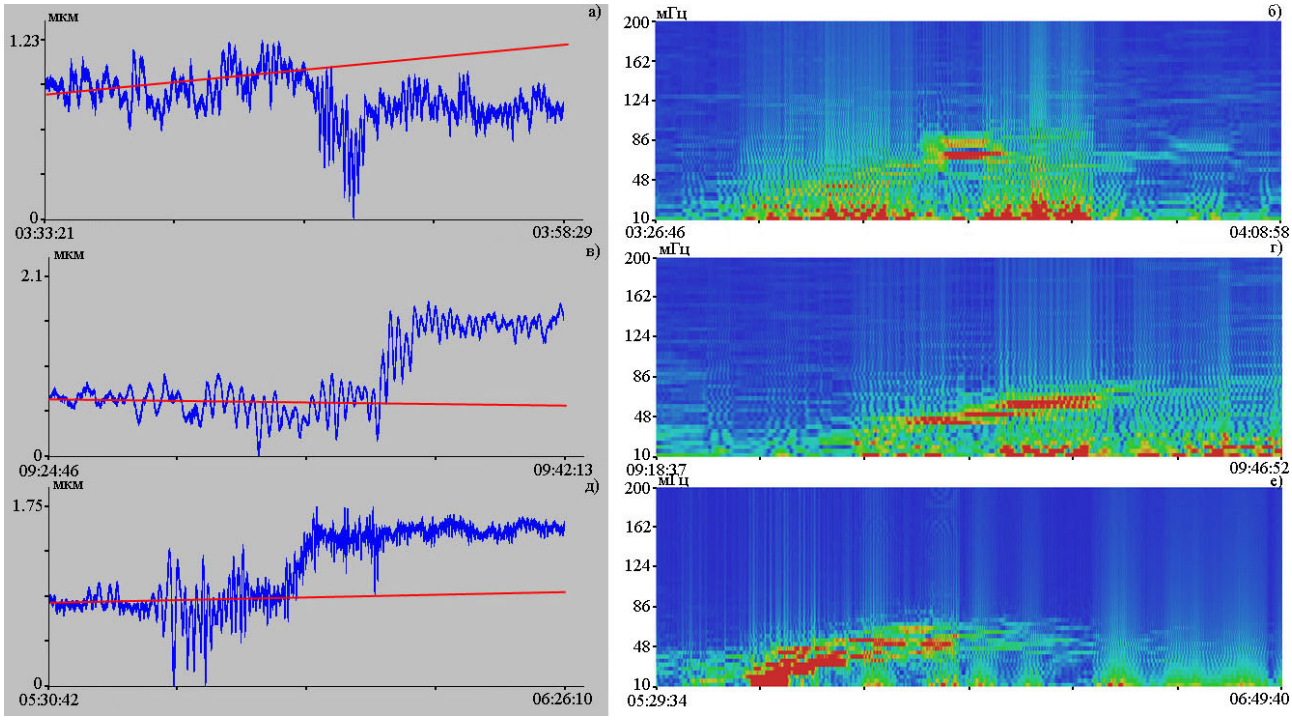


*Рисунок 21 – Фрагменты записей цунамигенных землетрясений 52.5-метрового лазерного деформографа за 28 октября 2012 г. (а), 05 января 2013 г. (в) и 08 сентября 2017 г. (д). И динамические спектрограммы записей цунамигенных землетрясений за 28 октября 2012 г. (б), 05 января 2013 г. (г) и 08 сентября 2017 г. (е).*

Для оценки смещений участков земной коры друг относительно друга, приводящих к образованию цунами, применяются различные модели. Преимущество имеют модели о конечных разломах, созданные USGS NEIC. Для оценки диссипативных характеристик деформационных аномалий, зарегистрированных 52.5-метровым неравноплечим лазерным деформографом, воспользуемся рассчитанными смещениями геоблоков (плит, частей геоблоков и т.п.) в очаге землетрясений по этой модели. В таблице приведены расчетные

смещения в очаге и величины деформационных аномалий, зарегистрированные лазерным деформографом в момент регистрации землетрясений.

Таблица – Расчетные смещения геоблоков (частей геоблоков, и т.п.) и величины деформационных аномалий, зарегистрированные лазерным деформографом.

| Дата | Расчетное смещение, м | Смещение на деформографе, мкм | Расстояние, км | Степень расходимости |
|---|---|---|---|---|
| 11.04.2012 | 5.4 | 2 | 5800 | 0.951 |
| 12.04.2014 | 0.8 | 0.4 | 6700 | 0.923 |
| 28.09.2018 | 1.8 | 1 | 4800 | 0.936 |
| 27.02.2010 | 10.5 | 1.11 | 17800 | 0.962 |
| 01.04.2014 | 8 | 1 | 16700 | 0.956 |
| 16.09.2015 | 3.2 | 0.6 | 17650 | 0.928 |
| 28.10.2012 | 1.5 | 0.4 | 6800 | 0.962 |
| 05.01.2013 | 3 | 0.8 | 6500 | 0.965 |
| 08.09.2017 | 4 | 0.5 | 12150 | 0.974 |

С учетом всех усреднений среднее значение степени расходимости равно 0.951, а максимальное отклонение расчетных значений, приведенных в таблице 4.1, от средней величины составляет 0.028, т.е. 2.9 %. Во всех рассматриваемых случаях расходимость близка к сферической, но не сферическая. Это связано с соотношением величины смещения и толщины земной коры, по которой распространяется сигнал от места генерации до места приёма. Для всех случаев с учетом небольшой ошибки величины степени расходимости практически совпадают. Это свидетельствует о очень хорошем совпадении модельных и экспериментальных значений смещений. Т.е. для всех рассмотренных экспериментальных случаев можно с большой уверенностью утверждать, что зарегистрированные аномальные сигналы связаны со смещениями участков земной коры, приведших к образованию цунами.

Под степенью расходимости понимается степень при расстоянии в формуле:

$$A = A_0 \frac{1(м)}{R^{\alpha}(м)} \tag{3}$$

где: A– величина смещения, зарегистрированная лазерным деформографом, A0 величина смещения в очаге цунами, R – расстояния от места генерации землетрясения до лазерного деформографа, α – степень.

**В параграфе 5.3** анализируется метеоцунами на данных лазерно-интерференционных приборов. При обработке экспериментальных данных приборов, входящих в состав сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, расположенного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», выявлены геосферные

особенности метеоцунами. На записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы было выявлено несколько уединенных волн с амплитудой в несколько раз больше амплитуды суточного прилива. На записи лазерного нанобарографа было выявлено резкое изменение атмосферного давления. На записях лазерного нанобарографа и лазерного деформографа, через несколько часов после прохождения волн, были выявлены сильные полуторачасовые колебания.

Резкое изменение атмосферного давления, величиной 13,5 гПа было зарегистрировано на экспериментальных записях лазерного нанобарографа в 15:20 25 мая 2015 года (рисунок 22 а). Данное изменение атмосферного давление стало причиной появления в гидросфере длинных волн. Эти волны были зарегистрированы лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, установленном на шельфе Японского моря на расстоянии 200 м от берега на глубине 33 м, 25–26 мая 2015 года. При анализе экспериментальной записи было выявлено две волны, первая почти через полтора часа после начала регистрации атмосферного возмущения, а вторая более чем через двенадцать часов (рисунок 22 б).

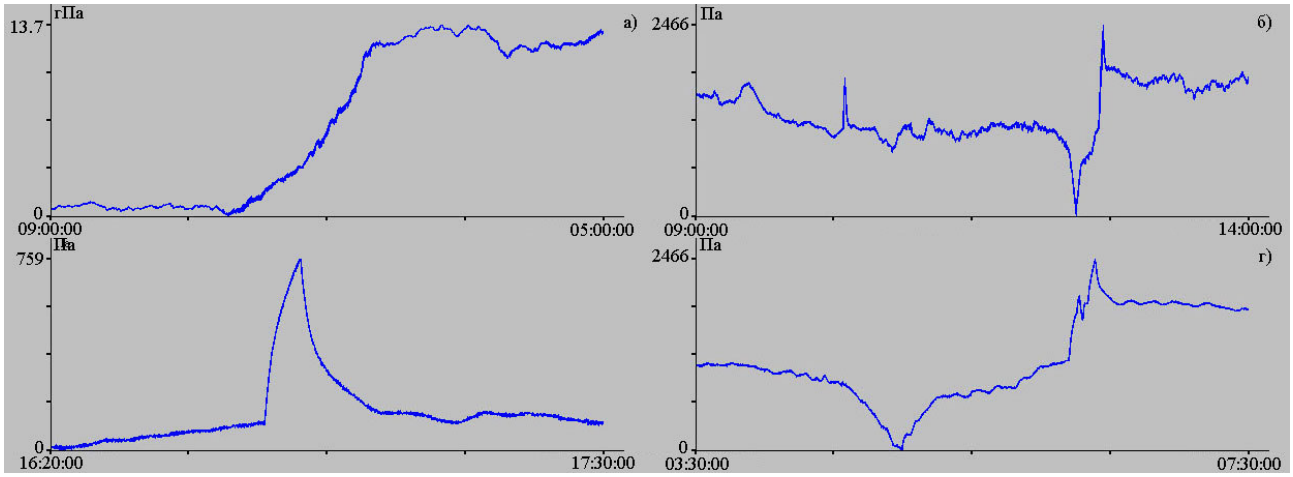


*Рисунок 22 – Фрагменты записей лазерно-интерференционных приборов за 25–26 мая 2015. Фрагменты записи лазерного нанобарографа (а), записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б), увеличенный фрагмент записи первой волны (в), увеличенный фрагмент записи второй волны (г)*

Первая уединенная волна почти солитоноподобной формы была зарегистрирована в 16:44 25 мая 2015 года (рисунок 22 в). Высота этой волны в четыре раза больше амплитуды суточного прилива в данном регионе, а время прохождения через точку установки прибора составило около 14.5 мин. Первая волна вызвала только приток водных масс (увеличение гидростатического давления), и по своим характеристикам похожая на волну цунами. Перед приходом второй волны был зафиксирован отток водных масс, глубина моря уменьшилась на величину равную примерно пяти амплитудам суточного прилива. Примерно через час наблюдался приток водных масс на высоту почти в два раза большую чем после

прихода первой волны. По записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 22 г) видно, что ее форма похожа на догнавшие друг друга две волны. Общее время прохождения волны через точку установки прибора составило 23 мин.

Еще одним признаком, характеризующим метеоцунами, является присутствие колебаний с периодами от 30 мин до 2 ч. При анализе данных лазерно-интерференционных приборов за 26 и 27 мая 2015 года были выявлены полуторачасовые колебания. Присутствие колебаний с периодом 1 ч 37 мин в атмосфере, литосфере и гидросфере говорит об их общем происхождении, связанной с одной из геосфер. При обработке данных лазерного нанобарографа, лазерных деформографов и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, было выявлено, что максимальное отношение амплитуды полуторачасовых колебаний к фоновых колебаниям в атмосфере больше, чем в других геосферах. Определяющим фактором определения первоисточника является то, что резкое изменение атмосферного давления было зафиксировано до прихода уединенных длинных волн в гидросфере. Из всего этого можно сделать вывод, что первоисточником всех колебаний и волн является атмосфера.

**В параграфе 5.4** приведено краткое описание основных результатов 5 главы, в которых: 1) используя данные неравноплечего лазерного деформографа, разработан метод определения степени цунамигенности землетрясений, являющийся наиболее перспективным и эффективным при его использовании в службах предупреждения; 2) определение степени расходимости позволяет по данным лазерного деформографа определить не только степень цунамигенности землетрясения, но и оценить величину смещения в очаге землетрясения и тем самым оценить величину цунами; 3) при обработке совместных данных лазерно-интерференционных приборов было выявлено природное явление по своим характеристикам схожее с метеоцунами.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование закономерностей генерации, динамики и трансформации процессов на границе системы «атмосфера-гидросфера-литосфера» невозможно без использования комплексных методов. Такие методы обусловлены необходимостью применения установок, позволяющих проводить измерения одновременно во всех геосферах с высокой точностью в широком частотном и динамическом диапазонах. К таким установкам, в первую очередь, относится аппаратура, созданная на основе современных лазерно-интерференционных методах. В результате проведённых исследований получены следующие наиболее важные результаты:

1. На основе современных лазерно-интерференционных методов были созданы лазерный нанобарограф, лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны для регистрации вариаций давления атмосферы и гидросферы в широком частотном диапазоне практически от 0 Гц (условно) на уровне фоновых колебаний.

2. С использованием лазерно-интерференционных приборов были созданы два лазерно-интерференционных комплекса, расположенных на берегах Японского и Охотского морей. Так на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» был создан лазерно-интерференционный комплекс, в состав которого входят лазерные деформографы, лазерный нанобарограф, лазерные измерители вариаций давления гидросферы, лазерный гидрофон, метеостанция, широкополосный сейсмограф, GPS приемник Trimble, гидрологические зонды, профилограф, гидроакустические и сейсмоакустический излучатели и другая аппаратура. На базе СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный» был создан лазерно-интерференционный комплекс, в состав которого входят лазерный деформограф, лазерный нанобарограф, лазерный гидрофон, GPS приемник Trimble, метеостанция.

3. Применение установок, созданных на основе лазерно-интерференционных методов, в гидроакустических и сейсмоакустических исследованиях позволяет изучать физику процессов трансформации волн на границе «вода – дно». Проведенные экспериментальные работы с применением низкочастотных гидроакустических излучателей, береговых лазерных деформографов, лазерных измерителей вариаций давления гидросферы позволили изучить трансформацию волн низкочастотного звукового диапазона и высокочастотного инфразвукового диапазона на границе «вода-дно».

4. Установлено, что при глубинах моря больше половины гидроакустической волны на 9 – 10 % около 4 – 7 % энергии гидроакустических волн трансформируется в сейсмоакустическую энергию волн рэлеевского типа. При уменьшении глубины процентная доля трансформированной энергии резко возрастает. Полученные экспериментальные результаты позволили определить критическую глубину, при которой шельф «запирает» прохождение гидроакустической энергии в воде на частоте 22 Гц, которая равна 17.8 м

5. По полученным результатам гидроакустического эксперимента можно оценивать закономерности распространения более низкочастотных морских волн по шельфу убывающей глубины, например, для морских ветровых волн, короткопериодных внутренних морских волн. Для них также существуют глубины, при которых значительная доля их энергии трансформируется в энергию упругих колебаний верхнего слоя земной коры. Начало этих глубин начинается с глубин, равных половине длины гидрофизической волны.

6. В ходе проведения экспериментальных работ с применением сейсмоакустического излучателя, лазерных деформографов, лазерного измерителя вариаций давления гидросферы было определено, что около 0.3 % энергии сейсмоакустических поверхностных волн переходит в энергию гидроакустических волн на частоте излучаемого сигнала.

7. В процессе проведения цикла натурных и модельных экспериментов установлено, что морские ветровые волны не оказывают модулирующего воздействия на распространяющиеся гидроакустические волны с частотами около 32, 245 и 321 Гц. Все модулирующее воздействие связано с “эффектом обработки”, который обусловлен влиянием низкочастотной спектральной составляющей на высокочастотную часть спектра в области излученного сигнала.

8. При анализе синхронных данных лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и метеостанции было установлено, что по мере распространения по шельфу убывающей глубины ветровая волна при взаимодействии с дном теряет часть своей энергии (передает дну), что приводит к трансформации ее спектра, энергия в ней перераспределяется в более высокочастотную область. Величины изменения зависят не только от длин ветровых волн и степени уменьшения глубины, но и от их амплитуд.

9. При анализе экспериментальных данных лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией «север-юг» была определена природа возникновения и динамики колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн. Было установлено, что амплитуды инфрагравитационных волн сравнимы с амплитудами гравитационных волн, а периоды инфрагравитационных волн не зависят от периодов гравитационных волн.

10. В результате анализа многочисленных экспериментальных данных рассматриваемого инфрагравитационного диапазона периодов было установлено, что колебания давления гидросферы, зарегистрированные лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, практически всегда сопровождаются колебаниями давления атмосферы. В результате анализа синхронных данных лазерных деформографов и лазерного нанобарографа было выявлено, что синхронно с вариациями атмосферного давления наблюдаются вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры. В редких случаях вариации давления гидросферы и

вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры рассматриваемого диапазона, не сопровождаются соответствующими колебаниями атмосферного давления.

11. После вычета деформации земной коры, вызванной вариациями атмосферного давления, уверенно выделены сфероидальные колебания Земли в рассматриваемом диапазоне периодов, которые были «замаскированы» более мощными атмосферными процессами.

12. Анализ данных лазерного деформографа за декабрь 2004 года позволил сформулировать деформационный метод определения цунамигенности землетрясений, заключающийся в регистрации лазерным деформографом аномальной деформационной ступеньки, характеризующей подвижки морского дна в месте генерации цунами. Исходя из данных лазерного деформографа, деформационный метод определения цунамигенности землетрясений является наиболее эффективным и перспективным при его использовании в службах предупреждения.

13. Деформационный метод был проверен на некатастрофических цунами, произошедших после сильных землетрясений за последние 20 лет. Для развития этого метода были рассчитаны коэффициенты затухания упругих волн различных цунамигенных землетрясений, произошедших с 2010 года по 2018 год в Индонезии, Чили и на западном побережье Северной Америке. Определение степени расходимости позволяет по данным лазерного деформогрфа определить не только степень цунамигенности землетрясения, но и оценить величину смещения в очаге землетрясения и тем самым оценить величину цунами.

14. Резкий скачек атмосферного давления, зарегистрированный лазерным нанобарографом, явился причиной появления в гидросфере уединенных длинных волн, зарегистрированных лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. Причем первая из них была почти солитоноподобной формы, а последняя складывалась из двух таких волн, высота этих волн соизмерима с амплитудой суточного прилива в данном регионе. Выявленные колебания с периодами от 2 до 2.5 мин на записях лазерного деформографа и широкополосного сейсмографа и колебания с периодами около полутора часов говорят о регистрации на юге Дальнего Востока России метеоцунами.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Овчаренко В.В., Титаренко С.Б., Яшков Д.В. Влияние вариаций поля давления на уровень микродеформаций земной коры на границе гидросфера-литосфера // Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. №6. С. 828-833.

2. Долгих Г.И., Валентин Д.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли. 2002. N8. С. 69-73.

3. Долгих Г.И., Батюшин Г.Н., Валентин Д.И., **Долгих С.Г.**, Ковалёв 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. №3. С. 120-122.

4. Долгих Г.И., Алексеев А.В., Валентин Д.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Швец В.А., Яковенко С.В., Холодкевич Е.Д. Регистрация инфрагравитационных волн на границе "гидросфера-литосфера" береговым лазерным деформографом // Доклады Академии наук. 2003. Т. 389. № 2. С. 244-246.

5. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении баро-деформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. №8. С. 82-90.

6. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Приборы и техника эксперимента. 2005. №6. С.56-57.

7. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Регистрация цунамигенного землетрясения 2004 г. // Вестник ДВО РАН. 2006. №6(130). С. 115-119.

8. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом // Доклады академии наук. 2007. Т. 412. № 1. С. 104-106.

9. Долгих Г.И., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы в гидроакустических и океанологических исследованиях // Подводные исследования и робототехника. Владивосток: Дальнаука. 2007. №1(3). С.40-45.

10. Долгих Г.И., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Технология пеленгации и идентификации опасных гидродинамических процессов Земли на стадии их зарождения и развития // Подводные исследования и робототехника. Владивосток: Дальнаука. 2007. №1(3). С. 46-53.

11. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений // Доклады Академии наук. 2007. Т. 417. № 1. С. 109-112.

12. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.** Применение прямых и параметрических методов в геофизических исследованиях // Физика Земли. 2008. №11. С. 77-83.

13. Батюшин Г.Н., Дзюба С.П., Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Чупин В.А. Трансформация сейсмоакустической энергии в гидроакустическую // Доклады Академии наук. 2008. Том 423. №6. С. 815-816.

14. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Чебров В.Н., Шевченко Ю.В. Геофизический полигон м. Шульца // Вестник ДВО РАН. 2010. №5. С.165-169.

15. 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.

16. Долгих Г.И., Бутырин П.Г., **Долгих С.Г.**, Дягилев Р.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Регистрация инфразвуковых деформационных возмущений пространственно- разнесёнными лазерными деформографами // Доклады Академии наук. 2011. Т. 441. №1. С. 376-379.

17. Долгих Г.И., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Ковалёв С.Н., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерно-интерференционные системы измерения распределения гидростатического давления // Подводные исследования и робототехника. 2011. №1(11). С. 49-58.

18. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Смирнов С.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Инфразвуковые колебания японского моря //Доклады Академии наук. 2011. Т. 441. № 1. С. 98-102.

19. Долгих Г.И., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Овчаренко В.В., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Динамика ветровых волн при движении по шельфу убывающей глубины // Доклады академии наук. 2012. Т. 447. №4. С. 445-449.

20. **Долгих С.Г.**, Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Геофизический комплекс “Горнотаежное” // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 2. С. 159-160.

21. 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.

22. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерный деформограф с точностью на уровне пикометров // Приборы и техника эксперимента. 2013. №2. С.138-139.

23. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Плотников А.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный гидрофон на основе зеленого лазера LCM-S-111 // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 140-141.

24. Будрин С.С., Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ярощук Е.И. Исследование изменчивости периода ветровых волн // Метеорология и гидрология. 2014. № 1. С. 72-79.

25. Яковенко С.В., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А. Лазерно-интерференционная система "Приморье - о. Сахалин" // Метрология. 2015. № 1. С. 28-31.

26. Долгих Г.И., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Морские внутренние волны и атмосферные депрессии // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. № 5. С. 601-604.

27. Долгих Г.И., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Закурко А.Г., Косарев О.В., Овчаренко В.В., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Комплексный пространственно-разнесённый полигон на Дальнем Востоке для геонаблюдений // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 34-36.

28. **Долгих С.Г.**, Будрин С.С., Плотников А.А. Компенсация воздействия температуры на работу лазерных интерферометров // Приборы и техника эксперимента. 2016. №3. С.147-148.

29. Яковенко С.В., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Чупин В.А., Швец В.А. Гидрофизический лазерно-интерференционный комплекс // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 2. С. 121-126.

30. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырёв А.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В., Ярощук И.О. Излучающая гидроакустическая система на частотах 19-26 Гц // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 137-141.

31. **Долгих С.Г.**, Будрин С.С., Плотников А.А. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы с механической системой компенсации температурного воздействия // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 663-666.

32. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Ялченир А., Сусморо Н., Прасетья Г., Хидаят Р., Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Куркин А.А., Доган Г., Заибо Н., Пронин П.И. Возникновение цунами 2018 года на острове Сулавеси: возможные очаги // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 3. С. 375-379.

33. **Долгих С.Г.**, Долгих Г.И. Геосферные особенности проявления метеоцунами // Физика Земли. 2019. № 5. С. 104-109.

34. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Василевская Л.Н., Лисина И.А. Атмосферно-литосферное взаимодействие в минутном диапазоне периодов // Доклады академии наук. 2020. Т. 490, № 1. С. 22–26.

35. Долгих Г.И., Будрин С.С., Piao Shengchun, Song Yang, **Долгих С.Г.**, Овчаренко В.В., Чупин В.А., Яковенко С.В., Dong Yang, Wang Xiaohan, Швец В.А. Особенности распространения и трансформации низкочастотных гидроакустических сигналов на шельфе убывающей глубины // Доклады Академии наук. 2020. Т. 491. № 2. С. 112–116.

36. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.** Деформационные аномалии как индикатор генерации цунами // Доклады академии наук. Науки о земле. 2022. Т. 502, № 2. С. 77–82.

**Статьи в других изданиях и материалах конференций**

37. Dolgikh G.I., Dubrov M.N., **Dolgikh S.G.**, Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Savvin E.A., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Application of laser strainmeters to the study of earthquake physics // Acta Geophysica. 2006. V.54, no.2. P.187-197.

38. Dolgikh G.I., **Dolgikh S.G**, Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Experimental estimate of the ratio between the energies of wind waves and microdeformations of the Earth's crust in the non-wave zone // Acta Geophysica. 2007. V.55, no.4. P.607-618.

39. Dolgikh G.I., **Dolgikh S.G.**, Kovalyov S.N., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Super-low-frequency laser instrument for measuring hydrosphere

pressure variations // Journal of Marine Science and Technology. 2009. V.14. no.4. P.480-488.

40. Dolgikh G.I., Piao Shengchun, Budrin S.S., Song Yang, **Dolgikh S.G.**, Chupin V.A., Yakovenko S.V., Dong Yang, Wang Xiaohan Study of Low-Frequency Hydroacoustic Waves' Behavior at the Shelf of Decreasing Depth // Applied sciences basel. 2020. V. 10. № 9.

41. Dolgikh G.I., Budrin S.S., **Dolgikh S.G.**, Plotnikov A.A. Supersensitive detector of hydrosphere pressure variations // Sensors. 2020. T. 20. №23. P. 6998.

42. Dolgikh G.I., **Dolgikh S.G.** Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination // J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9(10), 1144.

43. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерно-интерференционный комплекс // В сборнике: Дальневосточные моря России Москва, 2007. С. 15-48.

44. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерный гидрофон в гидроакустических и океанологических исследованиях // Ежегодник РАО. Акустика неоднородных сред: сборник научных статей. М. Изд-во Тровант. 2008. Выпуск 9. С.174-182.

45. Долгих Г.И., Будрин С.С., **Долгих С.Г.**, Плотников А.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерно-интерференционные комплексы // В книге: Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана Владивосток, 2013. С. 349-357.

43. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф // Материалы докладов третьего Всерос. симп. “Сейсмоакустика переходных зон”. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2003. С. 44-48.

47. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Овчаренко В.В., Пенкин С.И., Пивоваров А.А., Чупин В.А., Ярощук И.О. Закономерность трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую энергию в море переменной глубины // Сб. трудов XX сессии РАО. М.: ГЕОС. 2008. Т. 2. С. 438-440.

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

49. **Долгих С.Г.**, Долгих Г.И., Будрин С.С., Закурко А.Г., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Измерительный полигон на м. Свободный о. Сахалин // Материалы докладов восьмого всероссийского симпозиум "Физика геосфер". 2013. С.77-78

50. **Долгих С.Г.**, Луговой В.А., Аникин П.А., Цой Д.И. Анализ записей краснокаменского лазерного деформографа // Материалы докладов восьмого всероссийского симпозиум "Физика геосфер". 2013. С.82-83

51. **Долгих С.Г.** Метеоцунами на юге Приморского края // Материалы докладов одиннадцатого всероссийского симпозиум "Физика геосфер". 2019. С. 74-76.

Подписано в печать 24.02.2022 г.
Формат 64×84/16. Объем 2 усл. печ. л.
Тираж 120 шт. Заказ №

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