

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

На правах рукописи



Долгих Станислав Григорьевич

**ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Владивосток 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Лазерно-интерференционные приборы для измерения основных параметров системы «атмосфера-гидросфера-литосфера .....	16
1.1. Лазерные деформографы .....	18
1.1.1 Однокоординатные лазерные деформографы.....	28
1.1.2 Двухкоординатный лазерный деформограф.....	46
1.2 Лазерные нанобарографы.....	51
1.3 Лазерные измерители вариаций гидросферного давления.....	67
1.3.1 Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы и его модификации.....	74
1.3.2 Лазерный гидрофон и его модификации.....	87
1.4 Выводы. Постановка задачи.....	95
Глава 2. Лазерно-интерференционные комплексы для измерения вариаций деформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений инфразвукового и звукового диапазонов.....	98
2.1 Лазерно-интерференционный комплекс «м. Шульца».....	98
2.2 Лазерно-интерференционный комплекс «м. Свободный».....	110
2.3 Выводы.....	113
Глава 3. Особенности применения лазерно-интерференционного комплекса в гидроакустических исследованиях.....	115
3.1 Закономерности распространения и трансформации гидроакустических колебаний на границе «вода-дно».....	116

3.2	Закономерности распространения и трансформации сейсмоакустических колебаний на границе «суша-вода».....	139
3.3	Взаимодействие низкочастотных гидроакустических волн с более низкочастотными морскими волновыми процессами.....	151
3.4	Выводы.....	164
Глава 4. Возникновение, развитие и трансформация колебаний и волн ветрового и инфрагравитационного диапазонов.....		
4.1	Некоторые аспекты динамики и трансформации ветровых морских волн.....	168
4.2	Возникновение и динамика колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн.....	177
4.3	Колебания и волны диапазона морских инфрагравитационных волн не морского происхождения.....	184
4.4	Выводы.....	197
Глава 5. Деформационные аномалии сопутствующие возникновению цунами .....		
	цунами .....	199
5.1	Регистрация деформационной аномалии индонезийского землетрясения 26 декабря 2004 года.....	200
5.2	Регистрация деформационных аномалий других подводных землетрясений.....	208
5.3	Метеоцунами по данным лазерно-интерференционных приборов.....	235
5.4	Выводы.....	242
Заключение.....		245
Список литературы.....		249

## ВВЕДЕНИЕ

Взаимосвязь некоторых геосферных процессов может быть колоссальной. Так, например, в микросейсмическом диапазоне (2 – 20 с) прогрессивные и стоячие морские ветровые волны возбуждают микросейсмы второго и первого рода, соответственно, при их взаимодействии с морским дном. Периоды микросейсм второго рода равны периодам прогрессивных ветровых волн, а периоды микросейсм первого рода равны половине периода прогрессивных морских волн из-за того, что изменение гидростатического давления в стоячей морской волне дважды меняется за один период поверхностной морской волны. Периоды микросейсм первого и второго рода зависят от периодов морских ветровых волн, которые связаны со скоростью и временем действия ветра, площадью и глубиной водной акватории, над которой действует ветер. В то же время, некоторыми авторами, утверждается, что образование самого большого спектрального максимума в микросейсмическом диапазоне с пиковой частотой в области 0.14 – 0.22 Гц (7.1 – 4.5 с) связано с низкочастотным рассеянием энергии упругих волн в горных породах. Более того, утверждается, что «океанические волны следует трактовать не как причину низкочастотных сейсмических шумов, согласно теории Лонге-Хиггинса, а наоборот – как их следствие». В то же время нами при анализе записей лазерного деформографа, который установлен на Краснокаменском геодинамическом полигоне, было обнаружено, что в микросейсмическом диапазоне наблюдается два устойчивых пика на периодах в области 6 – 7 и 3 – 4 с, второй из которых вызван ветровыми волнами близлежащего озера Умыкий, исчезающий в зимний период наблюдений. Не исключено возбуждение волн микросейсмического диапазона атмосферными процессами по аналогии с возбуждением «Инфразавитационного шума Земли» пульсациями атмосферного давления в резонансном и околорезонансном случаях.

Изучение природы возникновения пиков микросейсмического диапазона невозможно без аппаратуры, позволяющей проводить измерения на уровне фоновых колебаний одновременно в трех геосферах, поскольку многие процессы

протекающие в одной геосфере невозможно понять без дополнительной информации о процессах протекающих в граничных средах. А совпадение многих частотных максимумов в спектрах соседних геосфер может указывать как на возможный общий источник колебаний и волн, так и существование отдельных источников в каждой геосфере. В следствии чего можно сформулировать задачи, требующие решения: 1) изучить закономерности генерации и динамики колебаний и волн широкого частотного диапазона в каждой из геосфер; 2) изучить закономерности трансформации данных колебаний и волн с оценкой их воздействия на колебания и волны широкого частотного диапазона соседних геосфер. Данные задачи необходимо решать, прежде всего, с проведением экспериментальных исследований с применением комплексов, созданных на основе лазерных деформографов, лазерных нанобарографов и лазерных измерителей вариаций гидросферного давления. Один такой комплекс создан на юге Приморского края России на берегу Японского моря МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». В состав комплекса входят лазерные деформографы различной длины и ориентации, лазерный нанобарограф, лазерные измерители вариаций давления гидросферы, лазерные гидрофоны, метеостанция, широкополосный сейсмограф, гидроакустические и сейсмоакустические излучатели, прочая вспомогательная аппаратура. В последние годы на м. Свободный (о. Сахалин) создан другой лазерно-интерференционный комплекс, состоящий из лазерного деформографа, лазерного нанобарографа, лазерного измерителя вариаций гидросферного давления и метеостанции. Работы, выполняемые на комплексах, проводятся в интересах изучения закономерностей возникновения, развития и трансформации разномасштабных процессов в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера».

### **Актуальность работы**

Если посмотреть на спектры колебаний и волн, существующих в атмосфере, гидросфере (океаны и моря, другие крупные водные объекты), литосфере, то можно отметить их большое сходство в отдельных частотных диапазонах,

первоисточник которых может находиться как вне, так и внутри геосфер. При изучении природы колебаний и волн частотного диапазона выше приливного можно обнаружить, что максимумы, выделенные при спектральной обработке полученных экспериментальных данных, можно приписать различным геосферам. Так, например, частотные диапазоны сверхнизкочастотных и собственных колебаний Земли, собственных колебаний океанов, морей и их отдельных частей, собственных колебаний атмосферы практически совпадают. Можно отметить и другой частотный диапазон в пределах периодов от 30 с до 10 – 12 мин, выделенные колебания и волны в котором можно приписать одной из геосфер совершенно неоправданно. В этом диапазоне могут находиться морские инфрагравитационные волны, короткопериодные морские внутренние волны, инфрагравитационные атмосферные волны, тона и обертона собственных колебаний Земли, собственные колебания геоблоков и минигеоблоков земной коры. На протяжении многих десятилетий учёные, занимающиеся происхождением колебаний и волн различных частотных диапазонов, проводят исследования исключительно только в одной из геосфер, практически не рассматривая соседние геосферы. В теоретических исследованиях это вылилось в существенном упрощении исходных уравнений, введением не существующих граничных условий, что было связано с невозможностью решения исходных уравнений и рассмотрением их преобразования при представлении геосфер как единой среды с неоднородными границами и отдельными неоднородными включениями. Это приводит к большим расхождениям полученных теоретических результатов с экспериментальными. Привлечение мощных суперкомпьютеров, можно надеяться, позволит решать теоретические задачи, результаты которых будут более приближены к натурным. В экспериментальной части проведение исследований одновременно во всех геосферах, да ещё и в различных полях (сейсмическое, гравитационное, электромагнитное и т.п.) затруднено ввиду больших материальных затрат и отсутствия соответствующей аппаратуры. В последние годы в геофизике выделено направление, названное приповерхностной геофизикой, в котором рассматриваются приповерхностные слои геосфер (до 10 км) как единая

неоднородная среда, в которой выделенные колебания и волны можно приписать любой из геосфер, рассмотреть закономерности их трансформации в этой среде, преобразование энергии колебаний и волн одних полей в другие. Понятно, что это тоже ограниченное рассмотрение, так как отбрасываются другие пространства, но, по крайней мере, это шаг вперёд в изучении закономерностей возникновения, развития и трансформации разномасштабных геосферных процессов и явлений.

**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» в широком диапазоне частот 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**

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.

### **Обоснованность полученных результатов**

Обоснованность полученных экспериментальных результатов подтверждается путем многократного и тщательного проведения экспериментов по изучению колебаний и волн широкого диапазона частот с использованием лазерно-интерференционного оборудования. Хорошее согласование экспериментальных данных с литературными и модельно-теоретическими оценками также свидетельствует об обоснованности полученных результатов.

### **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\_a «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\_a «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 РФФИ № 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 давления 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:

1. 8 Тихоокеанско/Азиатский оффшорный симпозиум по механике, г. Бангкок, Таиланд, 2008 г.
2. Международный симпозиум сообщества морских и полярных инженеров, г. Осака, Япония, 2009 г.
3. Международный симпозиум сообщества морских и полярных инженеров, г. Пекин, Китай, 2010 г.
4. Международная конференция по геологии и геофизике, г. Пекин, Китай, 2013 г.
5. Международная конференция научного и технического развития исследований и мониторинга морских биологических ресурсов, г. Владивосток, 2017 г.
6. Двадцать пятая международная конференция по лазерно-интерференционным технологиям в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте, г. Новороссийск, 2017 г.
7. Двадцать шестая международная конференция по лазерно-интерференционным технологиям в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте, г. Новороссийск, 2018 г.
8. Шестой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2009 г.
9. Седьмой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2011 г.
10. Восьмой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2013 г.
11. Девятый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2015 г.
12. Десятый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2017 г.
13. Одиннадцатый всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток, 2019 г.

## **Публикации**

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

## **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.

## **Личный вклад автора**

Выбор научного направления, создание лазерно-интерференционного комплекса, 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.

Приятно поблагодарить коллег из ФГБУН Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН за создание уютной творческой атмосферы, позволившей эффективно работать над диссертацией, а также всех соавторов за сотрудничество и помощь.

## ГЛАВА 1. ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ «АТМОСФЕРА-ГИДРОСФЕРА- ЛИТОСФЕРА»

Успешное изучение процессов, происходящих в атмосфере, гидросфере и литосфере, а также процессов взаимодействия в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера», во многом определяется разработкой новых методов исследований. В последние годы особый интерес вызывают методы, позволяющие изучать физику процесса взаимодействия в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» на новом, прецизионном уровне, что в первую очередь относится к лазерно-интерференционным методам исследования [4, 185, 95]. Данные методы исследования относятся к прямым методам, позволяющим изучать колебания и волны широкого диапазона частот. Прямые методы исследований осуществляются с помощью инерционных и безинерционных приборов и устройств, работающих на близком к резонансу и далеком от резонанса принципах действия. Существенное отличие в конструкции приборов этих двух классов проявляется в возможности исследования колебаний и волн различного диапазона частот. К приборам инерционного типа необходимо отнести различные сейсмографы, измеряющие колебания и волны в узком диапазоне частот. Приборы безинерционного типа предназначены для исследования колебаний и волн более широкого диапазона частот, практически от нуля герц до килогерц. К приборам такого типа относятся лазерные деформографы с рабочим диапазоном частот условно от 0 до 10 000 Гц.

Основным преимуществом лазерного деформографа является его широкий рабочий диапазон частот, позволяющий регистрировать сейсмоакустические колебания как в высокочастотном, так и в низкочастотном и сверхнизкочастотном диапазонах. В ходе многолетних исследований нами были выявлены колебания, вызванные лунно-солнечными приливами, собственными колебаниями Земли, микросейсмами Японского моря [39], землетрясениями [60] и их предвестниками [79], другими процессами.



Существует большое множество параметрических методов исследования, где зачастую используется модуляционный метод. В таких методах исследования обычно используются данные различных сейсмографов. Так группой российских ученых была выделена модуляция уровня высокочастотных микросейсм длиннопериодными деформационными процессами, экспериментальные данные по которым были получены с помощью созданного нестандартного горизонтального сейсмографа, ориентированного по линии «север-юг» и расположенного примерно в 40 км от Москвы [134]. Полученные результаты позволили говорить о связи высокочастотных микросейсм с лунно-солнечными приливами [135], штормовыми микросейсмами [133], собственными колебаниями Земли [134]. Но применяемая ими аппаратура имеет узкий рабочий диапазон частот, который не позволяет регистрировать низкочастотные колебания с помощью прямых методов [56].

Изучение энергообмена геосфер во многом определяет разработку новых методов исследований. Изучение атмосферного и гидросферного воздействия на вариации уровня микродеформаций земной коры имеет важное значение как с точки зрения построения модели энергообмена геосфер зоны перехода, так и с точки зрения оценки вклада энергии атмосферных и гидросферных процессов широкого диапазона частот в сейсмоактивность Земли. Ввиду необходимости получения точных оценок величины передаваемой энергии только от атмосферных или от гидросферных процессов земной коре измерения необходимо проводить на уровне фоновых колебаний в широком частотном диапазоне, поэтому применяемая аппаратура должна удовлетворять следующим требованиям: иметь высокую чувствительность и способность проводить измерения в частотном диапазоне от (условно) 0 Гц. В связи с необходимостью проведения измерений от уровня фоновых колебания (нанометры) до нескольких сантиметров данная аппаратура должна также обладать достаточно большим динамическим диапазоном. В настоящее время данным требованиям в наибольшей степени отвечают установки, созданные на основе современных лазерно-интерференционных методах с

использованием в качестве источника света частотно стабилизированных гелий-неоновых лазеров [39].

Применение установок, созданных на основе современных лазерно-интерференционных методах, позволяет проводить измерения колебаний и волн в широком диапазоне частот во всех гидросферах одновременно, что позволяет исключить ошибки при определении источника колебаний в сложной системе «атмосфера-гидросфера-литосфера». В связи с этим была поставлена задача по созданию лазерных деформографов, предназначенных для регистрации вариаций микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц (точность измерения смещений на базе прибора 0.3 нм и лучше), лазерных нанобарографов, предназначенных для регистрации вариаций атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа, лазерных измерителей вариаций давления гидросферы и лазерных гидрофонов, предназначенных для регистрации вариаций гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа, с последующей разработкой и созданием на их основе прецизионного лазерно-интерференционного комплекса.

## 1.1 ЛАЗЕРНЫЕ ДЕФОРМОГРАФЫ

Для решения различных поставленных задач был создан ряд работоспособных высокочувствительных приборов безинерционного типа для измерения микродеформаций земной коры. С момента создания стрейн-сейсмографа Хьюго Бениоффом в 1935 году [39], появился ряд механических деформографов. Так, например, для измерения микродеформаций земной коры по двум горизонтальным взаимно-перпендикулярным осям был создан штанговый деформограф, который позволяет проводить непрерывные регистрации в диапазоне частот измеряемых смещений с точностью 0.4 В/мкм в динамическом диапазоне около 80 дБ [171].

Созданные кварцевые деформографы достигали длины 100 м, в которых в качестве чувствительного элемента применялась алюминиевая пластина, закрепленная на конце стержня, являющаяся также одной из пластин конденсатора-регистратора [149, 103].

Основными внешними факторами, влияющими на показания деформографов являются температура, давление и влажность. С этой целью в помещениях, где установлены приборы для измерения микродеформаций земной коры, необходима стабилизация температуры, влажности и давления. Вариации параметров окружающей среды так же приводят к существенному изменению диэлектрической проницаемости между обкладками конденсатора датчика. Чувствительность кварцевого деформографа составляет около  $10^{-9}$ . Экспериментальные работы, проведённые на данном деформографе после катастрофического Чилийского землетрясения 1960 г., позволили выделить почти весь ряд собственных колебаний Земли [172].

Применение в качестве регистрирующего устройства фотоэлектрической системы позволило повысить чувствительность кварцевого деформографа на порядок. Она состоит из механического преобразователя линейного смещения трубы в поворот зеркала и фотоэлектрического преобразователя [149].

Простота конструкции и высокая чувствительность деформографов стали основными факторами, приведшими к созданию в мире сети международных геофизических станций, которые вели непрерывные наблюдения за движением верхнего слоя земной коры. Эта сеть включала в себя несколько сотен деформографических установок штангового или проволочного типа с чувствительностью порядка  $10^{-8}$  [103]. В нашей стране каждая пятая сейсмостанция и обсерватория была оснащена механическим деформографом [172].

Механические деформографы не лишены ряда существенных, неустранимых недостатков: недостаточная чувствительность и зависимость от вариаций температуры. Так для работы кварцевого деформографа суточные вариации температуры не должны превышать 0.1 К. При пересчете в деформацию, с учетом теплового расширения материала, такие вариации температуры понижали

чувствительность прибора до  $10^{-7}$ . Влияние вариаций температуры очень велико и для его стабильной работы необходимо поддерживать постоянную температуру внутри помещения. Так для обеспечения чувствительности порядка  $10^{-9}$  температуру в месте расположения прибора необходимо поддерживать с точностью 0.001 – 0.0001 К.

Устранение влияния вариаций температуры на механические деформографы привело к созданию приборов нового поколения – лазерных деформографов. В новых деформографах в качестве рабочего элемента применялся луч лазера, пробегающий расстояние от одной точки к другой, составляющей базу прибора. Изменение этой базы и фиксируется прибором. Принцип работы лазерного деформографа заключается в том, что изменение длины плеча прибора приводит к изменению фазы волны лазерного излучения, которое и является измеряемой величиной. Исключение механического чувствительного элемента является главным преимуществом лазерных деформографов над его предшественниками. Метеорологические параметры перестали оказывать сильное влияние на показания прибора, но вариации температуры и давления оказывают воздействие на изменение оптического пути лазерного луча. Использование герметизированных и вакуумированных лучеводов позволило улучшить точность измерения микродеформаций земной коры на 2 – 3 порядка. Так при чувствительности прибора  $10^{-12}$  –  $10^{-13}$  точность измерения лучших образцов составляет величину  $10^{-10}$  –  $10^{-11}$  м в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц. А в некоторых случаях конструктивные особенности установок позволили еще повысить точность измерения вариаций микродеформаций земной коры даже при снижении стабильности метеорологических параметров и относительно не высокой стабильности частоты лазерного излучения.

В 1965 г. Вейли, Кругстад и Мосс создали макет первого длиннобазового лазерного деформографа на основе интерферометра Майкельсона [124]. Экспериментальные исследования, проводимые с помощью данного лазерного деформографа, позволили получить ценные длительные измерения вариаций микродеформаций земной коры [24]. Лазерный деформограф Вейли хорошо себя

зарекомендовал, что и привело к созданию в 1969 году в Сан-Диего, в Калифорнийском университете поверхностного лазерного деформографа на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча 800 м [23]. Уже к 1973 году в мире насчитывалось 8 лазерных интерферометров-деформографов, большая часть из которых находилась в США [103].

В XX веке в мире насчитывалось несколько десятков лазерных деформографов. Их можно разбить на два класса: равноплечие и неравноплечие. Оптическая часть лазерных деформографов построена на основе интерферометров Майкельсона или Фабри-Перо с возможными модификациями [13, 26]. Несколько лазерных деформографов равноплечего и неравноплечего типов на основе интерферометра Майкельсона или его модификаций были созданы в странах бывшего СССР [100]. Исследования на лазерных деформографах проводились по двум направлениям: изучение возможностей лазерных деформографов при регистрации геофизических процессов широкого диапазона частот и исследование новых явлений низкочастотного и сверхнизкочастотного диапазонов [6].

В настоящее время для регистрации геодинамических, сейсмических, геофизических и планетарных процессов широкого диапазона частот самыми точными средствами наблюдений являются лазерно-интерферометрические измерительные системы. Для измерений используются мобильные, портативные и стационарные лазерные интерферометры-деформографы [229, 193, 53]. В некоторых мобильных лазерных деформографах применяется схема трехзеркального интерферометра, что упрощает установку и настройку в местах проведения наблюдений [92]. В стационарных лазерных деформографах оптическая схема построена на основе интерферометров Майкельсона или Фабри-Перо равноплечего и неравноплечего типов. Стационарные лазерные интерферометры-деформографы установлены в России, Японии, США, Италии и других странах. Большинство интерферометров установлено в наиболее активных в геодинамическом плане регионах. Измерительные плечи интерферометров, в основном, не превышают 100 м. Так в ГАИШ МГУ создан лазерный интерферометр-деформограф с длиной измерительного плеча 75 м, который

расположен в Приэльбрусье [111]. В Японии в шахте Камиока установлен лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 100 м [229, 233]. На комплексной станции Талая (Байкальский регион) в 90-метровой штольне установлен лазерный интерферометр-деформограф с длиной измерительного плеча 100 м [9, 140]. Лазерные интерферометры-деформографы, установленные в шахтах и штольнях, предназначены не только для исследований геофизических процессов, но и для контроля за сейсмической обстановкой в местах установки.

На Баксанской станции ГАИШ МГУ, расположенной в 30 км на юго-запад от г. Тырнауза и 20 км от вулкана Эльбрус в Кабардино – Балкарии, в штольне установлен лазерный деформограф. Он установлен на глубине 400 м, что обеспечивает слабое влияние вариаций температуры и давления на показания прибора [114]. Баксанский лазерный интерферометр собран на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча 75 м с использованием в качестве источника света частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера ЛГН-303. Оптические части лазерного интерферометра располагаются в вакуумных камерах, соединенных между собой вакуумным световодом диаметром 0.3 м. Вакуумные камеры установлены на бетонных основаниях, которые жестко связаны с коренной породой [115]. Электронная система регистрации осуществляет сбор данных лазерного интерферометра по трем каналам: низкочастотному (от 0.1 Гц и ниже), каналу «тремор» (в полосе 0.1 — 10 Гц), сейсмическому (на частоте 30 Гц в полосе 1 Гц) и высокочастотному (на частоте 1620 Гц в полосе 0.5 Гц). В трех точках лазерного интерферометра проводятся измерения вариаций температуры и атмосферного давления [116, 117]. При обработке экспериментальных данных Баксанского лазерного интерферометра были исследованы: динамика магматических структур вулкана Эльбрус [108], приливные деформации [112], глобальные деформации и глобальные геодинамические процессы [113], собственные колебания Земли [110, 109] и другие геофизические процессы.

Для измерения малых деформационных смещений горных пород в сейсмоактивной зоне, в ИЛФ СО РАН был разработан автоматизированный

лазерный деформограф (рисунок 1.1). Оптическая часть прибора собрана на основе интерферометра Майкельсона. Это двухкоординатный лазерный деформограф с ортогональными измерительными плечами длиной 22.75 м. В качестве источника света применяются два частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазера с мощностью излучения 1 мВт с длиной волны 0.63 мкм, рассчитанные на непрерывный режим работы в течении 10 – 15 тысяч часов [128].



Рисунок 1.1 – Лазерный деформограф в штольне «Талгар».

Лазерный деформограф установлен в штольне на полигоне «Талгар» Алма-тинской области Казахстана. Данное расположение интерферометра позволяет минимизировать влияние вариаций температуры и атмосферного давления на показания прибора. Экспериментальные данные, полученные с помощью лазерного деформографа, позволяют исследовать: собственные и приливные колебания Земли [126], детерминированные суточные вариации

микродеформационного процесса [122], особенности деформационных процессов в земной коре, сопровождающих сейсмичность [119].

В штольне сейсмостанции «Талая», расположенной в 7 км от оз. Байкал, установлен двухкоординатный лазерный деформограф (рисунок 1.2) [8]. Деформограф выполнен по схеме несимметричного интерферометра Майкельсона с взаимно ортогональными измерительными плечами длиной 25 м. Данная схема построения прибора позволила уменьшить влияние суточных вариаций атмосферного давления на три порядка по сравнению с однокоординатным лазерным интерферометром-деформографом [127].

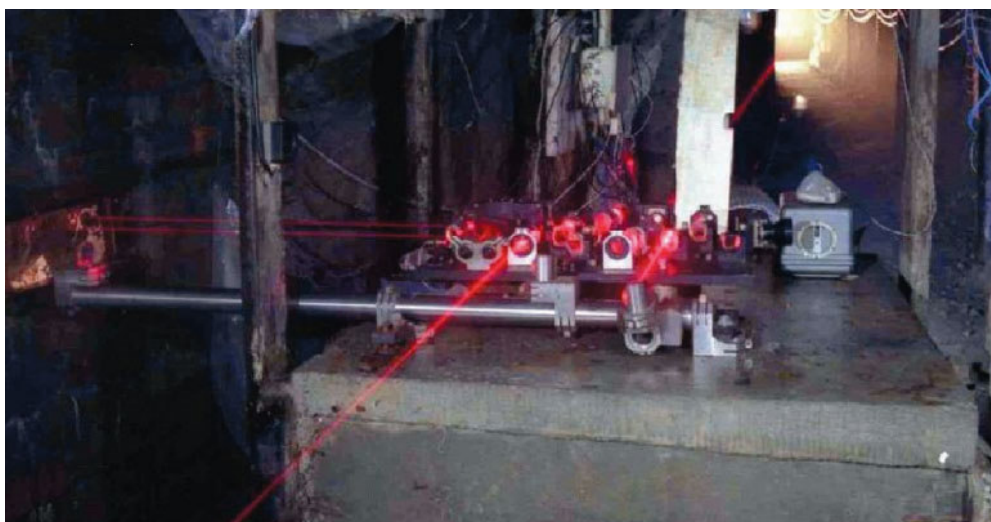


Рисунок 1.2 – Лазерный деформограф на сейсмостанции «Талая» Байкальской рифтовой зоны.

Экспериментальные данные, полученные с помощью лазерного деформографа на сейсмостанции «Талая», широко используются в геодезии, сейсмике и геофизике. Исследования деформаций земной коры необходимы для решения задач в широком временном и пространственном диапазонах. По данным лазерного деформографа были исследованы вариации амплитуд и фаз приливных деформаций [141], эффект суточной повторяемости возбуждения шума в сигналах с периодом колебаний в несколько десятков секунд [125]. По данным деформографических наблюдений сделано большое количество исследований по



поиску предвестников землетрясений. Проводились исследования с целью выявления среднесрочных и краткосрочных предвестников землетрясений [145]. На записях прибора были выделены колебания, соответствующие собственным колебаниям Земли, собственным колебаниям оз. Байкал [139].

Для измерения микродеформаций земной коры в Подмосковном лучеводном полигоне во Фрязино был установлен лазерный деформограф, разработанный ИРЭ РАН [25]. Деформограф создан на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча 100 м. Для исключения воздействия вариаций температуры на показания прибора, он был установлен под землей в металлическом трубопроводе лучевода на глубине 2 – 3 м. Оптическая часть интерферометра расположена в термоизолированном помещении. Такая установка прибора позволила добиться стабильности температуры, в период проведения измерений, в пределах  $0.03 - 0.05$  °C/сут [192].

Экспериментальные данные, полученные с помощью лазерного деформографа, установленного на полигоне во Фрязино, позволили провести исследования по геофизике, сейсмике, геодезии и других областях. Так с помощью лазерного деформографа, манометрического измерителя уровня воды в скважинах и метеорологического барографа выявлен ряд особенностей процессов динамического взаимодействия системы «литосфера – гидросфера – атмосфера» [93]. Совместная регистрация смещений и деформаций в поле сейсмической волны, полученных с помощью лазерных интерферометров–деформографов, позволила получить эффективные методы выделения продольных волн и подавления поперечных волн [123]. В результате обработки экспериментальных данных лазерных деформографов обнаружены и определены характеристики компонент сейсмических сигналов, распространяющихся со скоростями на порядок больше, чем скорости объемных Р-волн [5]. По результатам наблюдений широкополосных геофизических процессов с помощью лазерных интерферометров-деформографов и специальной геоакустической аппаратуры была показана возможность применения данных приборов для разделения локальных и глобальных возмущений геодинамических процессов [3]. Дальнейшие исследования

возможностей лазерного деформографа на Фрязинском лучеводном полигоне позволило создать двухкомпонентный лазерный интерферометр–деформограф (рисунок 1.3). Обе компоненты близки по своим техническим характеристикам, отличия только в оптических и электрических схемах устройств регистрации [92, 2].

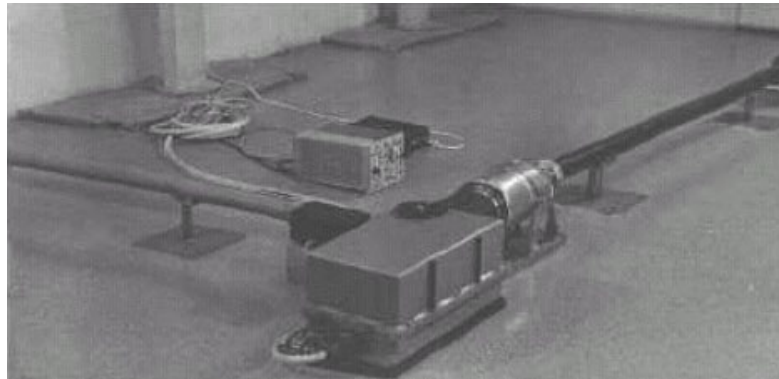


Рисунок 1.3 – Двухкомпонентный лазерный интерферометр–деформограф на Подмосковном лучеводном полигоне во Фрязино

В Японии в префектуре Кобе установлен лазерный деформограф длиной 15.5 м. Он расположен в тоннеле Рокко-Такао длиной 340 м на глубине 120 м от уровня моря и на глубине 240 м под землей. Оптическая часть лазерного интерферометра собрана на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона. В качестве источника света используется частотно-стабилизированный лазер НР-518А с длиной волны 0.633 мкм. Данный лазерный деформограф позволяет регистрировать вариации микродеформаций земной коры с точностью  $10^{-9}$ . Место установки прибора выбрано с целью контроля сейсмоопасной территории вблизи города Кобе. За время работы лазерного деформографа с 1989 по 1997 года было зарегистрировано несколько крупных землетрясений с магнитудами от 6 до 7.5. Наибольший интерес вызвало землетрясение с магнитудой 7.2, произошедшее 17 января 1995 года в непосредственной близости от места установки прибора [234, 201].

Наиболее известными, в настоящее время, являются лазерные интерферометры, объединенные в единую систему под одним названием: LIGO. В

эту сеть входят четыре лазерных интерферометра. Два из них установлены в США LIGO Hanford и LIGO Livingston – это Г-образная система, состоящая из двух четырёхкилометровых плеч с высоким вакуумом внутри. В каждом из плеч, благодаря дополнительным зеркалам из кварцевого стекла, образуются резонаторы Фабри-Перо. Многократное отражение луча в начале и в конце плеча повышает чувствительность интерферометра [157]. Основной целью LIGO является экспериментальное обнаружение гравитационных волн космического происхождения [157, 175, 161]. Еще один установлен в Италии Virgo, каждое плечо которого имеет длину 3 километра. Принцип построения Virgo аналогичен LIGO в США, а переотражение сигнала на концах плеч увеличивает длину до 120 км. Для исключения сейсмических шумов в обсерватории используется десятиметровая маятниковая система, а для исключения шумов в воздухе внутренняя часть интерферометра вакуумирована [169]. Основной целью исследований коллаборатории стало изучение гравитационных волн космического происхождения и уже 11 февраля 2016 года ими было объявлено о первом прямом наблюдении гравитационных волн [158, 159, 156]. Другой установлен в Японии KARGA, который имеет два плеча длиной 3 км - это гравитационно-волновой детектор нового поколения. Как и предыдущие аналоги он имеет Г – образную форму и создан на основе модифицированного интерферометра Майкельсона с двумя трех километровыми плечами. Тестовые запуски интерферометра показали хорошую чувствительность на низких частотах и высокую стабильность работы [165]. После ввода в эксплуатацию гравитационного детектора KARGA были сделаны первые оценки чувствительности сети к переходным гравитационно-волновым сигналам и определению местоположения источника в небе [160, 198]. Основное исследование на лазерно-интерферометрических приборах LIGO направлено на изучение гравитационных волн внеземного происхождения. Проект по созданию лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории был предложен в 1992 году. И уже в 2002 году обсерватория LIGO начала наблюдение гравитационных волн. В ее состав входили два лазерных интерферометра, установленных в Ливингстоне (штат Луизиана) и в Хэнфорде

(штат Вашингтон), удаленных друг от друга на 3002 километра [155]. В 2007 году в состав обсерватории был введен франко-итальянский детектор гравитационных волн (Virgo), расположенный в Европейской гравитационной обсерватории, вблизи итальянского города Пиза [162]. А в 2019 году в состав обсерватории LIGO стало входить четыре лазерно-интерференционных прибора. Четвертым стал Kamioka Gravitational Wave Detector (KAGRA) созданный группой исследователей гравитационных волн в институте исследований космических лучей Токийского университета [164].

### 1.1.1 ОДНОКООРДИНАТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДЕФОРМОГРАФЫ

В Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН создано несколько вариантов лазерных деформографов: однокоординатные, двухкоординатные и разнесенные. Однокоординатные лазерные деформографы горизонтального и вертикального типов. Все созданные лазерные деформографы собраны на основе современных лазерно-интерференционных методах, по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, с использованием в качестве источника света частотно-стабилизированных лазеров. На рисунке 1.4 представлена оптическая схема лазерного деформографа неравноплечего типа с использованием в качестве источника света частотно-стабилизированного лазера фирмы Melles Griot, долговременная стабильность которого составляет  $10^{-9} - 10^{-10}$ .

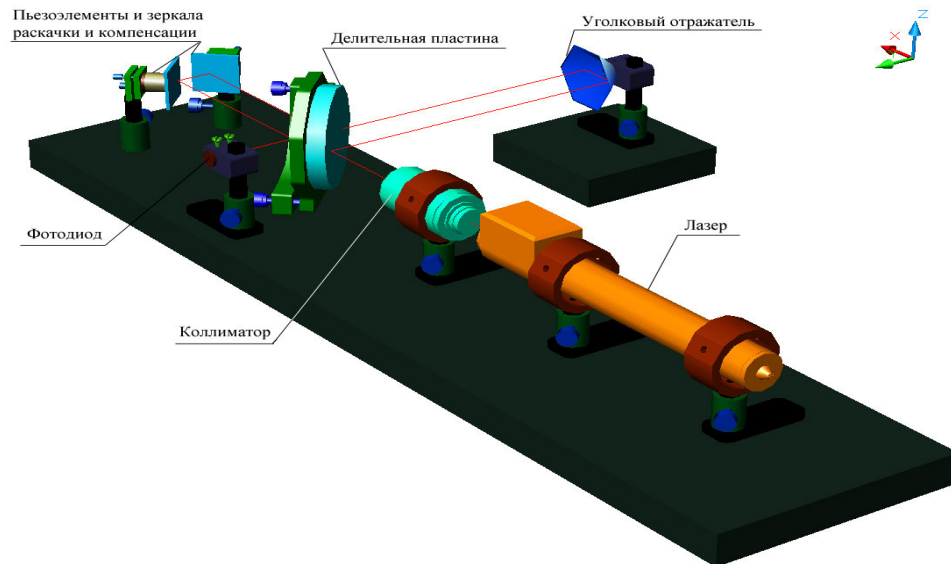


Рисунок 1.4 – Оптическая схема лазерного деформографа неравноплечего типа.

На рисунке 1.4 видно, что луч лазера, пройдя через коллиматор, попадает на плоско-параллельную пластину, типа ПИ-100, где он делится на две части. Первая часть луча считается эталонной, она проходит через зеркала, расположенные на пьезокерамических основаниях под углом  $90^\circ$  друг к другу. Эти пьезокерамические основания (цилиндры) являются элементами системы регистрации, а именно пьезокерамика раскачки и пьезокерамика компенсации [74]. Далее первая часть луча, пройдя плоско-параллельную пластину, попадает на фотодиод. Вторая часть луча считается измерительной, она проходит через световод и, отражаясь от трипель призмы, проходя через плоско-параллельную пластину попадает на фотодиод. Измерительное плечо намного больше эталонного. Если длина опорного плеча колеблется в пределах от 20 до 30 см, то длина измерительного плеча может быть от нескольких метров до километра. Так на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» работают три лазерных деформографа длиной 3.5, 17.5 и 52.5 м. После попадания обоих лучей на фотодиод между ними формируется интерференционная картина, изменение которой пропорционально изменению разности хода оптических лучей в измерительном и опорных плечах. Интерференционная картина на лазерных деформографах при их первоначальной установке настраивается вручную, а в

процессе эксплуатации может подстраиваться как вручную так и удаленно с использованием современных технологий. Изменение интерференционной картины оценивается цифровой системой экстремального регулирования [74], суть работы которой заключается в выполнении двух функций: управление интерферометром через пьезокерамики компенсации и раскачки, и формирование выходного сигнала. При этом интенсивность излучения, попадающего на фотодиод, описывается следующим выражением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi(L_2 - L_1)}{\lambda}\right) \quad (1.1)$$

где:  $I_1$  и  $I_2$  - интенсивности интерферирующих лучей;  $L_1$  и  $L_2$  - оптическая длина пути первого и второго лучей, соответственно;  $\lambda$  - длина волны лазерного излучения.

Такая зависимость  $I$  от  $\Delta L = L_2 - L_1$  является периодической с периодом  $\frac{\lambda}{2}$ . Она позволяет осуществить привязку к одному из экстремумов интенсивности интерференционной картины для измерения изменения разности длин плеч  $\Delta L$  интерферометра, счета интерференционных полос и их доли при автоматической подстройке интерферометра к ближайшему экстремуму интерференционной картины.

Весь путь луча лазера, за исключением оптической скамьи, расположен в герметичном световоде. При установке деформографов в стационарных, подземных сооружениях используется воздушнонаполненный световод с большой герметичностью (рисунок 1.5). В поверхностном варианте воздух из световода откачивается вакуумными насосами. Вакуумный световод собран из труб нержавеющей стали длиной по 3.5 м и внутренним диаметром 90 мм. В местах сочленения труб предусматривается большая герметичность, обеспечиваемая применением высококачественной вакуумной резины и U-образным замком. С обоих концов световод имеет герметично закрепленные прозрачные окна.

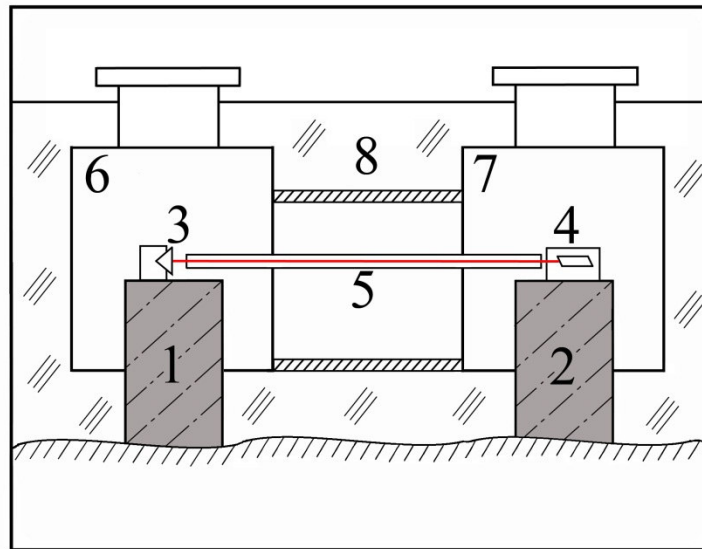


Рисунок 1.5 – Вертикальный разрез установки «Горизонтальный лазерный деформограф». 1 и 2 – бетонные устои, 3 – отражатель, 4 – интерферометр, 5-лучевод, 6 - термоизоляционное помещение отражателя, 7 - термоизоляционное помещение интерферометра, 8 – железобетонные трубы.

На рисунке 1.5 приведен вертикальный разрез горизонтального лазерного деформографа, расположенного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Данный деформограф установлен стационарно на глубине около 2 м под землей, причем герметичный лучевод (5) размещен в железобетонных трубах (8) с внутренним диаметром 1.5 м. На концах этих труб располагаются два термоизоляционных помещения (6 и 7) для отражателя (3) и интерферометра Майкельсона (4), где с помощью термоэлементов поддерживается постоянная температура с точностью 0.01°C. В этих же помещениях располагаются бетонные устои (1 и 2), на верхней части устоя располагаются оптические части лазерного деформографа, а нижняя часть устоя располагается на скальной породе. Расстояние между бетонными устоями 52.5 м, изменение этого расстояния и фиксируется системой регистрации лазерного деформографа и передается по кабельной линии в лабораторное помещение.

Наряду с горизонтальными лазерными деформографами были собраны и вертикальные лазерные деформографы (рисунок 1.6). Принцип работы у этих интерферометров идентичен. Вертикальные лазерные деформографы так же состоят из интерференционного узла, вакуумного световода (6) и отражателя (7). В интерференционный узел входят: лазер (1), коллиматор (2), плоскопараллельная пластина (4), зеркала, закрепленные на пьезокерамических цилиндрах (5), фотодиод (3), на котором настраивается интерференционная картина. Главное отличие вертикального лазерного деформографа заключается в вертикальной ориентации измерительного плеча. Данный деформограф был создан и испытан на МЭС ТОИ ДВО «м. Шульца» в 2000 году [57].

Чувствительность лазерных деформографов неравноплечего типа зависит, главным образом, от стабильности частоты применяемого лазера [83]. С 2012 года на лазерном деформографе неравноплечего типа, установленном на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», с длиной измерительного плеча 52.5 м, был установлен частотно-стабилизированный лазер фирмы Melles Griott [166]. Стабильность частоты этого лазера находится на уровне  $10^{-9}$ , при использовании гидротермоизоляционного помещения, где находится оптическая часть лазерного интерферометра, стабильность частоты лазера возрастает на порядок до  $10^{-10}$ . Учитывая, что длина измерительного плеча неравноплечего лазерного интерферометра 52.5 м, то точность измерения смещения составляет 5.2 нм. Теоретически [153], применяемые методы интерферометрии позволяют измерять смещение с точностью  $10^{-6} \cdot \lambda/2$ , что при длине волны гелий-неонового лазера составляет величину 0.32 пм. В настоящее время оптико-механическая часть неравноплечего лазерного деформографа претерпела изменения, в качестве источника света используется гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер фирмы Neorark со стабильностью частоты  $\sim 10^{-12}$ . 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. На рисунке 1.7 приведен внешний вид



центрального интерференционного блока лазерного деформографа с частотно стабилизированным и мощным лазером в качестве источника света [69].

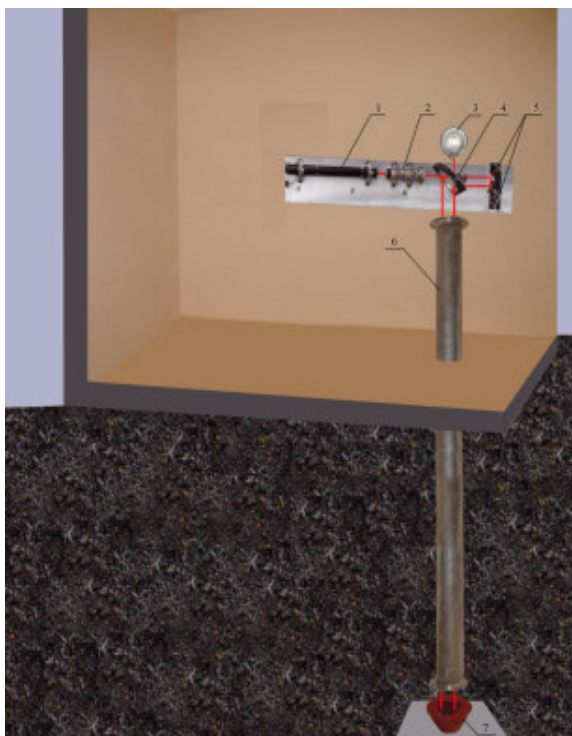


Рисунок 1.6 – Разрез установки «Вертикальный лазерный деформограф». 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – фотодиод, 4 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 5 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 6 – лучевод, 7 – отражатель

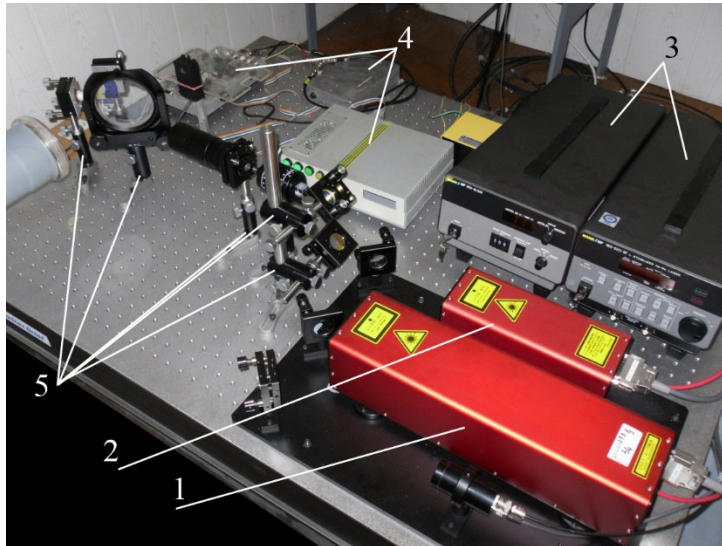


Рисунок 1.7 – Центральный интерференционный блок лазерного деформографа. 1 – частотно-стабилизированный лазер; 2 – мощный лазер; 3 – блоки питания лазеров с системой стабилизации частоты; 4 – система регистрации лазерного деформографа; 5 – оптическая часть интерферометра Майкельсона

Чувствительность лазерных деформографов неравноплечего типа также зависит от шумов фотоэлектронной аппаратуры. В качестве приемника в системе регистрации лазерного деформографа используется фотодиод ФД 24К. Выбор фотодиода обусловлен тем, что в лазерных интерферометрах изменение слабого переменного оптического сигнала производится на фоне большой постоянной засветки. В связи, с чем предельный порог чувствительности определяется дробовым шумом, а дробовый шум фотодиода  $K_D$  намного меньше, шума фотоумножителя  $K_F$ . Отношение этих шумов записывается выражением:

$$\frac{K_F}{K_D} = \left\{ \frac{2(1+\beta)\Delta f h \nu}{P_F \eta_D} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{2\Delta f h \nu}{P_D \eta_F} \right\}^{1/2} \quad (1.2)$$

где  $\beta$  – величина, обусловленная вторичной эмиссией электронов, равная 1.5;  $\Delta f$  – полоса воспроизведения частот;  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  – частота;  $P_D, P_F$  – мощность засветки фотокатодов;  $\eta_D, \eta_F$  – квантовая эффективность фотокатодов. Так если для фотодиода ФД 24К  $P_D = 10$  мВт, а  $\eta_D = 0.6$ , то, например, для фотоумножителя ФЭУ – 77  $P_F = 0.03$  мВт, а  $\eta_F = 0.008$ . В связи с этим отношение

дробного шума фотоумножителя к дробному шуму фотодиода будет примерно равно 50.

Учитывая, что интенсивность лазерного излучения  $I$ , попадающего на фотодиод, описывается выражением 1.1 и то, что интенсивность интерферирующих лучей одинаковая, выражение 1.1 принимает вид:

$$I = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{2\pi l}{\lambda} \right) \quad (1.3)$$

где  $2l = 2(L_2 - L_1)$  – разность оптических путей интерферирующих лучей. Из выражения 1.3 следует, что величина силы тока на выходе фотоприемника описывается следующим равенством:

$$i = i_0 \cos^2 \left( \frac{2\pi l}{\lambda} \right) \quad (1.4)$$

где  $i_0 = 4I_0\chi$ ,  $\chi$  – чувствительность фотоприемника. Согласно выражению 1.4, изменение оптической разности плеч интерферометра  $l$  и изменение длины волны  $\lambda$  оказывают воздействие на изменение силы тока. Введем дополнительные параметры, связанные с шумовыми составляющими тока:  $\Delta i_1$  – шум фотоэлектронной аппаратуры и  $\Delta i_2$  – стабильность мощности лазерного излучения. Продифференцируем выражение 1.4 по  $l$  и по  $\lambda$  и затем добавим в выражение параметры  $\Delta i_1$  и  $\Delta i_2$ :

$$\Delta i = i_0 \sin \left( \frac{4\pi l}{\lambda} \right) \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} l \pm \frac{2\pi l}{\lambda^2} \Delta \lambda \right\} \pm \Delta i_1 \pm \Delta i_2 \quad (1.5)$$

Максимальное значение  $\Delta i$  возможно при  $\frac{4\pi l}{\lambda} = \frac{\pi}{2}$ . Учитывая, что относительное смещение устоев деформографа зависит от изменения длины волны гелий-неонового лазера [83], то с учетом выражения 1.5 изменение измерительного плеча можно описать как:

$$\Delta l = \frac{\Delta i}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi} \pm l \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \pm \frac{\Delta i_1}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi} \pm \frac{\Delta i_2}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1.6)$$

где  $\frac{\Delta i}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi}$  – сейсмические колебания, а остальные слагаемые это шумы аппаратуры.

Отношение  $\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$  – шумы связанные с нестабильностью частоты лазера. При использовании гелий-неонового лазера это отношение порядка  $10^{-10}$  м. Для того же

лазера слагаемое  $\frac{\Delta i_2}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi} \approx 0.1$  нм. При оценки порога чувствительности дробного шума фотоприемника, предельная чувствительность к абсолютным смещениям зеркал в интерферометре Майкельсона, определяется выражением [16]:

$$\Delta l_{\min} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{\lambda h c \Delta f}{q P_0} \right)^{1/2} \quad (1.7)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $P_0$  – мощность лазерного излучения,  $c$  – скорость света,  $\Delta f$  – полоса принимаемых частот,  $q$  – квантовый выход фотоприемника. При условии, что  $P_0 = 0.001$  Вт,  $q = 0.05$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  М/с,  $\lambda = 0.63 \cdot 10^{-6}$  м,  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с, получаем:

$$\Delta l_{\min} = 1.78 \cdot 10^{-15} \sqrt{\Delta f} \text{ м} / \text{Гц}^{1/2} \quad (1.8)$$

При условии, что  $\Delta f \approx 10^3 \div 10^4$  Гц, получаем  $\Delta l_{\min} = 1.78 \cdot 10^{-13}$  м, этот параметр не оказывает влияния на точность измерения.

При оценке погрешности нельзя пренебрегать воздействием температуры, давления и влажности на лазерные интерферометры. Рассмотрим воздействие этих параметров на поверхностный лазерный деформограф неравноплечего типа (рисунок 1.4). Интерференционный узел и отражатель данного прибора находятся в термоизолированных помещениях, где многосуточные вариации температуры составляют величину порядка 0.1 К. Определим максимальную ошибку внешних воздействий на плоскопараллельные зеркала (рисунок 1.4), зеркала закреплены на пьезокерамические цилиндры высотой 20-25 мм. Толщина самих зеркал 2 мм. При максимальном изменении температуры на 0.1 К изменение смещения составит  $\Delta l = \pm 0.2 \cdot 10^{-8}$  м. Так же следует учитывать суммарную ошибку, вызванную изменением температуры, давления и влажности в воздушных промежутках интерферометра, равную  $\Delta l = \pm 1.1 \cdot 10^{-9}$  м. На любом деформографе необходимо стабилизировать внутреннее давление в лучевом, что позволит обеспечить необходимую точность измерений. При поддержании давления в трубе с точностью  $\Delta P = 5 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст. обеспечит чувствительность  $\Delta l / l \approx 2 \cdot 10^{-10}$ . Для определения температуры при которой не будет оказывать воздействие на

точность измерений будем считать, что  $P = 10^{-4}$  мм.рт.ст.,  $\varepsilon = \delta l / l = 2 \cdot 10^{-10} \Delta T$ ,  $\Delta T = \frac{\delta l}{2 \cdot 10^{-6}} = 1$  град. То есть сохраняя температуру в помещении с точностью равной  $\pm 0.1$  К, позволяет исключить влияние этой ошибки на точность измерений.

Рассмотрим изменение длины вакуумного трубопровода, в случае использования вакуумного лучевода, из-за вариаций температуры окружающей среды изменяется длина труб, что приводит к изменению оптического пути. При изменении температура на  $0.01^\circ$  С оптический путь луча изменится на величину  $\Delta l = \Delta l_0 (n - n_0)$ , где  $\Delta l$  – изменение длины лучевода (при условии, что лучевод изготовлен из труб из нержавеющей стали, то  $\Delta l_0 = \alpha l \Delta T = 5.5 \cdot 10^{-6}$  м), а  $(n - n_0)$  – разность показателей преломления воздуха и вакуума. В итоге получаем, что  $\Delta l = 5.5 \cdot 10^{-10}$  м, эта помеха не влияет на точность измерений.

Рассмотрим изменение длины лучевода при вариациях атмосферного давления. Для расчета воспользуемся формулой:

$$\Delta l = \frac{\Delta F l}{A \gamma} \quad (1.9)$$

где  $\Delta F$  – изменение силы атмосферного давления на конце трубы, вызванное вариациями атмосферного давления,  $l$  – длина лучевода,  $A$  – площадь сечения стенок труб,  $\Delta F = \pi r^2 \Delta P$ , где  $r$  – радиус труб,  $\Delta P$  – изменение атмосферного давления. Учитывая, что  $\Delta F = 3.14 \cdot 10^6$  дин, длина лучевода 50 метров, площадь сечения стенок труб  $19 \text{ см}^2$ ,  $\gamma = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ , получаем что  $\Delta l = \pi r^2 \Delta P / A \gamma = 5.7 \cdot 10^{-10}$  м. Следовательно и эта помеха не оказывает влияния на точность измерений.

Лазерные деформографы неравноплечего типа были установлены на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» (Приморский край) [42], на МЭС СКБ САМИ «м. Свободный» (о. Сахалин) [88], на территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН Приморский край [90], в г. Соликамске (Урал) на глубине 300 м под землей [52], в г. Краснокаменске (Читинская область) на глубине 270 м под землей [89]. На МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» работают в непрерывном режиме два лазерных деформографа горизонтального типа и один лазерный

деформограф вертикального типа. Первый лазерный деформограф с ориентацией «север-юг» имеет длину измерительного плеча 52.5 м и регистрирует вариации уровня микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц с точностью 0.3 нм. Второй лазерный деформограф с ориентацией «запад-восток» имеет длину измерительного плеча 17.5 м и регистрирует вариации микродеформаций земной коры в частотном диапазоне в пределах от 0 до 10 000 Гц с точностью 0.3 нм (рисунок 1.8). Вертикальный лазерный деформограф имеет длину измерительного плеча 3,5 м и регистрирует вариации микродеформаций земной коры в пределах от 0 до 10 000 Гц и с точностью 0.3 нм. Все эти приборы входят в состав сейсмоакустико-гидрофизического комплекса [68].

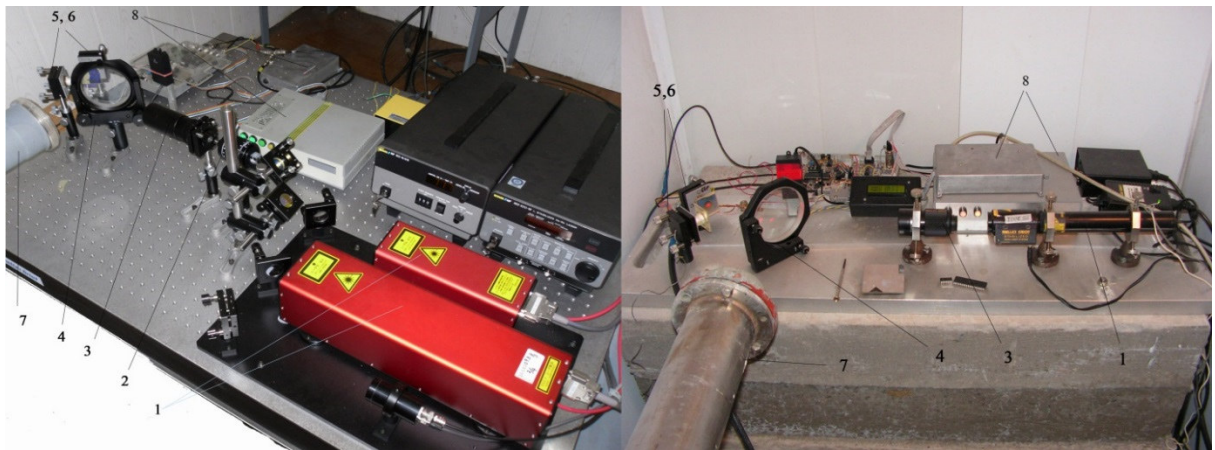


Рисунок 1.8 – Интерферометры лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м ориентацией «север-юг» (слева) и с длиной измерительного плеча 17.5 м ориентацией «запад-восток» (справа). 1 – лазер, 2 – оптический затвор, 3 – коллиматор, 4 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 5 и 6 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 7 – лучевод, 8 – система регистрации

Данные с этих приборов по кабельным линиям попадают на АЦП типа L-CARD E14-140-M, далее после предварительной обработки записываются на компьютер. На рисунке 1.9 приведен пример синхронной записи неравноплечих лазерных деформографов с ориентацией «север-юг» и «запад-восток»,

расположенных на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Данный фрагмент был получен путем сшивания часовых файлов записи, сделанных с частотой 500 Гц, с последующей их фильтрацией низкочастотным фильтром Хемминга и децимацией до 1 Гц [189].

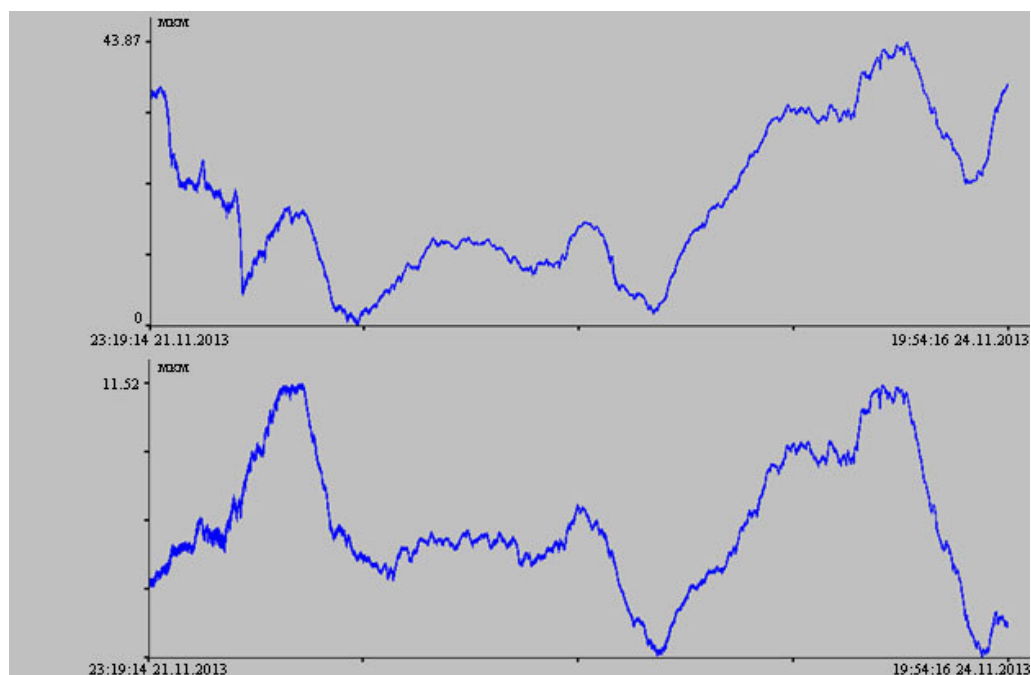


Рисунок 1.9. – Синхронная запись неравноплечих лазерных деформографов ориентацией север-юг (верхний) и запад-восток (нижний)

На МЭС СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный» установлен и работает лазерный деформограф горизонтального типа с длиной измерительного плеча 10.5 м (рисунок 1.10). Данный лазерный деформограф позволяет регистрировать микродеформации земной коры в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц и с точностью 0.3 нм [243]. Данные с этого прибора по кабельным линиям попадают на АЦП типа L-CARD E14-140-M, далее после предварительной обработки записываются на компьютер. На рисунке 1.11 приведен пример записи неравноплечего лазерного деформографа с ориентацией «север-юг», расположенного на МЭС СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный». Данный фрагмент, длительностью более пяти суток, был получен путем сшивания часовых

файлов записи, сделанных с частотой 500 Гц, с последующей их фильтрацией полосовым фильтром Хемминга и децимацией до 1 Гц.

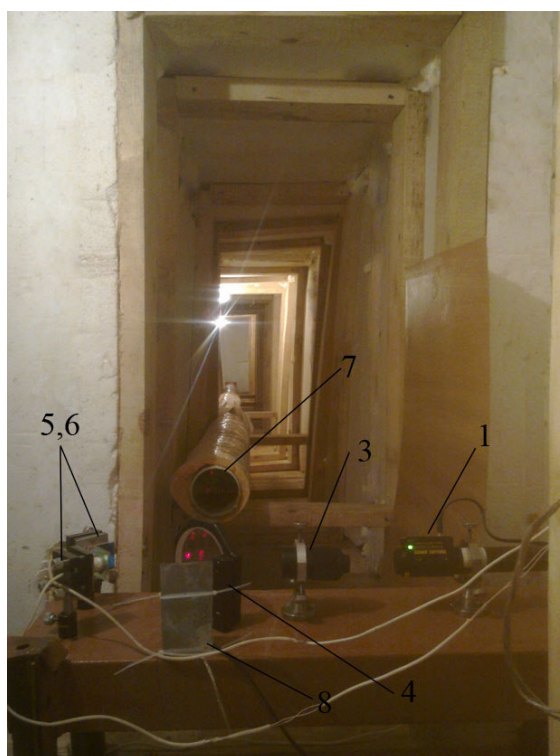


Рисунок 1.10 – Интерферометр лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 10.5 м ориентацией «север-юг». 1 – лазер, 3 – коллиматор, 4 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 5 и 6 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 7 – лучевод, 8 – система регистрации.

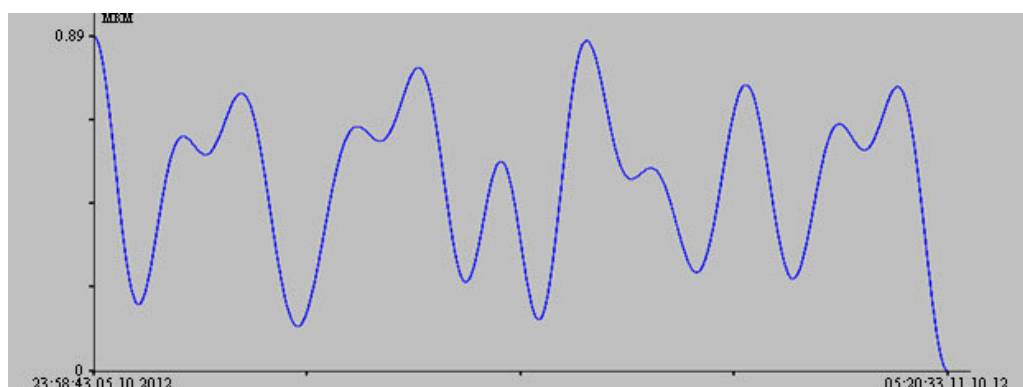


Рисунок 1.11. – Запись неравноплечего лазерного деформографа, расположенного на МЭС СКБ САМИ ДВО РАН.



На территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН Приморский край установлен и работает неравноплечий горизонтальный лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 18 м (рисунок 1.12). Данный лазерный деформограф выполнен в поверхностном варианте, его лучевод располагается в теплоизоляционном каркасе, исключая воздействие прямых солнечных лучей на работу прибора. Лазерный деформограф позволяет регистрировать микродеформации земной коры в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц и с точностью 0.3 нм [191].

Данные с лазерного деформографа по кабельным линиям попадают на АЦП того же типа и после предварительной обработки записываются на компьютер. На рисунке 1.13 приведен пример записи поверхностного лазерного деформографа. Данный участок записи длиной почти четверо суток, был получен путем сшивания часовых файлов, сделанных с частотой 500 Гц, с последующей их фильтрацией низкочастотным фильтром Хемминга и децимацией до 1 Гц.

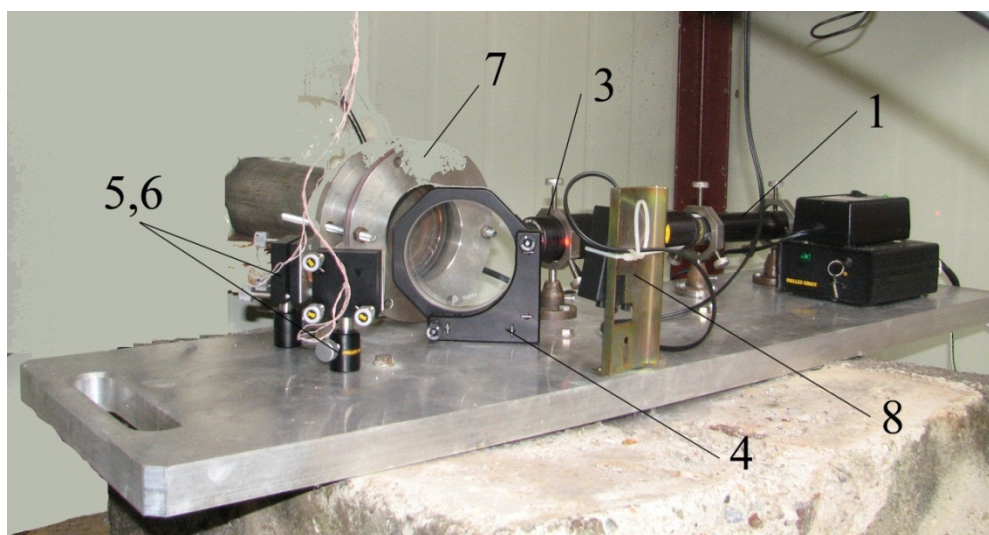


Рисунок 1.12 – Интерферометр лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 18 м, установленного на территории Уссурийской астрофизической обсерватории. 1 – лазер, 3 – коллиматор, 4 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 5 и 6 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 7 – лучевод, 8 – система регистрации.

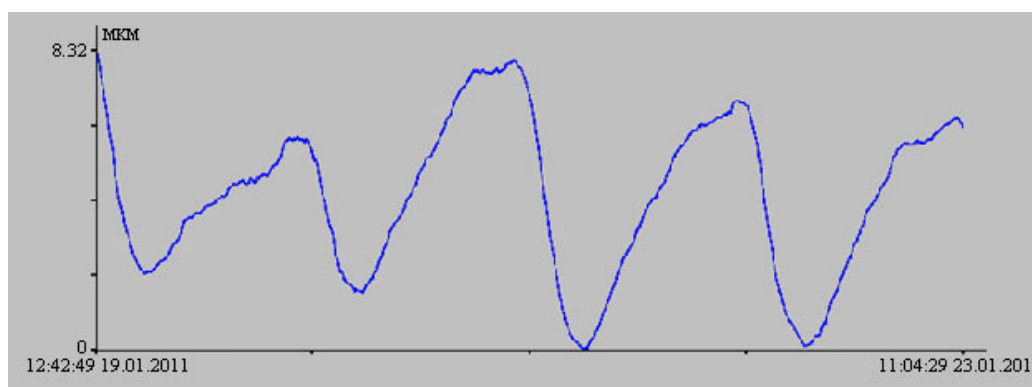


Рисунок 1.13 – Запись неравноплечего лазерного деформографа, расположенного на территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН.

Еще один неравноплечий лазерный деформограф установлен в г. Соликамске (Урал) на глубине 300 м под землей с длиной измерительного плеча 52.5 м (рисунок 1.14). Данный прибор установлен в шахте и позволяет регистрировать вариации микродеформации земной коры в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц с точностью 0.3 нм [178].

Данные с лазерного деформографа по кабельным линиям попадает в лабораторное помещение, где по средствам АЦП после предварительной обработки записывается на компьютер. Пример записи соликамского лазерного деформографа длительностью более суток приведен на рисунке 1.15. Данный участок записи был получен путем сшивания часовых файлов сделанных с частотой 500 Гц с последующей их фильтрацией низкочастотным фильтром Хемминга и децимацией до 1 Гц.

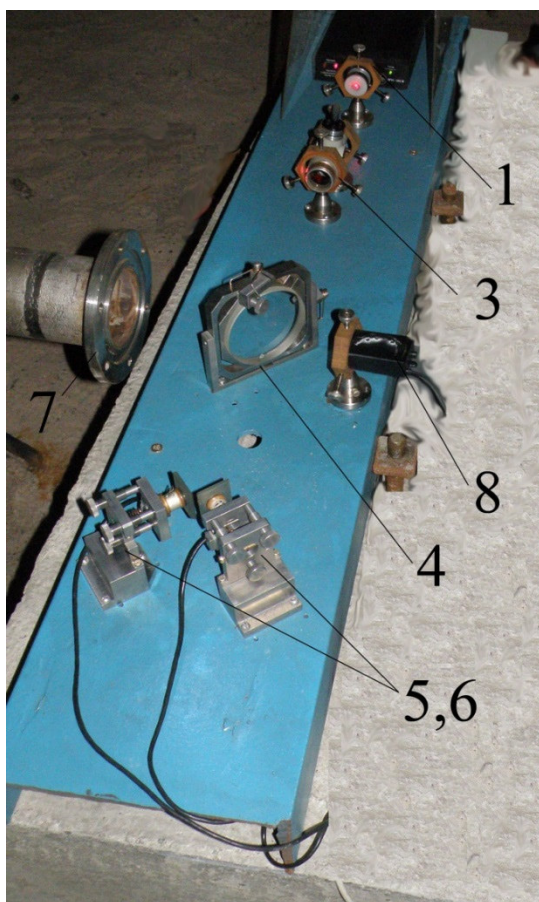


Рисунок 1.14 – Интерферометр лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м, установленного в г. Соликамск. 1 – лазер, 3 – коллиматор, 4 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 5 и 6 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 7 – лучевод, 8 – система регистрации.

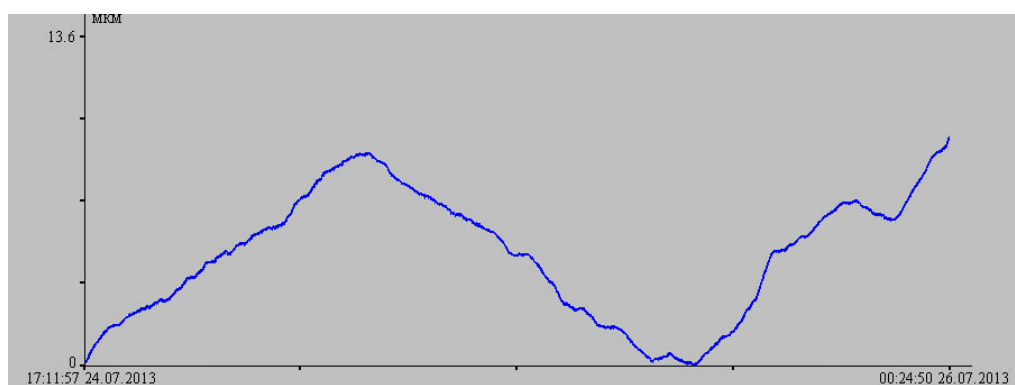


Рисунок 1.15 – Запись неравноплечего лазерного деформографа, расположенного в г. Соликамске.

Горизонтальный лазерный деформограф неравноплечего типа был установлен в г. Краснокаменске (Читинская область) в шахте на глубине 270 м под землей, длина измерительного плеча прибора 50 м (рисунок 1.16). Прибор был установлен в свободной горной выработке и позволяет регистрировать вариации микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц с точностью 0.3 нм [182].

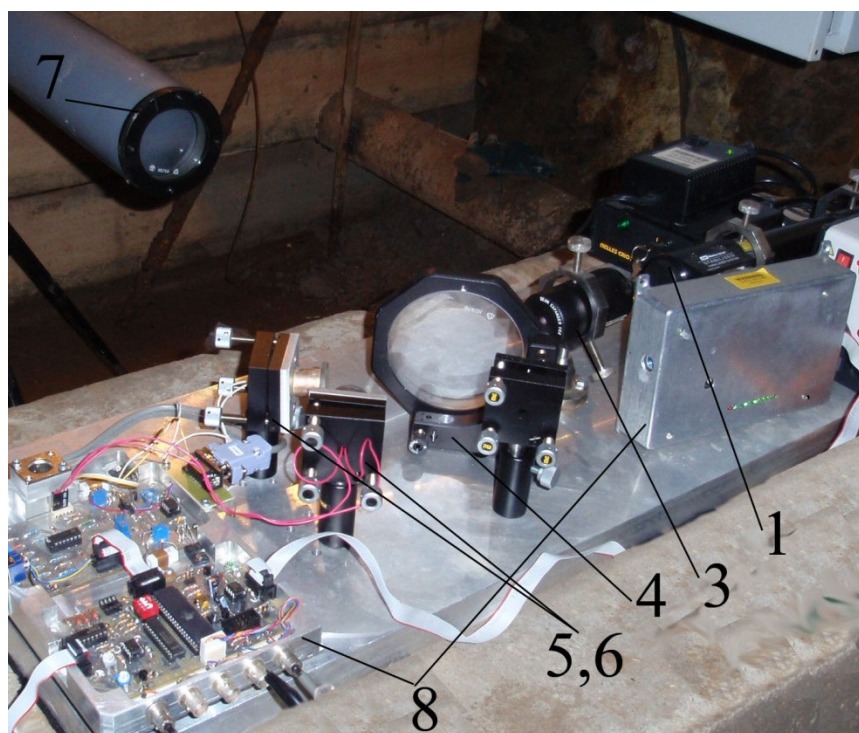


Рисунок 1.16 – Интерферометр лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 50 м, установленного в г. Краснокаменске.

1 – лазер, 3 – коллиматор, 4 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 5 и 6 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 7 – лучевод, 8 – система регистрации.

Данные с цифровой системы регистрации неравноплечего лазерного деформографа по кабельным линиям попадают в лабораторное помещение, где после предварительной обработки записываются на компьютер. На рисунке 1.17 приведен пример записи Краснокаменского лазерного деформографа длительностью более 20 суток. Данный ряд был получен путем сшивания часовых

файлов записанных с частотой 500 Гц, с последующей их фильтрацией низкочастотным фильтром Хемминга и децимацией до 1 Гц.

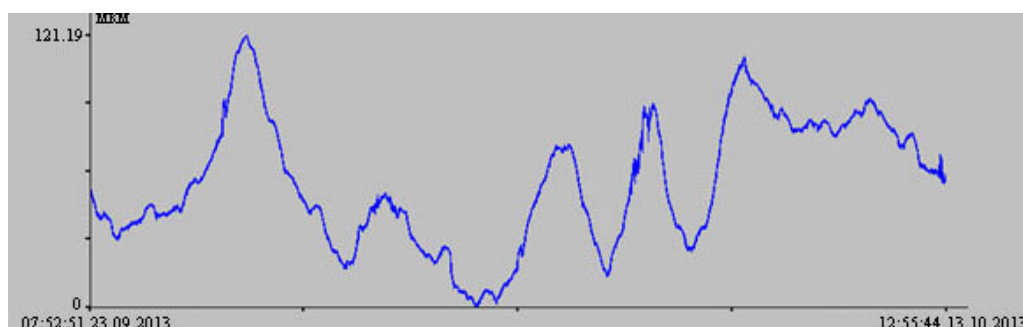


Рисунок 1.17 – Запись неравноплечего лазерного деформографа, расположенного в г. Краснокаменске.

Все неравноплечие лазерные деформографы, приведенные выше, собраны на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона. В качестве источника света используется гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер фирмы Neoark (1) (рисунок 1.8 (левый)) далее луч лазера пройдя через оптический затвор (2) попадает в коллиматор (3). В других случаях в качестве источника света используется гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер фирмы Melles Griot (1) (рисунки 1.8, 1.10, 1.12, 1.14, 1.16). Выходя из лазера луч, как и в предыдущем случае, попадает в коллиматор (4). Дальнейшая схема всех лазерных деформографов идентичная, луч, выйдя из коллиматора, попадает на делительную пластину (4), где он делится на две части, измерительную и эталонную. Эталонная часть луча, пройдя через зеркала на пьезокерамических цилиндрах (5, 6) возвращается на делительную пластину. Измерительная часть луча проходит по лучеводу (7) и, отразившись от трипель призмы, возвращается на делительную пластину. На делительной пластине лучи сводятся в точку, образуя интерференционную картину. Изменение этой интерференционной картины регистрируется на фотодиоде цифровой системой регистрации (8).

### 1.1.2 ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДЕФОРМОГРАФ

Двухкоординатные лазерные деформографы можно разделить на два типа, это лазерные деформографы, где интерференционные узлы располагаются на одном основании и деформографы с разнесенными интерференционными узлами. На рисунке 1.18 приведена оптическая блок схема двухкоординатного неравноплечего лазерного деформографа с единым источником света, а на рисунке 1.19 - двухкоординатный неравноплечий лазерный деформограф с различными источниками света, в обоих случаях интерференционные узлы расположены на одном основании. В первом случае луч лазера (1) пройдя через коллиматор (2) попадает на плоско-параллельную пластину (3), где он делится на два луча. Первая часть луча будет источником света для первой оси, а вторая часть луча для второй оси. Первый луч попадает на плоско-параллельную пластину (4), где он разделяется на эталонный и измерительный. Измерительная часть луча, пройдя по лучеводу (7) и отразившись от трипель призмы (8), возвращается на плоско-параллельную пластину. Эталонная часть луча попадает на зеркала, закрепленные на пьезокерамических цилиндрах (5, 6), пройдя зеркала луч возвращается на плоско-параллельную пластину, на которой оба луча сбиваются в точку, образуя интерференционную картину, изменение этой интерференционной картины фиксируется фотодиодом (9) и передается на систему регистрации (16), которая также управляет пьезокерамикой раскочки и компенсации (5 и 6).

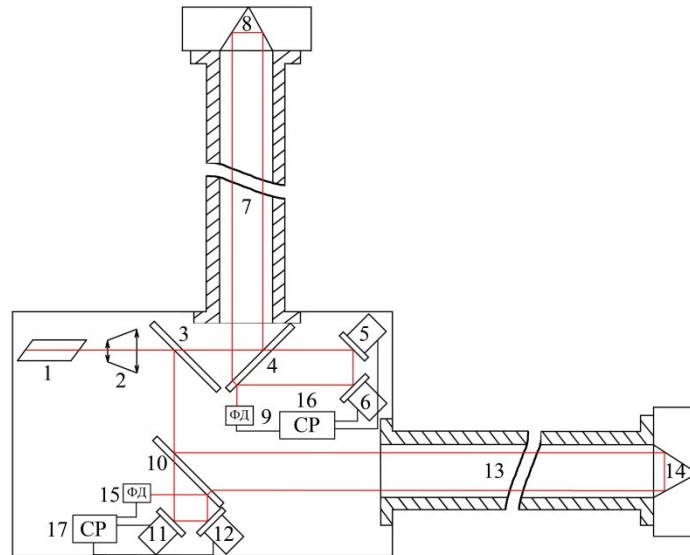


Рисунок 1.18 – Двухкоординатный лазерный деформограф с одним источником света. 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3, 4 и 10 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 5 и 6, 11 и 12 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 7 и 13 – лучевод, 8 и 14 – отражатель, 9 и 15 – фотодиод, 16 и 17 – система регистрации.

Второй луч, отразившись от делительной пластины (3), попадает на плоско-параллельную пластину (10), где делится на две части: эталонный и измерительный. Измерительная часть луча проходит по лучеводу (13), который располагается под углом  $90^\circ$  к лучеводу (7), и отразившись от трипель призмы (14) возвращается на полупрозрачную пластину. Эталонная часть луча отразившись от зеркал, закрепленных на пьезокерамиках компенсации и раскачки, также возвращается на плоско-параллельную пластину. Затем лучи сбиваются в точку и образуют интерференционную картину. Изменение интерференции посредством фотодиода (15) фиксируется системой регистрации (17). Использование такой схемы построения двухкоординатного неравноплечего лазерного деформографа требует использование более мощного лазера, чем в схеме с двумя источниками света, так как при делении луча на два луча, мощность каждого из лучей будет в два раза меньше начальной мощности лазера.

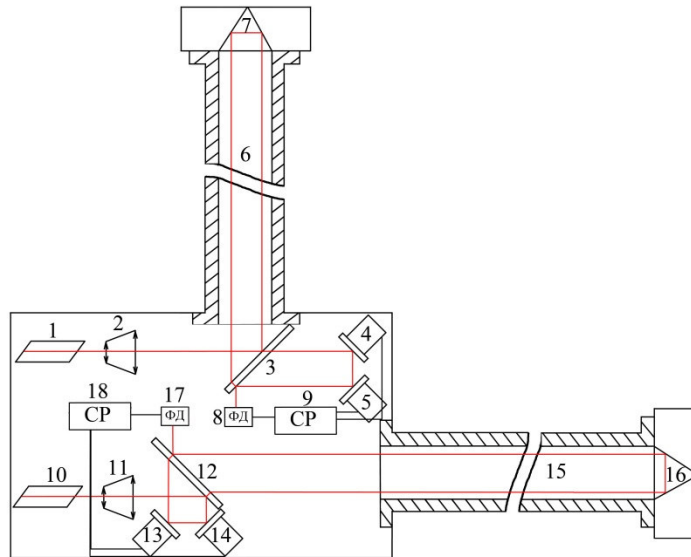


Рисунок 1.19 – Двухкоординатный лазерный деформограф с двумя источниками света. 1 и 10 – лазер, 2 и 11 – коллиматор, 3 и 12 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 4 и 5, 13 и 14 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 6 и 15 – лучевод, 7 и 16 – отражатель, 8 и 17 – фотодиод, 9 и 18 – система регистрации.

В случае двухкоординатного лазерного деформографа с двумя источниками света схема построения прибора очень похожа. Отличие заключается в том, что в этом случае вводится дополнительный лазер и коллиматор, а одна делительная пластина исключается. Луч первого лазера (1) пройдя коллиматор (2) попадает на плоско-параллельную пластину (3), где он разделяется на две части - эталонную и измерительную. Измерительная часть луча пройдя по лучеводу (6) и, отразившись от трипель призмы (7), возвращается на пластину. Эталонная часть луча проходит через зеркала (4, 5), закрепленные на пьезокерамических цилиндрах и расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу. Далее на фотодиоде (8) эти лучи сбиваются в точку, образуя интерференционную картину, изменение этой картины фиксируется системой регистрации (9) посредством фотодиода. Схема построения второй компоненты лазерного деформографа аналогична предыдущей.

На МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» работает в непрерывном режиме двухкоординатный лазерный деформограф с разнесенными интерференционными узлами. Схемы построения интерференционных узлов двухкоординатных



неравноплечих лазерных деформографов приведены на рисунке 1.8 и описывались выше. Такая схема расположения приборов вызвана рельефом местности, где располагается лабораторное помещение. На рисунке 1.20 приведена структурная схема расположения двухкоординатного лазерного деформографа, состоящего из двух лазерных деформографов с взаимно перпендикулярными плечами с ориентацией «север-юг» и «запад-восток» и длиной 52.5 и 17.5 м, соответственно. По кабельным линиям синхронные данные с этих двух приборов поступают в лабораторное помещение [242].

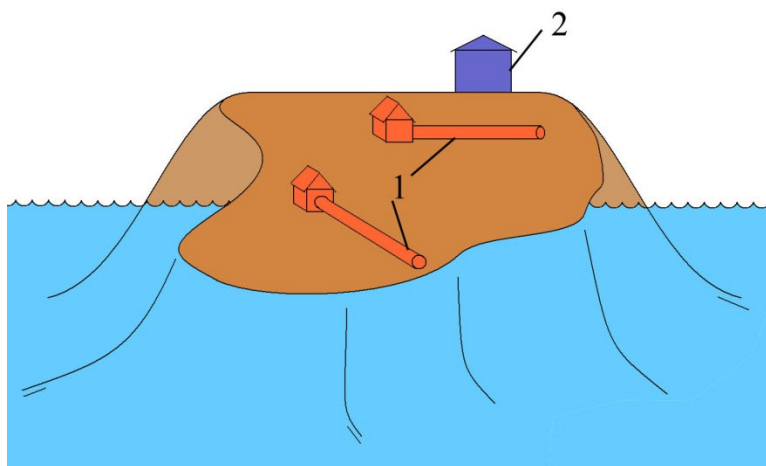


Рисунок 1.20 – Структурная схема расположения лазерных деформографов.

1 – лазерные деформографы, 2 – лабораторное помещение.

Так на рисунке 1.21 приведен пример синхронной записи двух лазерных деформографов длительностью почти пять суток. Этот ряд был получен путем сшивания часовых файлов данных, записанных с частотой 500 Гц, с предварительной фильтрацией и децимацией. На верхнем графике приведен участок записи лазерного деформографа ориентацией «север-юг», а на нижнем рисунке приведен участок записи «запад-восток» за тот же промежуток времени.

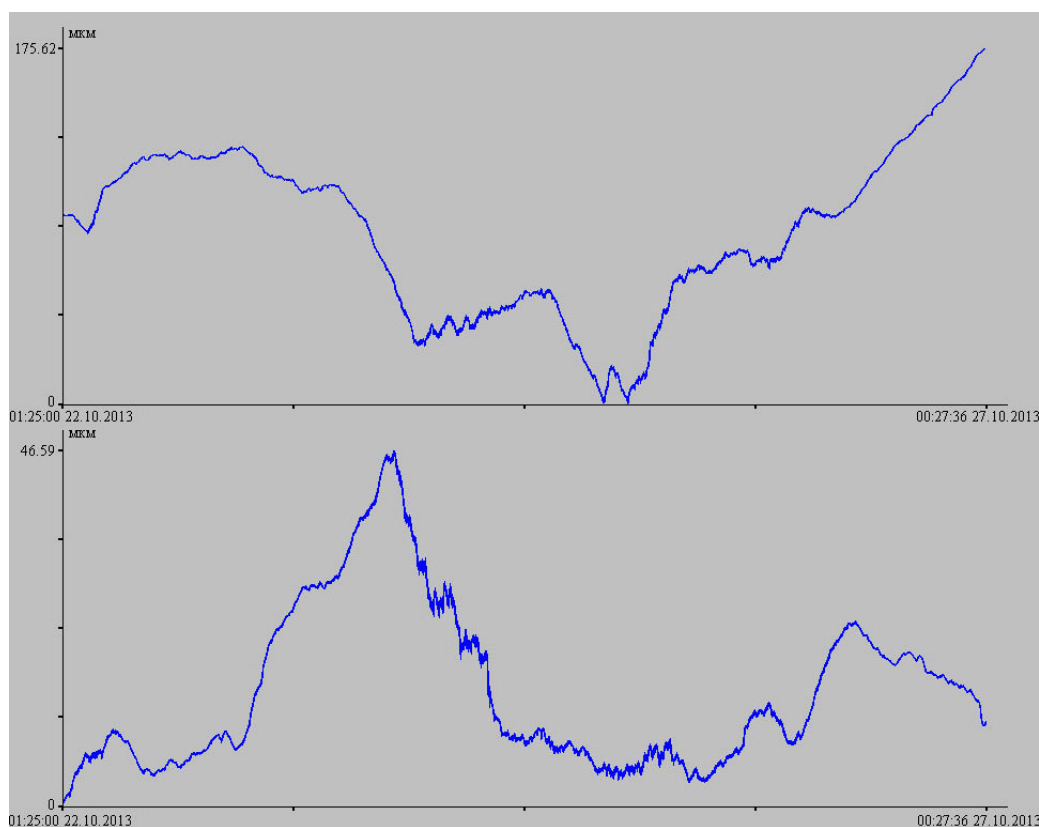


Рисунок 1.21 – Запись лазерных деформографов ориентацией «север-юг» (верхний) и «запад-восток» (нижний).

При обработке совместных данных двухкоординатного лазерного деформографа были исследованы некоторые тона и обертона собственных колебаний Земли. Так на рисунке 1.22 представлены участки записей лазерных деформографов длительностью полтора суток. Они были получены путем сшивания часовых файлов, записанных с частотой 500 Гц, с последующей их фильтрацией и децимацией. На спектрах записей двухкоординатного лазерного деформографа как на интерферометре с ориентацией «север-юг», так и на интерферометре с ориентацией «запад-восток», выделяются пики, соответствующие некоторым тонам и обертонам собственных колебаний Земли. На спектрах отмечены некоторые сфероидальные колебания основного тона и некоторых обертонов, это  $0S_4$ ,  $1S_2$ ,  $0S_0$ ,  $1S_3$ ,  $0S_6$ ,  $0S_8$ ,  $0S_9$ ,  $1S_0$ ,  $0S_{11}$ ,  $2S_2$ ,  $0S_7$ ,  $0S_{10}$ . В большинстве случаев пики ярко выражены.

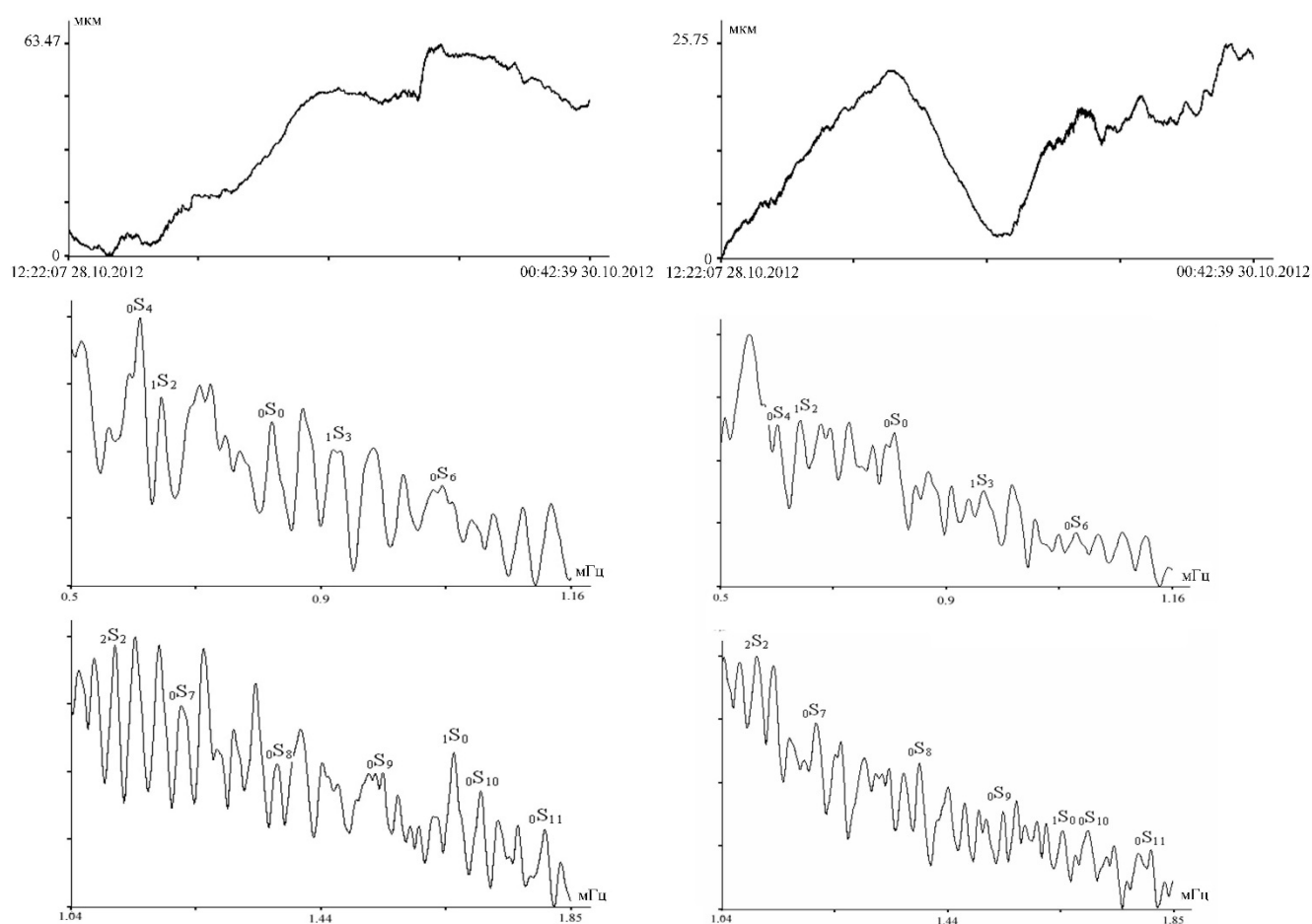


Рисунок 1.22 – Запись и спектр записи лазерных деформографов ориентацией «север-юг» (левый) и «запад-восток» (правый).

## 1.2 ЛАЗЕРНЫЕ НАНОБАРОГРАФЫ

До недавнего времени для измерения вариаций атмосферного давления в метеорологии применялись, в основном, четыре группы приборов: металлические барометры, барометры с жидкостями, газовые барометры и гипсотермометры [37]. Действие металлических барометров (анероиды и вибротроны) основывалось на упругих свойствах твердого тела. Действие барометров с жидкостями основывалось на законах гидростатики. Действие газовых барометров обуславливалось упругими силами газа. А действие гипсотермометров - на зависимости точки кипения жидкости от внешнего давления.

Все эти барометры имеют ряд недостатков: узкий рабочий диапазон частот, невысокая стабильность и сложность в технологии изготовления. Главным их недостатком является невозможность измерения малых вариаций атмосферного давления и ограничения в измерении низких давлений. При исследовании работы anerоидных коробок на больших высотах было установлено, что измерение атмосферного давления возможно с точностью  $\pm 200$  Па [20]. Увеличение чувствительности приборов вызвало ряд трудностей в деформационных манометрах. Так при изменении давления на 0.013 Па на один квадратный сантиметр стенки действует сила равная 0.133 дин. А измерение столь малых сил представляет собой очень сложную техническую задачу [37].

Наряду с механическими методами измерения вариаций атмосферного давления стали развиваться физические методы, которые позволяют преобразовать давление воздуха или газа в камере в электрические величины. Электрические методы измерения атмосферного давления можно разделить на две группы: ионизационные и тепловые. Манометры, созданные на основе этих методов, позволяют измерять вариации атмосферного давления с большей точностью [37].

Применение ионизированных и тепловых методов при измерении вариаций атмосферного давления возможно при условии, что в приборе производится дополнительная затрата энергии, которая в последствии рассеивается и поглощается молекулами газа [36, 38]. Ограничение динамического диапазона и собственные шумы электронных преобразователей являются главными недостатками этих приборов. Магнитоэлектроразрядный, ионизационный, газоэлектроразрядный, масс-спектрометрический, теплоэлектрический и термоконвекционный также основываются на применении электрических методов. Они применяются при измерении низких давлений, порядка 150 Па [37].

Дальнейшее развитие барометров привело к созданию деформационных барометров с мембранами, сильфонами и манометрическими трубчатыми пружинами. Данная группа приборов получила самое большое распространение в практической метеорологии [37]. Приборы, где установлены деформационные чувствительные элементы можно разделить на три типа: с использованием

измерения по отклонению чувствительного элемента, с компенсационным силовым методом измерения и с вибротронами. В приборах с использованием измерения по отклонению чувствительного элемента уравнивание вариаций атмосферного давления достигается упругими силами деформационных элементов. В приборах с компенсационным силовым методом измерения измеряется усилие, прилагаемое к удержанию в нулевом положении чувствительного элемента. В приборах с вибротронами измеряется частота колебания струны, возбужденной вариациями атмосферного давления [15]

В НИИГМП был разработан ряд датчиков автоматических, дистанционных устройств и приборов для измерения вариаций атмосферного давления. К отдельным приборам широкой области применения относятся барометры-анероиды М-67 и М-98. К датчикам измерения вариаций атмосферного давления относятся М-36 и М-107, входящие в состав автоматических станций АРМС УАТГМС и станции ГМ-56 [38].

В большинстве барометрах для измерения вариаций атмосферного давления используются анероидные мембраны и коробки. Так в барометрах МД-49-2 и МД-49-А чувствительными элементами являются блоки из анероидных барокоробок из бериллиевой бронзы. А в барометре АБ-53 в качестве чувствительных элементов используются мембраны из бериллиевой бронзы и цепного множительного передаточного механизма. В датчиках атмосферного давления АРМС-Н (М-36) чувствительным элементом является блок из четырех мембранных анероидных коробок, который связан с кодирующим устройством. Этот датчик позволяет проводить измерение атмосферного давления в пределах от 95 000 до 105 000 Па. В датчике АРМС-Н (М-107) чувствительным элементом является блок из восьми мембранных анероидных коробок. Он позволяет измерять атмосферное давление в пределах от 95 000 до 105 000 Па с точностью 50 Па. В датчике атмосферного давления для автоматической станции ГМ-56 чувствительным элементом является блок из двух анероидных коробок диаметром 100 мм. Он позволяет измерять атмосферное давление в пределах от 88 000 до 106 000 Па с точностью 100 Па. В ртутном датчике атмосферного давления М-96 чувствительным элементом

является чаша с ртутью, в котором точность измерения составляет 100 Па [130]. Барометры, которые были созданы и выпущены отечественным производством, позволяли проводить измерения атмосферного давления в пределах от 80 000 Па до 110 000 Па с точностью 50 Па и хуже [14].

В конце XX века основное внимание при создании измерителей атмосферного давления было уделено повышению точности измерений. Повышение точности стало возможным с появлением новых электронных компонентов, позволяющих проводить регистрацию данных с большей частотой. Данное развитие приборов привело к созданию электронных считывающих устройств с ранее созданных барометров и созданию совершенно новых измерителей атмосферного давления. В некоторых случаях точность измерения вариаций атмосферного давления была около 1 Па.

При конструировании устройств для измерения атмосферного давления использовались несколько датчиков давления с электрическими выходами, а регистрирующая аппаратура складывала данные со всех датчиков и выводила среднее значение, что позволило повысить точность в измерениях [121]. В качестве датчиков давления используются поликристаллические пленки из нитрида меди толщиной 1 мкм [120], вакуумированные сильфоны [101]. В некоторых приборах используется совместное применение вакуумированных сильфонов и медных стержней [100], мембран и стержней, размещенных в вакууме [136]. Применение всех этих датчиков позволило существенно расширить диапазон измерений, снизить нижний предел измерения до 10 000 Па, а в некоторых случаях проводить измерения от 1 000 Па.

В настоящее время существует большое количество датчиков, способных измерять атмосферное давление. Их можно разделить на три вида: с механическими, тепловыми и электронными рабочими элементами. Датчики с электронными рабочими элементами на данный момент являются самыми распространенными и дают более точные показания. В конструкцию любого датчика давления входят: преобразователь физической величины с рабочим

элементом, электронная схема обработки и усиления выходного сигнала, защитное покрытие.

В волоконно-оптических датчиках давления в качестве чувствительного элемента используется кварцевая нить, внутри которой пропускается свет. При изменении атмосферного давления нить изменяет свои геометрические размеры, что приводит к изменению свойств светового луча [131]. Изменение геометрических свойств оптоволоконна фиксируется с точностью около 1 нм и затем переводится в показания вариаций атмосферного давления. Применение нескольких таких датчиков с одним регистратором позволяет повысить точность измеренного атмосферного давления. Основными преимуществами таких датчиков являются: не зависит от перепадов температуры окружающей среды, отсутствие воздействия электромагнитных помех, не требует подачи электричества, большой срок службы.

Еще одними датчиками, с похожими характеристика, являются оптоэлектрические. В этих датчиках в качестве чувствительного элемента используется прозрачные многослойные плоскости, которые изменяют свои свойства под действием атмосферного давления. Луч света проходит через чувствительный элемент и попадает на фотодиод, сигнал от которого попадает в регистрирующую часть прибора.

В магнитных датчиках в качестве чувствительного элемента используется мембрана, которая установлена в Е – образной плоскости рядом с индуктивной катушкой. Под воздействием атмосферного давления мембрана прогибается изменяя зазор между плоскостью и тем самым изменяет электромагнитную индукцию катушки, которая и фиксируется прибором [137].

В емкостных датчиках в качестве чувствительного элемента используются конденсаторы. Под действием внешнего давления изменяется емкость конденсатора, а специальная развязка, состоящая из мультивибратора с компаратором, преобразует изменение емкости в выходной сигнал прибора [118]. Устройства с такими датчиками конструируются с одним или несколькими конденсаторами. При использовании одного конденсатора устройство становится

сильно зависимым от воздействия окружающей среды, температуры и влажности. При использовании двух и более конденсаторов точность замеров становится существенно выше.

В ртутных датчиках в качестве чувствительного элемента используется емкость с ртутью как в форме английской буквы U, так и в форме трубки. При первом виде сосуда используется проводник, проходящий через весь сосуд. При изменении атмосферного давления ртуть перемещается по сосуду, тем самым появляется разность сопротивления провода с одной и с другой стороны ветви, эту разность и преобразовывает регистрирующая аппаратура в вариации атмосферного давления. Во втором виде сосуда при изменении атмосферного давления измеряется объем столба ртути в трубке, что и фиксируется прибором.

В пьезоэлектрических датчиках в качестве чувствительного элемента используются мембраны из кристаллических материалов [99]. Под действием давления между его сторонами появляется разность потенциалов, которая и фиксируется прибором. Такие типы датчиков применяются для среды с быстро меняющимся давлением. Если давление будет постоянным, то не будет деформации и пьезоэлектрик не генерирует сигнал.

В пьезорезонансных датчиках в качестве чувствительного элемента используется пластина с закрепленной на ней кристаллом кварца. При воздействии атмосферного давления пластина прогибается и изменяется частота колебаний кристалла, что и фиксируется прибором [129]. Пьезорезонансные датчики получили большую популярность, так как обладают высокой точностью измеряемой величины.

В резистивных датчиках в качестве чувствительного элемента используется пластина с резистором. При воздействии атмосферного давления пластина из полупроводниковой пленки начинает контактировать с электродами проводника, тем самым изменяя сопротивление [28]. Изменение этого сопротивления и фиксируется прибором. Эти датчики являются наименее точными и используются, в основном, в бытовых барометрах.



В большинстве современных метеостанций используются емкостные датчики давления. Эти датчики имеют надежную конструкцию, просты в изготовлении и дают неплохую точность. Так в метеостанциях фирмы Gill применяются емкостные датчики давления, позволяющие проводить измерения атмосферного давления в пределах от 60 000 до 110 000 Па с точностью  $\pm 50$  Па с частотой 1 Гц. В большинстве немецких метеостанций фирмы Lufft применяются емкостные датчики MEMS, они позволяют проводить измерения атмосферного давления в диапазоне от 10 000 до 120 000 Па с точностью  $\pm 30$  Па. В российских метеостанциях фирмы ICVCom также применяются емкостные датчики давления MEMS, позволяющие регистрировать атмосферное давление в диапазоне от 30 000 до 120 000 Па с точностью  $\pm 100$  Па. В китайских метеостанциях фирмы Oregon используются емкостные датчики с более низкими характеристиками, позволяющие проводить измерения атмосферного давления в диапазоне от 70 000 до 105 000 Па с точностью  $\pm 1 000$  Па. Американская метеостанция фирмы Dawis позволяет проводить измерения атмосферного давления в диапазоне от 54 000 до 110 000 Па с точностью  $\pm 70$  Па. Российская метеостанция фирмы Эскаорт позволяет проводить измерения атмосферного давления в диапазоне от 50 000 до 110 000 Па с точностью  $\pm 100$  Па. Немецкие метеостанции фирмы Thies Clima позволяют измерять атмосферное давление в диапазоне от 60 000 до 110 000 Па с точностью  $\pm 50$  Па. Метеостанции фирмы Vaisala, Финляндия, регистрируют атмосферное давление в диапазоне от 60 000 до 110 000 Па с точностью  $\pm 50$  Па.

Основным недостатком датчиков давления является связь динамического диапазона и чувствительности. У датчика с широким рабочим диапазоном низкая чувствительность, порядка 50 – 100 Па. А у датчиков с чувствительностью в десятки мкПа очень ограниченный динамический диапазон. Их применяют, в основном, для измерения давления вакуума. Применение лазерно-интерференционных методов в приборах, предназначенных для измерения атмосферного давления, позволило исключить этот недостаток и получить измерение вариаций атмосферного давления в широком динамическом диапазоне с точностью 50 мкПа. Данный прибор разработан и создан для изучения природы

вариаций атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с высокой точностью. В качестве чувствительного элемента в лазерном нанобарографе используется блок анероидных коробок, применяемый в обычных стрелочных барометрических приборах. Блок анероидных коробок обладает следующими характеристиками: материал коробки – бериллиевая бронза БрБ2; диаметр коробки –  $d_k = 50$  мм; диаметр жесткого центра –  $d_c = 10$  мм; толщина материала коробки –  $\delta k = 0.1$  мм; тип гофра – пильчатый; высота гофра  $H = 1$  мм; длина волны гофра  $l = 7$  мм; угол наклона гофра  $\theta = 20^\circ$ ; количество коробок в измерительном блоке – 4 шт.

Оптико-механическая блок схема лазерного нанобарографа [59] представлена на рисунке 1.23, которая создана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона равноплечего типа с длинами измерительного и эталонного плеч по 20 см. Из рисунка видно, что луч лазера (1) попадает на коллиматор (2), который его стабилизирует по диаметру, затем он попадает на плоско-параллельную пластину ПИ-100 (3), на которой он делится на две части – измерительную и эталонную. Эталонная часть луча проходит между пластиной ПИ-100 и зеркалами, закрепленными на пьезокерамических цилиндрах (7, 8), и затем попадает на фотодиод ФД24К (5). Измерительная часть луча проходит между пластиной ПИ-100 и системой «кошкин глаз» и затем попадает на фотодиод ФД24К. Система «кошкин глаз» состоит из собирающей линзы и блока анероидных коробок с зеркальным напылением, причем расстояние от линзы до анероидных коробок равно фокусному расстоянию линзы. Размещение элементов лазерного нанобарографа на оптической скамье представлено на рисунке 1.24.

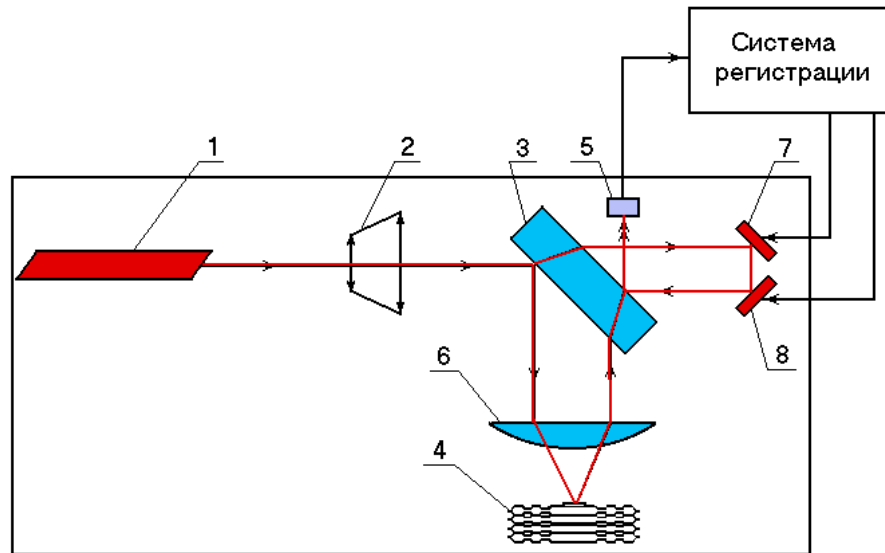


Рисунок 1.23 – Оптико-механическая блок схема лазерного нанобарографа. 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – плоско-параллельная пластина ПИ-100, 4 – блок анероидных коробок, 5 – фотодиод, 6 – линза, 7 и 8 – юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах.

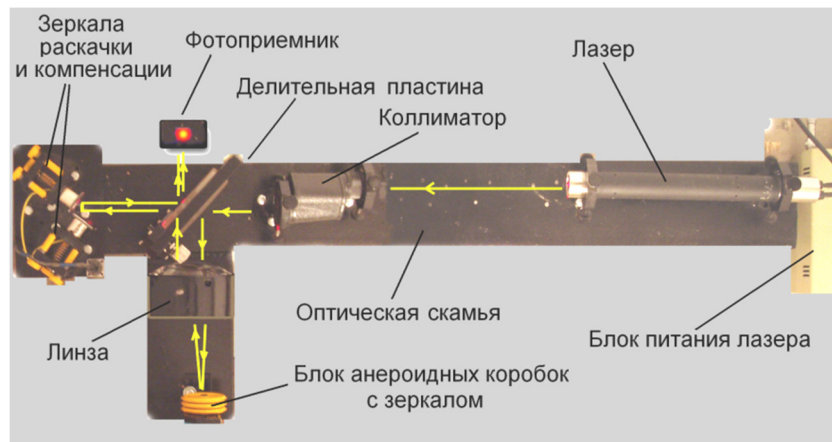


Рисунок 1.24 – Размещение элементов лазерного нанобарографа на оптической скамье.

На фотодиоде лучи сбиваются в точку образуя интерференционную картину, изменение этой картины и фиксируется системой регистрации посредством фотодиода. Далее интерференционная картина настраивается на «пятно-минимум» или «пятно-максимум» в зависимости от выбранных способов работы системы регистрации лазерного нанобарографа. Посредством обратной связи, выведенной на одну из пьезокерамик, интерференционная картина поддерживается неизменной

на фотодиоде. Величина сигнала подстройки пропорциональна изменению оптической разности хода в плечах интерферометра. При достижении величины сигнала подстройки, соответствующей изменению оптической разности хода в плечах интерферометра равного  $\lambda/2$  ( $\lambda$  - длина волны лазера), ключи системы регистрации замыкаются и интерференционная картина с одного экстремума скачком переходит на один из двух соседних, связанных с увеличением или уменьшением измерительного плеча интерферометра.

В качестве источника света в лазерном нанобарографе используется частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер фирмы Melles Griot, который имеет долговременную стабильность лазерного излучения  $10^{-9}$ , что позволяет проводить измерения  $\Delta l$  с точностью до  $10^{-10}$  м.

Для оценки чувствительности интерференционного измерителя атмосферного давления необходимо рассчитать перемещения незакрепленного конца блока анероидных коробок под действием изменений атмосферного давления. Следует рассчитать прогиб одиночной мембраны с заданными параметрами. Перемещение незакрепленного конца блока будет в 8 раз больше. Для расчета прогиба мембраны можно воспользоваться методикой, приведенной в [7]. Прогиб мембраны и перепад давления на мембране связаны соотношением

$$\frac{pR^4}{Eh^4} = a \frac{\omega_0}{h} + b \frac{\omega_0^3}{h^2} \quad (1.10)$$

Здесь  $p$  – перепад давления на мембране,  $R$  – радиус анероидной коробки,  $E$  – модуль упругости материала коробки,  $h$  – толщина материала мембраны,  $\omega_0$  – прогиб мембраны под действием перепада давления,  $a$  и  $b$  – вспомогательные коэффициенты, определяемые в зависимости от параметров гофрировки. В нашем частном случае  $a=35$  и  $b=0.032$ , и выражение (1.10) приобретает вид:

$$p = 0.012\omega_0 + 0.0011\omega_0^3 \quad (1.11)$$

Здесь давление задано в МПа, прогиб мембраны в мм.

Имеющаяся система регистрации позволяет измерять перемещения с точностью не хуже  $10^{-3}$  от величины  $\lambda/2$ , для имеющегося источника когерентного

излучения это составляет  $0.315 \cdot 10^{-10}$  м. При этом могут быть измерены перепады давления порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  Па [62].

Тарировка нанобарографа производилась путем сравнения данных, полученных с помощью нанобарографа с данными, полученными путем регистрации атмосферного давления с помощью anerоидного барометра в течение всего времени наблюдения с дискретностью 1 – 2 часа и последующего осреднения полученных величин. В результате тарировки установлено, что передаточный коэффициент нанобарографа составляет 0.6 В/Па.

В описываемом измерителе давления возможно возникновение ряда погрешностей, связанных с изменением температуры окружающей среды. Основные причины этих погрешностей следующие:

- а) изменение модуля упругости материала, из которого сделан чувствительный элемент;
- б) линейное расширение деталей оптической скамьи при изменении температуры;
- в) изменение давления воздуха внутри anerоидной коробки при изменении температуры.

Погрешности по пунктам а) и в) кроме температуры зависят от остаточного давления внутри коробки, которое, по возможности, всегда стремятся иметь как можно меньше. В нашем случае остаточное давление  $p_{\text{ост}} = 120$  Па. При этом осредненный перепад на мембране составит  $p = 1 \cdot 10^5$  Па. Абсолютное значение температурной погрешности, вызванное изменением модуля упругости, равно

$$\Delta p_E = -\lambda p \Delta t \quad (1.12)$$

где  $\lambda_E$  – температурный коэффициент модуля упругости,  $p$  – перепад давлений,  $\Delta t$  – изменение температуры. Для коробки, выполненной из бериллиевой бронзы ( $\lambda_E = -3 \cdot 10^{-4}$ ) относительная температурная погрешность, обусловленная изменением модуля упругости, составит 0.03% на каждый градус изменения температуры.

В силу изменения давления воздуха, находящегося внутри anerоидной коробки, под действием изменения температуры окружающей среды возникает погрешность определения давления:

$$\Delta p_p = -\frac{p_{\text{ост}}}{273} \Delta t \quad (1.13)$$

После подстановки соответствующих числовых величин можно видеть, что данная погрешность составит 0.0004% на каждый градус изменения температуры.

Погрешность, обусловленная линейным расширением деталей оптической скамьи, связана с изменением разности хода, возникающем между опорным и измерительным лучами. При стальном корпусе оптической скамьи это вызывает появление дополнительной разности хода, вызванной изменением температуры:

$$\Delta l = l_0(1 + \alpha \Delta t) \quad (1.14)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения материала скамьи, равный  $1.1 \cdot 10^{-5}$ . При этом появится погрешность в определении давления 0.0002% на каждый градус изменения температуры.

Очевидно, что погрешностями от остаточного давления и температурного расширения оптической скамьи по сравнению с температурной погрешностью модуля упругости материала коробки можно пренебречь и считать, что имеется погрешность определения давления, равная 0.03% на каждый градус изменения температуры. Для интервалов наблюдения продолжительностью 30 суток изменения температуры в помещении, где располагался нанобарограф, составляли (в самом худшем случае) величину порядка 0.1°C. При этом для нормального атмосферного давления абсолютная погрешность измерения давления составит величину порядка 3 Па, что значительно превышает чувствительность прибора. Отсюда следует, что для полной реализации возможностей нанобарографа желательно осуществлять мероприятия по температурной стабилизации в помещении, где установлен прибор. Кроме того, необходимо синхронно измерять температуру в этом помещении с целью введения поправок в измеренное значение давления. За счет применения anerоидных коробок из элинвара, температурный

коэффициент модуля упругости которого близок к нулю, можно вообще избавиться от соответствующей температурной погрешности.

Суточные вариации температуры в гидротермоизолированном помещении, в котором расположен лазерный нанобарограф, более чем на порядок меньше тридцати суточных вариаций. А вариации температуры в несколько секунд и минут еще меньше на 1 – 2 порядка. С учетом этого ошибка измерения в высокочастотном и сверхнизкочастотном диапазонах из-за температурных флуктуаций составит величину 0.03-0.003 Па.

Рассмотрим ошибки, вносимые в измерения вариаций атмосферного давления сейсмоакустическими шумами, которые могут изменять оптическую разность хода в плечах интерферометра.

Для интерферометра равноплечевого типа соотношение, связывающее величину зарегистрированной амплитуды  $A$  с истинной амплитудой  $A_0$  гармонического сигнала, определяется следующим образом:

$$A = 4A_0 \cos\left(\frac{2\pi(L-x)}{\lambda_y}\right) \sin^2\left(\frac{\pi L}{\lambda_y}\right) \quad (1.15)$$

где:  $L$  – длина «плеча» интерферометра (20 см),  $x$  – координата,  $\lambda_y$  – длина волны, распространяющейся в упругой среде. При анализе данного выражения следует, что измеренная амплитуда очень сильно падает при возрастании  $\lambda_y$  в случае  $\lambda_y \gg L$ . Конечно, берется случай равного смещения в обоих плечах интерферометра при прохождении сейсмоакустических волн (сейсмоакустического шума). В случае, когда упругая волна вызывает смещение только в одном из плеч интерферометра, то для оценки принятой амплитуды можно пользоваться выражением для интерферометра неравноплечевого типа:

$$A = 2A_0 \sin\left(\frac{2\pi(L-x)}{\lambda_y}\right) \sin\left(\frac{2\pi L}{\lambda_y}\right) \quad (1.16)$$

При этом происходит уменьшение принятой амплитуды при возрастании  $\lambda_y$ , но не так быстро, как в случае действия выражения (1.16). В любом случае по мере роста  $\lambda_y$  (увеличение периода волны) происходит значительное уменьшение амплитуды зарегистрированной волны. Граничное значение периода  $\left(\frac{2\pi L}{\lambda_y} = \frac{\pi}{6}\right)$  при

скорости упругих волн  $C_y = 3000$  м/с находится на частоте 125 Гц. В этом случае  $A = A_0$ . Далее по мере роста периода волны происходит уменьшение  $A$ .

Оценку воздействия фонового сейсмоакустического шума (или упругих колебаний и волн) в рабочей полосе установки на величину зарегистрированного сигнала можно сделать только после проведения синхронных измерений на лазерном деформографе и лазерном нанобарографе. Интерференционный узел лазерного деформографа и лазерного нанобарографа располагались в одном и том же помещении. Как будет показано далее, в высокочастотной области принимаемых сигналов  $T < 100$  с практически не наблюдается совпадений за исключением отдельных выбросов, что указывает на то, что воздействие упругих колебаний и волн на измеренную величину  $\Delta l$  ничтожно, по сравнению с реакцией anerоидной коробки на вариации атмосферного давления. Необходимо заметить, что оптическая скамья лазерно-интерференционного нанобарографа находилась на резиновых шариках диаметром 5 см, что обеспечивало дополнительную развязку от сейсмоакустического шума.

В месте расположения лазерного нанобарографа ранее проводились измерения вариаций уровня микросмещений земной коры в широком частотном диапазоне. Уровень фоновых колебаний микросейсмического шума в частотном диапазоне при  $f > 1$  Гц составляет в среднем  $10^{-10}$  м (если не брать во внимание резонансные частоты сооружения «лазерный деформограф» и т.п.) на базе прибора неравноплечего типа длиной 52.5 м. В случае, если данные сейсмоакустические шумы влияют только на одно плечо нанобарографа, то они выдают изменение оптической разности хода в нем, равное  $\frac{0.2}{52.5} \cdot 10^{-10}$  м  $\approx 3 \cdot 10^{-12}$  м, что на порядок больше точности измерений изменения оптической разности хода лучей в плечах интерферометра нанобарографа применяемыми методами интерферометрии.

В другом крайнем случае, когда данные сейсмоакустические шумы вызывают одинаковые смещения в обоих плечах интерферометра, измеренное изменение оптической разности хода, вызванное данными сейсмоакустическими шумами, будет равно  $\frac{0.01}{52.5} \cdot 10^{-10}$  м  $\approx 2 \cdot 10^{-14}$  м, что находится за пределами



чувствительности применяемых методов интерферометрии. Из вышеприведенных оценок следует, что фоновые сейсмоакустические шумы не влияют на измеряемые параметры вариаций атмосферного давления лазерного нанобарографом.

Для проверки данных расчетов были проведены одновременные измерения вариаций уровня сейсмоакустического шума и атмосферного давления в одном помещении. Измерение изменения уровня микродеформаций земной коры проводилось 52.5-метровым лазерным деформографом неравноплечего типа, а измерение вариаций атмосферного давления осуществлялось лазерным нанобарографом. Лазерный нанобарограф располагался в подземном гидротермоизолированном помещении интерференционного узла лазерного деформографа. Проводились длительные измерения вариаций уровня микродеформаций земной коры и атмосферного давления в широком диапазоне частот с предварительной обработкой данных (фильтрация и децимация) в режиме реального времени с записью данных на жесткий диск компьютера с частотой дискретизации равной 62.5 Гц. Затем данные перезаписывались на лазерные диски с последующей организацией банка данных. Частые отключения света не позволили получить длительные ряды записей. Максимальная длительность непрерывной записи составила примерно три недели. Полученные данные позволили проанализировать вариации уровня микродеформаций земной коры и атмосферного давления по синхронным записям лазерного деформографа и лазерного нанобарографа в частотном диапазоне от суточного прилива и их гармоник до 31.75 Гц. В записях деформографа и нанобарографа высокочастотного диапазона в периоды отсутствия сейсмоакустического шума высокого уровня не обнаружено совпадающих максимумов в спектрах мощности, полученных при обработке синхронных участков в записи. Так на рисунке 1.25 приведены спектры, полученные при обработке синхронных участков записи лазерного деформографа (верхний) и лазерно-интерференционного нанобарографа (нижний).

Выделенные максимумы на записях лазерного деформографа и лазерного нанобарографа не совпадают, что указывает на разный их первоисточник. Все выделенные максимумы, по-видимому, связаны с собственными шумами

установок «лазерный деформограф» и «лазерный нанобарограф». Из данной экспериментальной проверки следует, что фоновые сейсмоакустические шумы высокочастотного диапазона ( $1 \text{ Гц} < f < 31.75 \text{ Гц}$ ), регистрируемые лазерным деформографом, не влияют на характер записи лазерно-интерференционного нанобарографа.

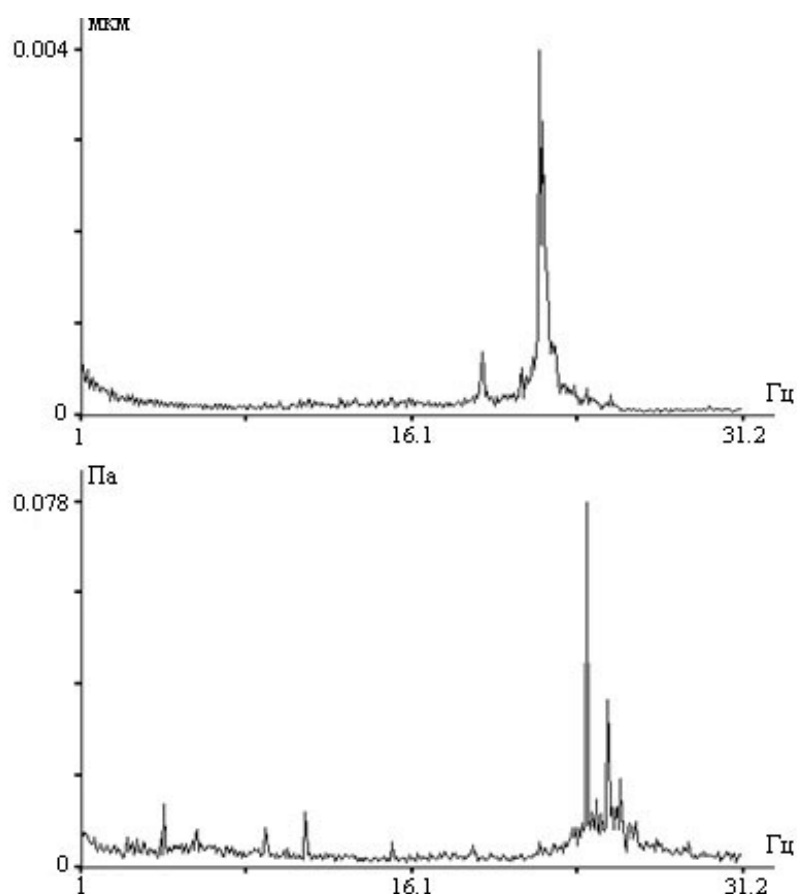


Рисунок 1.25 – Спектры, полученные при обработке синхронных участков записи лазерного деформографа (верхний) и лазерного нанобарографа (нижний)

Таким образом, теоретически установлено, что точность измерения вариаций атмосферного давления, ограниченная, в основном, изменением температуры, равна  $0.00003 \text{ Па}$ , что значительно ниже точности измерений, определяемой применяемыми методами интерферометрии. Учет влияния температуры на измеряемые параметры или создание большей температурной стабилизации помещения, где находится лазерно-интерференционный нанобарограф, позволит поднять точность измерения вариаций атмосферного давления до предельной.

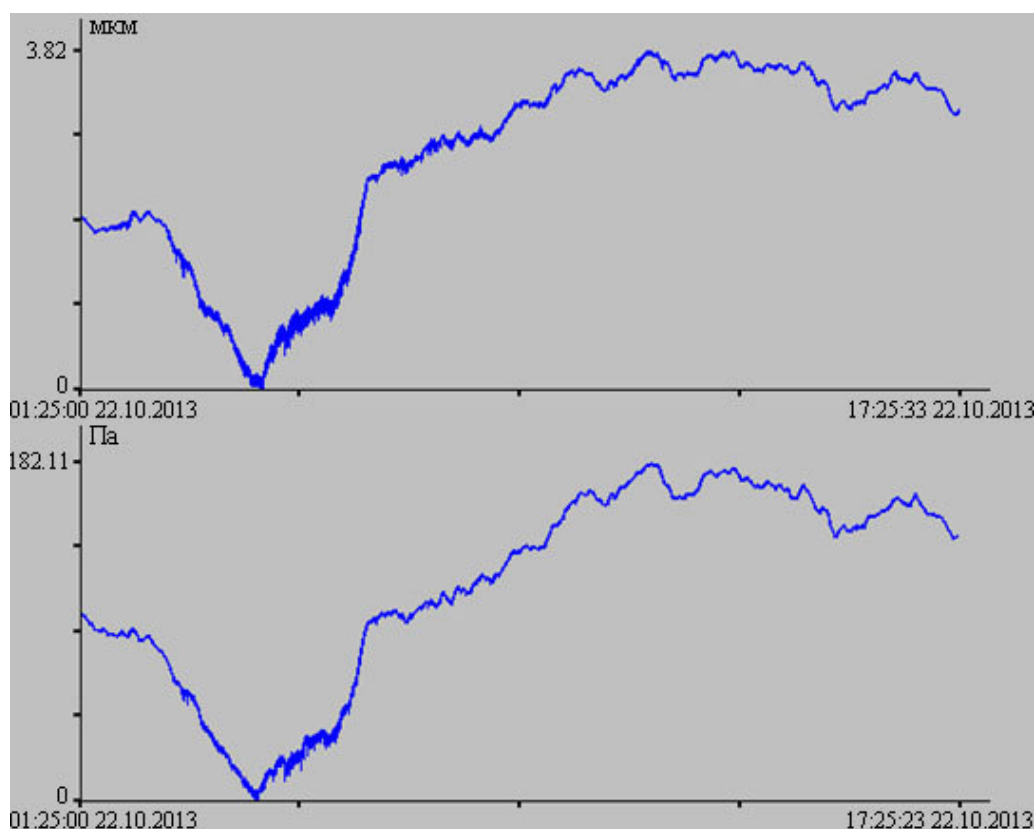


Рисунок 1.26 – Пример записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного нанобарографа (нижний).

На рисунке 1.26 приведен пример записи лазерного деформографа (верхний график) и лазерного нанобарографа (нижний график). Данный участок записи был получен путем сшивания часовых файлов сделанных с частотой 500 Гц с последующей их фильтрацией и децимацией. Из графиков видно, что поведение приборов очень похоже, то есть в данном случае основное влияние на микродеформации земной коры оказывают вариации атмосферного давления [181].

### 1.3 ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ВАРИАЦИЙ ГИДРОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Для измерения вариаций гидросферного давления в звуковом и инфразвуковом диапазонах применяются автоматические установки и комплексы, в основу которых положены поплавковые, радарные, гидростатические, кабельные,

бесконтактные методы исследования. Гибридные методы позволяют проводить измерения в более широком диапазоне частот. Особенное место в исследованиях занимают установки, созданные с применением нескольких гидрофонов с различными характеристиками, что позволяет расширить частотный диапазон измерений. Необходимость измерений в широком частотном диапазоне, практически от 0 Гц до 10 000 кГц, и требования к наличию большого динамического диапазона, привели к созданию в океанологии большого множества приборов, работающих в разных частотных диапазонах. Весь диапазон частот можно разделить на инфразвуковой и звуковой. В звуковом диапазоне основными измерительными приборами являются гидрофоны, а в области инфразвука используются, в основном, измерители уровня, мареографы и др.

Первые гидрофоны стали применяться в гидроакустике с конца XIX века. В современной гидроакустике гидрофон перекрывает весь звуковой диапазон и верхнюю часть инфразвукового диапазона и является основным измерительным прибором. Гидрофон – это электроакустический преобразователь, хорошо известный в океанологии. Широко распространены три типа гидрофонов, созданных на пьезоэлектрическом, электродинамическом и магнитострикционном эффектах [142, 96, 143]. Чувствительным элементом пьезоэлектрических гидрофонов является пакеты прямоугольной или цилиндрической формы, изготовленные из кристаллов кварца, сульфата лития, сегнетовой соли, дигидрофосфата аммония и др. Вариации давления гидросферы вызывают деформацию кристаллов, которая в свою очередь приводит к появлению переменных поверхностных электрических зарядов. Чувствительным элементом электродинамических гидрофонов является тонкая мембрана. Принцип работы таких гидрофонов идентичен электродинамическим микрофонам. Чувствительным элементом магнитострикционных гидрофонов является катушка, изготовленная из ферромагнитных металлов. Вариации давления гидросферы вызывают деформации, которые приводят к появлению переменной магнитной индукции в магнитопроводе и к переменной ЭДС на обмотке.

На данный момент, на рынке представлены гидрофоны нескольких фирм, лидерами среди них являются фирмы Brüel&Kjær и RESON. Гидрофоны этих компаний хорошо зарекомендовали себя в научных исследованиях, обладают наилучшими техническими характеристиками и высококачественные. Гидрофоны фирмы Brüel&Kjær, представленные на рисунке 1.7, имеют очень хорошие характеристики направленности и ровные АЧХ на всех указанных для них диапазонах частот [102]. Они представляют собой индивидуально калиброванные измерительные преобразователи звука, имеющие плоский частотный отклик и всенаправленные в широком частотном диапазоне. Гидрофоны типа 8103, 8104, 8105, 8106 работают в частотном диапазоне от 0.1 Гц до 180 кГц с чувствительностью  $-173$  дБ на 1 В/мкПа. Так малоразмерный высокочувствительный гидрофон типа 8103 способен измерять абсолютный шум в частотном диапазоне от 0.1 Гц до 180 кГц с чувствительностью приема  $-211$  дБ на 1 В/мкПа. Широкодиапазонный стандартный гидрофон типа 8104 способен измерять абсолютный шум в частотном диапазоне от 0.1 Гц до 120 кГц с чувствительностью приема  $-205$  дБ на 1 В/мкПа. Малоразмерный сферический гидрофон типа 8105 способен измерять абсолютный шум в частотном диапазоне от 0.1 Гц до 160 кГц с чувствительностью приема  $-205$  дБ на 1 В/мкПа. Широкодиапазонный гидрофон типа 8106 способен измерять абсолютный шум в частотном диапазоне от 7 Гц до 80 кГц с чувствительностью приема  $-173$  дБ на 1 В/мкПа. Данные гидрофоны являются лидерами среди измерительных устройств в гидроакустике, но, не смотря на все свои преимущества, они малоэффективны в области инфразвука.

Для измерения вариаций давления гидросферы используются приборы, созданные на основе датчиков измерения гидростатического давления [107, 138]. Датчики гидростатического давления, по большей части, идентичны датчикам для измерения атмосферного давления с похожими принципами действия. Они бывают магнитные, индуктивные, емкостные, пьезоэлектрические, пьезорезонансные и резистивные. Основное отличие датчиков заключается в конструкции их герметичного корпуса.

В резистивных датчиках в качестве чувствительного элемента используется пластина с тензорезистором. Для измерения давления гидросферы тензорезистор устанавливается на мембрану. Под действием давления гидросферы мембрана прогибается тем самым придавливая пластину из полупроводниковой пленки и она начинает контактировать с электродами проводника и изменяет сопротивление. Изменение сопротивления фиксируется прибором и преобразуется в вариации давления гидросферы.



Рисунок 1.27 – Внешний вид гидрофонов фирмы Brüel&Kjaer.

Пьезорезонансные и резистивные датчики наиболее часто используются в гидростатических измерителях уровня и гидрологических зондах. Совместно с датчиками давления в зондах применяются датчики температуры, солености, скорости звука и др. Например, приборы английской компании Valeport могут комплектоваться как пьезорезонансным, так и резистивным датчиком. При использовании пьезорезонансного датчика давления диапазон измерений до 100 дБар с точностью  $\pm 0.01\%$ , а при использовании резистивного датчика диапазон измерений до 50 дБар с точностью  $\pm 0.04\%$ . Точность измерений зависит от динамического диапазона, чем он больше, тем меньше точность измерений [209].

В последние годы широкое распространение получили волнографы и мареографы. В их конструкцию входят один и более гидростатических датчиков. Мареографы существуют прибрежные и открытого моря. В пунктах постоянного наблюдения используются прибрежные мареографы, их принцип действия основан на измерении гидростатического давления столба жидкости. Имеется несколько типов данных приборов: автономные, кабельные, открытого моря. Автономные мареографы измеряют вариации давления гидросферы на протяжении нескольких месяцев, затем их поднимают и считывают данные. Такие мареографы обычно используются на временных пунктах наблюдения. Кабельные мареографы передают непрерывные данные по кабельным линиям. Они применяются на береговых постоянных пунктах наблюдения. Мареографы открытого моря находятся на дне в состоянии ожидания и при изменении давления гидросферы на заданную величину изменяют режим работы и передают сигнал на береговой пост наблюдения. На последних основана система раннего предупреждения цунами. Система раннего предупреждения цунами состоит из донного датчика и поверхностного буйа. В рабочем режиме данные с датчика передаются с периодом 10 – 15 мин, что существенно экономит заряд батареи. В режиме события или цунами период измерений резко меняется и данные с датчика передаются с периодом 1 – 10 с. Донный датчик измеряет давления столба воды с точностью 0.5 мм. Для более точного измерения давления гидросферы в донных датчиках устанавливаются измерители температуры воды. Вариации температуры вычитаются из колебаний давления гидросферы, что делает измерения более точными [195, 144]. Широко известна система раннего предупреждения о цунами DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) [220, 214]. Свое широкое распространение она получила после разрушительного землетрясения в Индийском океане 2004 года. Принцип работы данной системы аналогичен принципу работы отечественной системы раннего предупреждения.

На рынке измерителей уровня моря представлено большое количество приборов, позволяющих получать данные гидростатического давления. Лидерами среди фирм представленных на рынке по своим характеристикам являются

AANDERAA, SAIV A/S и Valeport. Наиболее распространенными измерителями уровня моря фирмы Valeport являются самописцы уровня моря Midas WLR, TideMaster. Самописец Midas WLR выпускается в ацетиленовом и титановом корпусах, позволяет проводить измерения как в реальном времени, так и в автономном режиме. Дополнительно прибор комплектуется датчиком температуры, показания которого, после предварительной обработки вычитаются из данных гидростатического давления. Диапазон измерения гидростатического давления 300 или 600 бар, разрешение 0.001%, точность  $\pm 0.01\%$  с частотой от 1 до 8 Гц. Самописец уровня моря TideMaster выпускается в корпусе из нержавеющей стали, позволяет проводить как краткосрочные, так и длительные наблюдения. Самописец оборудован тензометрическим датчиком давления и датчиком температуры. Дополнительно к прибору могут быть подключены датчик скорости и направления ветра. Как и самописец, описанный выше, данный прибор может работать в автономном режиме. Использование режима низкого энергопотребления позволяет проводить измерения уровня моря с частотой 1 Гц около года. В режиме непрерывной передачи данных датчик и блок управления соединены кабелем, и данные поступают в реальном времени. Диапазон глубин данного самописца стандартно 10 дбар, точность измерения  $\pm 0.1\%$  от измеряемого диапазона. Запись ведется с частотой от 1 до 8 Гц [227].

Самописец уровня моря SAIV TD301R выпускается в корпусе из нержавеющей стали. Совместно с датчиком давления в прибор встроен датчик измерения температуры. Использование воздушного канала внутри кабеля, соединяющего датчик с передающим устройством, позволяет измерять абсолютное давление с высокой точностью в широком температурном диапазоне. Диапазон глубин самописца 10, 20, 50 и 100 м, разрешение 0.001 дбар, точность  $\pm 0.01\%$  от измеряемого диапазона, диапазон измерения температуры от  $-2$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  с точностью  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ . Время измерения данных задается в интервале от 2 до 240 с [217].

Мареограф открытого моря TD304 выпускается в корпусе из нержавеющей стали. Прибор оснащен тензометрическим датчиком давления и датчиком



температуры, дополнительно к нему можно подключить датчики растворенного кислорода, мутности и флуоресценции. Мареограф оснащен памятью большой емкости и позволят проводить измерения длительное время. Диапазон измерения давления 10, 20, 50 и 100 м с разрешением 0.0001 дбар и точностью  $\pm 0,01\%$  от измеряемого диапазона. Температура воды измеряется в диапазоне от -2 до +40°C с точностью  $\pm 0,001^\circ\text{C}$ .

Фирмой AANDERAA выпускается гидростатический датчик давления в титановом корпусе. Данный датчик разработан для разного вида использования, как отдельный инструмент, и как для установки на платформу AADI SEAGUARD или гидрометеорологическую станцию AWS2700. Совместно с тензометрическим датчиком давления в него встроен термистор для измерения температуры воды. Диапазон измерения датчика очень широкий, от 5 м до 6 км, разрешение 0.0001% от диапазона, а точность  $\pm 0.02\%$  от диапазона, интервал измерений от 1 с до 255 мин. Фирмой AANDERAA на рынке представлено несколько резистивных датчиков давления с похожими характеристиками серии 3791 – 3798, предназначенные для оснащения метеостанций, гидрологических платформ и других станций этой фирмы. Они работают в диапазоне до 10 м и позволяют проводить измерения с точностью  $\pm 0.1\%$  от диапазона [154].

Самописцы уровня моря и мареографы широко используются для наблюдения за уровнем моря по всему миру. Данные с этих приборов используются для оценки высот изменения уровня мирового океана, приливного уровня, штормовых нагонов, внутренних волн, волн убийц, цунами как для отдельных регионов, так и в глобальных масштабах. Так для измерения приливного уровня и штормовых нагонов использовались данные 12 самописцев, расположенных у берегов Камчатки и Курильских островов [148]. Оцениваются данные мареографов после появления волн цунами, особый интерес вызывают крупные цунами, например, в декабре 2004 года в индийском океане [207]. На основе экспериментальных данных мареографов и математического моделирования рассчитываются и прогнозируются сезонные изменения уровня мирового океана [231, 212]. Многолетние записи уровня моря позволяют найти новые закономерности в

периодически проявляющихся событиях различных регионов [218]. А совместное применение данных мареографов и GPS данных позволило проводить более точную оценку изменения уровня моря в некоторых морях и акваториях [168].

### 1.3.1 ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОСФЕРЫ И ЕГО МОДИФИКАЦИИ

В состав лазерно-интерференционного комплекса «м. Шульца» и лазерно-интерференционного комплекса «м. Свободный» входят приборы, позволяющие регистрировать вариации гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью в несколько десятков микропаскаль. Все эти приборы созданы на основе применения современных лазерно-интерференционных методов с использованием в качестве источника света частотно-стабилизированных лазеров. Это лазерные измерители вариаций давления гидросферы и мобильный лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, где в качестве источников света используются частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры со следующими характеристиками: длина волны 633 нм, максимальная мощность излучения 1.4 мВ, нестабильность частоты излучения за 8 часов  $10^{-8}$ . Так же к приборам регистрации вариаций давления гидросферы относятся лазерные гидрофоны, где в качестве источника света применяются частотно-стабилизированные полупроводниковые лазеры со следующими характеристиками: длина волны излучения 532 нм, выходная мощность 11 мВт, диаметр луча на выходе 1.1 мм, долговременная стабильность < 2% за 8 ч. Оптическая часть всех приборов собрана по оптической схеме модифицированного интерферометра Майкельсона.

Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы применяется при регистрации вариаций давления толщи воды в месте его постановки, где глубина может составлять до 500 м. Оптическая схема прибора приведена на рисунке 1.28, которая очень походит на оптическую схему лазерного нанобарографа, но вместе с тем она имеет свои характерные особенности [170].

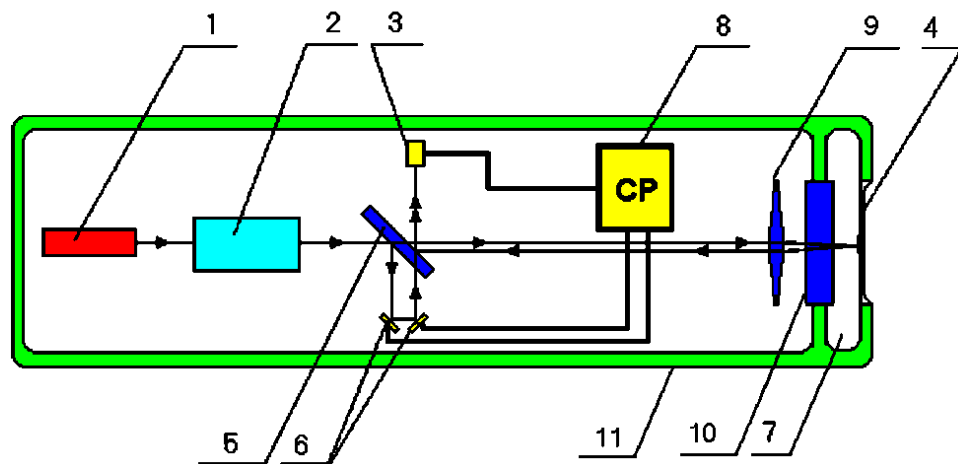


Рисунок 1.28 – Оптическая схема лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. 1 – лазер, 2 – оптический затвор и коллиматор, 3 – фотодиод, 4 – мембрана с наклеенным зеркалом, 5 – полупрозрачная плоскопараллельная пластина ПИ-100, 6 – плоскопараллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, 7 – компенсационная камера, 8 – система регистрации, 9 – линза, 10 – плоскопараллельная пластина, 11 – герметичный корпус прибора

Луч частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера (1) проходит через коллиматор и оптический затвор (2) и попадает на полупрозрачную плоскопараллельную пластину, разделяясь при этом на две части: измерительную и эталонную. Поскольку данный прибор имеет очень ограниченные по габаритам размеры, то пришлось изменить привычную схему. Здесь луч, отразившийся от пластины (5), выполняет роль эталонного, а прошедший ее насквозь роль измерительного, а не наоборот. Это не меняет сути измерительной системы, но упрощает габаритные проблемы по размещению прибора внутри корпуса. Далее измерительный луч попадает в отражающую систему «глаз кошки», такую же, как в лазерном нанобарографе. То есть луч попадает на линзу (9), которая фокусирует его на зеркале (4), приклеенном на плоскую мембрану (есть также вариант полировки мембраны до зеркального состояния, в этом случае зеркало отсутствует и фокусировка производится прямо на поверхности мембраны), которая обратной

своей стороной непосредственно контактирует с морской водой, передающей ей давление на измеряемой глубине, а также его колебания, которые мы называем вариациями давления гидросферы. Отразившись от зеркала на мембране, луч вновь попадает на линзу, которая посылает его на плоскопараллельную пластину, где он сбивается с эталонным лучом, который идет от пластины через юстировочные зеркала, закрепленные на пьезокерамических цилиндрах раскачки и компенсации, и возвращается обратно. При точной и правильной настройке они образуют интерференционную картину, которая попадает на фотодиод (3). Изменение этой интерференционной картины считывает цифровая система регистрации и по кабельной линии передает на аналого-цифровой преобразователь, подключенный к компьютеру.

На рисунке 1.29 представлено внутренне расположение элементов лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, который может быть оборудован дополнительными датчиками: датчиками температуры, гидрофоном. Сверху на прибор одевается герметичный цилиндрический корпус из нержавеющей стали, который крепится к крышке прибора болтами, применение резинового кольца в месте соединения обеспечивает герметичное соединение [66].

Чувствительным элементом прибора является круглая мембрана, закрепленная на краях. С одной стороны мембрана контактирует с водой, а с другой стороны с оптической частью лазерного интерферометра. Под действием вариаций давления гидросферы центр мембраны смещается, что фиксируется лазерным интерферометром, установленным внутри прибора. Для повышения чувствительности прибора используются мембраны малой толщины (менее 1мм). В связи с тем, что мембрана имеет максимальную чувствительность при малых прогибах в конструкции прибора предусмотрена компенсационная камера. Это небольшой объем, заполняемый воздухом и ограниченный с одной стороны мембраной, а с другой стороны плоскопараллельной пластиной, отделяющей камеру от остального прибора. Для выравнивания давления внутри камеры с давлением окружающей среды в приборе предусмотрена система патрубков и шлангов, которая через электромагнитный клапан соединяется с резиновой

емкостью с воздухом, расположенной с внешней стороны прибора. Система компенсации работает следующим образом: при погружении прибора открывается электромагнитный клапан и под действием внешнего давления воздух начинает поступать в камеру. При достижении прибором рабочей глубины клапан закрывается и прибор готов к работе [152].

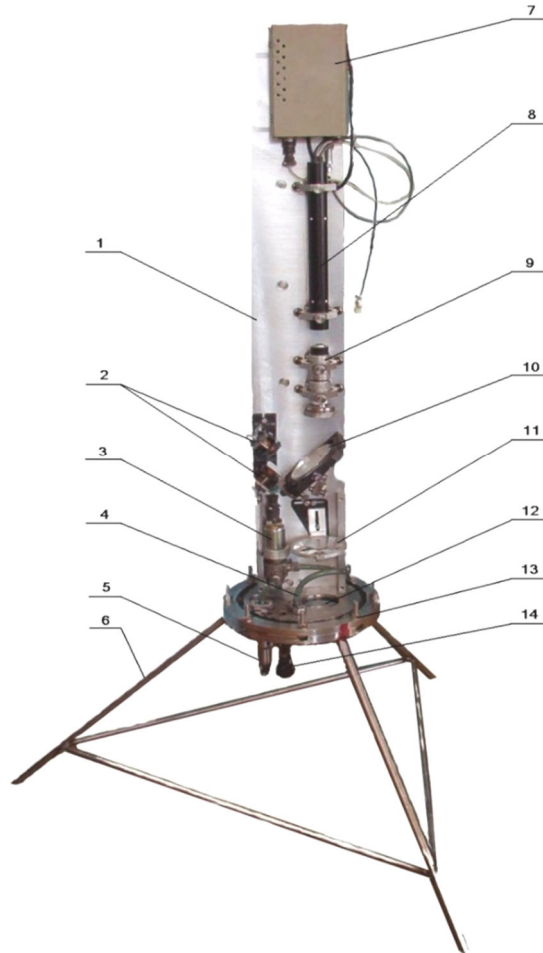


Рисунок 1.29 – Внутреннее расположение элементов лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. 1 – оптическая скамья; 2 – подвижные юстировочные зеркала интерферометра; 3 – клапан системы компенсации наружного давления; 4 – воздушные шланги; 5 – гермоввод; 6 – опорное устройство; 7 – блок питания лазера, 8 – лазер; 9 – коллиматор; 10 – делительная пластина; 11 – линза; 12 – измерительная мембрана с отражающим покрытием; 13 – крепежные болты для установки герметичного корпуса; 14 – контрольный гидрофон

Чувствительным элементом прибора является круглая мембрана, закрепленная на краях. С одной стороны мембрана контактирует с водой, а с другой стороны с оптической частью лазерного интерферометра. Под действием вариаций давления гидросферы центр мембраны смещается, что фиксируется лазерным интерферометром, установленным внутри прибора. Для повышения чувствительности прибора используются мембраны малой толщины (менее 1 мм). В связи с тем, что мембрана имеет максимальную чувствительность при малых прогибах в конструкции прибора предусмотрена компенсационная камера. Это небольшой объем, заполняемый воздухом и ограниченный с одной стороны мембраной, а с другой стороны плоскопараллельной пластиной, отделяющей камеру от остального прибора. Для выравнивания давления внутри камеры с давлением окружающей среды в приборе предусмотрена система патрубков и шлангов, которая через электромагнитный клапан соединяется с резиновой емкостью с воздухом, расположенной с внешней стороны прибора. Система компенсации работает следующим образом: при погружении прибора открывается электромагнитный клапан и под действием внешнего давления воздух начинает поступать в камеру. При достижении прибором рабочей глубины клапан закрывается и прибор готов к работе [152].

Для расчета величины вариаций давления, регистрируемых лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, воспользуемся формулой для круглой мембраны, закрепленной на краях [106]:

$$P = \frac{16\Delta l h^3 E}{3(1-\sigma^2)R^4} \quad (1.17)$$

где  $\Delta l$  – смещение мембраны;  $h$  – толщина мембраны;  $E$  – модуль Юнга;  $\sigma$  – коэффициент Пуассона,  $R$  – радиус мембраны.

При использовании мембраны из нержавеющей стали с толщиной 0.5 мм и диаметром 0.1 м получаем, что  $R = 50\text{мм}$ ,  $h = 0.5\text{мм}$ ,  $E = 2.1 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ,  $\sigma = 0.25$ , получаем:

$$P = 1.5 \cdot 10^6 \Delta l \quad (1.18)$$

Лазерно-интерференционные методы позволяют измерять  $\Delta l$  с точностью  $0.3 \cdot 10^{-9}$  м в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц. Минимально измеряемое давление при указанной мембране будет равно 0.45 мПа. При увеличении диаметра мембраны или уменьшения её толщины чувствительность лазерного измерителя вариаций давления гидросферы значительно улучшается.

Первоначальная настройка и отладка лазерного измерителя вариаций давления гидросферы производится в лабораторном помещении при достаточно высокой температуре. При погружении прибора в водоем окружающая температура понижается, что приводит к изменению длины деталей интерферометра. При этом эксплуатация прибора выглядит следующим образом: погружение прибора на заданную глубину с проведением мероприятий по компенсации гидросферного давления с нарастанием глубины; стабилизация температуры работы прибора во включенном состоянии; проведение измерений; подъем прибора с проведением мероприятий по компенсации гидросферного давления.

Оценим вклад температурного воздействия в работу интерферометра при его погружении на заданную глубину. Допустим разность температур на поверхности и в месте установки прибора составляет 20 градусов. При рассмотрении оптической схемы интерферометра (рисунок 1.28) мест наиболее влияющих на изменение интерференционной картины два, это участок скамьи от делительной пластины до герметизирующего стекла и юстировочный узел, состоящий из крепежных деталей, пьезокерамики и зеркал (рисунок 1.20).

Для измерения вариаций длины от температуры воспользуемся формулой:

$$l = l_0(1 + \alpha t) \quad (1.19)$$

где:  $l$  – конечный размер детали,  $l_0$  – начальный размер детали,  $\alpha$  – температурный коэффициент материала,  $t$  – изменение температуры,  $\Delta l = l - l_0$  – изменение длины. Все расчеты для интерференционного узла приведены в таблице 1.1.

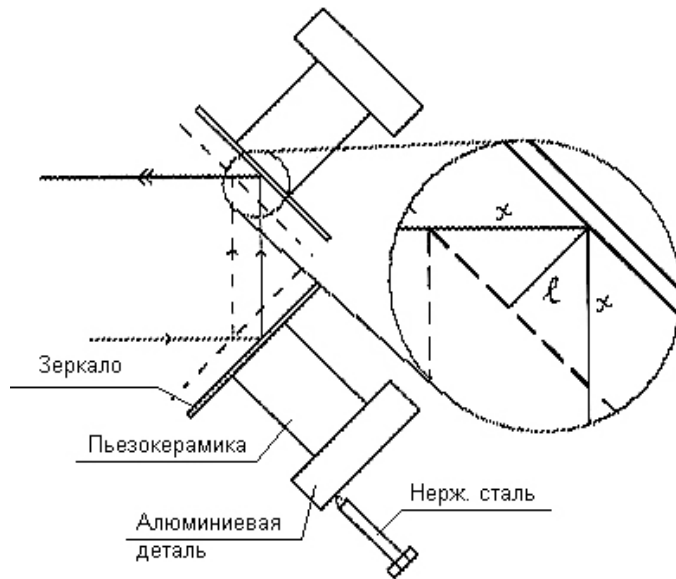


Рисунок 1.30 – Интерференционный узел

Таблица 1.1 – Расчеты для юстировочного узла интерферометра.

Материал	$\alpha$	Исходный размер, мм	Размер при изменении t на 20°C, мм
Зеркало	$5.00 \cdot 10^{-6}$	1	1.0001
Пьезокерамика	$5.00 \cdot 10^{-6}$	25	25.0025
Сплав АМГ	$2.53 \cdot 10^{-5}$	10	10.00506
Сталь	$1.10 \cdot 10^{-5}$	35	35.0077
Итоговый размер		71	71.01536

Так как два юстировочных узла установлены под углом  $45^{\circ}$  к оптическому пучку лазера, то окончательное изменение размеров этих двух узлов равно  $4 \cdot \Delta l^2 = 0.00377$  мм.

Рассмотрим второй участок наиболее сильно влияющий на изменение интерференционной картины, здесь основной вклад в изменение интерференционной картины вносит часть оптической скамьи от делительной пластины до герметизирующего стекла. Для этого случая расчеты приведены в таблице 1.2.



Таблица 1.2 – Данные для расчета температурного расширения деталей интерферометра

Материал	$\alpha$	Исходный размер, мм	Размер при изменении $t$ на 20 <sup>0</sup> С, мм
Стекло	$5.00 \cdot 10^{-6}$	25	25.0025
Сплав АМГ	$2.53 \cdot 10^{-5}$	300	300.1518
Итоговый размер		325	325.1543

В результате получаем, что изменение оптического пути лазерного интерферометра, при изменении температуры на 20<sup>0</sup>С, составляет 0.16876 мм. Но так как это изменение не смещает луч лазера, а лишь изменяет длину его оптического пути, получаем, что существенного нарушения качества интерференционной картины не будет.

Для исключения возможного влияния температуры на работоспособность прибора разработана система механической компенсации внешнего температурного воздействия, позволяющая стабилизировать их оптическую часть. Механическая система компенсации температурного воздействия (рисунок 1.31) необходима для стабилизации интерференционной картины. Для этого направляющие стержни (1), изготовленные из инвара, коэффициент температурного расширения которого более чем в десять раз меньше, чем у нержавеющей стали, жестко закреплены на крышке (2). При изменении температуры внутри прибора изменяется длина стержней, а система крепления (3) плоскопараллельной пластины (4), изготовленная из нержавеющей стали и закрепленная на конце стержней, построена так, что, расширяясь в обратную сторону, компенсирует изменение длины стержней. В связи с этим длина измерительного плеча не зависит от вариаций температуры.

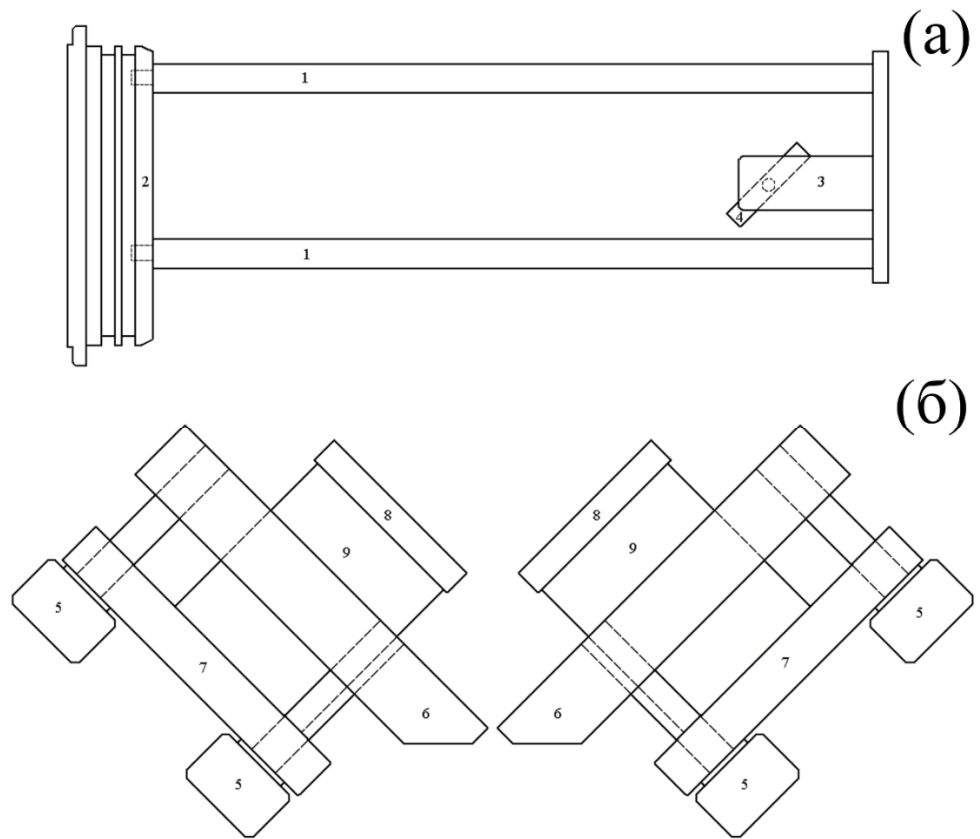


Рисунок 1.31 – Система механической компенсации внешнего температурного воздействия. Оптическая часть лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а), юстировочный узел (б). 1 – направляющие стержни, изготовленные из инвара; 2 – крышка прибора; 3 – крепление плоскопараллельной пластины; 4 – плоскопараллельная пластина; 5 – юстировочные болты; 6 – крепежная пластина; 7 – основание крепления пьезокерамических цилиндров, 8 – зеркало; 9 – пьезокерамический цилиндр.

Сложная система юстировочного узла, изготовленная из материалов с различными коэффициентами температурного расширения, рассчитана так, что длина эталонного плеча не меняется из-за вариаций температуры. При вариациях температуры изменяются размеры зеркал на пьезокерамических цилиндрах и все части крепежа юстировочного узла. Так как луч попадает под углом  $45^\circ$  к плоскости зеркал, а сами зеркала расположены под углом  $90^\circ$  друг к другу, то на длину эталонного плеча влияет только изменение размера вдоль оси пьезокерамических цилиндров (9). Коэффициенты температурного расширения

зеркал (8) и пьезокерамических цилиндров (9) почти в три раза меньше, чем у нержавеющей стали, из которой изготовлены части крепления зеркал. Изменения толщины зеркала, длины пьезокерамических цилиндров и толщины основания крепления цилиндров (7) компенсируются изменением толщины крепежной пластины (6) и юстировочных болтов (5). В следствие этого длина эталонного плеча не зависит от вариаций температуры. Применение механической системы компенсации температурного воздействия позволило продлить работу лазерного измерителя вариаций давления гидросферы без подстройки интерференции [85, 186].

В настоящее время проведены работы по модернизации лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, в первую очередь это коснулось источника света, лазер ЛГН-303 был заменен на частотно стабилизированный гелий-неоновый лазер фирмы Melles Griot. Далее изменения коснулись схемы расположения оптических элементов, что привело к уменьшению габаритов и массы прибора. Внешний и внутренний вид прибора изображен на рисунке 1.32 [186].

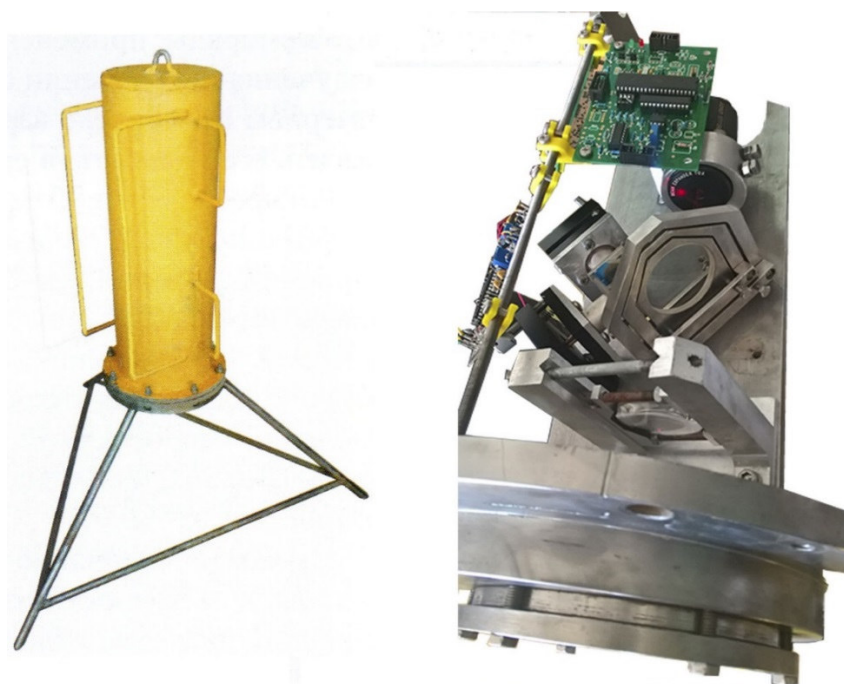


Рисунок 1.32 – Внешний и внутренний вид модернизированного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы

Модернизация лазерного измерителя вариаций давления гидросферы привела к созданию новых приборов, отличающихся габаритами и схемой оптической части интерферометра. При разработке новой модели лазерного измерителя вариаций давления гидросферы среди прочих была поставлена задача, исходя из опыта эксплуатации, изменить оптическую схему с целью улучшения характеристик интерферометра с точки зрения вибро- и ударо-устойчивости, увеличения времени работы без подстройки интерференции, а также упрощения настройки оптической части прибора. С учетом полученных сведений была разработана гибридная схема, где используется удобный в настройке делительный куб, а также в измерительное «плечо» схемы вернули собирающую линзу, которая позволяет стабилизировать параллельность возвращающегося от мембраны луча. Принципиальная схема прибора прошлых модификаций представлена на рисунке 1.33. Внешний и внутренний вид прибора изображен на рисунке 1.34.

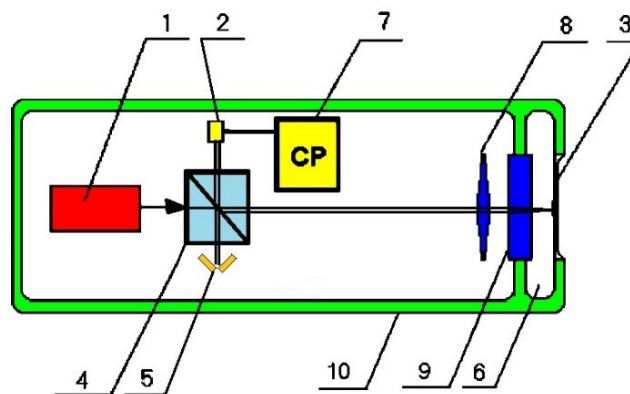


Рисунок 1.33 – Принципиальная схема работы интерферометра ЛИВДГ  
 1 – лазер с коллиматором, 2 – фотоприемник, 3 – мембрана с установленным на нее зеркалом, 4 – делительная пластина, 5 – зеркала с пьезокерамическими элементами для модуляции сигнала и компенсации воздействий, 6 – компенсационная камера, 7 – система регистрации, 8 – собирающая линза, 9 – пластина-окно для разделения объемов прибора, 10 – герметичный корпус прибора.

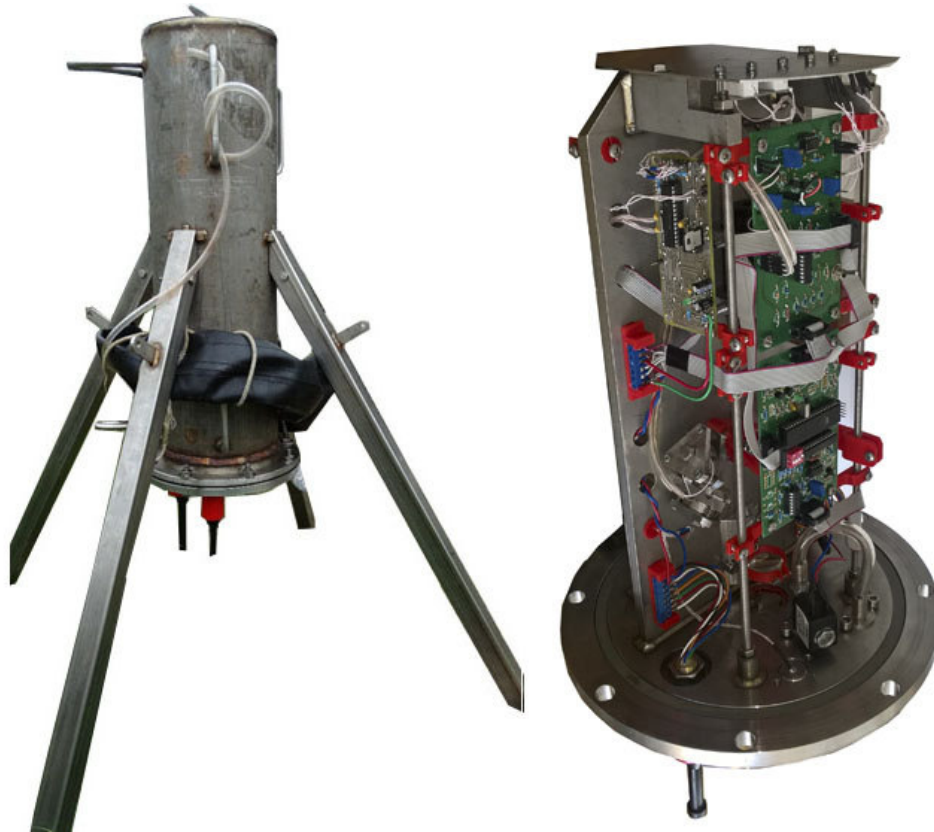


Рисунок 1.34 – Внешний и внутренний вид модернизированного лазерного измерителя вариаций давления гидросфер.

Еще одним прибором, созданным при модернизации, является мобильный лазерный измеритель вариаций давления гидросферы [184]. Его конструкция отличается от предыдущих приборов, корпус изготовлен в виде герметичного цилиндра из нержавеющей стали с крышками с обеих сторон. На одной крышке расположен интерференционный узел, а на второй крышке установлены система регистрации прибора и блоки питания лазера. Еще одним отличием от аналогов является то, что вместо опорной треноги используется защитная клетка, предотвращающая попадание на измерительную часть прибора посторонних предметов и организмов. На рисунке 1.35 представлен внешний и внутренний вид мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы [44].

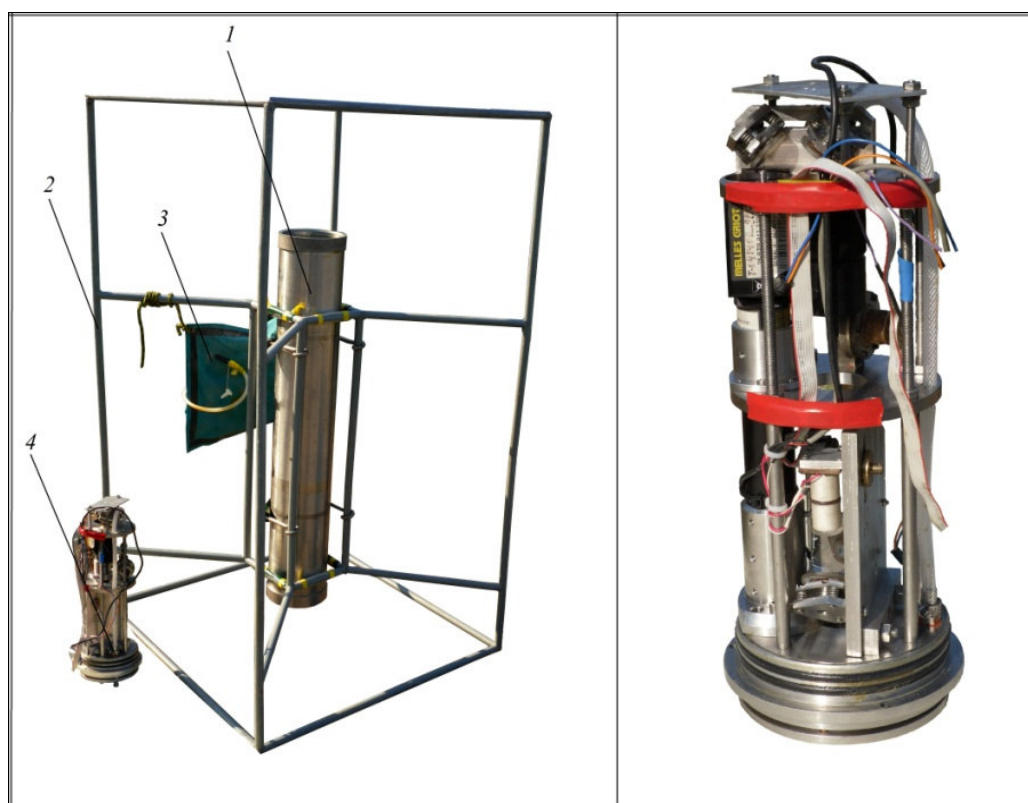


Рисунок 1.35 – Внешний и внутренний вид мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. 1 – корпус прибора, 2 – защитная клетка, 3 – внешняя емкость системы компенсации внешнего давления, 4 – оптико-механическая часть прибора, которая в увеличенном варианте показана на рисунке справа

В качестве источника света в мобильном лазерном измерителе вариаций давления гидросферы используется гелий-неоновый частотно стабилизированный лазер со следующими параметрами: длина волны 633 нм, максимальная мощность излучения 1.4 мВ, нестабильность частоты излучения за 8 часов  $10^{-8}$ . Высокая стабильность лазера позволила проводить измерения вариаций гидросферного давления с точностью  $2.4 \cdot 10^{-5}$  Па [176].

Так на рисунке 1.36 приведен пример записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы оригинальная запись (верхний) и восстановленная запись (нижний). Это участок записи прибора сделан на экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» с частотой 1000 Гц. На оригинальной записи видно, как сигнал при регистрации морского волнения, достигая края динамического

диапазона сверху и снизу, возвращается в нулевое положение. В этом случае рабочая точка интерферометра с одного максимума перескакивает на соседний за счёт срабатывания ключей в системе сброса уровня системы регистрации. На восстановленной записи хорошо видны колебания гидросферы, соответствующие ветровому волнению [190].

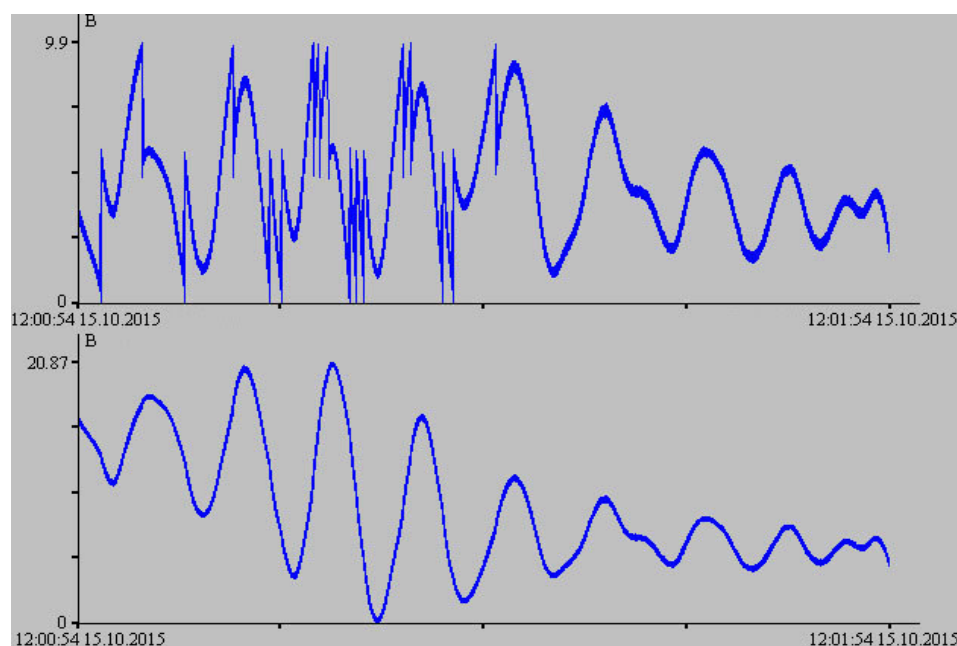


Рисунок 1.36 – Пример записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы.

### 1.3.2 ЛАЗЕРНЫЙ ГИДРОФОН И ЕГО МОДИФИКАЦИИ

Применение гелий-неонового частотно-стабилизированного лазера в лазерных измерителях вариаций давления гидросферы обеспечило высокую точность измерений, но и оказала отрицательное влияние на эксплуатационные характеристики – это большие геометрические размеры и вес прибора. Большие размеры излучающего элемента и блоков питания, по сравнению с полупроводниковым лазером (рисунок 1.37), влекут за собой увеличение корпуса прибора и применение дополнительных крепежных элементов. Кроме того, гелий-неоновый лазер отличается серьезным энергопотреблением, около 110 Вт против десятков мВт полупроводникового лазера, что существенно ограничивает время

его автономной работы. Для уменьшения габаритов и массы прибора, увеличения времени автономной работы, был создан ряд приборов на полупроводниковых лазерах. Но применение полупроводникового лазера снизило точность измерения на четыре порядка. В лазерных гидрофонах была применена схема равноплечего интерферометра Майкельсона, что позволило повысить точность измерения путем выравнивания плеч с точностью  $10^{-5}$  м [65].



Рисунок 1.37 – Гелий-неоновый лазер и полупроводниковый лазер.

1 – излучающий элемент гелий-неонового лазера, 2 – блок питания гелий-неонового лазера, 3 – блок питания термостабилизации гелий-неонового лазера, 4 – полупроводниковый лазер.

На рисунке 1.38 представлен внешний вид лазерного гидрофона на полупроводниковом лазере [81]. Он состоит из цилиндрического корпуса, изготовленного из нержавеющей стали (1), защитной клетки (2), предназначенной для защиты измерительную часть прибора от попадания посторонних предметов и организмов. С одной стороны лазерного гидрофона имеется отверстие для герморазъёма, предназначенного для подачи питания в прибор и выходу сигнала. Со второй стороны он герметично закрывается крышкой (3) с закрепленной на ней оптической частью прибора. Для компенсации внешнего давления снаружи прибора закреплена эластичная емкость (4), которая соединена трубкой с компенсационной камерой, расположенной в крышке.



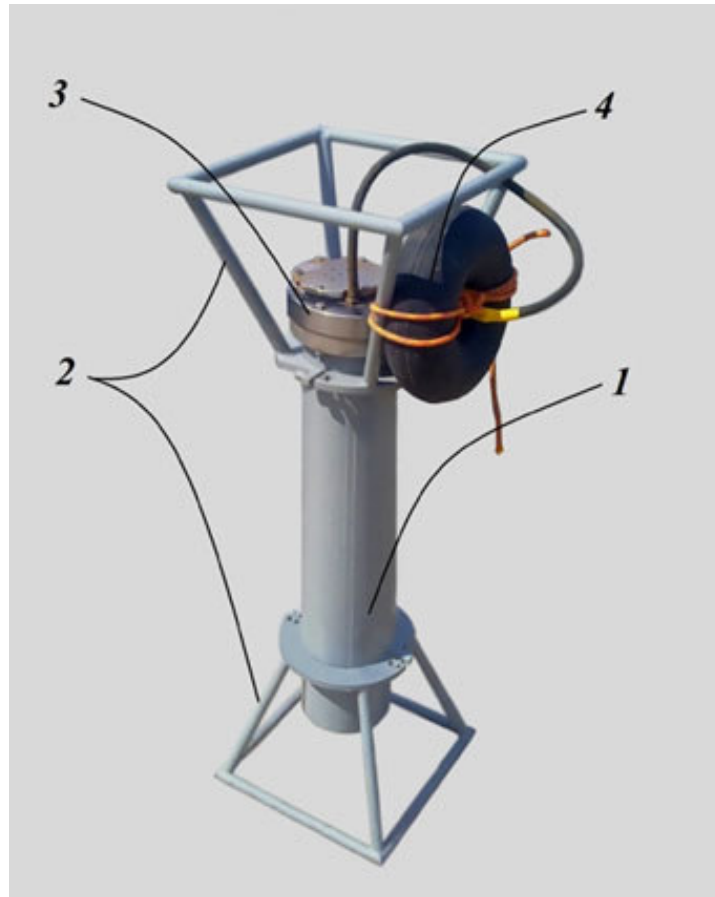


Рисунок 1.38 – Внешний вид лазерного гидрофона.

1 – корпус прибора; 2 – защитная клетка; 3 – крышка прибора;  
4 – внешняя емкость системы компенсации внешнего давления.

Как и в лазерном измерителе вариаций давления гидросферы внутри корпуса лазерного гидрофона расположены: равноплечий интерферометр Майкельсона, цифровая система регистрации, электромагнитный клапан, компенсационная камера.

Оптико-механическая часть лазерного гидрофона представлена на рисунке 1.39. На массивной крышке прибора (1), в которой расположены компенсационная камера и чувствительный элемент, жестко закреплена металлическая платина – скамья (8). Герметичность крышки обеспечивается уплотнительными кольцами, расположенными в пазах (2). Оптическая часть прибора собрана на основе равноплечего интерферометра Майкельсона с использованием в качестве источника света полупроводникового лазера (11). Луч лазера попадает в

коллиматор (10), где стабилизируется по размеру, после чего на делительной пластине (7) распадается на две части - измерительную и эталонную. Эталонная часть луча, пройдя через пьезокерамики раскачки (6) и компенсации (5), возвращается на делительную пластину, а измерительная часть, пройдя через линзу (4) и отразившись от чувствительного элемента, также возвращается на делительную пластину. Оба этих луча совмещаются, образуя интерференционную картину, изменение которой регистрируется резонансным усилителем с закреплённым на нем фотоприемником. Далее по кабельным линиям сигнал с резонансного усилителя попадает на цифровую систему регистрации, состоящую из микропроцессорной платы (15) и усилительной платы (16). Система регистрации располагается в крепежной решетке, состоящей из колец (12) и соединительных шпилек (13), которая фиксируется внутри цилиндрического корпуса распирающими болтами (14). Данное устройство устанавливается внутри прибора со стороны входа кабельной линии, что обеспечивает эргономичное расположение элементов внутри корпуса.

В лазерном гидрофоне, также как и в лазерном измерителе вариаций давления гидросферы, чувствительным элементом является круглая мембрана, закрепленная на краях и расположенная в крышке прибора. Во время установки прибора на рабочую глубину, используя систему компенсации внешнего давления, мембрана устанавливается в нейтральное положение. Под действием вариаций гидросферного давления мембрана прогибается, тем самым изменяя интерференционную картину. Эти изменения фиксируются цифровой системой регистрации и передаются по кабельной линии на записывающее устройство [177].

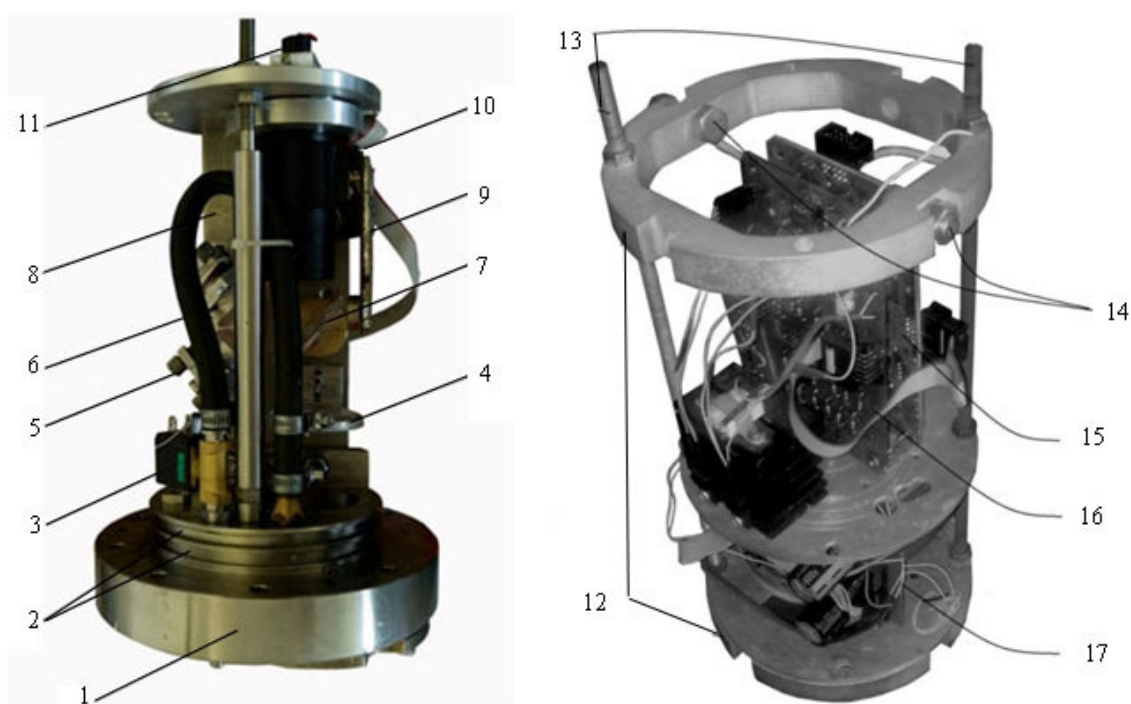


Рисунок 1.39 – Оптико-механическое устройство (слева) и внешний вид устройства системы регистрации (справа) лазерного гидрофона.

1 – крышка прибора; 2 – пазы под уплотнительные кольца; 3 – клапан; 4 – линза; 5 – пьезокерамика компенсации; 6 – пьезокерамика раскачки; 7 – делительная пластина; 8 – оптическая скамья; 9 – резонансный усилитель; 10 – коллиматор; 11 – полупроводниковый лазер; 12 – крепежные кольца; 13 – соединительные шпильки; 14 – распирающие болты; 15 – микропроцессорная плата; 16 – усилительная плата; 17 – блок питания.

В лазерном гидрофоне в качестве источника света используется малогабаритный одномодовый полупроводниковый лазерный модуль типа KLM – 650/20, имеющий следующие характеристики: длина волны излучения 660 нм, мощность излучения от 5 до 20 мВт, диаметр лазерного пучка 4 мм, расходимость излучения  $10^{-3}$  рад. Малые размеры лазерного модуля ( $\varnothing 16 \times 30$  мм) существенно сказываются на размере и весе прибора, а его низкое энергопотребление играет важную роль при использовании прибора в автономном режиме. Основным недостатком лазерного модуля является низкая относительная нестабильность частоты лазерного излучения. Относительная нестабильность частоты лазерного излучения связана со смещением центра мембраны соотношением:

$$\Delta l = L \frac{\Delta \nu}{\nu} \quad (1.20)$$

где  $L$  – разность оптического хода в плечах интерферометра в начальный момент измерения,  $\frac{\Delta \nu}{\nu}$  – нестабильность частоты,  $\nu$  – частота и  $\Delta \nu$  – ширина полосы лазерного излучения. Ширина полосы современных полупроводниковых лазеров составляет от 0.1 нм и выше [1], соответственно нестабильность частоты излучения  $10^{-4}$ . Для увеличения точности измерения вариаций давления лазерным гидрофоном минимизируем разность оптического хода в плечах интерферометра в начальный момент измерения. Это возможно при уравнивании опорного и измерительного плеч лазерного интерферометра. Этот процесс будет реализовываться в два этапа. На первом этапе уравнием плечи интерферометра с помощью обычной линейки, что позволит достигнуть точности  $10^{-3}$  м. На втором этапе, для получения более точного результата, модифицируем интерферометр Майкельсона, добавив в его схему дополнительное зеркало, закрепленное на пьезокерамическом цилиндре настройки. При подаче на пьезокерамический цилиндр напряжения с генератора сигналов и учитывая, что на измерительную мембрану не оказывается внешнее воздействие и юстированные винты имеют очень мелкую резьбу, можно уравнивать плечи интерферометра с точностью  $10^{-5}$  м. В итоге получается, что при уравнивании плеч интерферометра с точностью  $10^{-5}$  м, при использовании полупроводникового лазера и мембраны, из нержавеющей стали, диаметром 0.1 м и толщиной 0.5 мм, точность измерения вариаций гидросферного давления составит  $2.4 \cdot 10^{-2}$  Па.

На основе частотно-стабилизированного зеленого полупроводникового лазера LCM-S-111 был разработан и создан лазерный гидрофон, позволяющий проводить длительные измерения, сохраняя свои габариты и вес. На рисунке 1.40 показан внутренний вид лазерного гидрофона, где в качестве источника света применен одночастотный полупроводниковый зеленый лазер (1) LCM-S-111 с длиной волны 532 нм. Принцип работы данного прибора очень похож на принцип работы лазерного гидрофона, описанного выше. В лазерном гидрофоне на зеленом лазере также присутствуют коллиматор, оптическая скамья, на которой закреплены

делительная пластина, пьезокерамики раскачки и компенсации. Во внутрь прибора встроена цифровая система регистрации, состоящая из платы блока питания, платы усилителя мощности и самой платы цифровой системы регистрации [70].

В крышку лазерного гидрофона на зеленом лазере встроена компенсационная камера и круглая мембрана, которая является чувствительным элементом прибора, с рабочим диаметром 100 мм, толщиной 0.8 мм. На внутренней стороне мембраны на подставке прикреплено зеркало диаметром 5 мм. Линейный рабочий диапазон частот лазерного гидрофона с зеленым лазером LCM-S-111 от 0 (условно) до 10 000 Гц, точность измерения вариаций гидросферного давления 0.5 мПа, точность измерения вариаций уровня моря (воды) 0.5 мкм, рабочие глубины до 50 м.

На рисунке 1.41 приведен пример записи лазерного гидрофона, который был установлен на шельфе Охотского моря вблизи базы СКБ САМИ ДВО РАН м. Свободный острова Сахалин. Запись была сделана с частотой 1000 Гц. На верхнем рисунке приведена оригинальная запись лазерного гидрофона, где видны «сбросы», выполняемые системой регистрации при достижении границ динамического диапазона. На нижнем рисунке приведен тот же участок восстановленной записи лазерного гидрофона, где выделяются колебания, соответствующие ветровому волнению.

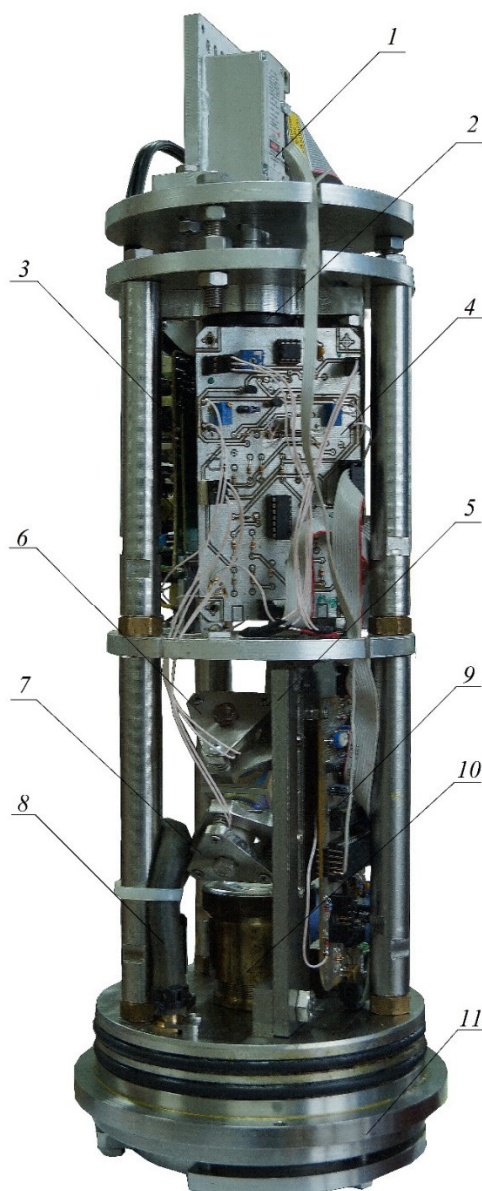


Рисунок 1.40 – Внутренний вид лазерного гидрофона.

1 – лазер LCM-S-111; 2 – коллиматор; 3 – плата блока питания;  
4 – плата усилителя мощности; 5 – оптическая скамья; 6 – пьезокерамика раскочки; 7 – пьезокерамика компенсации; 8 – соединительные шланги; 9 – плата цифровой системы регистрации; 10 – держатель линзы; 11 – крышка лазерного гидрофона, в которой находится мембрана и компенсационная камера.

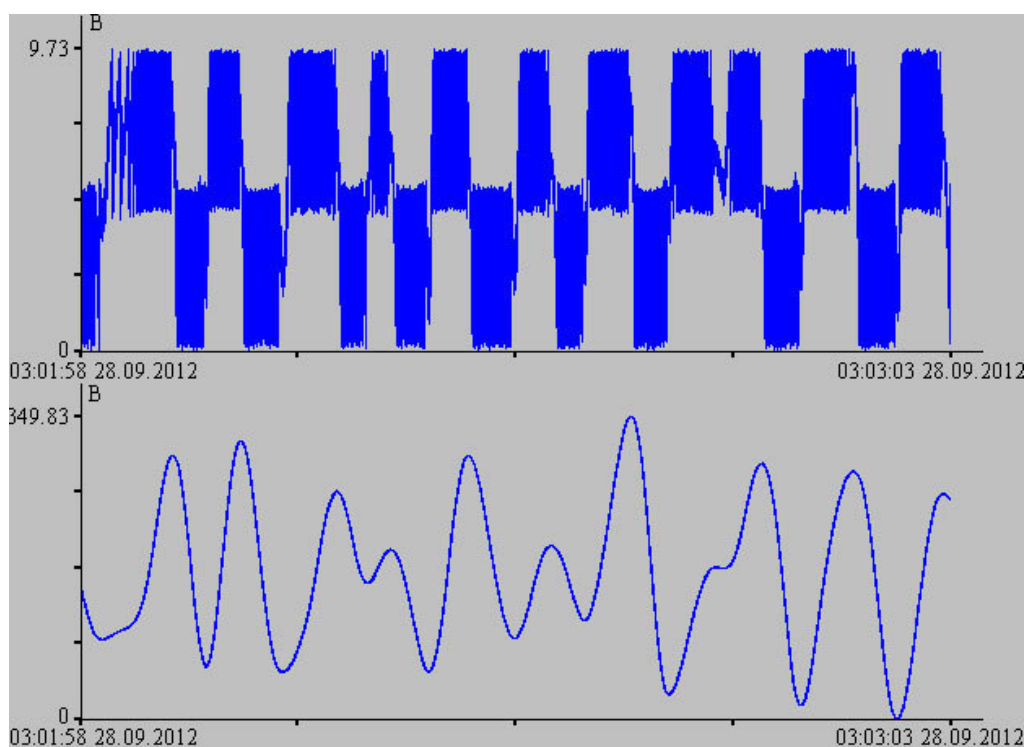


Рисунок 1.41 – Пример записи лазерного гидрофона

#### 1.4 ВЫВОДЫ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Особый интерес вызывают исследования, направленные на изучение физических процессов переходных зон («атмосфера-гидросфера-литосфера») с точки зрения отслеживания причинно-следственной связи различных явлений низкочастотного и сверхнизкочастотного диапазонов геосфер при возможности идентификации источников колебаний с прогнозированием их развития и влияния на колебания и волны смежных сред при линейных и нелинейных взаимодействиях. Изучение процессов, возникающих в атмосфере, гидросфере или литосфере, проводится с помощью различных установок и приборов. Их большая часть имеет ряд недостатков, не позволяющих проводить качественные измерения на высоком уровне. С целью ликвидации этих недостатков необходимо создать измерительные системы, построенные на новых физических принципах, к которым, в первую очередь, относятся лазерно-интерференционные методы регистрации колебаний и волн широкого диапазона частот в литосфере, гидросфере и атмосфере. К приборам, созданным на основе лазерно-интерференционных методов, относятся: 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 [56]. Но сами по себе отдельные лазерно-интерференционные установки не способны решить задачи по изучению закономерностей возникновения, развития и трансформации геосферных процессов инфразвукового и низкочастотного звукового диапазонов с определением их первоисточника (атмосфера, гидросфера или литосфера). Необходимо создание комплексов, состоящих из установок, разработанных на одних и тех же принципах. Учитывая высокие технические параметры лазерных деформографов, лазерных нанобарографов и лазерных измерителей вариаций гидросферного давления сформулирована задача по созданию таких комплексов, объединённых в единую сеть с вспомогательными установками, с обязательной разработкой методики проводимых измерений и разработкой соответствующего математического аппарата, направленного на оперативный сбор информации и обработку полученных экспериментальных данных с последующей интерпретацией полученных результатов обработки. Главные направления исследований, обозначенных в первом предложении данного абзаца, крайне широки и ориентированы на их выполнение не одним коллективом исследователей в течении не одного десятилетия. Поэтому в рамках одной работы необходимо ограничиться и начать исследования, начиная с низкочастотного звукового диапазона с продолжением в высокочастотную инфразвуковую область. Проведение экспериментальных исследований в низкочастотной звуковой области с использованием низкочастотных гидроакустических излучателей позволяет не только исследовать некоторые особенности закономерностей динамики и



трансформации гидроакустических волн на границе системы «гидросфера – литосфера», но и оценить поведение более низкочастотных волновых океанологических процессов на границе раздела сред на основе полученных результатов гидроакустических экспериментов. К таким волновым процессам, конечно, относятся морские ветровые (гравитационные) волны, инфрагравитационные морские волны, внутренние короткопериодные морские волны, а также процессы, связанные с возникновением цунами, вызванных подводными землетрясениями, очаговые области которых генерируют волны с периодами, лежащими в диапазоне от десяти до нескольких десятков секунд. Но, конечно, при рассмотрении данных процессов невозможно обойтись без атмосферных процессов рассматриваемого диапазона частот.

## ГЛАВА 2. ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ, МИКРОКОЛЕБАНИЙ АТМОСФЕРНОГО И ГИДРОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЙ ИНФРАЗВУКОВОГО И ЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНОВ

Наиболее энергоемкие процессы Земли происходят на границе раздела системы «атмосфера-гидросфера-литосфера». Некоторые из них носят катастрофический для человечества характер. Для изучения закономерностей возникновения и развития этих процессов необходимо применять комплексные методы исследования с применением аппаратуры, позволяющей проводить измерения основных параметров геосфер на уровне фоновых колебаний в широком частотном и динамическом диапазонах. В настоящее время в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют установки, созданные на основе современных лазерно-интерференционных методах. На основе этих методов были созданы два лазерно-интерференционных комплекса на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» Приморский край и базе СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный» о. Сахалин [50]. Оба комплекса расположены на берегу моря и имеют в своем арсенале лазерные деформографы для мониторинга вариаций деформаций верхнего слоя земной коры, лазерные нанобарографы для мониторинга вариаций атмосферного давления, лазерные гидрофоны и лазерные измерители вариаций гидросферного давления для мониторинга вариаций гидросферного давления на шельфе моря.

### 2.1 ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС «М. ШУЛЬЦА»

История лазерно-интерференционного комплекса на МЭС ТОИ ДВО «м. Шульца» началась 4 июня 1980 года, когда сотрудники лаборатории квантовой океанологии, руководимой профессором У.Х. Копвиллемом, прибыли на экспериментальную станцию для установки поверхностного варианта 105-метрового лазерного деформографа равноплечего типа. Измерения проводились до

конца октября, а главная ось была ориентирована по линии «запад-восток». В 1983 году благодаря поддержке директора института академика В.И. Ильичева для этого деформографа было создано подземное помещение, а в 1991 году был размещен 52.5-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа. В 1995 году в старых артукреплениях смонтирован 17.5-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа, главная ось которого направлена по линии «запад-восток». Начиная с 2000 года, после капитальной перестройки лаборатории и полной модернизации лазерного деформографа и подземных сооружений, измерения вариаций микродеформаций земной коры стали проводиться круглогодично. В 2000 году были установлены лазерный деформограф вертикального типа с длиной измерительного плеча 3.5 м, а в верхнем его помещении – лазерный нанобарограф, для измерения вариаций атмосферного давления. Оптическая схема лазерного нанобарографа построена на основе модифицированного интерферометра Майкельсона равноплечего типа с применением частотно-стабилизированного лазера ЛГН-303. В 2005 году построено новое лабораторное помещение, в котором собираются данные с различных установок комплекса для их первичной обработки и записи на твердые носители. В 2007 году в состав лазерно-интерференционного комплекса «м. Шульца» вошел и начал работать в режиме непрерывных измерений приемник GPS (Global Positioning System) Trimble 5700. Аналогичные приборы установлены на здании института во Владивостоке, а также в Находке. Общая площадь покрытия станциями GPS более 7500 км<sup>2</sup>. В отдельные годы на полигоне размещались сейсмографы сейсмостанции «Владивосток». В настоящее время для изучения закономерностей генерации, динамики и трансформации колебаний и волн геосфер широкого диапазона частот параллельно сухопутным работам выполняются морские исследования гидрофизическими и гидроакустическими системами, донными лазерно-интерференционными приемниками зондируется толщина воды [73].



Рисунок 2.1 – Лазерно-интерференционный комплекс «м. Шульца».

1 – лазерные деформографы горизонтального типа, 2 – лазерный нанобарограф, 3 – лазерный деформограф вертикального типа, 4 – трёхкомпонентный широкополосный сейсмограф Guralp CMG-3ESPВ, 5 – метеостанция AANDERAA, 6 – GPS-приёмник TRIMBLE 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 – ёмкостный измеритель уровня моря; 16 – маломерное судно, 17 – плавучая платформа, 18 – маломерное судно НИС «Импульс».

За последние годы горизонтальный лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 52.5 м прошел всестороннюю модернизацию для повышения на несколько порядков точности измерения микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц. В качестве источника излучения интерферометра была установлена лазерная система NEOARK со стабилизацией частоты излучения по линиям поглощения паров йода. Данная система, состоящая из двух лазеров, позволила получить мощный лазерный луч со стабильностью частоты излучения  $2.5 \cdot 10^{-11}$ , что на два порядка выше стабильности частоты

излучения луча частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, применяемого ранее. Для обеспечения стабильной работы лазерной системы помещения лазерного деформографа прошли дополнительную модернизацию для обеспечения лучшей температурной стабильности.

Вместе с лазерными деформографами ведется синхронная регистрация сейсмических колебаний широкополосным сейсмографом Guralp CMG-3ESPВ [73]. Широкополосный сейсмограф Guralp CMG-3ESPВ состоит из трех датчиков, которые позволяют измерять колебания почвы одновременно по трем направления «север-юг», «восток-запад» и в вертикальном направлении. Частотный диапазон каждого датчика 0.003 – 50 Гц. Имея такой широкий диапазон CMG-3ESPВ может заменить множество приборов, которые традиционно используются в сейсмических обсерваториях. Электронная часть прибора позволяет измерять колебания на твердой, почти горизонтальной поверхности и компенсировать наклон до  $3^{\circ}$  от горизонтального положения. В комплект входит блок управления, с помощью которого можно выполнить первоначальную установку, выравнивания и отцентровки прибора, так же этот блок позволяет тестировать и отлаживать прибор в процессе его работы. С сейсмографа выходит аналоговый сигнал, который необходимо оцифровать и передать на записывающее устройство, например 24-х разрядное АЦП GeoSIG GSR-24. Сейсмометр установлен в металлической трубе на глубине 3-х метров от поверхности земли на базе МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» вдали от автомобильных дорог, для более точной и достоверной оценки сейсмических колебаний. На рисунке 2.2 приведен внешний вид широкополосного сейсмографа.



Рисунок 2.2 – Широкополосный сейсмограф

Для регистрации вариаций гидросферного давления и инфрагравитационных колебаний на базе комплекса в разное время работают до трех гидрофонов, созданных на основе современных лазерно-интерференционных методах, но имеющих разные конструктивные особенности. К этим приборам относятся лазерный измеритель вариаций давления гидросферы и лазерный гидрофон. Приборы имеют береговое энергопитание по кабельной линии и могут быть установлены как на дно моря, так и в толще воды. Несколько двухканальных донных станций используются для измерения вариаций гидростатического давления на дне, вызванных искусственными и естественными источниками гидроакустических волн.

Комплекс оснащен станцией GPS, предназначенной для слежения за глобальными деформационными процессами, происходящими в верхнем слое земной коры. Эта станция оснащена двухчастотным спутниковым приемником Trimble 5700 миллиметровой точности (рисунок 2.3). Подобные приемники установлены во Владивостоке и в Находке, образуя треугольник со сторонами 88.8, 93.4 и 144.7 км. Приборы с миллиметровой точностью определяют точки с пространственными координатами и строят векторы связанные с другими измерительными пунктами. В результате обработки по каждому пункту

наблюдений рассчитываются вектора перемещения [91]. Современные методы обработки спутниковых данных позволяют следить за смещениями земной коры с точностью на уровне первого миллиметра, что дает возможность обнаруживать глобальные тенденции в поведении литосферы данного региона.



Рисунок 2.3 – Двухчастотный спутниковый приемник Trimble 5700  
миллиметровой точности

Метеорологическая станция AANDERAA ведет круглосуточное наблюдение изменений основных атмосферных параметров, таких как температура воздуха, атмосферное давление, влажность, скорость и направление ветра (рисунок 2.4). Автоматическая метеостанция установлена на мачте на высоте около 7 м. На горизонтальной балке смонтированы несколько датчиков из твердого анодированного алюминия для регистрации значений атмосферных параметров. Необработанные данные со всех датчиков с выбранной периодичностью по кабельной линии передаются на 11 канальный регистратор, установленный в лабораторном помещении, после преобразования в технические единицы сохраняются на пишущем компьютере. Температура регистрируется датчиком в диапазоне от  $-43$  до  $+48$  °C с точностью  $\pm 0.1$  °C, атмосферное давление измеряется в диапазоне от 920 до 1080 гПа с точностью  $\pm 0.2$  гПа, влажность регистрируется в

диапазоне от 0 до 100 % с точностью  $\pm 2\%$ . Также ведутся измерения скорости и направления ветра в диапазоне от 0 до 79 м/с с точностью  $\pm 2\%$  от показаний.

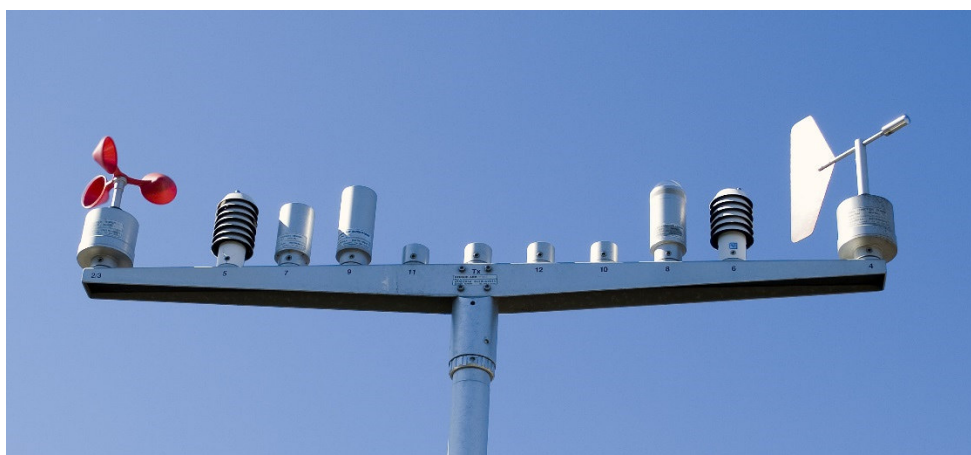


Рисунок 2.4 – Автоматическая метеостанция AANDERAA

Данные с описанных выше 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.

Для изучения характера распространения и трансформации энергии акустических волн используются низкочастотные гидроакустические излучатели, работающие с обеспечивающего судна на частотах 19 – 26 Гц, 30 – 40 Гц и 230 – 270 Гц. Излучающая гидроакустическая система в полосе частот от 19 – 26 Гц предназначена для генерации гармонических и фазоманипулированных гидроакустических сигналов в полосе частот порядка 1 Гц. Максимальное изменение объема излучателя может достигать  $0.0123 \text{ м}^3$ , что на частоте 20 Гц в безграничном водном пространстве соответствует акустической мощности 1000 Вт. Внешний вид и схема конструкции излучающей гидроакустической системы приведены на рисунке 2.5 а. В состав системы входят: излучатель с электромагнитным преобразователем, рама для подвеса излучателя, кабель-шланг



с контрольным манометром, источник электропитания, электронасос, контрольный гидрофон, два калибровочных акселерометра [71]. Внешний вид гидроакустического излучателя в полосе частот от 25 до 40 Гц изображен на рисунке 2.5 б. Его рабочая глубина до 20 м, а мощность генерируемых гармонических и фазоманипулированных гидроакустических сигналов на 1 м от излучателя 1 кПа. Еще один гидроакустический излучатель генерирует сигнал в полосе частот 230 – 270 Гц на глубине погружения до 25 м с мощностью на 1 м – 3.7 кПа (рисунок 2.5 в). Так же в состав комплекса входит автономная низкочастотная излучающая система, позволяющая вести непрерывное излучение тонального сигнала на частотах 290 – 390 Гц в течение трех суток при глубинах погружения до 100 м.

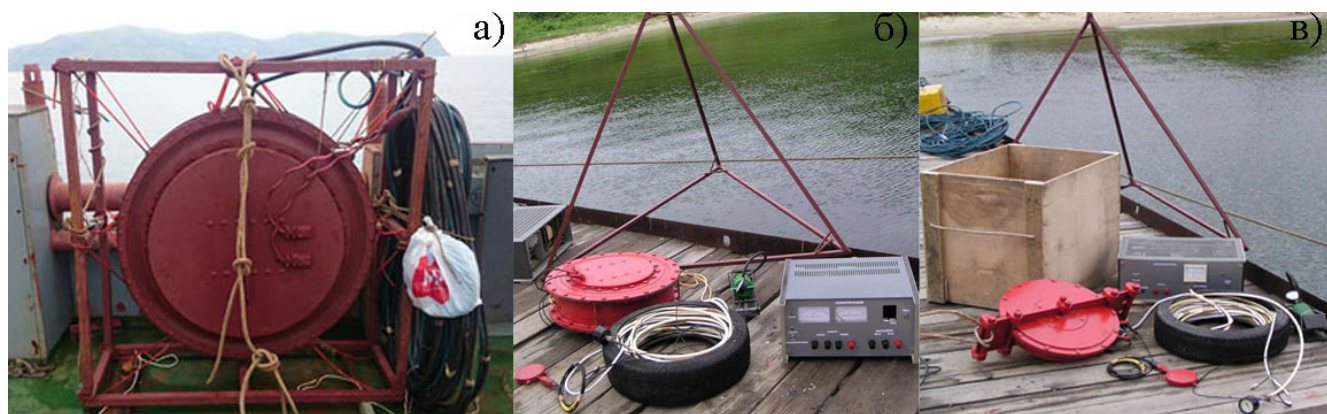


Рисунок 2.5 – Гидроакустические излучатели работающие в диапазоне частот 19 – 26 Гц (а), 30 – 40 Гц (б) и 230 – 270 Гц (в).

Низкочастотный сейсмоакустический излучатель, представленный на рисунке 2.6, создан на основе электродвигателя постоянного тока, выполняющего активную роль с заданием усилия вращения вала и его частоты, регулятора частоты, выпрямителя, вибратора. Вибратор через гибкое соединение связан с основным электродвигателем. Он выполнен на основе пассивного электродвигателя, в котором роторная часть изготовлена со смещенным относительно оси вращения центра масс. Частотный диапазон создаваемых сейсмоакустических колебаний находится в пределах от 2 до 20 Гц [11]. Масса

конструкции около 250 кг, а при частоте вращения ротора 11 Гц сила, нормальная к грунту, равна 2500 Н.

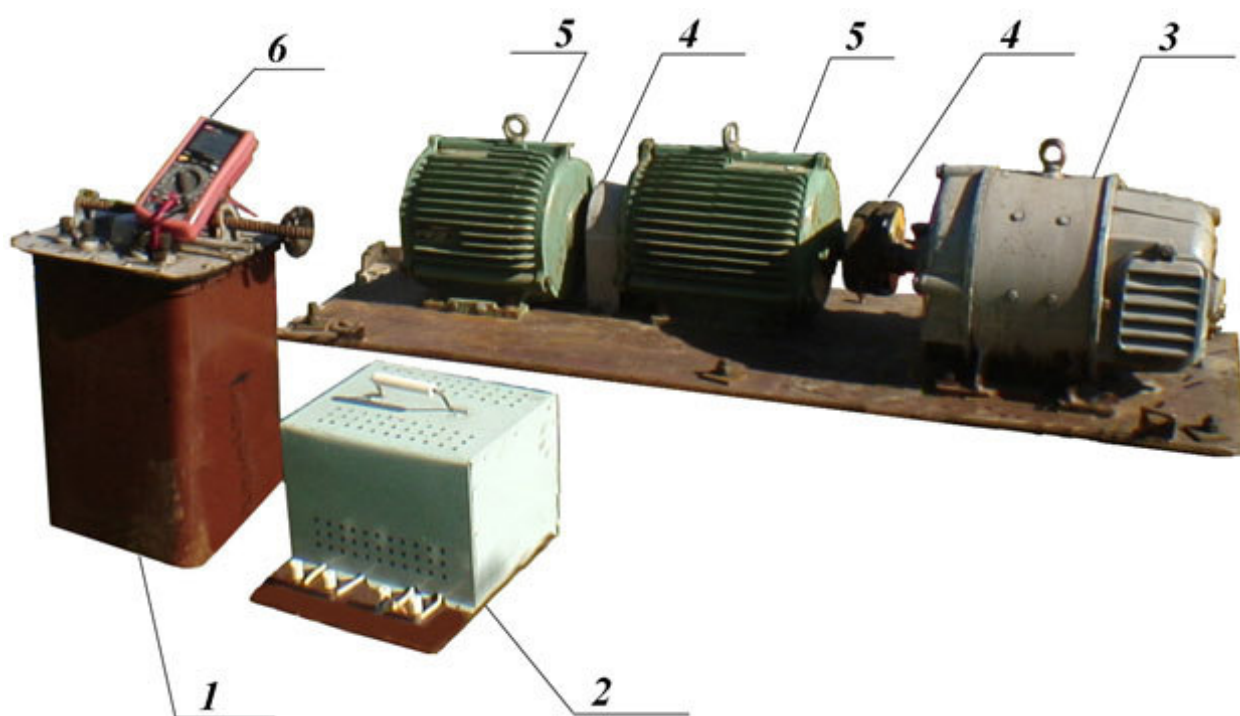


Рисунок 2.6 – Внешний вид сейсмоакустической излучающей системы 2-20 Гц.  
1 – регулятор напряжения, 2 – силовой выпрямитель, 3 – электродвигатель, 4 – соединительные муфты, 5 – дебалансные вибраторы, 6 – мультиметр.

При изучении влияния флуктуаций гидрофизических параметров на распространение акустических волн звукового и инфразвукового диапазонов используется ряд зондов различного назначения. Гидрологический зонд RBR позволяет измерять флуктуации основных параметров морской среды, такие как электропроводность, давление и температура, при стационарной постановке либо при выполнении гидрологических разрезов. Канал измерения температуры основан на преобразовании электрического сигнала, который поступает от первичного преобразователя в электрический блок, при измерении сопротивления датчика температуры, которое изменяется пропорционально измеряемой величине. Помимо стандартных датчиков CTD к многопараметрическому зонду RBR concerto можно подключить 2 внешних датчика (рисунок 2.7). Частота опроса датчиков

зонда от 2 до 32 Гц. Данный прибор обладает большим объемом памяти для записи измерений, оптимизацией питания, для скачивания данных предусмотрен стандарт USB-C, Wi-Fi, а для включения используется магнитный ключ.



Рисунок 2.7 – Внешний вид гидрологического зонда RBR concerto

Профилометр Valeport miniSVP позволяет измерять профиль скорости звука при работе на станциях, заданных условиями эксперимента. Наряду со скоростью звука в профилометр встроены датчики давления и температуры для вертикального профилирования. Прибор позволяет регистрировать скорость звука в диапазоне от 1 375 – 1 900 м/с с точностью  $\pm 0.02$  м/с, температуру воды в диапазоне от  $-5$  до  $+35$  °С с точностью  $\pm 0.01$  °С и давления до 100 бар с точностью  $\pm 0.05\%$  с частотой дискретизации 1, 2, 4 и 8 Гц.

В состав комплекса включен акустический доплеровский профилограф, фиксирующий изменчивость скорости морских течений по профилю при буксировке научно-исследовательским судном. Высокопроизводительный трехосевой профилограф ADP Sontek SY-51208 течения воды предназначен для измерения градиентов течения в толще воды в шельфовой области моря. Кроме градиентов течения профилограф оснащен функцией сонара, датчиком температуры, компасом, 2-х осевым датчиком наклона с возможностью

синхронизации по GPS. Максимальная глубина профилирования 180 м с разрешением 0.1 см/с с точностью  $\pm 0.5$  см/с. Для измерений течений разработана система крепления аппаратуры на борт маломерного судна высотой от 0.5 до 2 м (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Внешний вид акустического доплеровского профилографа

Другой комплексный измеритель параметров течения AANDERAA RCM 9 LW позволяет регистрировать изменения морского течения, удельную электропроводность, температуру воды и давление в точке при установке в стационарном режиме, либо при проведении вертикального зондирования толщи воды. В его состав входят: доплеровский датчик течения 4220, магнитный компас на эффекте Холла, датчики температуры и давления. Этот прибор позволяет регемтрировать чевения в диапазоне от 0 до 300 см/с с разрешением 0.3 см/с с относительной погрешностью  $\pm 1\%$  от показания.

Для измерения звуковой волны в воде применяются индивидуально калиброванные измерительные преобразователи звуков, гидрофоны Briel & Kjaer (Дания) серии 810х. Эти гидрофоны имеют плоский отклик и всенаправленную сферу обнаружения звуков в широком частотном диапазоне. Гидрофоны этой серии производятся с использованием бессвинцовой нитрилбутадиевой резины, что обеспечивает их полную гидроизоляцию и высокую степень коррозионной стойкости. В состав комплекса входят два гидрофона модели 8103 и 8104 (рисунок

2.9). Малоразмерный высокочувствительный измерительный преобразователь звука, гидрофон 8103, позволяет проводить измерения абсолютного шума в частотном диапазоне от 0.1 Гц до 180 кГц с чувствительностью 211 дБ на 1 В/мкПа. Гидрофон 8104 регистрирует абсолютный шум в частотном диапазоне от 0.1 Гц до 120 кГц с чувствительностью приема – 205 дБ на 1 В/мкПа. Этот гидрофон может применяться в качестве звукового передатчика, что позволяет с помощью него калибровать другие приборы методом взаимного обмена.

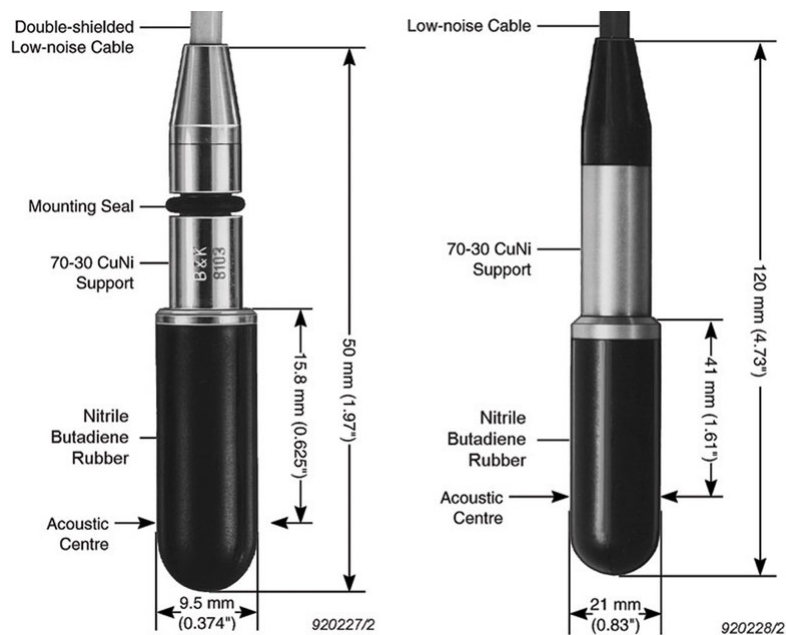


Рисунок 2.9 – Внешний вид гидрофонов Buel & Kjaer 8103 (левый) и 8104 (правый)

Для работы с излучателями и зондами используются несколько маломерных судов и плавучая платформа, которые адаптированы для проведения работ по установке измерительных приборов, генерации гидроакустических колебаний, съемке течений на исследуемой акватории и гидрологическом профилировании на рабочих станциях и трассах распространения изучаемого сигнала. Периодически, для улучшения качества получаемых данных, к исследованиям привлекается дополнительное оборудование, такое как автономные необитаемые подводные аппараты.

В современном состоянии лазерно-интерференционный комплекс «м. Шульца» позволяет проводить качественное изучение закономерностей возникновения, развития и трансформации колебаний и волн на границе зоны перехода системы «атмосфера-гидросфера-литосфера» звукового и инфразвукового диапазонов, изучения динамики крупномасштабных и мелкомасштабных неоднородностей океанов и морей, их взаимодействия и влияния на параметры колебаний и волн широкого диапазона частот [48, 63].

## 2.2 ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС «М. СВОБОДНЫЙ»

В 2010 году на мысе Свободный о. Сахалин, недалеко от маяка Тонина, был установлен лазерный деформограф поверхностного типа с длиной измерительного плеча 8 м и ориентацией «север-юг» (рисунок 2.10). В том же году для измерения вариаций гидросферного давления недалеко от места установки лазерного деформографа, на шельфе Охотского моря, был установлен лазерный гидрофон.



Рисунок 2.10 – Поверхностный лазерный деформограф на м. Свободный о. Сахалин. 1 – интерференционный узел, 2 – лучевод, 3 – уголкового отражатель.

В 2011 году на м. Свободный о. Сахалин был разработан и создан стационарный лазерный деформограф неравноплечего типа с длиной измерительного плеча 10.5 м и ориентацией «север-юг». В 2012 году к лазерному деформографу прибавился еще ряд приборов, а именно: лазерный нанобарограф,

лазерный гидрофон, станция GPS, а впоследствии и метеостанция (рисунок 2.11). Лазерный деформограф собран на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона, способного проводить измерения вариаций смещения земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0.3 нм. Лазерный нанобарограф, собранный на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, был установлен в приборном домике лазерного деформографа. Он способен проводить измерения вариаций атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Лазерный гидрофон, созданный на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, был установлен на шельфе Охотского моря на глубине 8 м, на удалении 500 м от места установки лазерного деформографа. Он способен проводить измерения вариаций гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Станция GPS предназначена для слежения за глобальными деформационными процессами, происходящими в верхнем слое земной коры. Эта станция оснащена двухчастотным спутниковым приемником Trimble 5700 миллиметровой точности. Аналогичными приемниками оснащены станции в г. Находка, г. Владивостоке, и на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Метеостанция ведет круглосуточное наблюдение за изменениями основных параметров атмосферы, таких как температура, влажность, атмосферное давление, направление и скорость ветра [150].

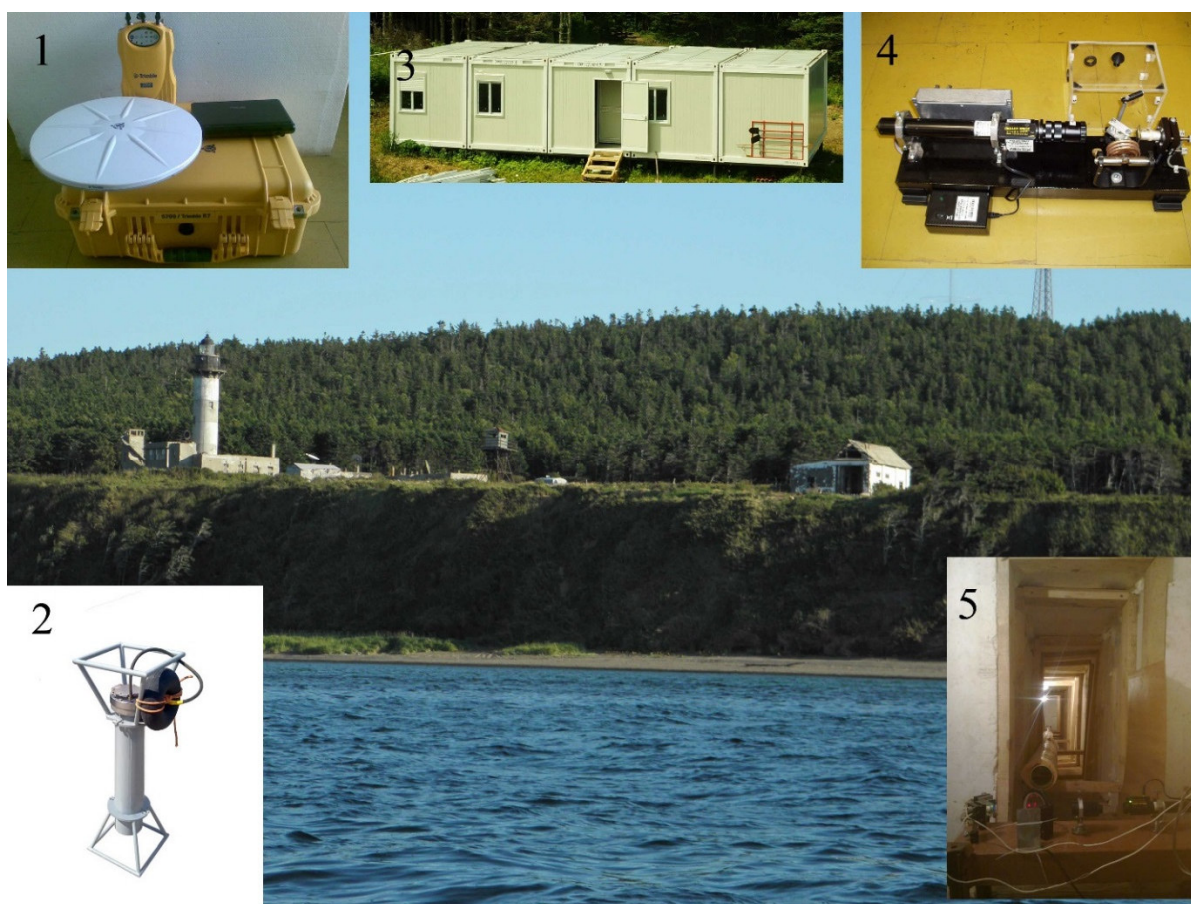


Рисунок 2.11 – Лазерно-интерференционный комплекс «м. Свободный».  
 1 – GPS-приёмник TRIMBLE 5700, 2 – лазерный гидрофон, 3 – лабораторное  
 помещение, 4 - лазерный нанобарограф, 5 - лазерный деформограф  
 горизонтального типа.

В 2013 году место расположения лазерных приборов дополнилось стационарным лабораторным помещением, которое было оснащено системой бесперебойного питания, способной обеспечивать автономность более 4 ч работы [43]. Экспериментальные работы на лазерно-интерференционном комплексе «м. Свободный» проводятся в период с весны по осень, зимой проезда к месту установки приборов нет. Данные со всех приборов по кабельным линиям поступают на пишущий компьютер, где после предварительной обработки формируется база экспериментальных данных, пополняющаяся каждый год. Использование часов точного времени, позволяет синхронизировать экспериментальные данные лазерно-интерференционного комплекса «м.



Свободный» с экспериментальными данными лазерно-интерференционного комплекса «м. Шульца».

## 2.3 ВЫВОДЫ

С использованием современных лазерно-интерференционных методов были созданы приборы, позволяющие проводить измерения в атмосфере, литосфере, гидросфере на уровне фона. На основе этих приборов были созданы два лазерно-интерференционных комплекса, расположенные на берегах Японского моря и Охотского моря. 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 сейсмоакустические 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.

Все лазерные измерители созданы на основе интерферометра Майкельсона. Горизонтальные лазерные деформографы неравноплечего типа, установленные на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», с длиной измерительного плеча 52.5 и 17.5 м и ориентацией «север-юг» и «запад-восток», соответственно. Оба лазерных деформографа позволяют регистрировать вариации смещения земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0.3 нм. Вертикальный лазерный деформограф неравноплечего типа, входящий в состав лазерно-интерференционного комплекса «м. Шульца», имеет длину измерительного плеча 3.5 м и позволяет регистрировать вариации смещения земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0.3 нм. Лазерный деформограф горизонтального типа, установленный на базе СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный» имеет длину измерительного плеча 10.5 м и ориентацию «север-

юг», позволяет регистрировать вариации смещения земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0.3 нм. Все лазерные деформографы установлены в термоизолированных помещениях.

Лазерные измерители вариаций давления гидросферы, входящие в состав лазерно-интерференционного комплекса «м. Шульца», созданы на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча около 0.5 м. Они позволяют регистрировать вариации гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа на глубинах до 500 м. Лазерные гидрофоны созданы на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, они входят в состав лазерно-интерференционного комплекса «м. Шульца» и лазерно-интерференционного комплекса «м. Свободный», способны регистрировать вариации гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0.5 мПа на глубинах до 50 м. Основными преимуществами лазерных гидрофонов над лазерными измерителями вариаций давления гидросферы является габариты, вес прибора и низкое энергопотребления за счет применения в них в качестве излучателя полупроводникового лазера.

Лазерные нанобарографы созданы на основе равноплечего интерферометра Майкельсона и входят в состав лазерно-интерференционного комплекса «м. Шульца» и лазерно-интерференционного комплекса «м. Свободный». Оба лазерных нанобарографа позволяют регистрировать вариации атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа.

### ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОМПЛЕКСА В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Гидроакустические исследования с применением лазерно-интерференционного комплекса в частотном диапазоне от 1 до 300 Гц установили присутствие сейсмоакустических шумов, вызванных работой механизмов морских судов [151, 75, 76, 34, 33, 31]. Постоянное присутствие сейсмоакустического шума в записях лазерно-интерференционных приборах вызвано интенсивным судоходством в шельфовой зоне Японского моря [29, 147]. С целью исследования природы сейсмоакустического шума в этом диапазоне частот был проведен ряд экспериментов с применением низкочастотных гидроакустических и сейсмоакустических излучателей и лазерно-интерференционных приборов [18, 27, 35], а также закономерностей их распространения и трансформации в шельфовой области. Сейсмоакустические поверхностные волны в области низких частот являются основным источником переноса акустической энергии на шельфе моря. При проведении сравнительных экспериментальных исследований акустических шумов на частотах ниже 25 Гц, при помощи гидрофонов и донных геофонов, было обнаружено, что в мелководной области шельфа в спектрах записей гидрофонов наблюдается уменьшение уровня спектральных составляющих, а в спектрах записей геофонов – увеличение уровня спектральных составляющих [31]. На проведенных ранее исследованиях с применением берегового лазерного деформографа, гидрофона и низкочастотного гидроакустического излучателя, была обнаружена аналогичная картина при регистрации сигнала с частотой 32 Гц [163].

### 3.1 ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ГРАНИЦЕ «ВОДА-ДНО»

Для изучения закономерностей распространения и трансформации гидроакустических колебаний на границе вода-дно был проведен ряд экспериментов с применением неравноплечих лазерных деформографов различной ориентации и длины, лазерных измерителей вариаций давления гидросферы, гидрофонных систем и низкочастотных гидроакустических излучателей на лазерно-интерференционном полигоне «м. Шульца». Один из первых экспериментов был проведен в 2004 году с применением гидроакустических излучателей, работающих на частотах 30 – 40 и 240 – 270 Гц, внешний вид которых представлен на рисунке 2.5. Работа с излучателями проводилась с борта маломерного судна [39]. Для приема в воде использовалась автономная станция на основе гидрофона, который был установлен на дно в специальной раме. Для регистрации сейсмоакустических волн использовался 52.5-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа ориентацией «север-юг». На рисунке 3.1 приведена схема проведения эксперимента. Всего было выполнено 8 станций, которые обозначены как ст. 1 – ст. 8, неравноплечий лазерный деформограф обозначен на карте как ЛД. Также на карте обозначено место постановки гидрофона.

Экспериментальные работы, обеспечивающие излучение гидроакустических сигналов, проводились с борта судна, которое на станциях 1 и 2 стояло на якорю, а на станциях 3 – 8 находилось в дрейфе. На станции 1 излучение проводилось с одинаковой мощностью на глубинах 5, 12 и 22 м, 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.

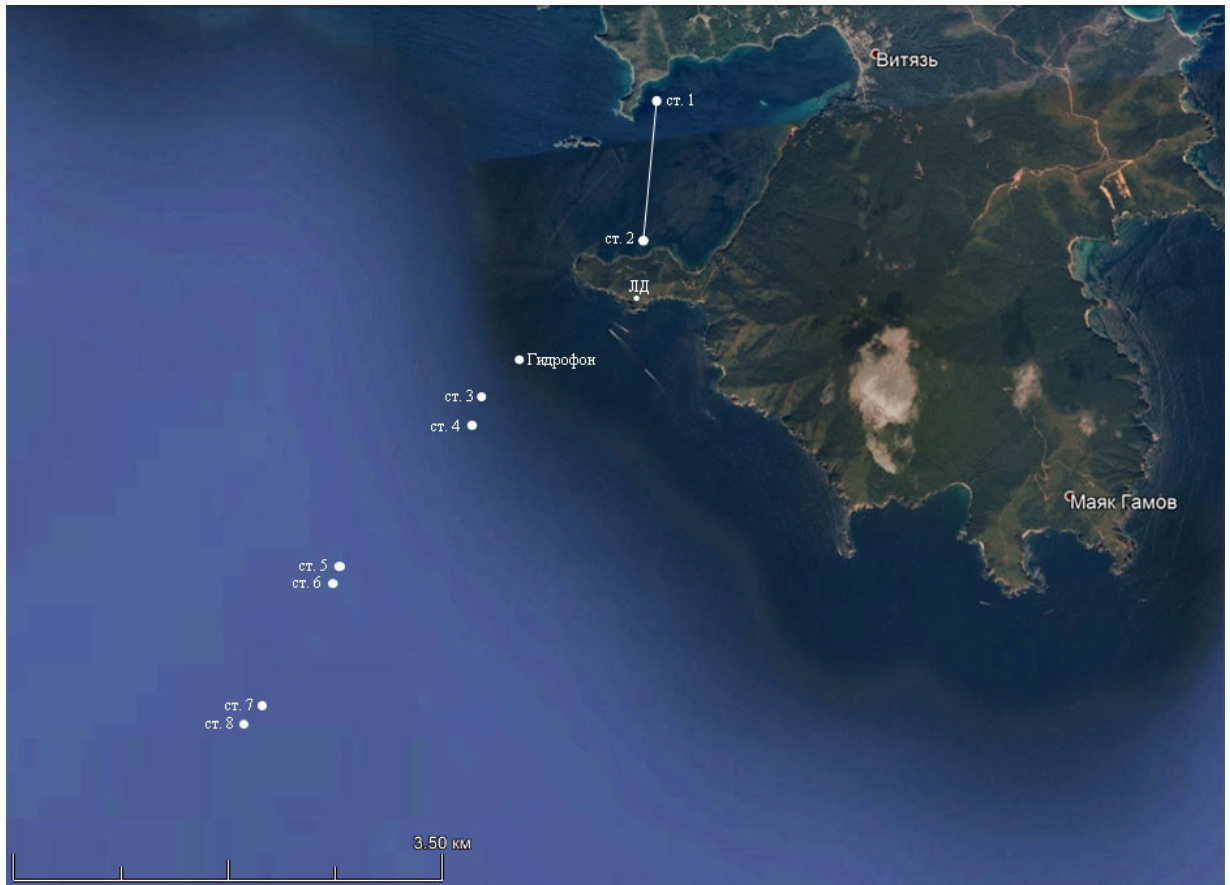


Рисунок 3.1 – Расположение станций гидроакустического излучения при выполнении экспериментальных работ в сентябре 2004 года.

Экспериментальные работы сначала выполнялись на станции 2, глубина в месте излучения составляла 27.7 м. Излучение тонового сигнала на глубине 5 м осуществлялось на частоте 32 Гц, начало излучения 17:43:57, конец излучения 17:58:02. Излучение тонового сигнала на глубине 15 м проводилось на частоте 32.6 Гц, начало излучения 18:13:00, конец излучения 18:28:00. Частота излучения гидроакустического сигнала записывалась по показаниям частотомера, установленного на борту судна. На рисунке 3.2 представлена динамическая спектрограмма участка записи лазерного деформографа, полученной во время проведения данного эксперимента.

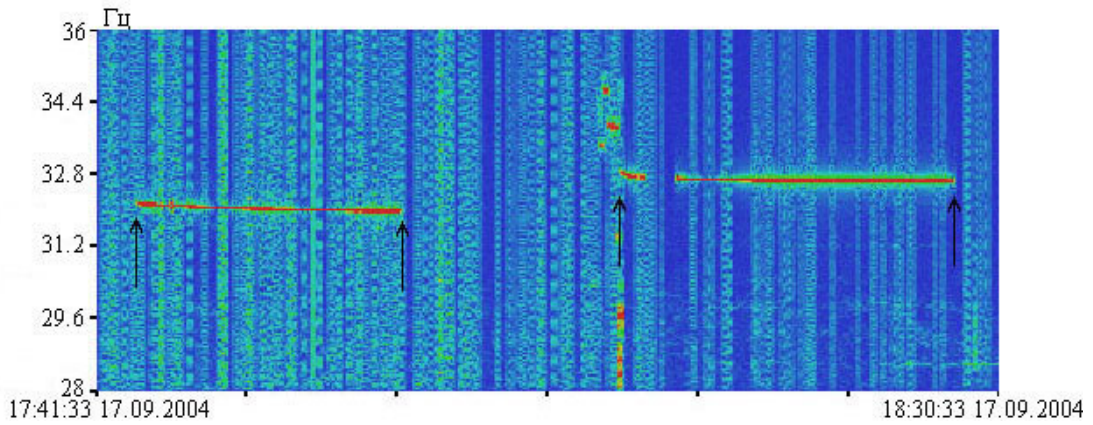


Рисунок 3.2 – Динамическая спектрограмма участка записи лазерного деформографа в момент излучения на 2 станции

На динамической спектрограмме участка записи неравноплечевого лазерного деформографа (рисунок 3.2) стрелками обозначено начало и конец приема излучающего сигнала. Первый отрезок соответствует излучению на глубине 5 м, а второй на глубине 12 м. В первом случае сигнал был принят на частоте 31.96 Гц, а во втором на частоте 32.92 Гц. На рисунке 3.3 представлены спектрограммы сейсмоакустического сигнала, полученные при обработке данных лазерного деформографа, при работе гидроакустического излучателя на 2 станции. На рисунке а) стрелкой обозначен спектральный максимум, соответствующий излучаемому сигналу при работе излучателя на глубине 5 м, а на рисунке б) стрелкой обозначен спектральный максимум, соответствующий излучаемому сигналу при работе излучателя на глубине 12 м.

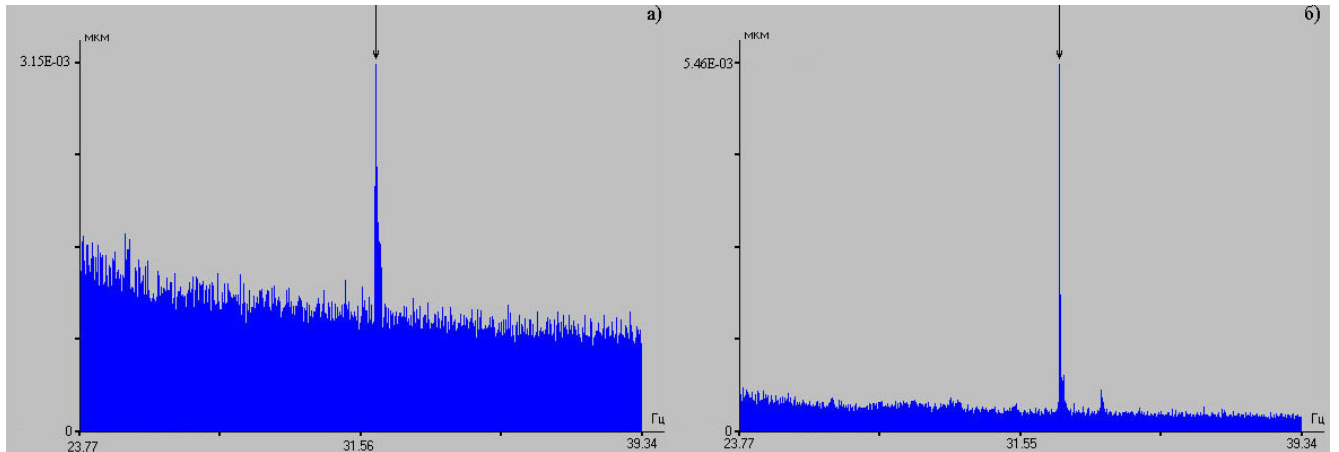


Рисунок 3.3 – Спектры записей лазерного деформографа в момент работы гидроакустического излучателя на глубине 5 м (левый) и на глубине 12 м (правый)

На станции №1 излучение гидроакустического сигнала выполнялось на 3 глубинах. На глубине 5 м излучение тонового сигнала осуществлялось на частоте 32.2 Гц, начало излучения 19:03:00, конец излучения 19:18:00. Излучение тонового сигнала на глубине 12 м выполнялось на частоте 32 Гц, начало излучения 19:24:00, окончание излучения 19:39:00. На глубине 22 м проводилось излучение тонового сигнала на частоте 36 Гц, начало излучения 20:01:08, окончание излучения 20:15:57. Мощность излучения на всех глубинах была одинакова. На рисунке 3.4 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.

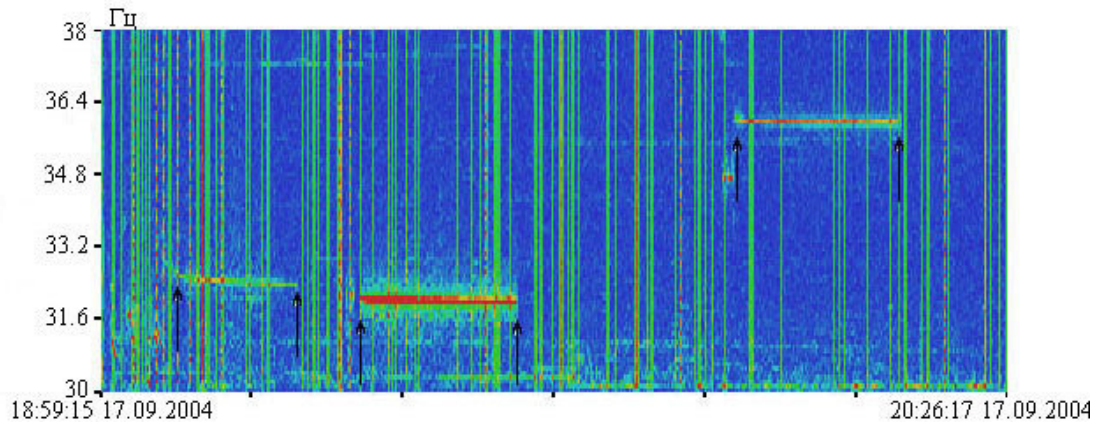


Рисунок 3.4 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа в момент работы гидроакустического излучателя

На рисунке 3.5 представлены спектрограммы сейсмоакустического сигнала, полученные при обработке данных лазерного деформографа, в момент работы гидроакустического излучателя на 1 станции. На рисунке а) стрелкой обозначен спектральный максимум, соответствующий излучаемому сигналу при работе излучателя на глубине 5 м, на рисунке б) стрелкой обозначен спектральный максимум, соответствующий излучаемому сигналу при работе излучателя на глубине 12 м, на рисунке в) стрелкой обозначен спектральный максимум, соответствующий излучаемому сигналу при работе излучателя на глубине 22 м. Частота сейсмоакустического сигнала при погружении излучателя на глубину 5 м составила 32.35 Гц. Частота сейсмоакустического сигнала при погружении на глубину 12 м составила 31.96 Гц. Частота сейсмоакустического сигнала при погружении на глубину 22 м составила 35.92 Гц. Мощность излучения тонового сигнала на разных глубинах была одинакова. Амплитуда принимаемого сейсмоакустического сигнала на разных глубинах была различной, так при глубине погружения излучателя на 5 м амплитуда составляла  $3.8 \cdot 10^{-5}$  мкм, при погружении излучателя на 12 м амплитуда составила  $2.43 \cdot 10^{-4}$  мкм, а при погружении излучателя на 22 м амплитуда составила  $1.06 \cdot 10^{-4}$  мкм. При одинаковой мощности излучения, наибольший уровень сигнала наблюдается при работе гидроакустического излучателя, погруженного на глубину 12 м. Это



подтверждается расчетом зависимости относительной излучаемой мощности точечного источника от его глубины, описанный в работе [146].

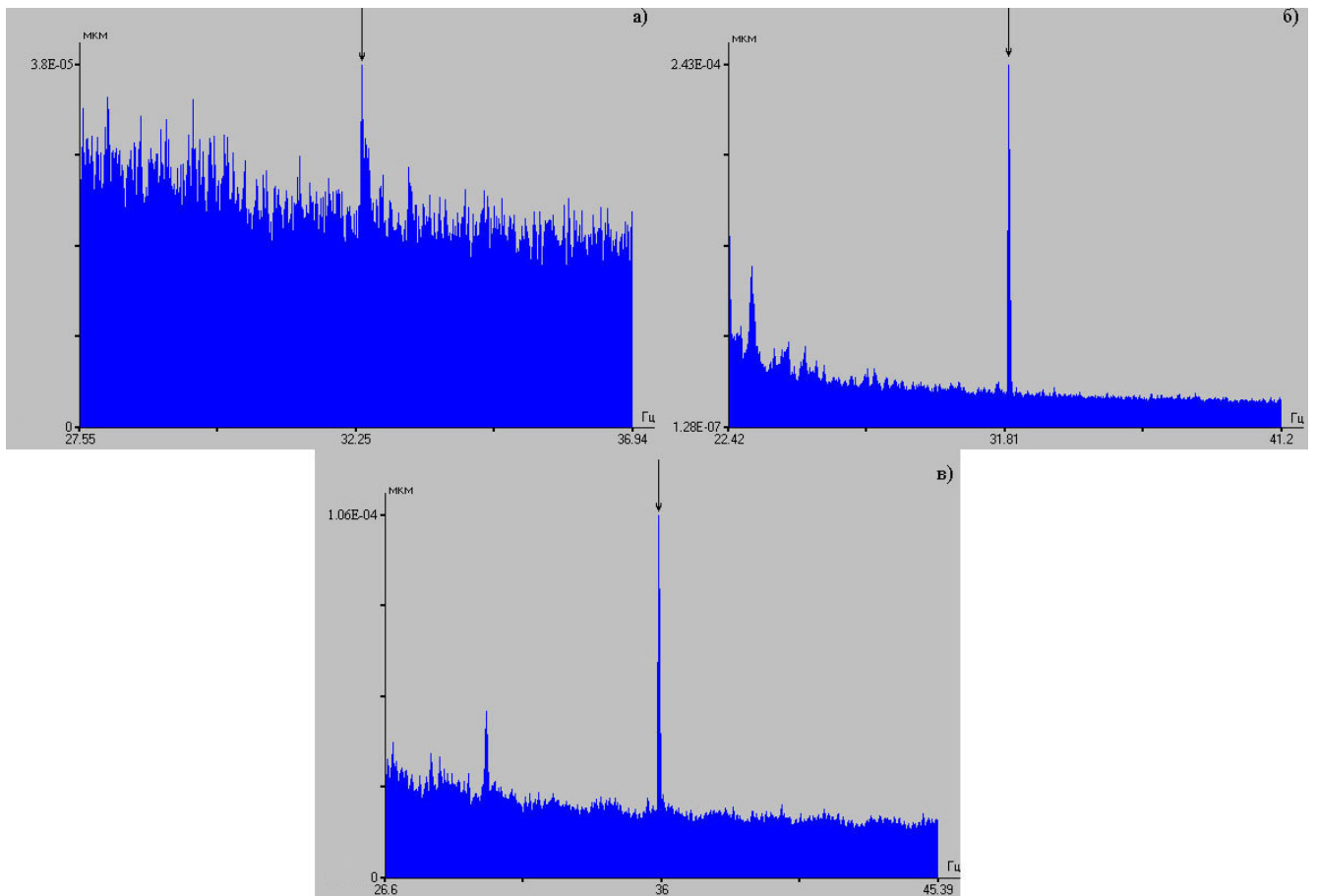


Рисунок 3.5 – Спектры записей лазерного деформографа в момент работы гидроакустического излучателя на глубине 5 м (а), на глубине 12 м (б), на глубине 22 м (в)

В ходе выполнения экспериментальных работ было проведено излучение гидроакустического тонального сигнала при движении судна по оси неравноплечего лазерного деформографа ориентации «север-юг» от станции №2 к станции №1. Эксперимент проводился 16 сентября 2004 года в бухте Витязь Японского моря в пасмурную, безветренную погоду. 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 3.6 приведена динамическая спектрограмма записи неравноплечего лазерного деформографа в момент работы излучателя, где стрелками обозначено начало и конец работы [67].

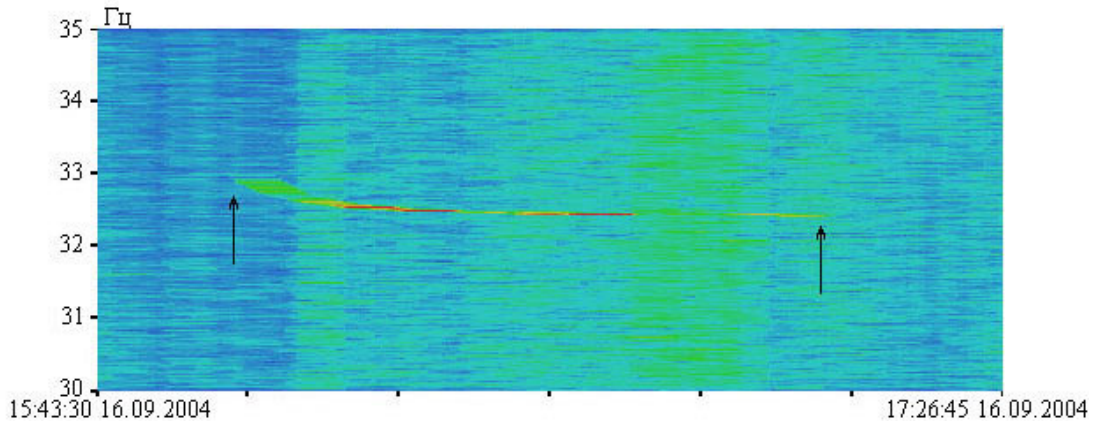


Рисунок 3.6 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа в момент работы гидроакустического излучателя

При спектральной обработке зарегистрированного лазерным деформографом гидроакустического сигнала было обнаружено, что его амплитуда меняется с периодом около 8.5 мин. Этот модуляционный эффект вызван сейшми б. Витязь с периодом около 17 мин, которые были зарегистрированы с помощью лазерных измерителей вариаций давления гидросферы [72].

В октябре 2009 года были проведены экспериментальные работы с помощью гидроакустического излучателя, неравноплечего лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. На рисунке 3.7 приведена карта-схема экспериментов. На карте точками 1 и 2 обозначены станции излучения, точкой ЛД обозначено место постановки интерференционного узла неравноплечего лазерного деформографа. Точкой ЛИВДГ обозначено место постановки лазерного измерителя вариаций давления гидросферы.

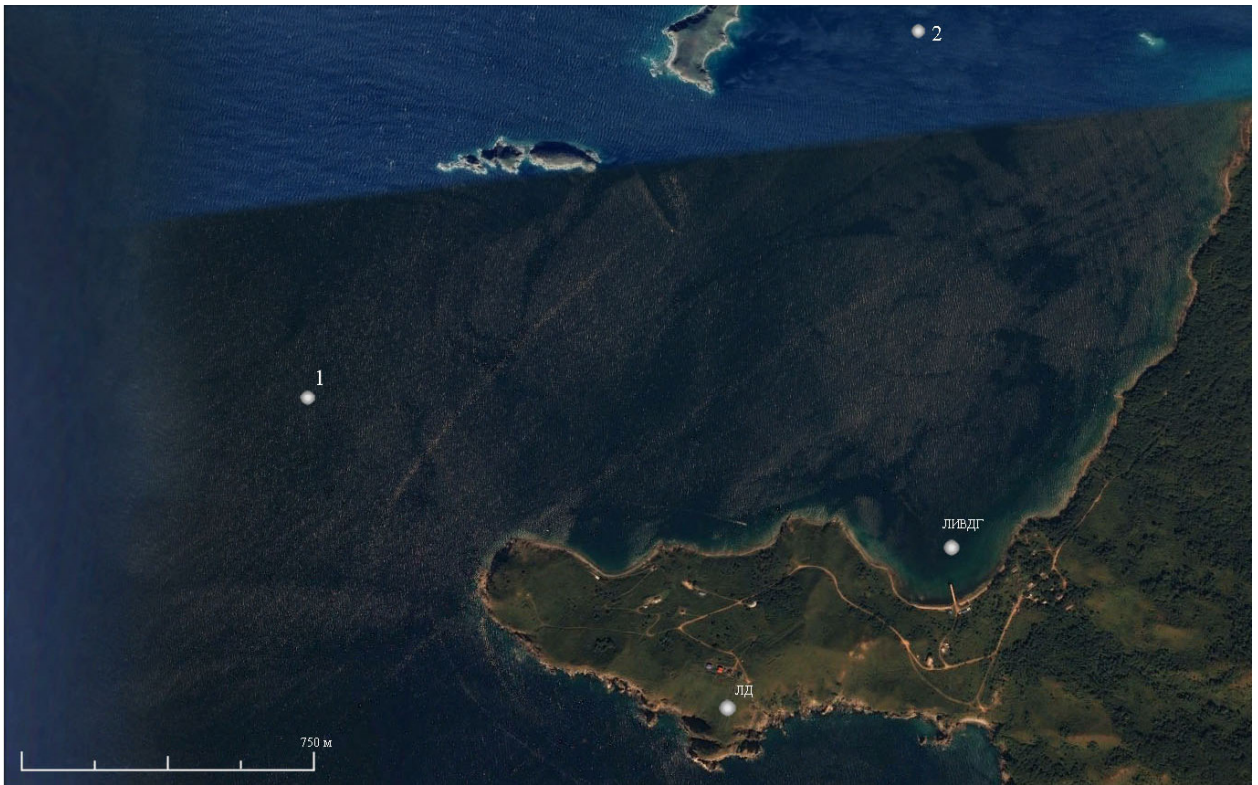


Рисунок 3.7 – Расположение станций гидроакустического излучения при выполнении экспериментальных работ в октябре 2009 года.

Первая станция излучения находилась в точке с координатами  $42^{\circ}35.272'N$ ,  $131^{\circ}08.527'E$ , а вторая станция излучения находилась в точке с координатами  $42^{\circ}35.923'N$ ,  $131^{\circ}09.833'E$ . Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы был установлен на дно в 200 м от берега в точке с координатами  $42^{\circ}35.038'N$ ,  $131^{\circ}09.849'E$  на глубине 15 м. Интерференционный узел неравноплечевого лазерного деформографа ориентацией «север-юг» установлен в точке с координатами  $42^{\circ}34.802'N$ ,  $131^{\circ}09.400'E$  на высоте около 60 м над уровнем моря. Расстояние от первой станции до лазерного деформографа составляет около 1.5 км, а до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы около 1.8 км. Расстояние от второй станции до лазерного деформографа составляет около 2.2 км, а до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы около 1.6 км.

На рисунке 3.8 приведены динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы гидроакустического излучателя на первой станции.

Стрелками обозначено начало и окончание работы гидроакустического излучателя. На разных глубинах излучатель работал с одной и той же мощностью. Первый сигнал соответствует излучению на глубине 5 м, а второй на глубине 15 м (рисунок 3.8). На глубине 5 м излучение тонового сигнала было на частоте 33 Гц, начало излучения 11:45:30, конец излучения 11:59:30. Излучение тонового сигнала на глубине 15 м было на частоте 33 Гц, начало излучения 12:10:40, окончание излучения 12:23:40.

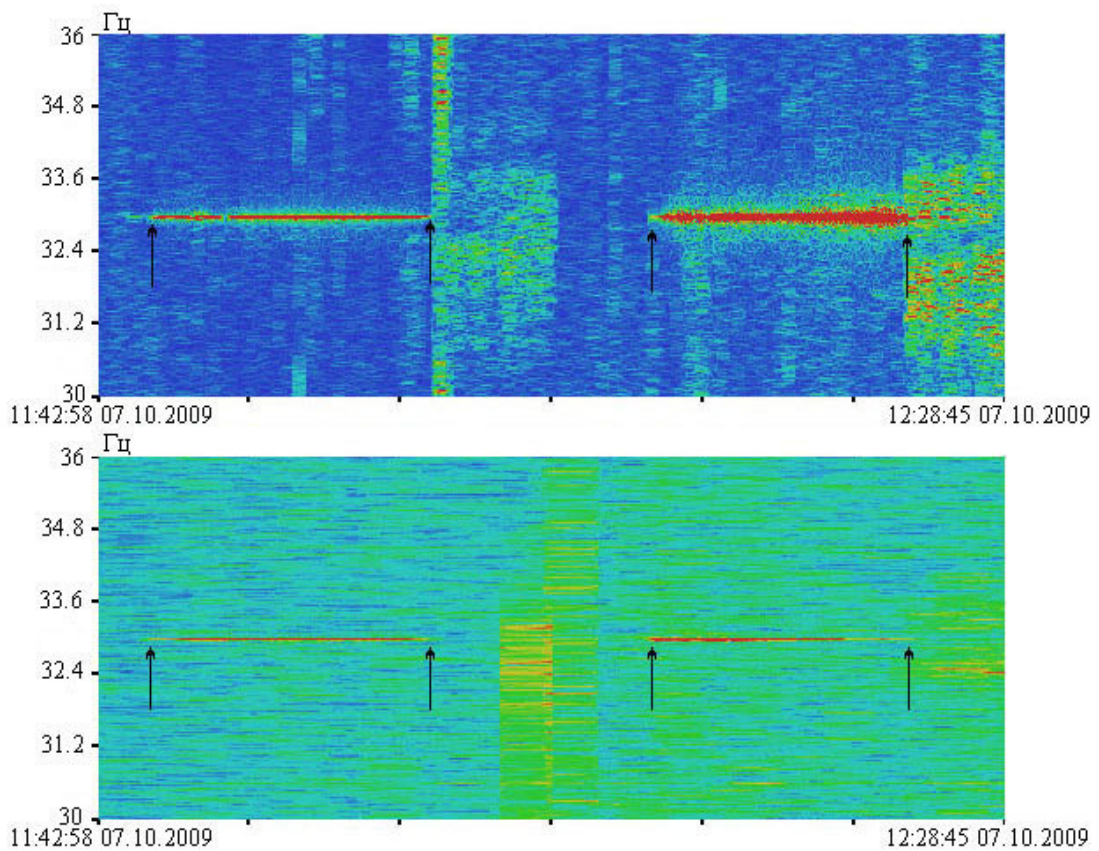


Рисунок 3.8 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы гидроакустического излучателя на станции 1

На рисунке 3.9 приведены спектры записей сейсмоакустического сигнала, выделенного из записи неравноплечего лазерного деформографа, и гидроакустического сигнала, выделенного из записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, в момент работы гидроакустического излучателя

на первой станции. На спектрах записей сейсмоакустического сигнала стрелкой обозначен максимумы мощности излучения на глубине 5 и 15 м (рисунок 3.9 а и б). На спектрах записей гидроакустического сигнала стрелкой обозначены максимумы мощности излучения на глубинах 5 и 15 м (рисунок 3.9 в и г). На записях лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы амплитуда принимаемого сигнала при излучении на глубине 15 м больше, чем при излучении на глубине 5 м, при одинаковой мощности излучения. Так на спектре записи лазерного деформографа амплитуда сигнала при излучении на глубине 5 м составила  $2.28 \cdot 10^{-4}$  мкм, а при излучении на глубине 15 м  $8.32 \cdot 10^{-4}$  мкм. На спектрах записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы амплитуда сигнала при излучении на глубине 5 м составила  $5.63 \cdot 10^{-3}$  Па, а при излучении на глубине 15 м  $8.9 \cdot 10^{-3}$  Па. Отношение амплитуды выделенного сигнала из записи лазерного деформографа к фоновому уровню выше, чем отношение амплитуды выделенного сигнала из записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы к фоновому уровню, что связано с расположением измерительных приборов. Расстояние от гидроакустического излучателя до лазерного деформографа меньше, чем до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, и на линии от первой станции до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы нет прямой видимости, трасса преграждается отрезком суши.

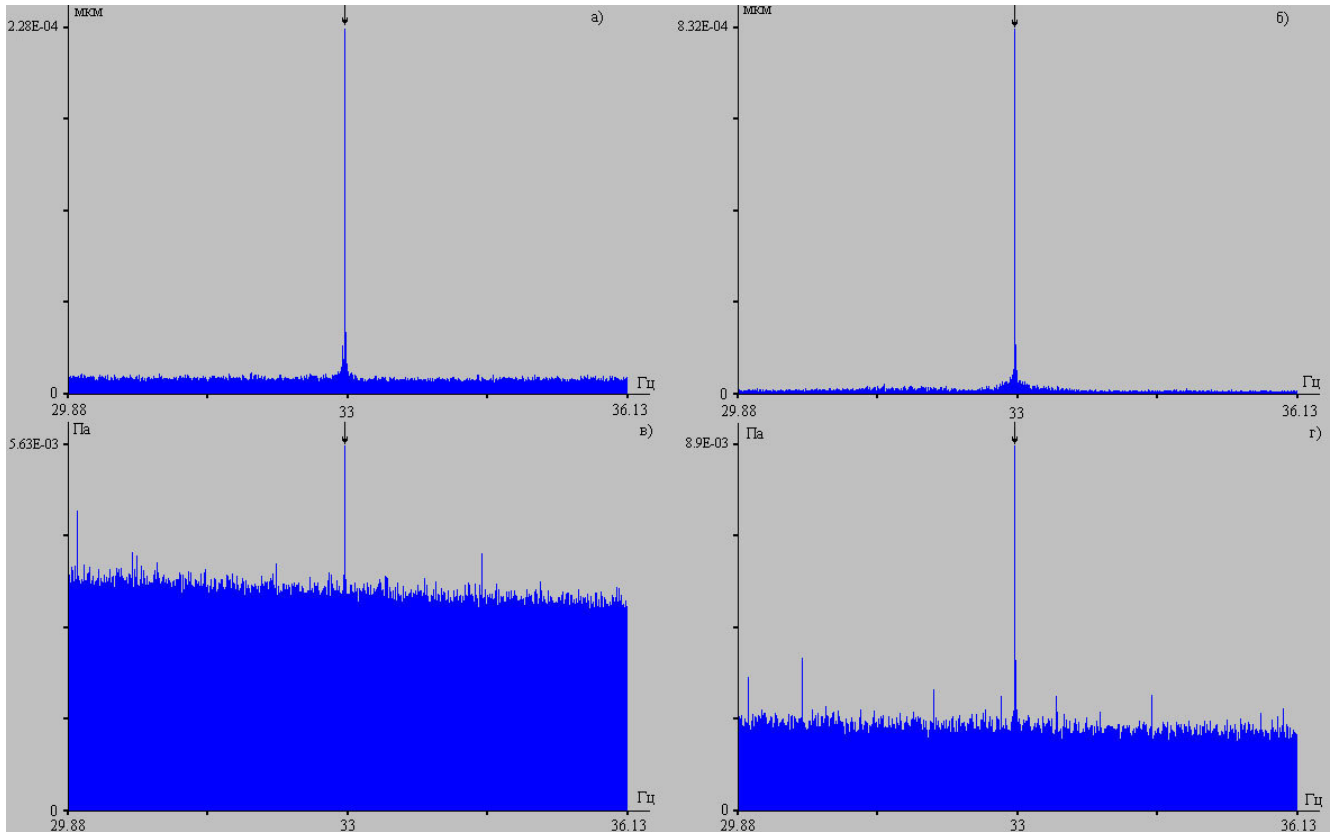


Рисунок 3.9 – Спектры записей лазерного деформографа (а и б) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (в и г) в момент работы гидроакустического излучателя на станции 1

На рисунке 3.10 приведены динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы гидроакустического излучателя на второй станции. Стрелками обозначено начало и окончание работы гидроакустического излучателя. На разных глубинах излучатель работал с одной и той же мощностью. Первый сигнал соответствует излучению на глубине 5 м, а второй на глубине 15 м. На глубине 5 м излучение тонового сигнала было на частоте 33 Гц, начало излучения 13:28:00, конец излучения 13:42:00. Излучение тонового сигнала на глубине 15 м было на частоте 33 Гц, начало излучения 13:52:20, окончание излучения 14:06:20.

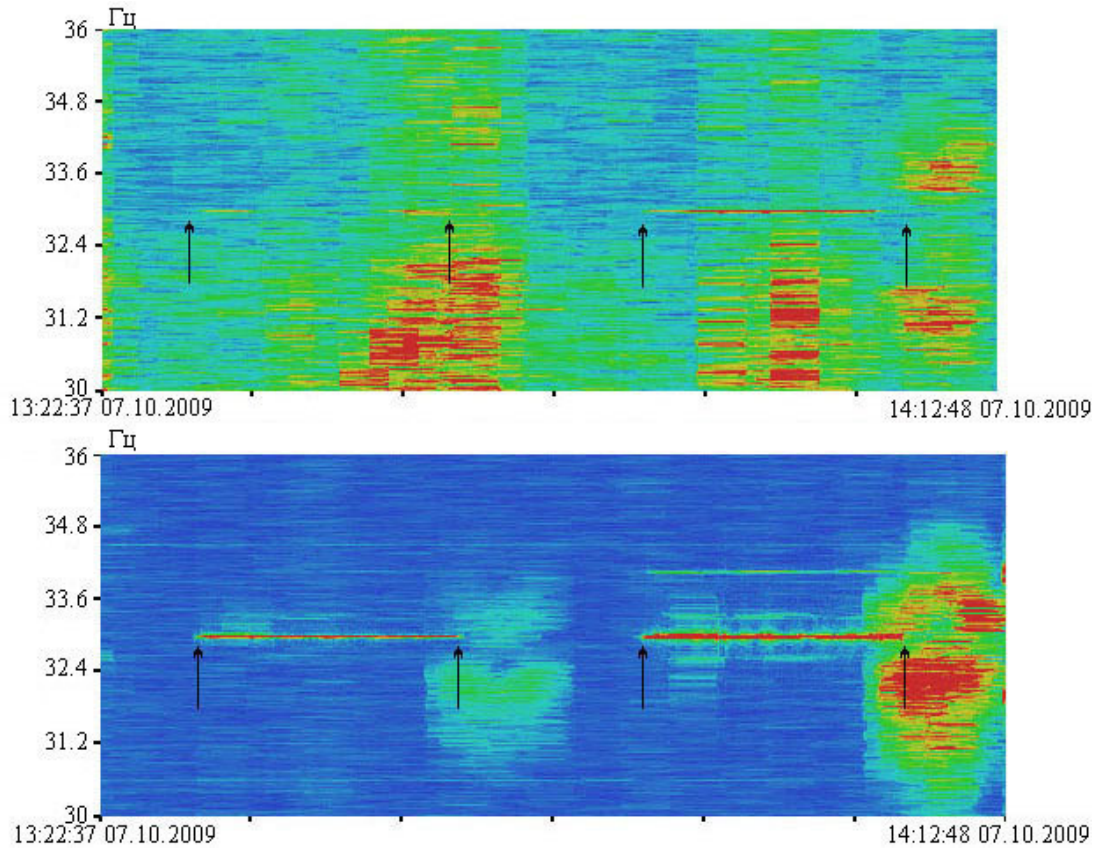


Рисунок 3.10 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы гидроакустического излучателя на станции 2

На рисунке 3.11 приведены спектры сейсмоакустического сигнала, полученные при обработке записи неравноплечего лазерного деформографа, и гидроакустического сигнала, полученные при обработке записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, в момент работы гидроакустического излучателя на второй станции. На спектрах записей сейсмоакустического сигнала стрелкой обозначены максимумы мощности излучения на глубине 5 и 15 м (рисунок 3.11 а и б). На спектрах записей гидроакустического сигнала стрелкой обозначены максимумы мощности излучения на глубинах 5 и 15 м (рисунок 3.11 в и г). На записях лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы амплитуда принимаемого сигнала при излучении на глубине 15 м больше, чем при излучении на глубине 5 м, при одинаковой мощности излучения. Так на спектре записи лазерного деформографа амплитуда сигнала при

излучении на глубине 5 м находится на уровне фоновых колебаний, а при излучении на глубине 15 м составила  $4.28 \cdot 10^{-5}$  мкм. На спектрах записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы амплитуда сигнала при излучении на глубине 5 м составила  $1.54 \cdot 10^{-2}$  Па, а при излучении на глубине 15 м  $4.45 \cdot 10^{-2}$  Па. При рассмотрении отношения выделенного сигнала на частоте гидроакустического излучателя к фоновым колебаниям выявлено, что при регистрации лазерным деформографом отношение меньше, чем при регистрации лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. Это связано с расположением измерительных приборов. Расстояние от гидроакустического излучателя до лазерного деформографа больше, чем до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы [45].

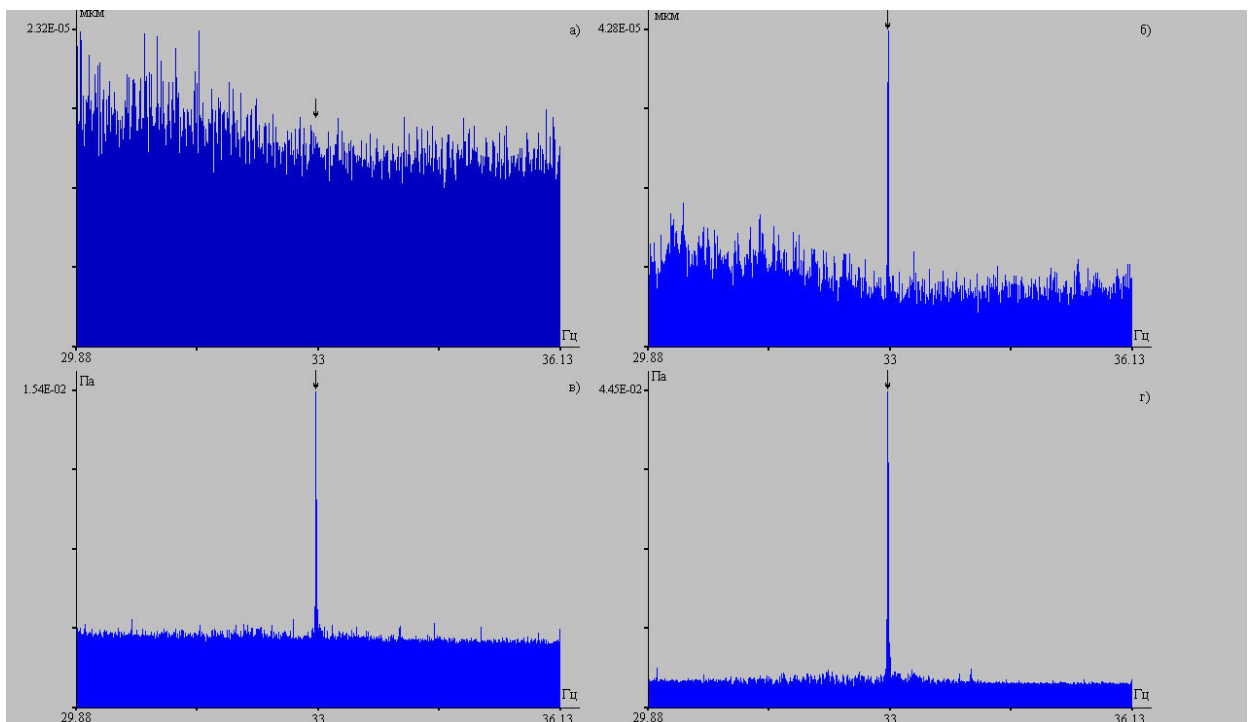


Рисунок 3.11 – Спектры записей лазерного деформографа (а и б) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (в и г) в момент работы гидроакустического излучателя на станции 2

Анализ спектров записей лазерного деформографа показал, что наибольшая амплитуда, принимаемого сейсмоакустического сигнала, наблюдалась при работе



гидроакустического излучателя на глубинах 12 – 15 м. При этом мощность излучаемого сигнала при работе в одной станции на разных глубинах была одинаковой, а от станции к станции была различной.

В мае 2015 года был проведен ряд экспериментальных работ с применением гидроакустических излучателей с центральной частотой излучения 22 Гц и 33 Гц, неравноплечих лазерных деформографов и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. На рисунке 3.12 приведена карта-схема эксперимента, где точкой ЛД обозначено место постановки лазерных деформографов, точкой ЛИВДГ обозначено место постановки лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, точками 1 – 5 обозначены места работы гидроакустических излучателей. В первой точке работы проводились с помощью излучающей гидроакустической системы, предназначенной для генерации гармонических и фазоманипулированных сигналов в полосе частот 1 Гц при центральной частоте в диапазоне 19 - 26 Гц [70]. В точках 2 – 5 работы велись с гидроакустическим излучателем, работающим на частотах 30 – 40 Гц.

В качестве приемных систем использовались два неравноплечих лазерных деформографа с длинами измерительных плеч 52.5 и 17.5 м, ориентацией «север-юг» и «запад-восток», соответственно. А на шельфе Японского моря на глубине 33 м был установлен лазерный измеритель вариаций давления гидросферы в точке с координатами 42°34' 40.2" N, 131°09' 17.2" E. Данные со всех измерителей по кабельным линиям поступали на пишущей компьютер где, после предварительной обработки, формировались в файлы длительностью 1 ч с частотой 500 Гц. Расстояния от станций излучения до лазерных деформографов и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы приведены в таблице 3.1. Минимальное расстояние от станции излучения до лазерных деформографов составляло 8.2 км, а максимальное 14.8 км. Минимальное расстояние от станций излучения до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы составляет около 8 км, а максимальное 14.5 км.

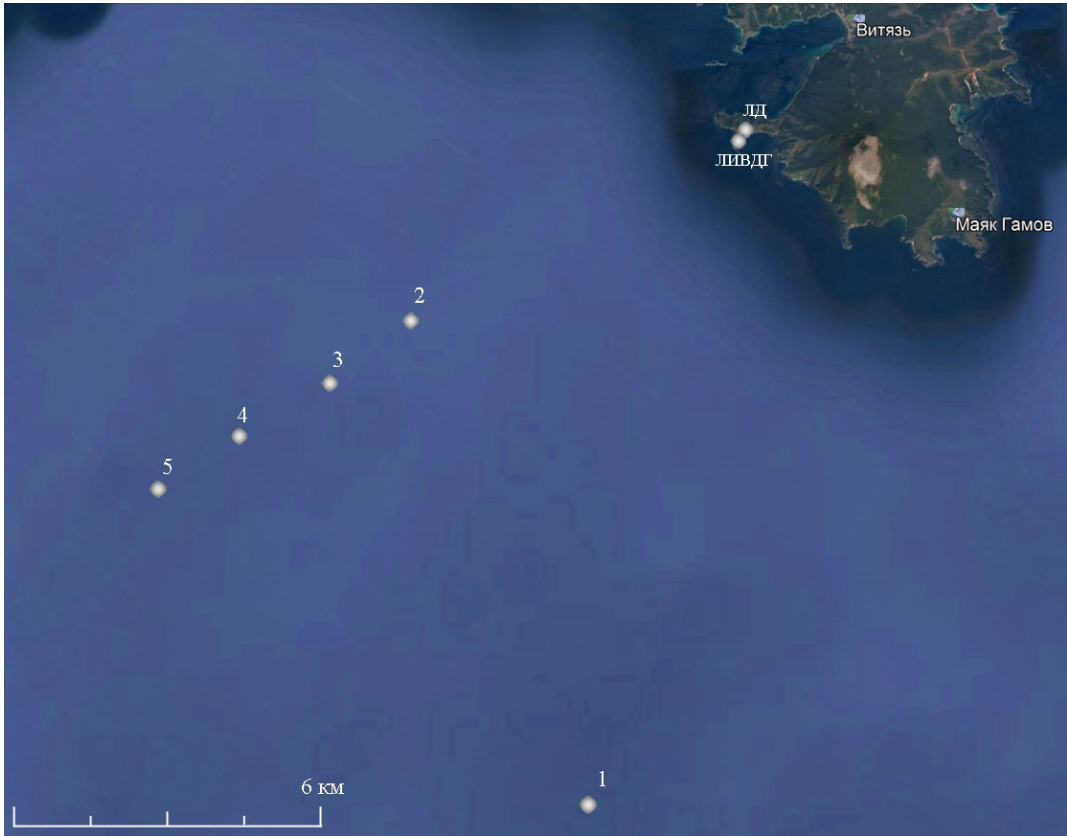


Рисунок 3.12 – Расположение станций гидроакустического излучения и постановки приемных систем при выполнении экспериментальных работ в мае 2015 года.

Таблица 3.1 – Расстояния (в километрах) от станций излучения до лазерных деформографов и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы.

	Станция излучения				
	1	2	3	4	5
Лазерные деформографы	14.8	8.2	10.4	12.6	14.7
Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы	14.5	8	10.2	12.4	14.5

В момент проведения эксперимента в первой точке источником тонового акустического сигнала длительностью 300 с являлся гидроакустический излучатель с центральной частотой 22 Гц. В ходе работы излучатель был погружен на глубину 18 м.

При обработке записей неравноплечих лазерных деформографов в момент работы гидроакустического излучателя был обнаружен сейсмоакустический сигнал с частотой, соответствующий частоте излучения. На спектре лазерного деформографа ориентацией «север-юг», приведенном на рисунке 3.13 а), стрелкой отмечен максимум мощности излучения при работе излучателя на глубине 18 м. При этом амплитуда сейсмоакустического сигнала составляет  $1.79 \cdot 10^{-4}$  мкм. На спектре лазерного деформографа ориентацией «запад-восток» (рисунок 3.13 б) стрелкой отмечен максимум мощности излучения, при этом амплитуда сигнала составила  $1.15 \cdot 10^{-3}$  мкм. На спектре лазерного измерителя вариаций давления гидросферы пик с частотой 22 Гц не выделяется и его амплитуда не выше фоновых колебаний (рисунок 3.13 в). Надо отметить, что длина излучённой гидроакустической волны, на частоте 22 Гц, примерно равна 68 м, а половина длины волны равна 34 м. Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления стоял на меньшей глубине и, поэтому, как будет показано ниже, не мог эффективно регистрировать данные гидроакустические волны.

При выполнении работ в следующих точках работы велись с помощью гидроакустического излучателя с максимальной мощностью на частоте 33 Гц, который излучал последовательность, состоящую из тонального сигнала длительностью 300 с и нескольких  $m$  последовательностей. В ходе работ излучатель во всех точках погружался на глубину 15 м, мощность гидроакустического сигнала была одинакова.

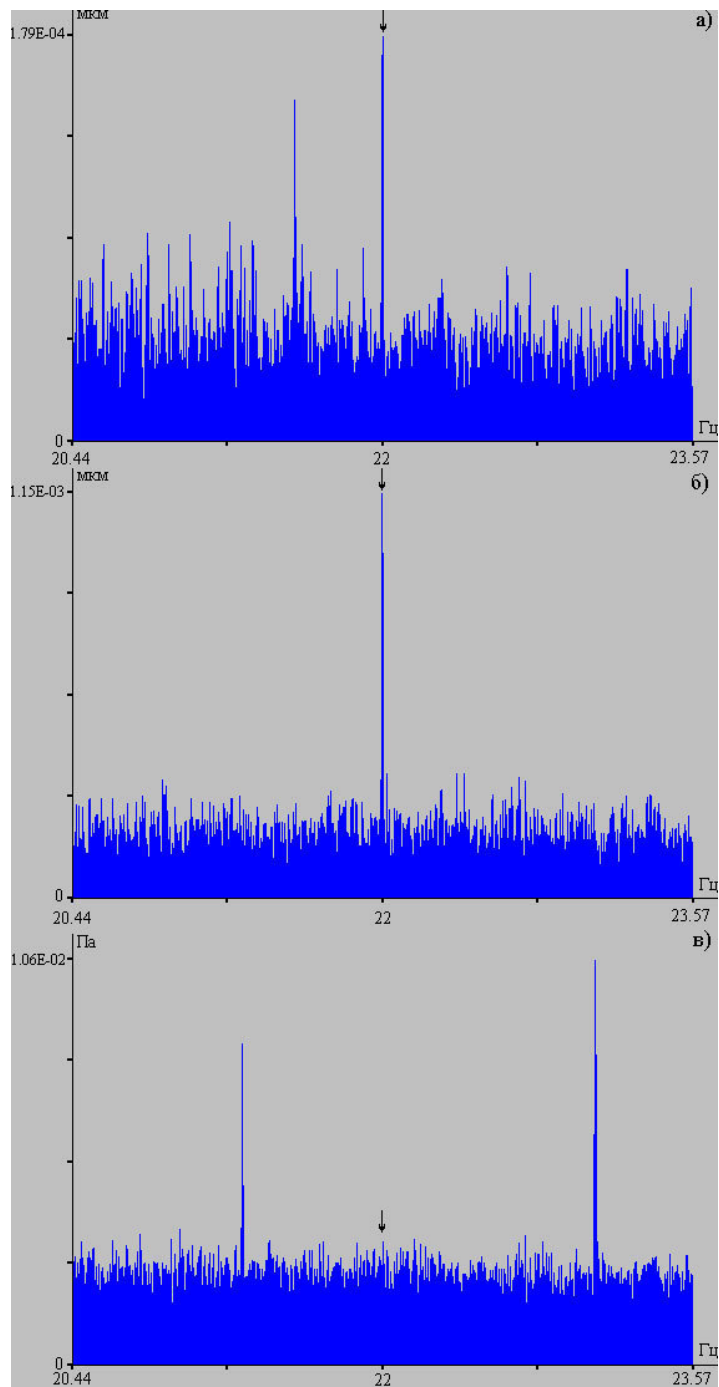


Рисунок 3.13 – Спектры записей лазерного деформографа ориентацией «север-юг» (а), лазерного деформографа ориентацией «запад-восток» (б) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (в) в момент работы гидроакустического излучателя на частоте 22 Гц.

При обработке сигналов неравноплечего лазерного деформографа ориентацией «север-юг» и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в момент работы гидроакустического излучателя обнаружены пики с частотами

33 Гц, соответствующие частоте излучения. Так в момент работы гидроакустического излучателя во второй точке на спектре записи лазерного деформографа выделяется (рисунок 3.14 а) пик с частотой 33 Гц и амплитудой  $1.47 \cdot 10^{-4}$  мкм, а на записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.14 б) выделен пик с частотой 33 Гц и амплитудой  $1.39 \cdot 10^{-3}$  Па. В момент работы гидроакустического излучателя в третьей точке на спектре записи лазерного деформографа выделяется (рисунок 3.14 в) пик с частотой 33 Гц и амплитудой  $1.42 \cdot 10^{-4}$  мкм, а на записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.14 г) выделен пик с частотой 33 Гц и амплитудой  $2.61 \cdot 10^{-3}$  Па.

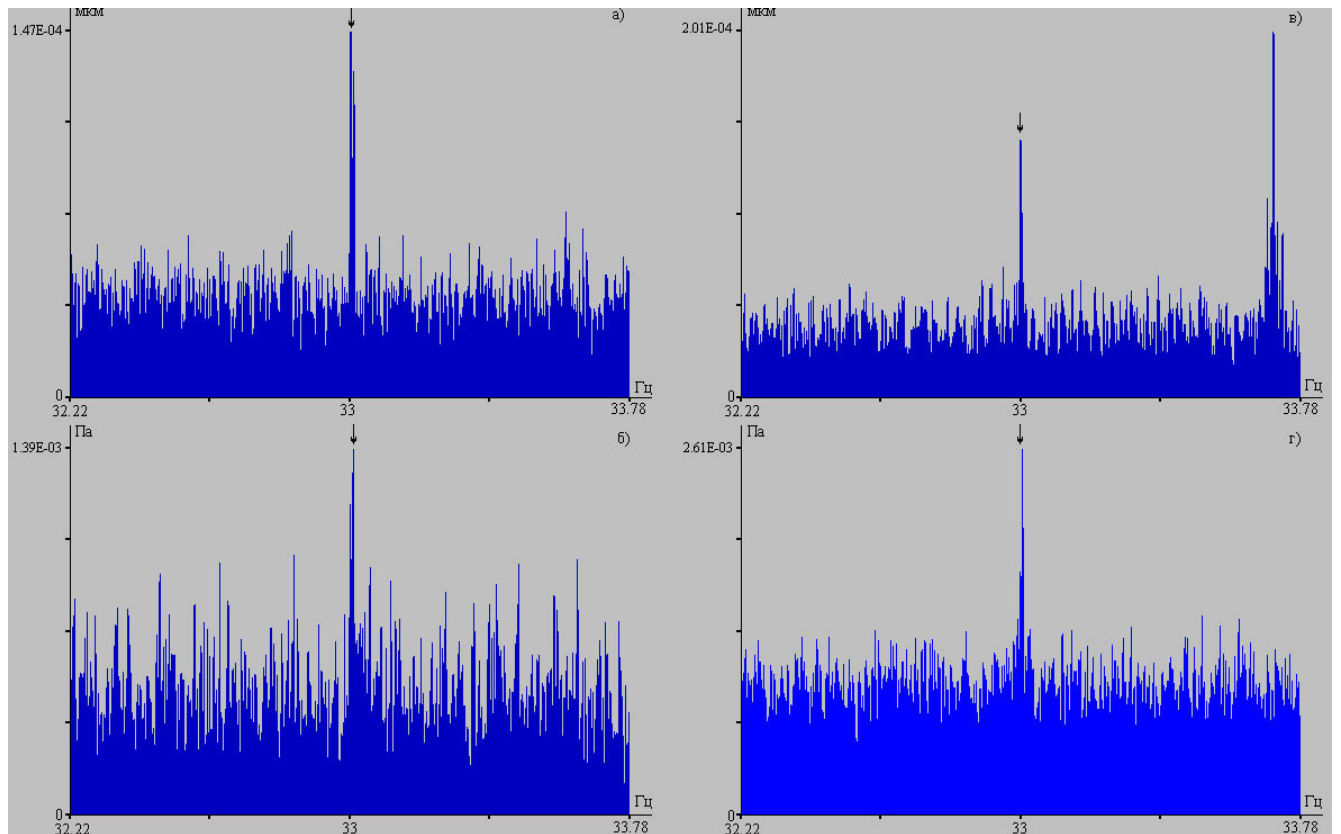


Рисунок 3.14 – Спектры записей лазерного деформографа (а и в) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б и г) в момент работы гидроакустического излучателя в точках 2 и 3

В момент работы гидроакустического излучателя в четвертой точке на спектре записи лазерного деформографа выделяется (рисунок 3.15 а) пик с

частотой 33 Гц и амплитудой  $1.07 \cdot 10^{-4}$  мкм, а на записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.15 б) выделен пик с частотой 33 Гц и амплитудой  $1.16 \cdot 10^{-3}$  Па. А в момент работы гидроакустического излучателя в пятой точке на спектре записи лазерного деформографа выделяется (рисунок 3.15 в) пик с частотой 33 Гц и амплитудой  $9.52 \cdot 10^{-5}$  мкм, а на записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.15 г) выделен пик с частотой 33 Гц и амплитудой  $2.54 \cdot 10^{-3}$  Па. Надо отметить, что длина излучённой гидроакустической волны, на частоте 33 Гц, примерно равна 45 м, а половина длины волны равна 22.5 м. Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления стоял на большей глубине, что позволяло ему эффективно регистрировать излучённый сигнал на частоте 33 Гц.

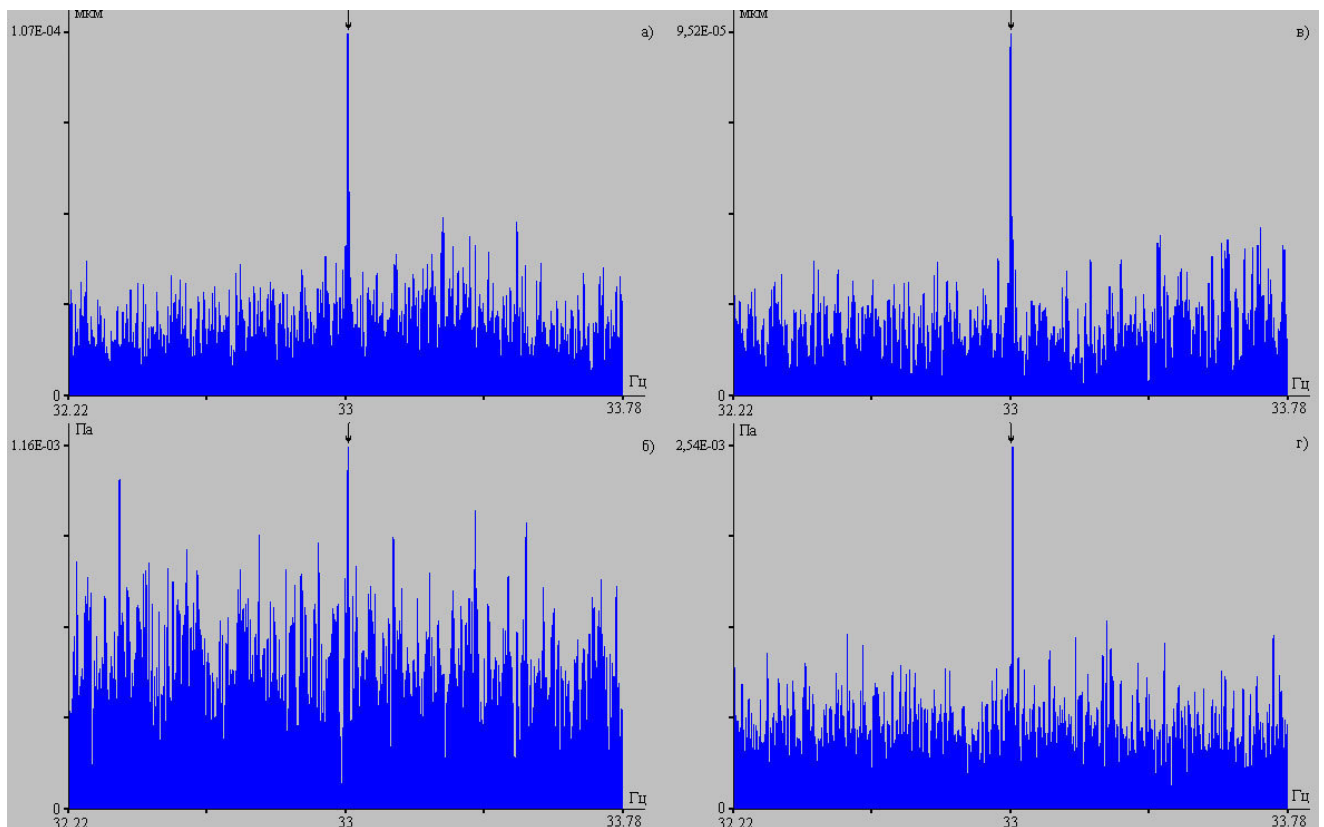


Рисунок 3.15 – Спектры записей лазерного деформографа (а и в) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б и г) в момент работы гидроакустического излучателя в точках 4 и 5

С целью изучения закономерностей распространения и трансформации гидроакустических сигналов, генерируемых низкочастотным гидроакустическим излучателем в диапазоне частот 19–26 Гц, на шельфе убывающей глубины был проведен ряд экспериментальных работ. Один из экспериментов проводился в бухте Витязь Японского моря. В качестве приемных систем использовались лазерные деформографы и гидрофон «Bruel&Kjaer» 8104, а в качестве источника использовался низкочастотный гидроакустический излучатель [45], создающий в воде низкочастотные гармонические сигналы на частоте 22 Гц. Излучатель был опущен на глубину 18 м с борта судна, стоящего на якорю в точке 2 (рисунок 3.8). На трассе «излучатель – лазерный деформограф» в воде было выполнено семь точек приема гидроакустического сигнала гидрофоном. В каждой точке приема от поверхности до дна проводилась регистрация на горизонтах через 1 м. Низкочастотный гидроакустический излучатель создавал давление около 7 кПа при работе в точках 3 – 7, а при работе в точках 1 – 2 – около 5.8 кПа.

По данным гидрофона в каждой точке приема строилась кривая, принятого гидроакустического сигнала от поверхности до дна. Затем полученная кривая описывалась полиномиальным уравнением наиболее подходящей степени. Синхронно с работой гидроакустического излучателя велась регистрация сейсмоакустических сигналов лазерным деформографом, полученных в результате трансформации гидроакустических сигналов в сейсмоакустические на границе «вода-дно». Полученные полиномиальные выражения и амплитуды сейсмоакустического сигнала приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. – Экспериментальные данные

№ точки	Глубина места, м	Расстояние от точки излучения, м	Уравнение кривой	Амплитуда смещения, нм
1	37	335	$S_{37}(z) = (3.2835124 \cdot 10^{-7}) \cdot z^7 -$ $-(4.5340116 \cdot 10^{-5}) \cdot z^6 + 0.0024484 \cdot z^5 -$ $-0.0643262 \cdot z^4 + 0.8225148 \cdot z^3 -$ $4.5942522 \cdot z^2 + 21.798353 \cdot z - 4.9269574$	14.6

2	37.5	502	$S_{37.5}(z) = (8.8507925 \cdot 10^{-5}) \cdot z^4 - 0.0085366 \cdot z^3 + 0.1861208 \cdot z^2 + 6.2774712 \cdot z + 2.4975244$	16.4
3	36.2	674	$S_{36.2}(z) = -(1.1161644 \cdot 10^{-4}) \cdot z^4 + 0.0063251 \cdot z^3 - 0.0895405 \cdot z^2 + 5.0292998 \cdot z - 0.206082$	28.7
4	30	970	$S_{30}(z) = (1.2446708 \cdot 10^{-4}) \cdot z^4 - 0.0112489 \cdot z^3 + 0.2185657 \cdot z^2 + 3.8794756 \cdot z + 0.9499853$	26.7
5	20	1148	$S_{20}(x) = (1.641604 \cdot 10^{-4}) \cdot z^4 - 0.0135414 \cdot z^3 + 0.2436404 \cdot z^2 + 1.2073308 \cdot z + 1.462406$	28.1
6	10	1252	$S_{10}(z) = 0.0561111 \cdot z^2 - 0.9616667 \cdot z + 6.2055556$	24.4
7	5	1300	$S_5(z) = 1.075 \cdot z^2 - 6.725 \cdot z + 10.85$	23.3

В расчётах плотности энергии гидроакустических волн и плотности энергии поверхностных волн рэлеевского типа использовались следующие данные:  $\rho_g = 1000 \text{ кг/м}^3$  (плотность воды),  $c = 1500 \text{ м/с}$  (скорость звука в воде),  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$  (плотность пород верхнего слоя земной коры),  $c_p = 2300 \text{ м/с}$  (скорость волны рэлеевского типа на границе «земная кора – воздух» [34]),  $\nu = 22 \text{ Гц}$  (частота),  $\theta = 9.4^0$  (угол между осью лазерного деформографа и линией «излучатель – станции 1 – 7»),  $\omega = 2\pi\nu$ .

Расчет плотности энергии гидроакустической волны, распространяющихся по шельфу, будет проводится по следующей формуле:

$$E_{ак} = \int_0^h \frac{(S_h(z))^2}{2\rho_g c^2} dz, \quad (3.1)$$

где:  $S_h(z)$  – уравнение кривой при глубине моря  $h$ , приведенной в таблице 3.2.

В соответствии с [40, 197] будем считать, что излучённый низкочастотным гидроакустическим излучателем сигнал доходит до лазерного деформографа в виде волн поверхностного типа. Основным источником смещения земной коры, в исследуемом диапазоне частот, являются затухающие поверхностные волны рэлеевского типа. Амплитуда данных волн экспоненциально затухает с глубиной земной коры. В следствии чего, плотность упругой энергии поверхностных волн рэлеевского типа будет рассчитываться по следующей формуле:



$$E_{y\theta} = \int_0^{\lambda_b} \frac{\rho_p \omega^2 u_{j\theta}^2 \exp(-4\pi z / \lambda_b)}{2 \cos(\theta)^2} dz, \quad (3.2)$$

где:  $u_{j\theta}$  – амплитуда смещения на частоте излучённого сигнала, равная половине амплитуды волны на частоте 22 Гц, выделенной из записи лазерного деформографа,  $\lambda_b$  – длина волны рэлеевского типа на границе «воздух – земная кора», равная 104.5 м. Полученные расчетные данные плотности энергии гидроакустических волн, плотности энергии поверхностных волн рэлеевского типа, доли плотности гидроакустической энергии в каждой точке приема от плотности энергии излучателя с учетом цилиндрической расходимости излучённого сигнала, а также доли плотности гидроакустической энергии, перешедшей в каждой точке приема в плотность сейсмоакустической энергии с учетом цилиндрической расходимости волны рэлеевского типа приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. – Результаты расчета

Расстояние от точки излучения, м	Глубина места, м	Плотность энергии излучателя, Дж/м <sup>3</sup>	Плотность гидроакустической энергии, Дж/м <sup>3</sup>	Излучатель / Гидроакустика, %	Плотность сейсмоакустической энергии, Дж/м <sup>3</sup>	Сейсмоакустика/гидроакустика, %
335	37	0.124	$3.1 \cdot 10^{-4}$	83.8	$0.91 \cdot 10^{-8}$	4.2
502	37.5	0.124	$1.7 \cdot 10^{-4}$	68.8	$1.15 \cdot 10^{-8}$	8.8
674	36.2	0.176	$8.3 \cdot 10^{-5}$	31.8	$3.51 \cdot 10^{-8}$	46.8
970	30	0.176	$4.0 \cdot 10^{-5}$	22.1	$3.04 \cdot 10^{-8}$	61.5
1148	20	0.176	$3.3 \cdot 10^{-6}$	2.2	$3.37 \cdot 10^{-8}$	100
1252	10	0.176	$1.9 \cdot 10^{-8}$	1.4	$2.54 \cdot 10^{-8}$	100
1300	5	0.176	$4.3 \cdot 10^{-9}$	0.3	$2.32 \cdot 10^{-8}$	100

Для изучения пространственного распределения гидроакустической энергии воспользуемся модельными расчетами представленными в [179]. Инструментом

моделирования является метод спектральных элементов, который представляет собой метод конечных элементов высокого порядка, разработанный для местных и глобальных масштабов распространения сейсмических волн [183]. На рисунке 3.16 представлена полученная кривая распространения гидроакустической энергии от точки излучения, полученная, в результате выполненных модельных расчетов.

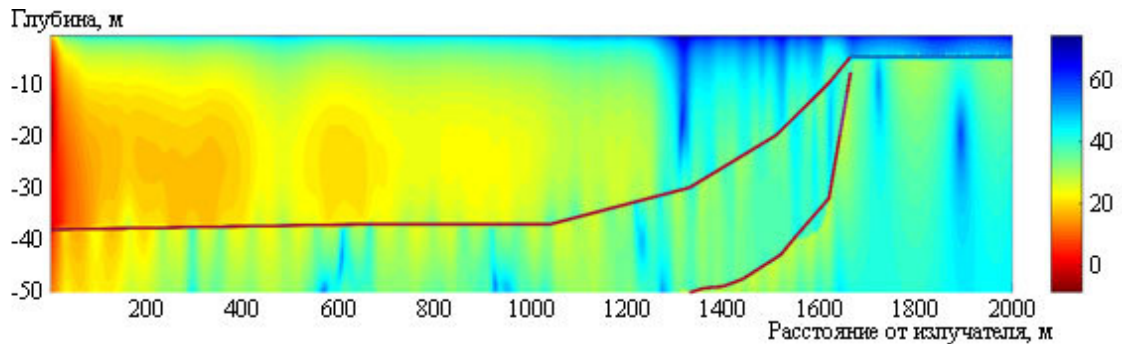


Рисунок 3.16 – Пространственное распределение гидроакустической энергии от излучателя до берега вдоль станций приема.

Из анализа рисунка 3.16 следует, что основная излучённая гидроакустическим излучателем энергия вблизи его расположения концентрируется в воде, а в дно уходит небольшая её часть. По мере продвижения по шельфу убывающей глубины уровень энергии понижается, что связано как с цилиндрической расходимостью, так и с трансформацией гидроакустической энергии в сейсмоакустическую. При этом зона наибольшей концентрации гидроакустической энергии в начальной стадии её распространения от излучателя находится на глубинах 21 – 35 м. Уровень энергии по горизонтали не спадает монотонно, а изменяется «квазипериодически», масштаб которого связан с длиной гидроакустической волны, равной 68 м. Из рисунка видно, что при глубинах чуть больше 30 м происходит резкое уменьшение гидроакустической энергии в воде с дальнейшим резким её уменьшением при глубинах около 16 – 17 м. Присутствие энергии в воде на меньших глубинах можно объяснить лишь вытекающими в воду незатухающими волнами рэлеевского типа.

В результате проведённых экспериментальных и модельных исследований выявлены общие закономерности распространения низкочастотных гидроакустических волн на шельфе убывающей глубины и их трансформации в сейсмоакустические волны поверхностного типа на границе «вода-дно». 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. 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 [51].

### 3.2 ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ГРАНИЦЕ «СУША-ВОДА»

Волны геосфер при своем распространении претерпевают различные изменения, связанные как с процессом диссипации энергии, так и с процессом ее трансформации на границах. В работах [179, 51] нами было оценено количество трансформированной гидроакустической энергии в сейсмоакустическую на границе системы «гидросфера-литосфера» при работе низкочастотных гидроакустических излучателей различных конструкций. При изучении гидросферно-литосферного взаимодействия в низкочастотном звуковом диапазоне остается открытым вопрос о доли сейсмоакустической энергии,

распространяющейся на границе «дно-вода», трансформированной в гидроакустическую энергию.

На морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» и в заливе Петра Великого Японского моря проведен ряд экспериментов по генерации упругих волн в земной коре низкочастотным сейсмоакустическим излучателем и их приему 52,5-метровым лазерным деформографом на берегу, а также гидроакустических волн, возникающих в результате трансформации упругих волн на границе дно-вода, лазерным измерителем вариаций давления гидросферы.

Упругие волны регистрируются стационарно установленным 52,5-метровым неравноплечим лазерным деформографом ориентацией «север-юг». Гидроакустические волны регистрируются лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, установленным на шельфе Японского моря на глубине 27 м. Низкочастотный сейсмоакустический излучатель располагался в 100 м от лазерного деформографа под углом  $25^\circ$  относительно его главной оси и в 320 м от лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.17). На рисунке точками обозначены: ЛД – место стационарной постановки неравноплечевого лазерного деформографа, ЛИВДГ – место постановки лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, СИ – место постановки сейсмоакустического излучателя.

В процессе эксперимента частота излучаемого сигнала менялась скачками и плавно в частотном диапазоне от 13 до 19 Гц. Работы по излучению сейсмоакустического сигнала проводились два дня. Времена работы сейсмоакустического излучателя на различных частотах приведены в таблице 3.4 [12].



Рисунок 3.17 – Расположение станции сейсмоакустического излучения и постановки приемных систем при выполнении экспериментальных работ в мае 2007 года.

Таблица 3.4 – Время работы и частота сейсмоакустического излучателя 30 мая 2007 года.

<b>Время начала работ</b>	<b>Время окончания работ</b>	<b>Частота, Гц</b>
12:53	12:56	13.15
12:56	12:59	14.2
12:59	13:01	14.4
13:01	13:03	14.8
13:03	13:05	15.2
13:05	13:07	16
13:07	13:08	18.5

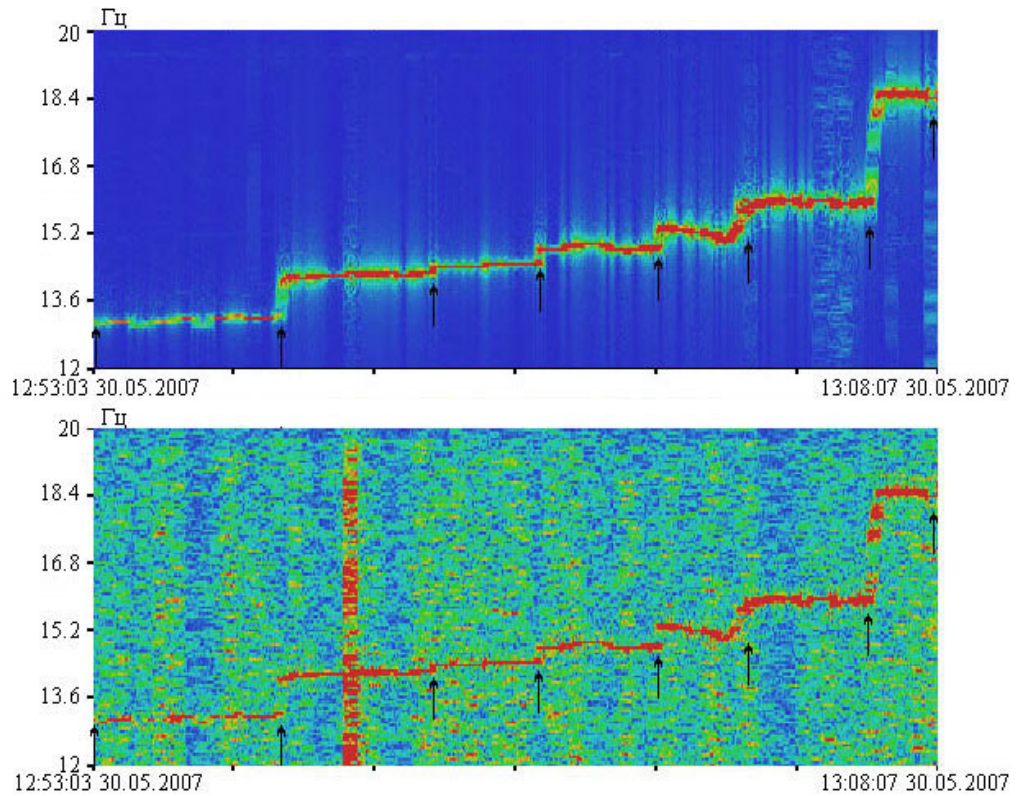


Рисунок 3.18 – Динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы сейсмоакустического излучателя 30 мая 2007 г.

Излученный сигнал синхронно регистрировался лазерным деформографом и лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. Для обработки было выбрано несколько участков синхронных записей измерительных приборов. На рисунке 3.18 представлены динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в первый день эксперимента. На рисунках стрелками отмечены места начала и окончания излучения сигнала на частотах, представленных в таблице 3.4.

На спектрах записей неравноплечего лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.19) выделяются пики с частотами, соответствующими частотам излучения. На спектре записи лазерного деформографа (рисунок 3.19 верхний) пики ярко выражены, и их амплитуды на много выше амплитуд фоновых колебаний. На спектре записи лазерного

измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.19 нижний) амплитуды пиков также значительны.

Рассмотрим экспериментальные данные лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в момент работы сейсмоакустического излучателя 31 мая 2007 года. Условия проведения эксперимента не поменялись, излучатель и приемные системы находились на тех же местах. Изменились частоты работы сейсмоакустического излучателя, они приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Время работы и частота сейсмоакустического излучателя 31 мая 2007 года.

<b>Время начала работ</b>	<b>Время окончания работ</b>	<b>Частота, Гц</b>
09:15:30	09:17	14.2
09:17	09:19	14.5
09:19	09:20	15
09:20	09:23	15.3 – 15.8
09:23	09:24	18.5

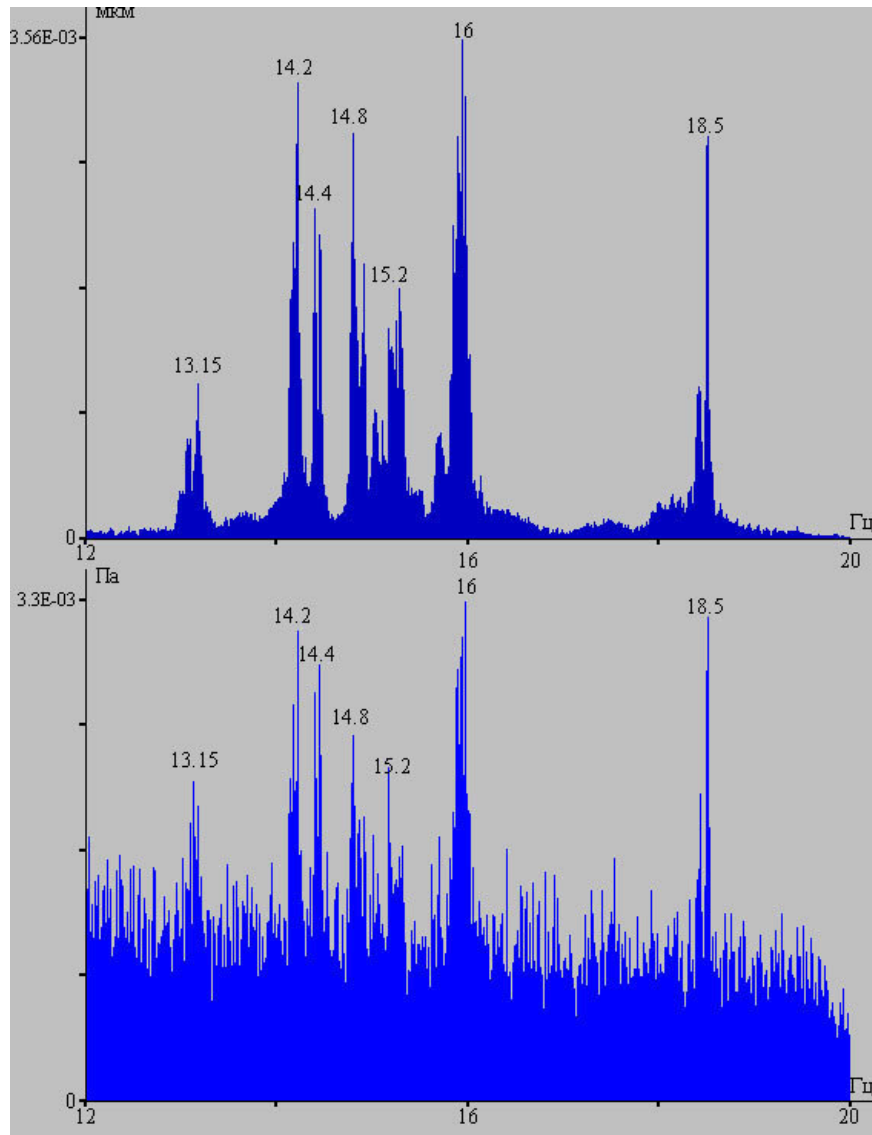


Рисунок 3.19 – Спектры записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы сейсмоакустического излучателя 30 мая 2007 г.

На рисунке 3.20 представлены динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) во второй день эксперимента. На рисунках стрелками отмечены места начала и окончания излучения сигнала на частотах, представленных в таблице 3.5. На спектрах записей неравноплечего лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.24) выделяются пики с частотами, соответствующими частотам излучения. На спектре записи лазерного деформографа (рисунок 3.24 верхний) пики ярко



выражены, и их амплитуда намного выше амплитуды фоновых колебаний. На спектре записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.21 нижний) амплитуды пиков также значительны.

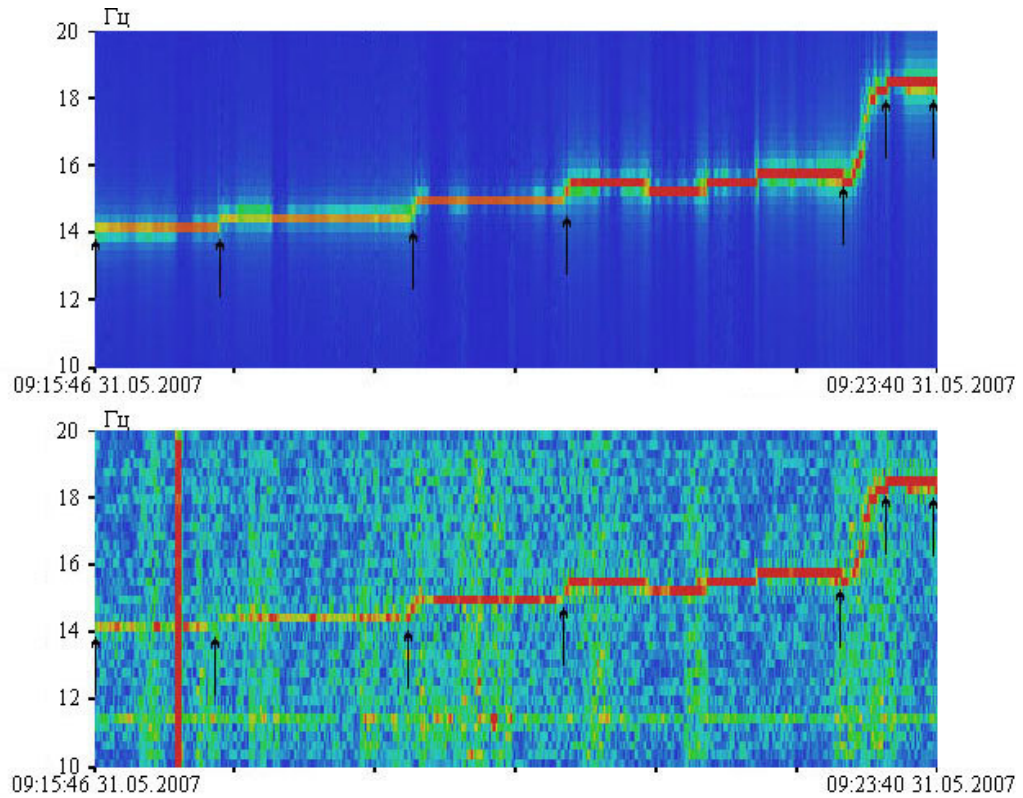


Рисунок 3.20 – Динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы сейсмоакустического излучателя 31 мая 2007 г.

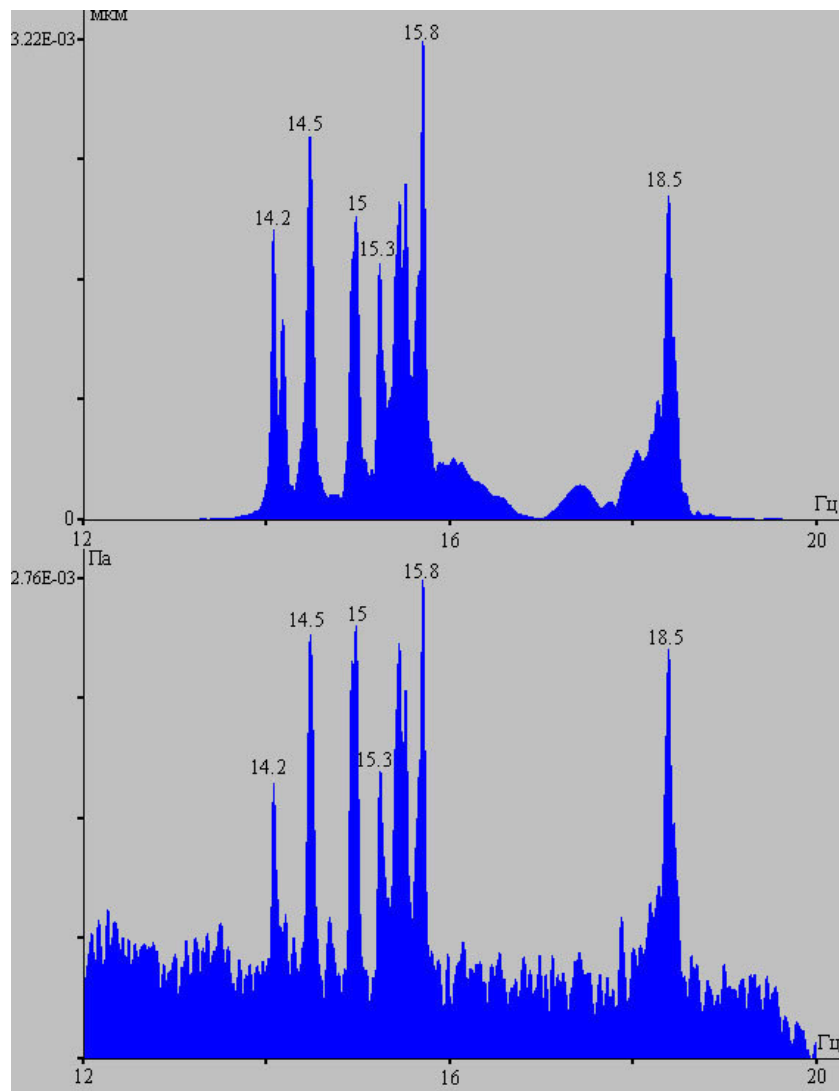


Рисунок 3.21 – Спектры записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы сейсмоакустического излучателя 31 мая 2007 г.

В октябре 2016 года на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» были проведены экспериментальные работы с использованием сейсмоакустического излучателя, неравноплечих лазерных деформографов и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. На рисунке 3.22 представлена схема расположения излучателя и приемных систем. Точками на рисунке обозначены: ЛД – место постановки 52.5-метрового неравноплечего лазерного деформографа ориентацией «север-юг», ЗВ – место постановки 17.5-метрового неравноплечего лазерного деформографа ориентацией «запад-восток», СИ – место постановки

сейсмоакустического излучателя, ЛИВДГ – место постановки лазерного измерителя вариаций давления гидросферы.



Рисунок 3.22 – Расположение станции сейсмоакустического излучения и постановки приемных систем при выполнении экспериментальных работ в октябре 2016 года.

Сейсмоакустический излучатель был жестко прикреплен к бетонной плите, установленной на берегу б. Витязь. Неравноплечий лазерный деформограф ориентацией «север-юг» располагался на расстоянии 680 м от сейсмоакустического излучателя. Неравноплечий лазерный деформограф ориентацией «запад-восток» располагался на расстоянии 640 м от сейсмоакустического излучателя. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы был установлен на дне б. Витязь на глубину 12 м на расстоянии 160 м от сейсмоакустического излучателя.

На динамических спектрограммах записей лазерного деформографа ориентацией «запад-восток» (рисунок 3.23 верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 3.23 нижний) 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. Так на спектре записи неравноплечего лазерного деформографа ориентацией «запад-восток» выделяется два пика (рисунок 3.24а), амплитуды которых примерно в два раза выше амплитуд фоновых колебаний. И на спектре записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы выделяется два пика (рисунок 3.24 б), амплитуды которых почти на порядок больше амплитуд фоновых колебаний.

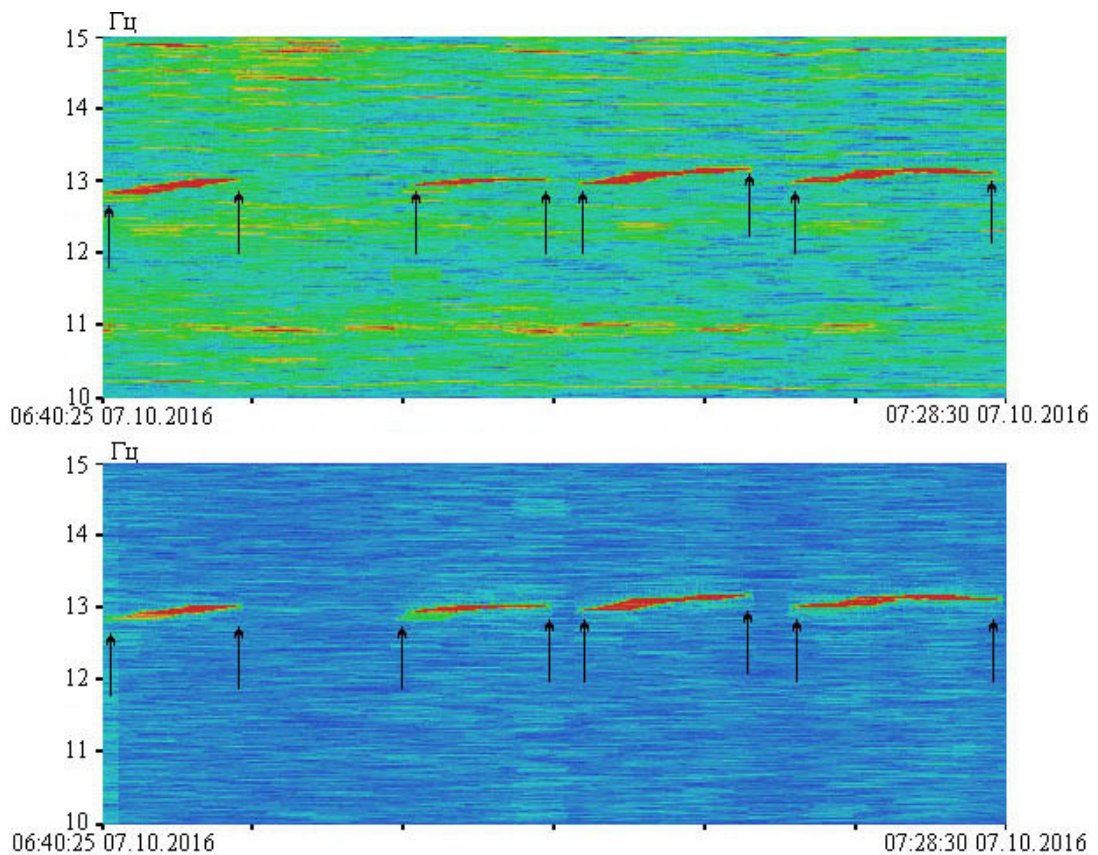


Рисунок 3.23 – Динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы сейсмоакустического излучателя 07 октября 2016 г.

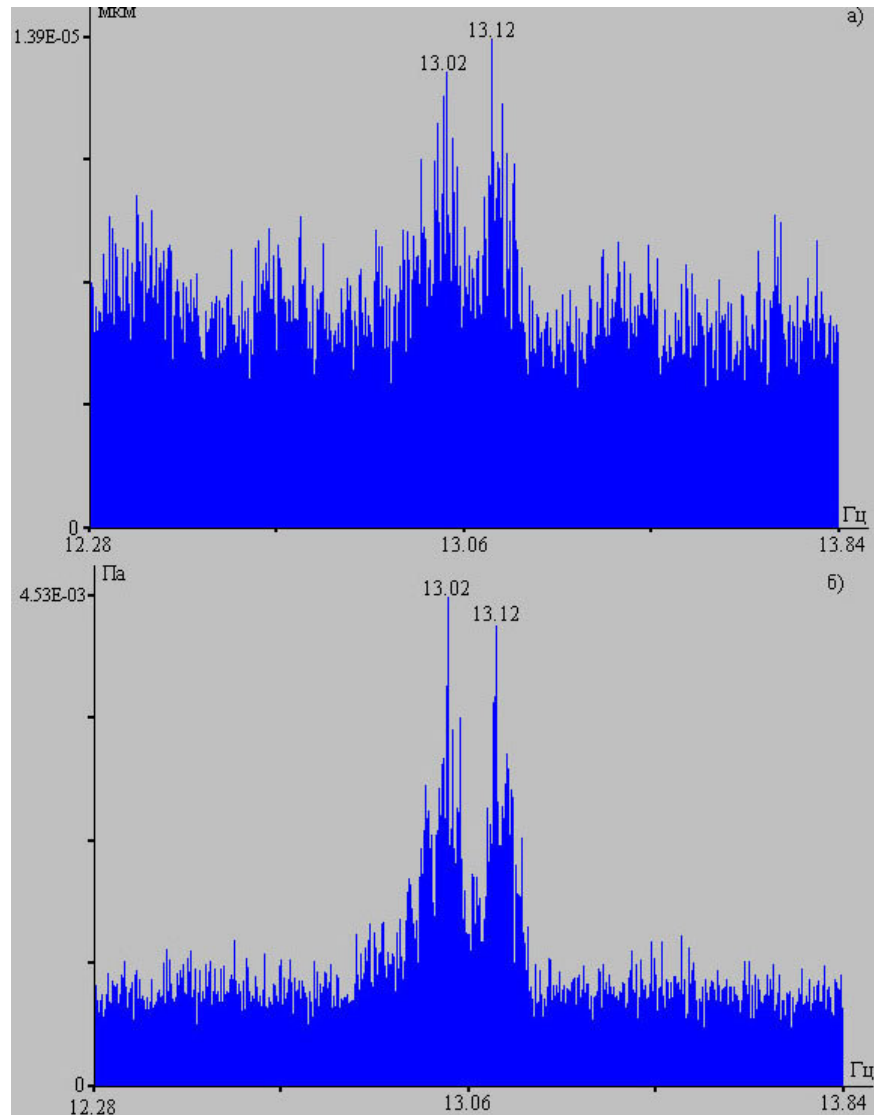


Рисунок 3.24 – Спектры записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы сейсмоакустического излучателя 07 октября 2016 г.

Для оценки величин сейсмоакустической и гидроакустической энергии будем использовать полученные экспериментальные данные лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. В соответствии с [104] оценим плотность гидроакустической и упругой энергий. Среднюю по времени плотность энергии упругой волны можно записать в виде:

$$\bar{E}_{ув} = \frac{1}{2} \rho u_{0j}^2 \omega^2 \quad (3.3)$$

где  $\rho$  – плотность пород,  $u_{0j}$  – смещение,  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $\nu$  – частота.

Если учесть диаграмму направленности лазерного деформографа, то

$$u_{0jд} = u_{0j}g(\Theta) \quad (3.4)$$

где  $u_{0jд}$  – измеренное смещение лазерным деформографом,  $g(\Theta) = \cos \Theta$ , и

$$\bar{E}_{ув} = \frac{1}{2 \cos^2 \Theta} \rho u_{0jд}^2 \omega^2 \quad (3.5)$$

Плотность энергии гидроакустической гармонической волны можно записать в виде:

$$\bar{E}_{ак} = \frac{P_0^2}{2\rho_B c^2} \quad (3.6)$$

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

Из экспериментальных данных лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в момент работы сейсмоакустического излучателя было выбрано шесть характерных синхронных участков записей. В таблице 3.6 приведены данные спектральной обработки синхронных записей приборов и вычисленное отношение плотности гидроакустической энергии к плотности упругой энергии  $\frac{\bar{E}_{ак}}{\bar{E}_{ув}}$  при  $\Theta = 25^\circ$ ,  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$ .

Таблица 3.6 – Данные спектральной обработки лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы.

Частота, Гц	14.2	14.5	15	15.2	16	18.5	18.9
Амплитуда, нм (ЛД)	57.4	55.3	46.5	67.8	84.0	78.9	51.3
Амплитуда, Па (ЛИВДГ)	0.74	0.80	0.66	0.74	1.15	1.10	0.74
$\frac{\bar{E}_{ак}}{\bar{E}_{ув}} \cdot 10^3$	3.8	4.5	4.2	2.4	3.3	2.7	2.7

Из анализа полученных экспериментальных данных 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.

### 3.3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН С БОЛЕЕ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ МОРСКИМИ ВОЛНОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Для изучения взаимодействия низкочастотных гидроакустических волн с ветровыми морскими волнами был проведен эксперимент в бухте Витязь в октябре 2007 года. В эксперименте использовались: приемная система – лазерный гидрофон, излучающая система – низкочастотный гидроакустический излучатель, работающий на частоте 245 Гц. На рисунке 3.25 представлена схема расположения приборов во время проведения экспериментальных работ. Приемник (ЛГ) располагался в бухте Витязь на глубине 17.5 м на удалении 1000 м от излучателя, излучатель (ГИ) – на глубине 10 м при глубине моря в данной точке 25 м. Низкочастотный гидроакустический излучатель работал в непрерывном режиме.



Рисунок 3.25 – Расположение станций гидроакустического излучения при выполнении экспериментальных работ в октябре 2007 года.

До настоящего времени считалось, что из-за влияния на параметры распространяющихся гидроакустических волн инфразвуковых гидрологических

колебаний, вызванных морскими приливами, поверхностными и внутренними волнами, в спектрах обработанных экспериментальных данных вблизи максимума, соответствующего излученному сигналу, обнаруживаются пики, указывающие на модулирующее воздействие более низкочастотных составляющих на излученный сигнал [17, 132]. Согласно этим представлениям считалось, что гидроакустические приемные системы, ограниченные по частотному диапазону, можно использовать для изучения инфразвуковых колебаний и волн, выходящих за рабочий диапазон приемных систем.

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.

На рисунке 3.26 приведены исходные и, после обработки, участки записей лазерного гидрофона, динамические спектрограммы и спектры записей лазерного гидрофона. На исходном ряде данных лазерного гидрофона, рисунок 3.26 а, видно ветровое волнение с периодом 7.28 с. На динамической спектрограмме, рисунок 3.290 в, выделен участок с записью сигнала гидроакустического излучателя на частоте 244.81 Гц. На спектре этого участка записи, рисунок 3.26 д, хорошо выделяется пик, соответствующий сигналу гидроакустического излучателя на частоте 244.81 Гц.

Проведем обработку данных в соответствии с работами [17, 132]. Выделяем сигнал на частоте излученного сигнала и анализируем изменение его амплитуды со временем (рисунок 3.26 б). При спектральной обработке в области излученного сигнала установлено наличие двух пиков на частотах 244.66 и 244.95 Гц. Появление двух пиков на этих частотах в соответствии с [17, 132] можно объяснить модулирующим воздействием более низкочастотных волн с периодами 6.54 и 7.30 с, что близко к периоду основного ветрового волнения (рисунок 3.26 г и 3.26 е).



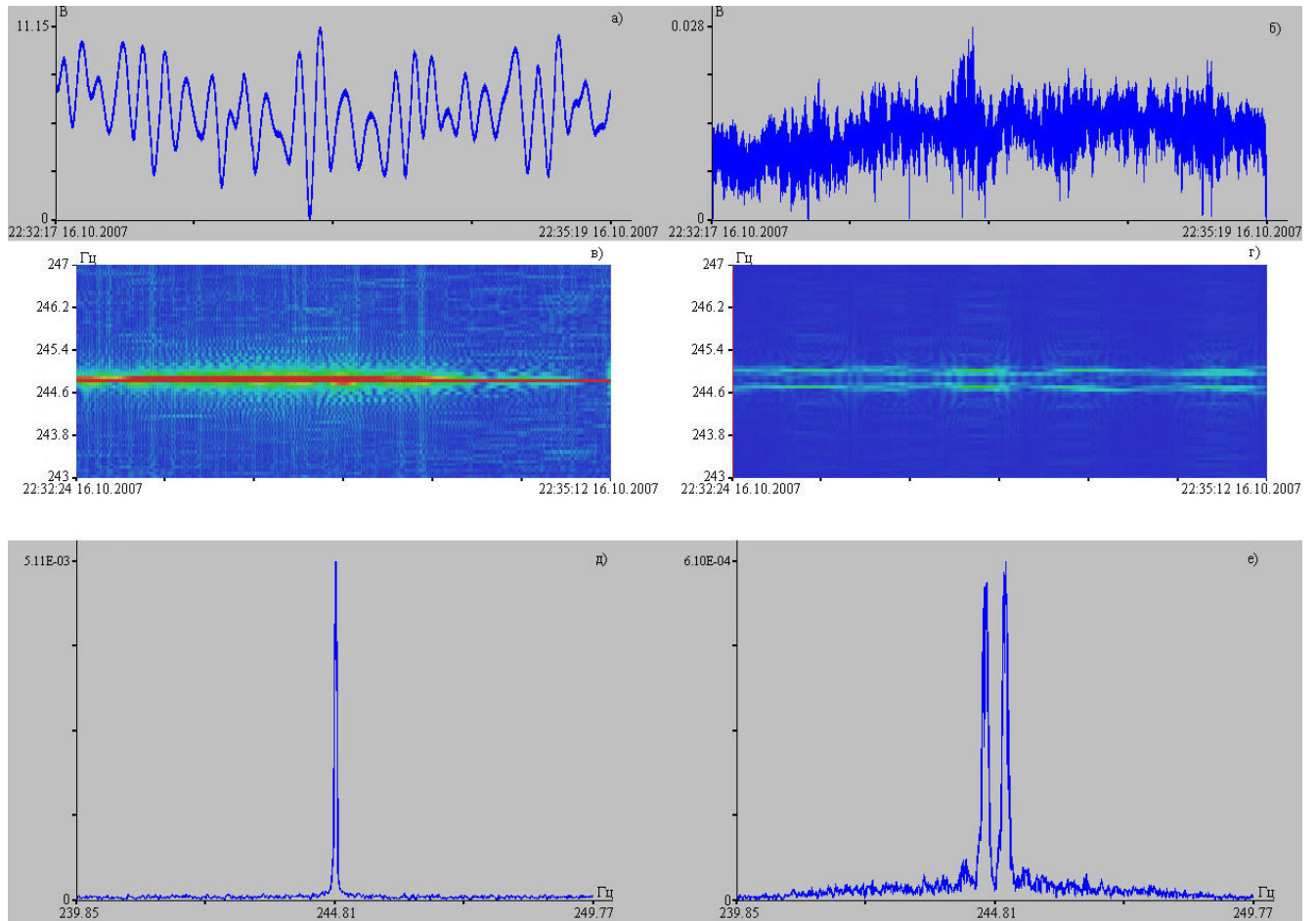


Рисунок 3.26 – Участки записей лазерного гидрофона исходного ряда (а) и после обработки (б), динамические спектрограммы исходного сигнала гидроакустического излучателя (в) и после обработки (г), спектры записей лазерного гидрофона исходного сигнала (д) и после обработки (е) во время проведения экспериментальных работ

Отфильтруем исходные данные высокочастотным фильтром Хэмминга длиной 200 и с граничной частотой 200 Гц. Данная процедура сделана для того, чтобы избежать ошибок обработки исходного ряда, связанных с возможным влиянием низкочастотных спектральных составляющих на высокочастотные составляющие. В спектре отфильтрованного ряда обнаружен максимум на частоте ветрового волнения, но с амплитудой, меньшей исходной амплитуды на четыре порядка. В области излученного сигнала обнаружен максимум с той же амплитудой и частотой (рисунок 3.27 а).

Выделим сигнал на частоте излученного сигнала и проанализируем изменение его амплитуды со временем. При спектральной обработке в области излучаемого сигнала установлено наличие трех пиков 244.66, 244.81 и 245.06 Гц, но амплитудой почти на четыре порядка меньше, чем в предыдущем случае такой же обработки (рисунок 3.27 б). Причем их амплитуда находится почти на уровне амплитуд шумовых компонент спектра.

Для еще большего подавления низкочастотных спектральных составляющих и ликвидацию их возможного влияния на высокочастотные спектральные составляющие проведем фильтрацию отфильтрованного ряда. Для этого воспользуемся высокочастотным фильтром Хэмминга длиной 200 и с граничной частотой 200 Гц. В спектре повторно отфильтрованного сигнала не обнаружено максимумов на частоте ветрового волнения, но в области излучаемого сигнала обнаружен максимум с той же амплитудой и частотой (рисунок 3.27 в).

Выделим сигнал на частоте излучаемого сигнала и проанализируем изменение его амплитуды со временем. При спектральной обработке в исследуемой области установлено наличие трех пиков 244.66, 244.81 и 245.06 Гц, но их амплитуды находятся на уровне шумовых компонент спектра (рисунок 3.27 г).

Фильтруем исходные данные высокочастотным фильтром Хэмминга длиной 300 и с граничной частотой 5 Гц. Таким образом, мы моделируем работу гидрофона, амплитудно-частотная характеристика которого слева от 5 Гц спадает по закону 4 – 5 дБ/октаву. В спектре отфильтрованного ряда обнаружен максимум на частоте ветрового волнения, но с амплитудой меньшей исходной амплитуды в 50 раз. В области излученного сигнала обнаружен максимум с той же амплитудой и частотой (рисунок 3.28 а).

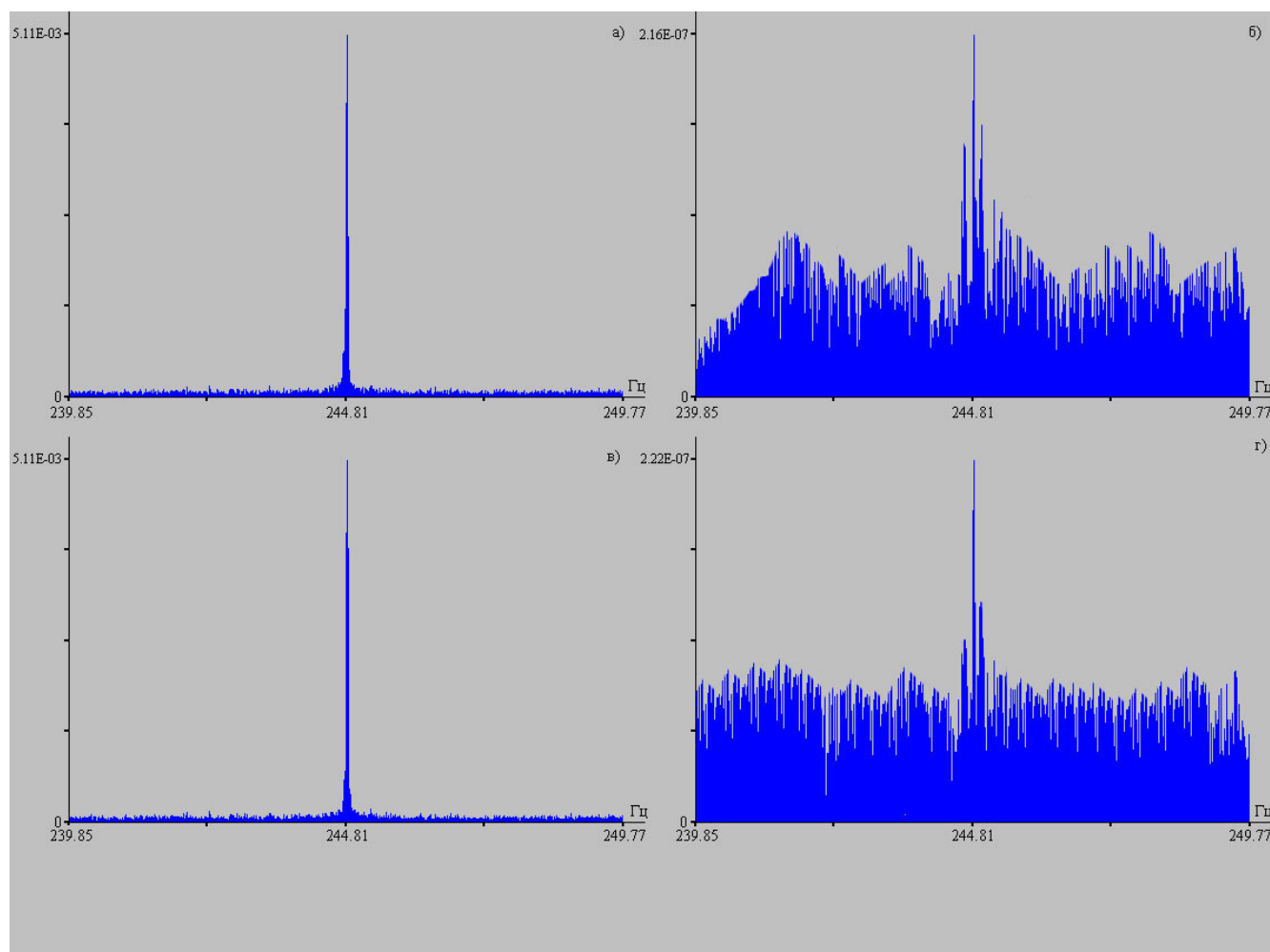


Рисунок 3.27 – Спектры отфильтрованных записей лазерного гидрофона исходный (а и в) и после обработки (б и г) во время проведения экспериментальных работ.

Выделяем сигнал на частоте излученного сигнала и анализируем изменение его амплитуды со временем. При спектральной обработке в области излученного сигнала установлено наличие двух максимумов 244.66 и 244.95 Гц. Появление двух указанных максимумов можно объяснить модулирующим воздействием более низкочастотных волн с периодами 6.54 с и 7.30 с, что близко к периоду основного ветрового волнения 7.28 с (рисунок 3.28 б).

После фильтрации исходных данных высокочастотным фильтром Хэмминга длиной 300 и с граничной частотой 5 Гц фильтруем исходный ряд высокочастотным фильтром Хэмминга длиной 200 и с граничной частотой 200 Гц. Данная процедура сделана для того, чтобы избежать ошибок обработки исходного

ряда, связанных с возможным влиянием низкочастотных спектральных составляющих на высокочастотные составляющие. В спектре отфильтрованного ряда обнаружен максимум на частоте ветрового волнения, но с амплитудой меньшей исходной амплитуды на шесть порядков. В области излученного сигнала обнаружен максимум с той же амплитудой и частотой (рисунок 3.28 в).

Выделяем сигнал на частоте излученного сигнала и анализируем изменение его амплитуды со временем. При спектральной обработке в области излученного сигнала установлено наличие трех спектральных максимумов 244.66, 244.81 и 245.06 Гц, но их амплитуды чуть больше уровня амплитуд шумовых компонент спектра (рисунок 3.28 г).

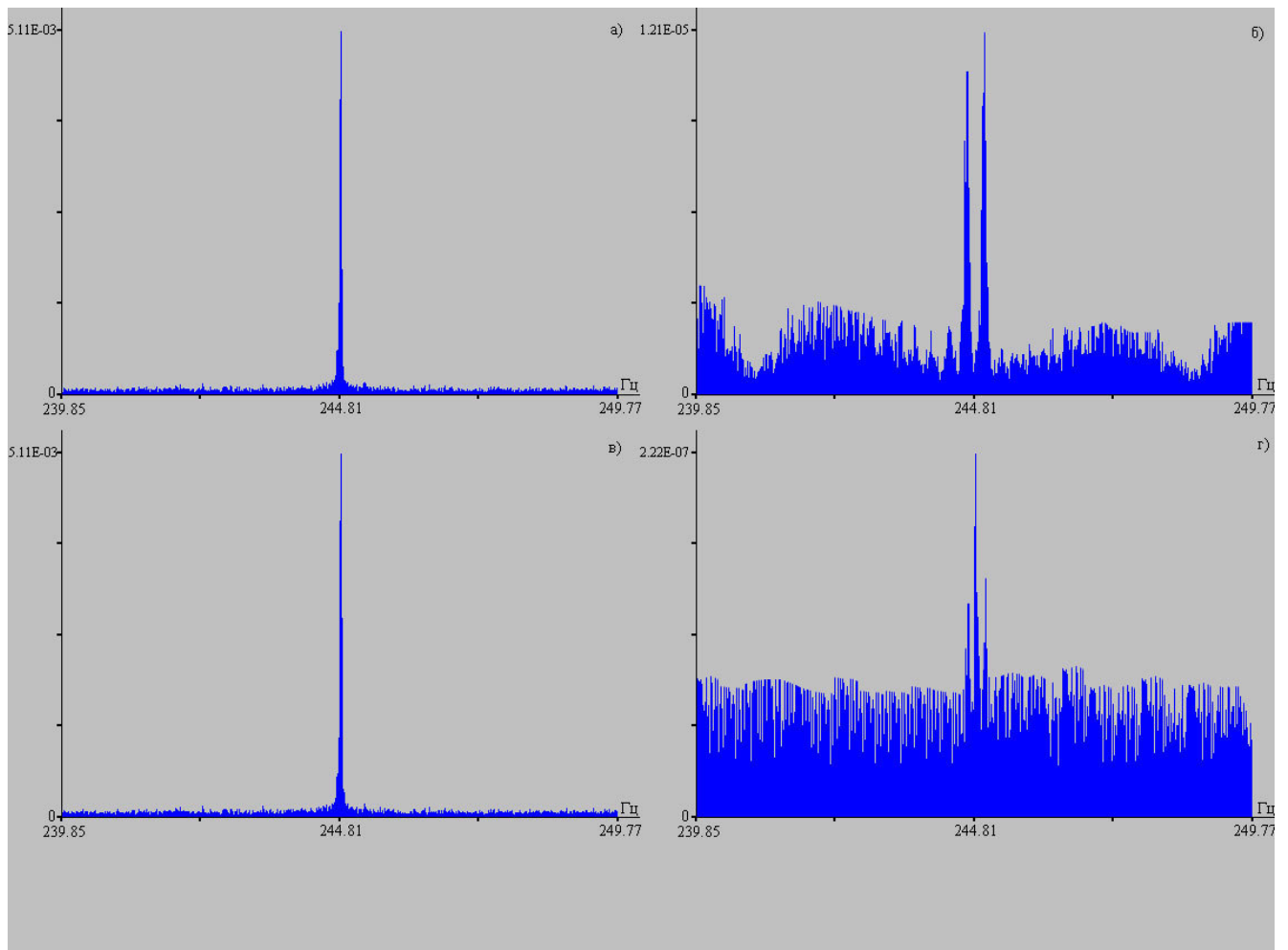


Рисунок 3.28 – Спектры отфильтрованных записей лазерного гидрофона исходный (а и в) и после обработки (б и г) во время проведения экспериментальных работ.

Так как исходные данные были обработаны низкочастотным фильтром Хемминга с частотой среза 200 Гц, то на основании данных приведенных на рисунках 3.26 е) и 3.28 б), нельзя говорить о влиянии ветрового волнения на параметры излученного сигнала (появление гармоник на частоте 244.66 и 244.95 Гц). Дальнейшая фильтрация исходного ряда показала, что никакой модуляции нет, а присутствует «эффект обработки, связанный с влиянием низкочастотной спектральной составляющей на высокочастотную часть спектра в области излученного сигнала». Данные ветрового волнения и излучаемого сигнала, полученные при различных способах обработки, описанных выше, приведены в таблице 3.7.

Для проверки этого предположения построим модельный ряд, состоящий из двух не связанных друг с другом гармоник с амплитудами, равными экспериментальным амплитудам. Обработку модельного ряда проведем в соответствии с вышеописанным процессом обработки экспериментального ряда. Полученные результаты обработки приведены в соответствующих столбцах таблицы 3.8. При анализе результатов обработки модельного ряда следует, что в пределах ошибок обработки никакого воздействия ветрового морского волнения на параметры распространяющегося гидроакустического сигнала нет.

Таблица 3.7. – Значения периодов и амплитуд ветрового волнения и излучаемого сигнала при различных способах обработки экспериментальных данных.

<b>Столбец</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Рисунок</b>	3.29 д)	3.29 е)	3.30 а)	3.30 б)	3.30 в)
<b>Ветровое волнение, период и амплитуда</b>	7.28 с, 0.98	3.12 с, $3.36 \cdot 10^{-4}$	7.28 с, $1.73 \cdot 10^{-4}$	3.12 с, $3.37 \cdot 10^{-4}$	Нет
<b>Излучаемый сигнал, частота и амплитуда</b>	244.81 Гц, $5.11 \cdot 10^{-3}$	244.66 Гц, $5.65 \cdot 10^{-4}$ 244.95 Гц, $6.10 \cdot 10^{-4}$	244.81 Гц, $5.11 \cdot 10^{-3}$	244.66 Гц, $1.40 \cdot 10^{-7}$ 244.81 Гц, $2.16 \cdot 10^{-7}$ 245.06 Гц, $1.58 \cdot 10^{-7}$	244.81 Гц, $5.09 \cdot 10^{-3}$
<b>Столбец</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Рисунок</b>	3.30 г)	3.31 а)	3.31 б)	3.31 в)	3.31 г)
<b>Ветровое волнение, период и амплитуда</b>	3.12 с, $3.36 \cdot 10^{-4}$	7.28 с, $1.92 \cdot 10^{-2}$	3.28 с, $3.36 \cdot 10^{-4}$	7.28 с, $3.40 \cdot 10^{-6}$	3.12 с, $3.36 \cdot 10^{-4}$
<b>Излучаемый сигнал, частота и амплитуда</b>	244.66 Гц, $1.11 \cdot 10^{-7}$ 244.81 Гц, $2.22 \cdot 10^{-7}$ 245.06 Гц, $1.34 \cdot 10^{-7}$	244.81 Гц, $5.11 \cdot 10^{-3}$	244.66 Гц, $1.12 \cdot 10^{-5}$ 244.95 Гц, $1.21 \cdot 10^{-5}$	244.81 Гц, $5.10 \cdot 10^{-3}$	244.66 Гц, $1.11 \cdot 10^{-7}$ 244.81 Гц, $2.22 \cdot 10^{-7}$ 245.06 Гц, $1.34 \cdot 10^{-7}$

Таблица 3.8. – Значения периодов и амплитуд первой и второй гармоник при различных способах обработки модельного ряда.

Столбец	1	2	3	4	5
<b>Первая гармоника, период и амплитуда</b>	7.28 с, 0.988	3.64 с, $4.0 \cdot 10^{-5}$	7.28 с, $1.74 \cdot 10^{-4}$	Порядка $10^{-10}$	Нет
<b>Вторая гармоника, частота и амплитуда</b>	244.81 Гц, $5.11 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $5.87 \cdot 10^{-4}$ 244.95 Гц, $5.84 \cdot 10^{-4}$	244.81 Гц, $5.09 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $1.04 \cdot 10^{-7}$ 244.95 Гц, $1.04 \cdot 10^{-7}$	244.81 Гц, $5.08 \cdot 10^{-3}$
Столбец	6	7	8	9	10
<b>Первая гармоника, период и амплитуда</b>	Порядка $10^{-10}$	7.28 с, $1.93 \cdot 10^{-2}$	3.64 с, $1.52 \cdot 10^{-8}$	7.28 с, $3.39 \cdot 10^{-6}$	Порядка $10^{-10}$
<b>Вторая гармоника, частота и амплитуда</b>	В районе 245 Гц – шум	244.81 Гц, $5.09 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $1.15 \cdot 10^{-5}$ 244.95 Гц, $1.15 \cdot 10^{-5}$	244.81 Гц, $5.08 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $2.04 \cdot 10^{-9}$ 244.95 Гц, $2.05 \cdot 10^{-9}$

Некоторые результаты обработки модельного ряда приведены на рисунке 3.29. Так на рисунке 3.29 а) приведён спектр сигнала, полученный в столбце 1, на рисунке 3.29 б) приведён спектр сигнала, полученный в столбце 2, на рисунке 3.29 в) приведён спектр сигнала, полученный в столбце 3, на рисунке 3.29 г) приведён спектр сигнала, полученный в столбце 4.

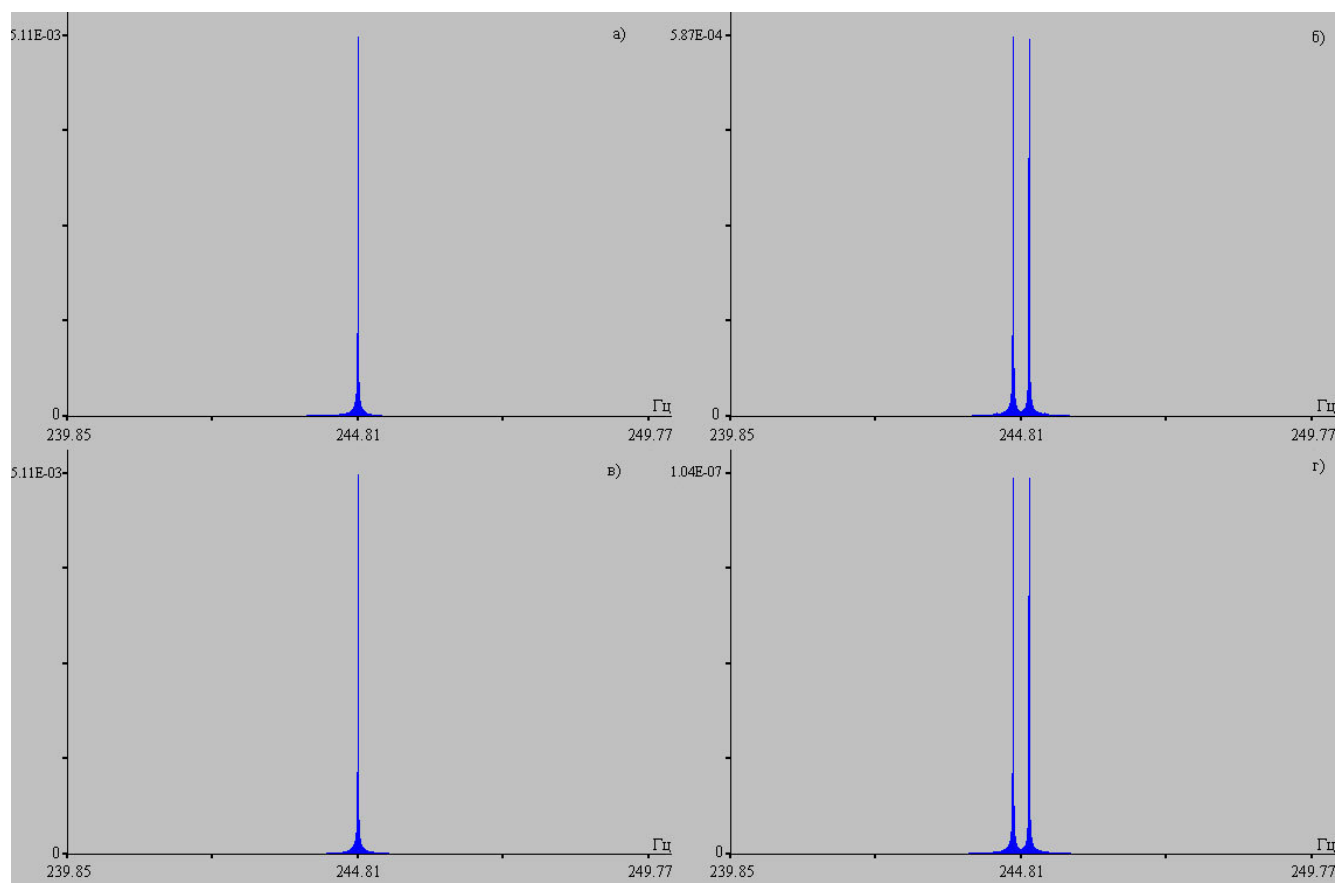


Рисунок 3.29 – Спектры исходного отфильтрованного модельного ряда (а и в) и после обработки (б и г).

Для проверки данной теории построим модельный ряд, состоящий из двух независимых гармоник. Первая гармоника, будет на частоте излученного сигнала с той же амплитудой, а вторая гармоника будет на частоте ветрового волнения, но с амплитудой на порядок выше, чем в предыдущем модельном ряде и, соответственно, в исходном ряде. И проведем обработку построенного модельного ряда в соответствии с ранее выполненными этапами обработки исходного ряда экспериментальных данных. Результаты обработки приведены в таблице 3.9. При сравнении результатов обработки двух модельных рядов видно, что увеличение амплитуды ветрового волнения в десять раз приводит к усилению его воздействия на амплитуду гармоники в области высокочастотного сигнала.



Таблица 3.9. – Значения периодов и амплитуд первой и второй гармоник при различных способах обработки модельного ряда.

<b>Столбец</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Первая гармоника, период и амплитуда</b>	7.28 с, 9.88	3.64 с, $4.0 \cdot 10^{-3}$	7.28 с, $1.74 \cdot 10^{-3}$	Порядка $10^{-9}$	Нет
<b>Вторая гармоника, частота и амплитуда</b>	244.1 Гц, $5.15 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $2.64 \cdot 10^{-3}$ 244.95 Гц, $2.63 \cdot 10^{-3}$	244.81 Гц, $5.14 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $1.05 \cdot 10^{-6}$ 244.95 Гц, $1.05 \cdot 10^{-6}$	244.81 Гц, $5.13 \cdot 10^{-3}$
<b>Столбец</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Первая гармоника, период и амплитуда</b>	Порядка $10^{-10}$	7.28 с, $1.93 \cdot 10^{-1}$	3.64 с, $1.54 \cdot 10^{-6}$	7.28 с, $3.4 \cdot 10^{-5}$	Порядка $10^{-9}$
<b>Вторая гармоника, частота и амплитуда</b>	В районе 245 Гц – шум	244.81 Гц, $5.14 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $1.16 \cdot 10^{-4}$ 244.95 Гц, $1.16 \cdot 10^{-4}$	244.81 Гц, $5.13 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $2.05 \cdot 10^{-8}$ 244.95 Гц, $2.05 \cdot 10^{-8}$

Для выявления взаимодействия низкочастотных гидроакустических волн с ветровыми морскими волнами построим модельный ряд, состоящий из высокочастотной гармоник с амплитудой, равной амплитуде принятого установкой излученного сигнала в натурном эксперименте, и низкочастотной гармоник, частота которой совпадает с частотой ветрового волнения, но с амплитудой примерно в 5 раз меньшей амплитуды высокочастотной гармоник. Из таблицы 3.10 видно, что присутствие в обрабатываемом сигнале низкочастотной гармоник приводит к эффекту воздействия ветрового волнения на параметры

излученного сигнала, т.е. к появлению двух спектральных максимумов слева и справа относительно модельно введенной высокочастотной гармоники.

Таблица 3.10. – Значения периодов и амплитуд первой и второй гармоник при различных способах обработки модельного ряда.

Столбец	1	2	3	4	5
<b>Первая гармоника, период и амплитуда</b>	7.28 с. – $9.88 \cdot 10^{-4}$	Нет	Нет	Нет	Нет
<b>Вторая гармоника, частота и амплитуда</b>	244.81 Гц, $5.16 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $5.96 \cdot 10^{-7}$ 244.95 Гц, $5.96 \cdot 10^{-7}$	244.81 Гц, $5.14 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $2.13 \cdot 10^{-10}$ 244.95 Гц, $2.34 \cdot 10^{-10}$	244.81 Гц, $5.13 \cdot 10^{-3}$
Столбец	6	7	8	9	10
<b>Первая гармоника, период и амплитуда</b>	Нет	7.28 с, $1.93 \cdot 10^{-5}$	Нет	Нет	Нет
<b>Вторая гармоника, частота и амплитуда</b>	В районе 245 Гц – шум	244.81 Гц, $5.15 \cdot 10^{-3}$	244.68 Гц, $1.17 \cdot 10^{-8}$ 244.95 Гц, $1.16 \cdot 10^{-8}$	244.81 Гц, $5.13 \cdot 10^{-3}$	В районе 245 Гц – шум

В результате обработки экспериментального ряда данных и трех модельных рядов, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что:

- 1) присутствие “ветровой” гармоники приводит к тому, что слева и справа относительно гармоники “излучения” на различных этапах обработки

появляются спектральные максимумы на ширине  $\Delta f \approx \frac{1}{T}$ , где  $T$  соответствует периоду “ветровой” гармоника;

2) изменение амплитуды “ветровой” гармоника вызывает прямо пропорциональное изменение амплитуд появившихся боковых (относительно гармоника излучения) гармоник;

3) почти во всех случаях даже одинарная фильтрация “ветровой” гармоника не подавляет ее влияние на высокочастотную область спектра;

4) можно уверенно утверждать, что двойная фильтрация “ветровой” гармоника снижает ее влияние на высокочастотную область спектра до уровня шума [80].

В следующем эксперименте работы выполнялись с применением в качестве излучателя низкочастотного гидроакустического излучателя, создающего гармонический сигнал на частоте 32 Гц, а в качестве приемника был задействован лазерный гидрофон. Экспериментальные работы проводились в бухте Витязь. Гидроакустический излучатель располагался на глубине 10 м при глубине моря 20 м, лазерный гидрофон был установлен на дне на глубине 17.5 м. Излучатель, располагающийся на расстоянии 1000 м от приемника, работал в непрерывном режиме. При анализе полученных результатов после обработки экспериментальных и модельных данных установлено, что никакого воздействия поверхностные ветровые волны в пределах ошибок обработки и эксперимента не оказывают на распространяющийся искусственный гидроакустический сигнал с частотой около 32 Гц по трассе излучатель–приемник.

В еще одном эксперименте применялись лазерный измеритель вариаций давления гидросферы и гидроакустический излучатель, излучающий непрерывный гармонический сигнал на частоте 321.6 Гц. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы был установлен на дне на шельфе Японского моря вблизи мыса Шульца на глубине 27 м. Гидроакустический излучатель был опущен с борта судна на глубину 41 м на удалении 5 000 м от приемника. При анализе полученных результатов после обработки экспериментальных и модельных данных

установлено, что никакого воздействия поверхностные ветровые волны в пределах ошибок обработки и эксперимента не оказывают на распространяющийся искусственный гидроакустический сигнал с частотой около 321.6 Гц по трассе излучатель–приемник.

### 3.4 ВЫВОДЫ

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». В ходе экспериментальных работ применялись гидроакустические излучатели с частотой излучаемого сигнала 22, 32 и 245 Гц. В результате было определено наиболее эффективное соотношение длины волны излучаемого гидроакустического сигнала к его заглублению, вызывающее наиболее мощные сейсмоакустические волны, регистрируемые лазерными деформографами.

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.

В процессе проведения цикла натуральных 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. Модулирующее воздействие на распространяющиеся гидроакустические волны оказывают более низкочастотные сейши.

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. 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. По полученному результату 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.

## ГЛАВА 4. ВОЗНИКНОВЕНИЕ, РАЗВИТИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН ВЕТРОВОГО И ИНФРАГРАВИТАЦИОННОГО ДИАПАЗОНОВ

Исследование процессов, обусловленных морскими волнами в прибрежной зоне, играющих значительную роль в формировании структуры и конфигурации прибойной зоны и берега, а также влияющих на хозяйственную деятельность человека в портах и акваториях, имеет важное значение для решения научно-исследовательских и прикладных задач. Однако до сих пор не существует законченной рабочей теории, дающей четкие ответы относительно происхождения и свойств упругих колебаний, вызванных морскими инфрагравитационными волнами, природу возникновения которых связывают с морскими ветровыми волнами и/или атмосферными процессами. В связи с этим ценное значение имеют знания о динамике и трансформации ветровых морских волн, природе возникновения и динамике колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн.

Исследования инфрагравитационных волн проводится по всему миру различными средствами измерений. Так в работе [200] описано изучение распространения и генерации инфрагравитационных волн по данным 24-х элементной когерентной решетки приемников давления, которая была установлена в двух километров от берега на глубине 13 м. Измерения проводились в течении девяти месяцев. По итогам работы была определена сильная зависимость направления распространения волн зыби от свойств инфрагравитационных волн.

Для изучения источников и изменчивости энергии инфрагравитационных волн были исследованы свободные и вынужденные колебания инфрагравитационных волн по измерениям на глубинах 8 и 204 м на Атлантическом и Тихоокеанском шельфах [199]. В результате было показано, что направления распространения инфрагравитационных волн и волн зыби взаимосвязаны, был изучен уровень энергии инфрагравитационных волн и её зависимость от географических условий. Сравнение наблюдений

инфраволнационных волн на одинаковой глубине при одинаковых условиях шельфа показывают большую энергию свободных инфраволнационных волн на открытых песчаных пляжах, чем на скалистых каменистых побережьях.

Для оценки изменения энергии инфраволнационных волн, распространяющихся по направлению к берегу и от берега, регистрировалось давление и скорость в воде на глубинах от одного до шести метров [228].

Наблюдения и численное моделирование волнационных волн между глубиной 15 м и берегом показывает, что в прибойной зоне происходит передача энергии от низкочастотных инфраволнационных волн обратно к высокочастотным [237]. Приливная модуляция инфраволнационных волн в прибойной зоне может влиять на береговые процессы и региональную сейсмическую активность.

Исследования инфраволнационных волн в открытом океане значительно осложнены и в силу этого малочисленны, однако и в этом направлении ведутся работы. Так в работе [241] делается вывод, что колебания давления на дне океана с периодами больше 30 с вызываются свободно распространяющимися морскими поверхностными волнами. Они генерируются у побережья вследствие нелинейной передачи энергии от короткопериодных волн.

Долгое время считалось, что колебания континентальной земной коры в данном диапазоне периодов обусловлены исключительно пульсациями атмосферного давления над континентами [224, 208, 210, 202]. Исследования последнего времени показали, что причиной колебаний Земли в диапазоне 30 – 180 с могут являться морские инфраволнационные волны [208, 225, 235]. Работы, проведенные коллективом нашей лаборатории [81] в данном вопросе, имеют приоритет.

Изучение возникновения и динамики инфраволнационных морских волн на границе “гидросфера-литосфера”, структуры и вариации напряженно-деформационного поля земной коры проводится эпизодически и с применением аппаратуры, имеющей недостаточную для полномасштабных работ чувствительность, рабочий диапазон частот и динамический диапазон. В

последние годы особый интерес вызывают комплексные методы, позволяющие изучать физику процессов на новом, прецизионном уровне. Это, в первую очередь, относится к лазерно-интерференционным методам исследования.

#### 4.1 НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДИНАМИКИ И ТРАНСФОРМАЦИИ ВЕТРОВЫХ МОРСКИХ ВОЛН

Для исследования динамики и трансформации ветрового волнения при их движения по шельфу убывающей глубины был проведен цикл экспериментальных исследований с применением гидрофизических лазерно-интерференционных приемных систем.

В нижеописанном эксперименте в качестве приемных систем использовались лазерный измеритель вариаций давления гидросферы и мобильный лазерный измеритель вариаций давления гидросферы. Приборы были установлены на глубинах 11.8 и 4.5 м в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря по направлению движения морских ветровых волн. Расстояние между установками составило 96 м. Информация с лазерно-интерференционных систем поступала в береговой пост и после предварительной обработки заносилась в ранее созданный банк данных с частотой дискретизации 500 Гц. На рисунке 4.1 представлена карта-схема установки приборов, где точками ЛИВДГ – обозначено место постановки лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, МЛИВДГ – обозначено место постановки мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, ЛД – место нахождения интерференционного узла лазерного деформографа ориентацией «север-юг» с длиной измерительного плеча 52.5 м.

В бухте Витязь были обнаружены два вида ветровых волн, это волны, пришедшие извне, и волны, которые генерируются ветром в самой бухте. Волны, пришедшие извне, обусловлены ветровым волнением открытой части Японского моря, имеют период от 5 до 10 с (с небольшими вариациями). Как показывают наши измерения, периоды ветровых волн, которые генерируются внутри бухты, находятся в диапазоне от 2 до 4 с (с небольшими вариациями). С целью



исследования динамики ветровых волн и изучения природы их образования были обработаны массивы данных, полученных в августе 2011 года и в январе 2012 года.



Рисунок 4.1 – Карта-схема постановки приборов в августе 2011 года в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря

Данные, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований, обрабатывали по следующей методике:

- на первом шаге они были подвергнуты обработке низкочастотным фильтром Хемминга длиной 3000 с частотой среза 1 Гц;
- на втором шаге выполнена децимация с усреднением, коэффициент децимации при частоте дискретизации 500 Гц брался равным 500, т.е. после данной процедуры итоговая частота дискретизации ряда становилась равной 1 Гц;
- на третьем шаге рассматривалась динамическая спектрограмма всего массива данных с целью выявления участков записи, характерных для ветрового волнения;

- на четвертом шаге выполнялась спектральная обработка некоторых выделенных участков данных на основе применения метода максимального правдоподобия или быстрого преобразования Фурье.

На рисунке 4.2 приведены динамические спектрограммы, полученные при обработке записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а) и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б), и график изменения скорости ветра в районе бухты Витязь (в) в период с 14 по 16 августа 2011 года. Ветровые волны с периодами около 7.5 и 10 с пришли из открытой части Японского моря, а ветровое волнение с периодами от 2.8 до 4.2 с возникли в самой бухте Витязь. Данное утверждение следует из анализа динамических спектрограмм, приведенных на рисунках 4.2 и 4.3. В начальной части рисунка 4.2 видны возмущения в диапазоне периодов от 2 до 5 с, а также присутствуют возмущения в диапазоне периодов от 6 до 8 с. Во второй половине рисунка 4.2 возмущения в диапазоне от 2 до 5 с отсутствуют. Это связано с тем, что 14.08.2011 в утреннее и дневное время дул умеренный северный ветер, который разогнал волну в бухте. Затем направление ветра поменялось на южное, что привело к постепенному затуханию ветрового волнения в диапазоне от 2 до 5 с.

При анализе динамической спектрограммы, приведенной на рисунке 4.3, видно, что ветровое волнения в диапазоне от 2 до 5 с возникает не сразу, а при воздействии на водную поверхность бухты ветра определенного направления. Так в начальный момент времени дул слабый ветер северо-восточного направления, а затем он стал усиливаться и поменял свое направление на северо-западное. Усиление ветра и смена направления привели к образованию ветрового волнения в диапазоне периодов от 2 до 5 с. В процессе усиления ветра и с течением времени рос период указанного ветрового волнения, что было зарегистрировано лазерным измерителем вариаций давления гидросферы (рисунок 4.3 а). Так при усилении ветра возникло ветровое волнение с периодом около 2.8 с, которое по истечении некоторого времени развивается до волнения с периодом 4.2 с. Возникновение данного ветрового волнения никак не связано с ветровым волнением открытой части Японского моря, а связано с воздействием ветра на поверхность бухты.

Следующее усиление скорости ветра такого же направления привело к увеличению интенсивности и периода ветрового волнения. Так усиление скорости ветра примерно в 14 ч 19.08.11 г. (рисунок 4.3 в) привело к увеличению амплитуды ветрового волнения примерно в 15 ч 19.08.11 г. (рисунок 4.3 а). Ветровое волнение в диапазоне периодов от 6 до 10 с присутствует как на первом участке записи (рисунок 4.2), так и на втором участке записи (рисунок 4.3).

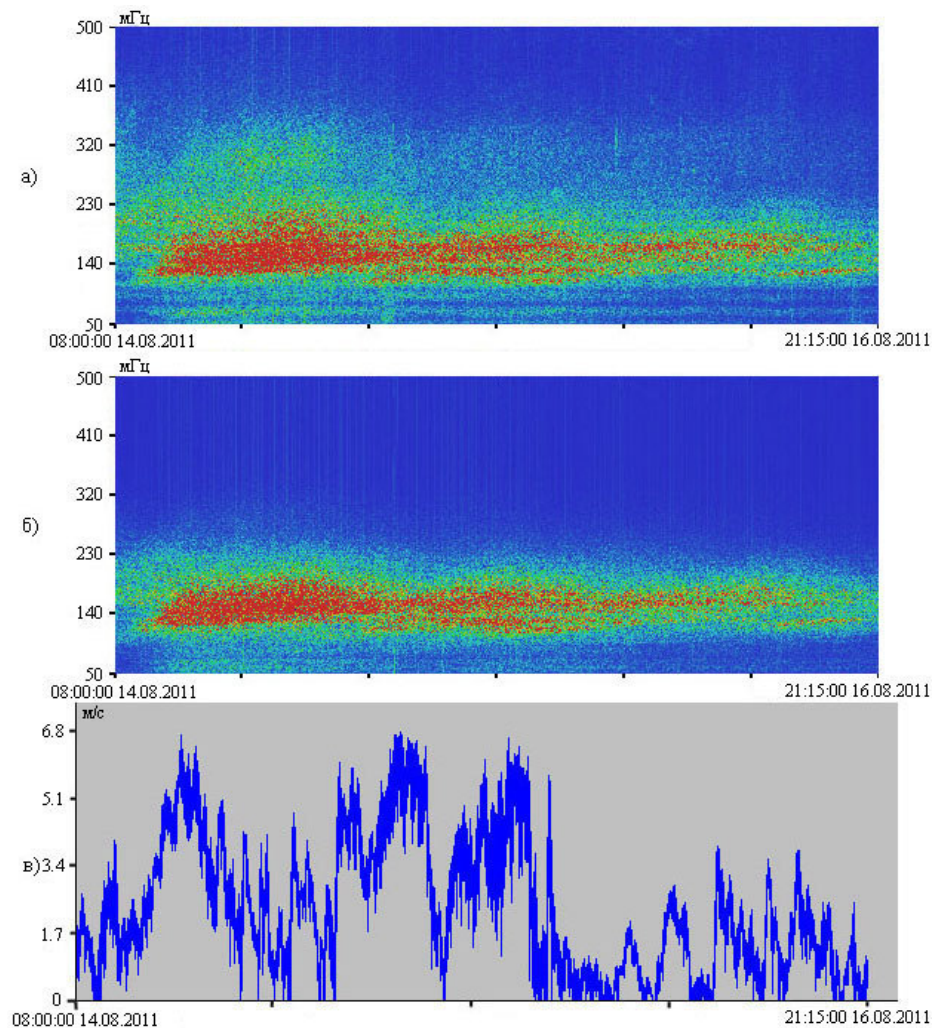


Рисунок 4.2 – Динамические спектрограммы участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а) и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б), график изменения скорости ветра (в) за 14 – 16 августа 2011 года

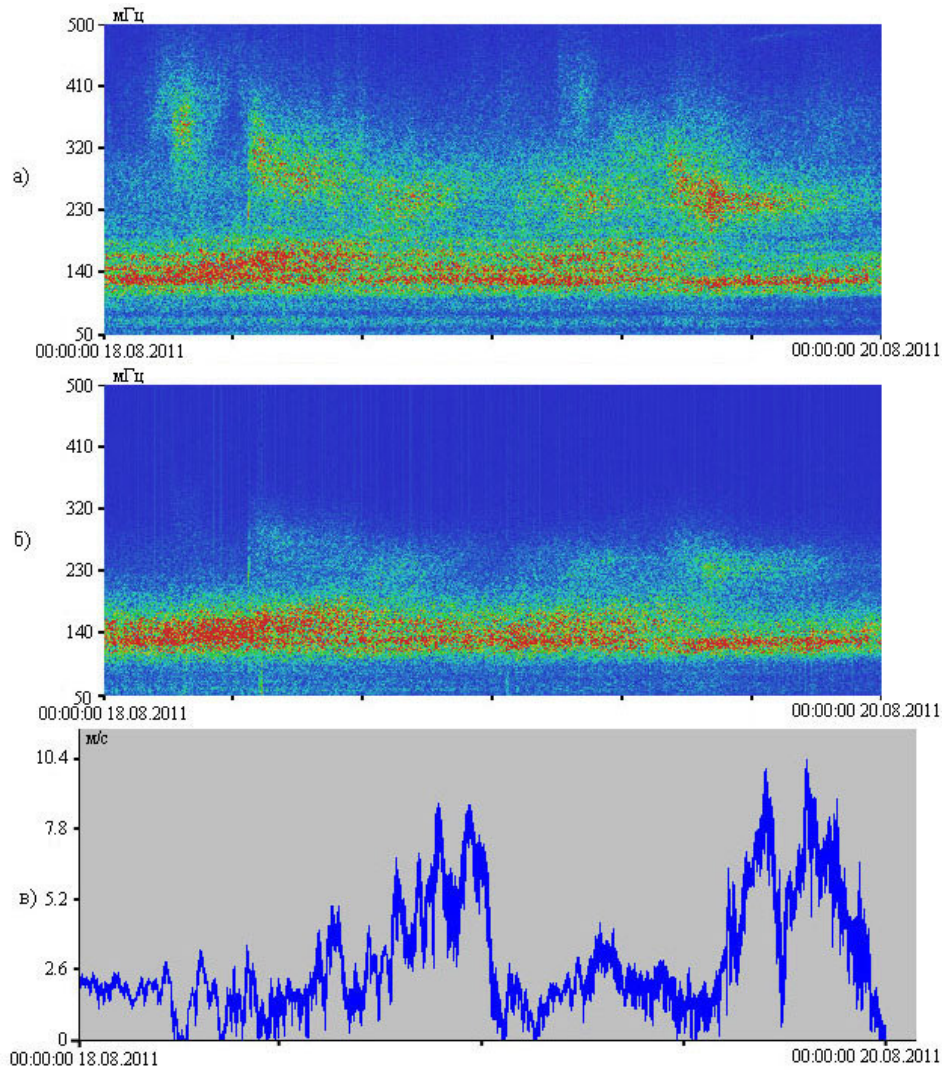


Рисунок 4.3 – Динамические спектрограммы участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а) и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б), график изменения скорости ветра (в) за 18 – 20 августа 2011 года.

Принадлежность ветрового волнения с периодами от 2 до 5 с к ветровому волнению, возникающему в бухте Витязь, подтверждается при анализе рисунка 4.4. На динамической спектрограмме лазерного измерителя вариаций давления гидросферы присутствует ветровое волнение с периодом около 10 с и ветровое волнение в диапазоне от 3.5 до 4 с. Ветровое волнение с периодом около 10 с является ветровым волнением открытой части Японского моря, а ветровое волнение, лежащее в диапазоне периодов от 3.5 до 4 с, возникло в бухте Витязь. На динамической спектрограмме (рисунок 4.4 верхний) в начальной и конечной части

присутствует возмущение в указанном диапазоне частот, а в остальной части его нет. Учитывая, что скорость ветра была примерно одинаковой на протяжении всего времени измерений, менялось только его направление с северо-западного на северо-восточное, что в отсутствии колебаний в средней части рисунка можно объяснить другим природным явлением. Отсутствие ветрового волнения бухты Витязь в средней части рисунка хорошо коррелируется с присутствием ледяного покрова, который «пригонялся» или «выгонялся» ветром при смене его направления. В начальный момент времени дул ветер северо-западного направления, который стал «пригонять» колотый ледяной покров в бухту Витязь из бухты Троица. Затем под воздействием отрицательных температур куски льда стали «спаиваться» образуя цельный ледяной покров. При смене направления ветра на северо-восточное ледяной покров разломало и стало «выгонять» из бухты. Это привело к тому, что вода над прибором открылась и он стал регистрировать возникающее в бухте ветровое волнение, период которого стал уменьшаться из-за изменения величины разгона северо-восточного ветра. При наличии ледяного покрова в бухте Витязь, даже колотого, ветровое волнение с периодом от 3.5 до 4 с не наблюдалось. В результате данного эксперимента было доказано, что ветровое волнение с периодом от 2 до 5 с генерируется в бухте Витязь.

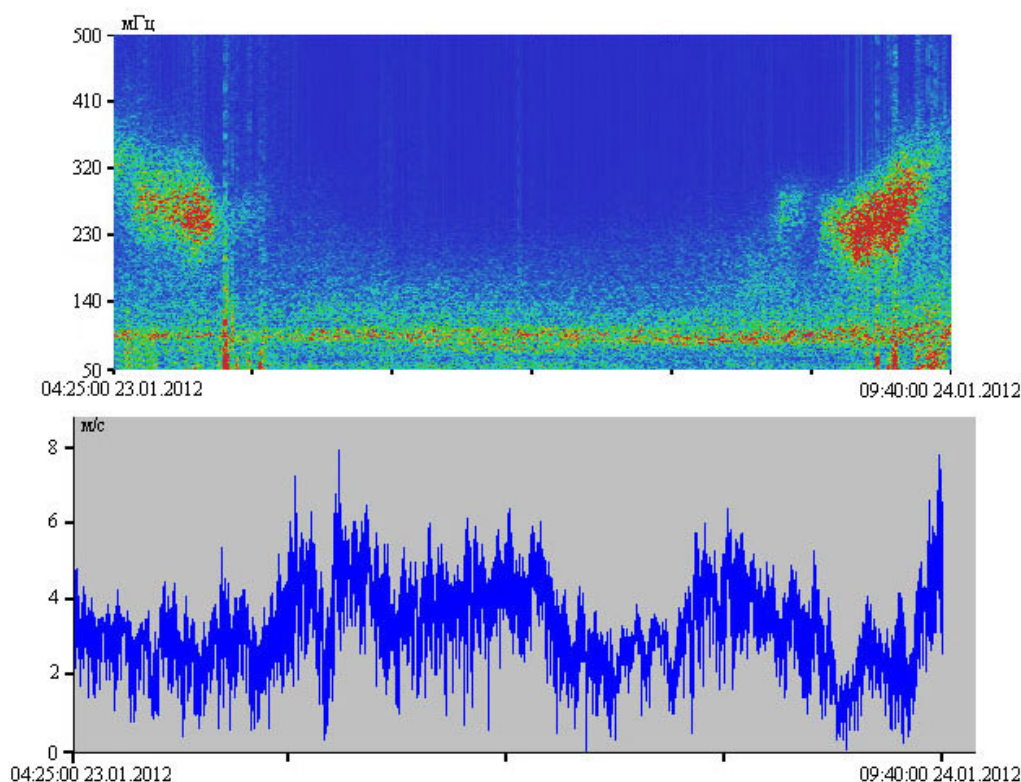


Рисунок 4.4 – Динамические спектрограммы участка записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (верхний) и график изменения скорости ветра (нижний).

Проанализируем данные лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, установленных в бухте Витязь в период с 1 по 21 августа 2011 года. Схема расположения приборов представлена на рисунке 4.1. При анализе данных особое внимание будет уделено динамике ветрового волнения открытой части Японского моря, заходящих в бухту Витязь. В данный промежуток времени регистрировалось ветровое волнение в диапазоне периодов от 5 до 8 с, которые вызваны ветром, действующим над Японским морем, и связаны с его параметрами (скорость, направление, время действия). Учитывая, что на преодоление расстояния между приборами ветровой волне необходимо менее 10 с, можно утверждать, что на протяжении длины одной выборки длительностью 8192 с данные двух указанных установок синхронны. При анализе указанных данных было выявлено, что периоды и амплитуды ветровых волн уменьшаются при их движении от места расположения

лазерного измерителя вариаций давления гидросферы до места расположения мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, от точки бухты с глубиной 11.8 м до точки бухты с глубиной 4.5 м. В этом диапазоне глубин ветровая волна, взаимодействуя с дном, отдает часть своей энергии верхнему слою земной коры.

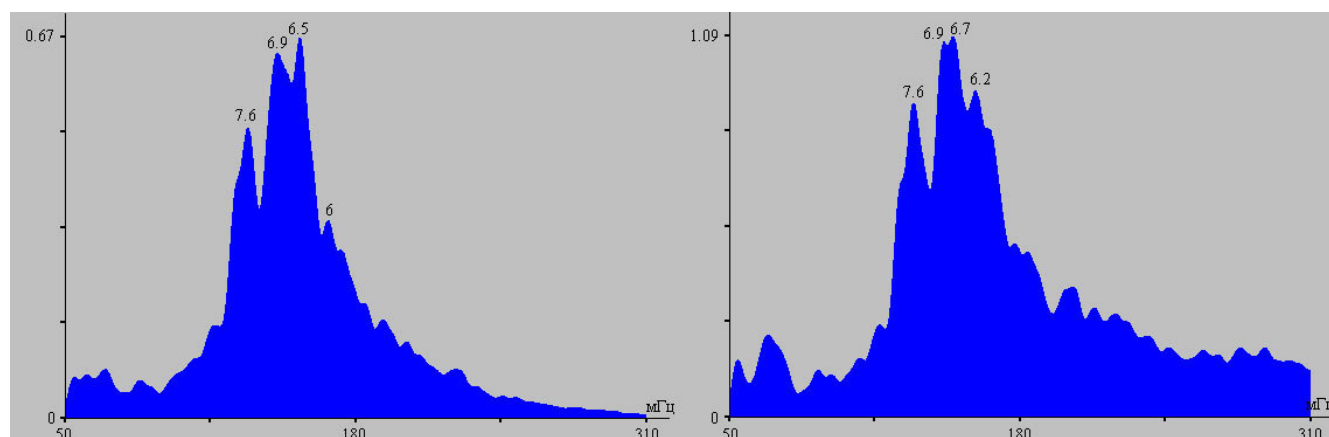


Рисунок 4.5 – Спектры участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (правый) и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (левый)

Данный процесс наблюдается не только при значительных амплитудах ветрового волнения, но и при малых амплитудах. Так на рисунке 4.5 представлены спектры участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (правый) и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (левый). Из анализа спектрограмм следует, что ветровое волнение с периодами 6.7 и 6.2 с при движении от одного прибора к другому меняется на 6.5 и 6 с. Процент изменения периодов ветрового волнения варьируется, так как в разные промежутки времени кроме ветрового волнения в анализируемом диапазоне частот присутствуют другие возмущения атмосферного и гидросферного происхождения, что влияет на точность определения основного периода ветрового волнения. При распространении ветрового волнения по исследуемому участку средний процент изменения периодов ветрового волнения в диапазоне периодов от 5 до 6 с составляет около 6%, а средний процент изменения периодов ветрового волнения

периодов изменения периодов ветрового волнения в диапазоне от 6 до 7 с составляет около 7%. Данное изменение периодов ветрового волнения связано не только с длиной ветровой волны, но и с ее амплитудой. На рисунке 4.6 приведены спектры синхронных участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. При анализе спектрограмм видно, что ветровое волнение с периодом 6 с при уменьшении глубины меняется до 5.5 с.

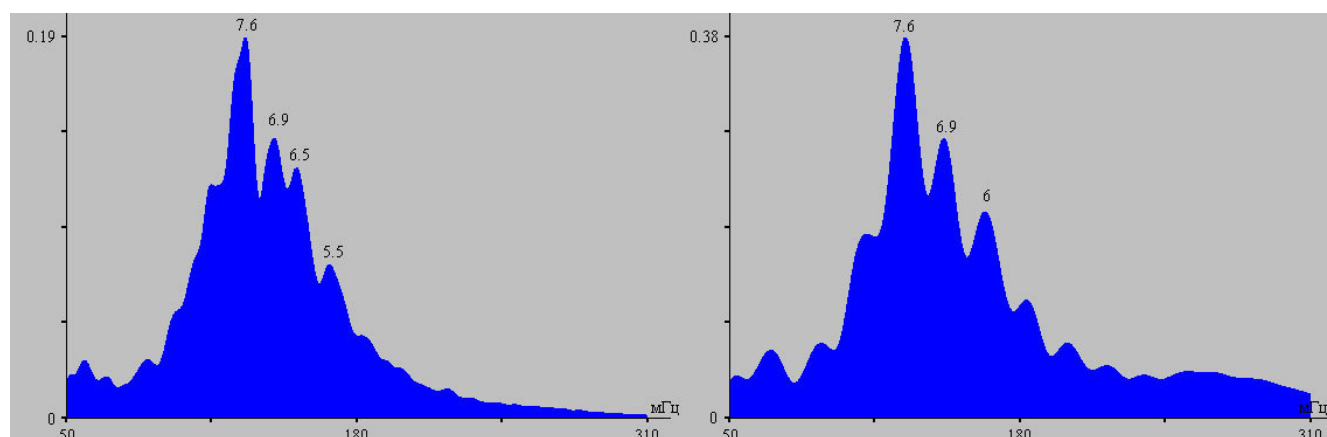


Рисунок 4.6 – Спектры участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (правый) и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (левый)

По мере распространения по шельфу монотонно 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. Величины изменений зависят не только от длин ветровых волн и степени уменьшения глубины, но и от их амплитуд [47, 188].



## 4.2 ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ДИНАМИКА КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН ДИАПАЗОНА МОРСКИХ ИНФРАГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Применение установок, созданных на основе лазерно-интерференционных методов, при исследовании волновых полей океана и литосферы позволило получить ряд новых фундаментальных результатов по физике взаимодействия геосфер в зонах перехода [39]. При обработке данных лазерных деформографов различных модификаций изучены закономерности генерации, динамики и трансформации на границе геосфер волновых процессов диапазона приливов [4], собственных колебаний бухт и морей [32], поверхностных ветровых и внутренних морских волн [54]. Благодаря нетрадиционному применению современных лазерно-интерференционных методов были получены основные результаты при изучении океанологических процессов и трансформации их энергии на границе «гидросфера-литосфера». Применение лазерных деформографов для изучения физики морских инфрагравитационных волн позволило исследовать интегральные, а не дискретные характеристики прибойных биений, получить совершенно новые данные о соотношении периодов и амплитуд поверхностных ветровых и инфрагравитационных волн. Полученные результаты значительно отличаются от результатов огромного числа экспериментальных и теоретических работ [19].

Для точной оценки процессов изменения инфрагравитационных и гравитационных волн необходимо использовать аппаратуру, на которой можно проводить измерения вне прибойной зоны. Приборы необходимо располагать одновременно как на берегу, так и в воде. Приборы, располагаемые на берегу, будут регистрировать основные колебания и волны, создаваемые гравитационными и инфрагравитационными волнами в литосфере при их трансформации на границе «гидросфера-литосфера».

При обработке экспериментальных данных лазерного деформографа, начиная с 2000 года, основное внимание было уделено соотношению амплитуд инфрагравитационных волн и амплитуд компонент морского волнения в зоне перехода «гидросфера-литосфера». Анализ данных проводился после

предварительной фильтрации высокочастотным фильтром Хемминга с длиной окна 3000, а также усреднения полученных спектров по 3 – 10 реализациям. Продолжительность непрерывных записей файлов вариаций микродеформаций земной коры достигала 3 месяцев.

В результате проведенного анализа данных установлено наличие значительных спектральных составляющих в диапазоне периодов от 25 до 50 с, существование которых зависит от погодных условий и морского волнения. Так 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.

Инфрагравитационные волны, зарегистрированные лазерным деформографом, подчиняются следующим закономерностям:

- обусловлены ветровым поверхностным морским волнением различных периодов и амплитуд, вызванных действием барических депрессий над Японским морем.

- периоды волн не зависят от величины периода ветрового волнения.

- амплитуды инфрагравитационных волн сравнимы с амплитудами гравитационных волн.

Входящие в прибойную зону ветровые волны как правило сильно модулированы по амплитуде. Это следует из анализа рисунке 4.7 (нижний), на котором представлены данные гидрофона, установленного в прибойной зоне недалеко от 52.5-метрового лазерного деформографа. На рисунке 4.7 (верхний) представлена запись 52.5-метрового неравноплечего лазерного деформографа, на которой зарегистрированы микросейсмы, вызванные поверхностными волнами. Период модуляции и ее глубина могут определять период и амплитуду инфрагравитационных волн.

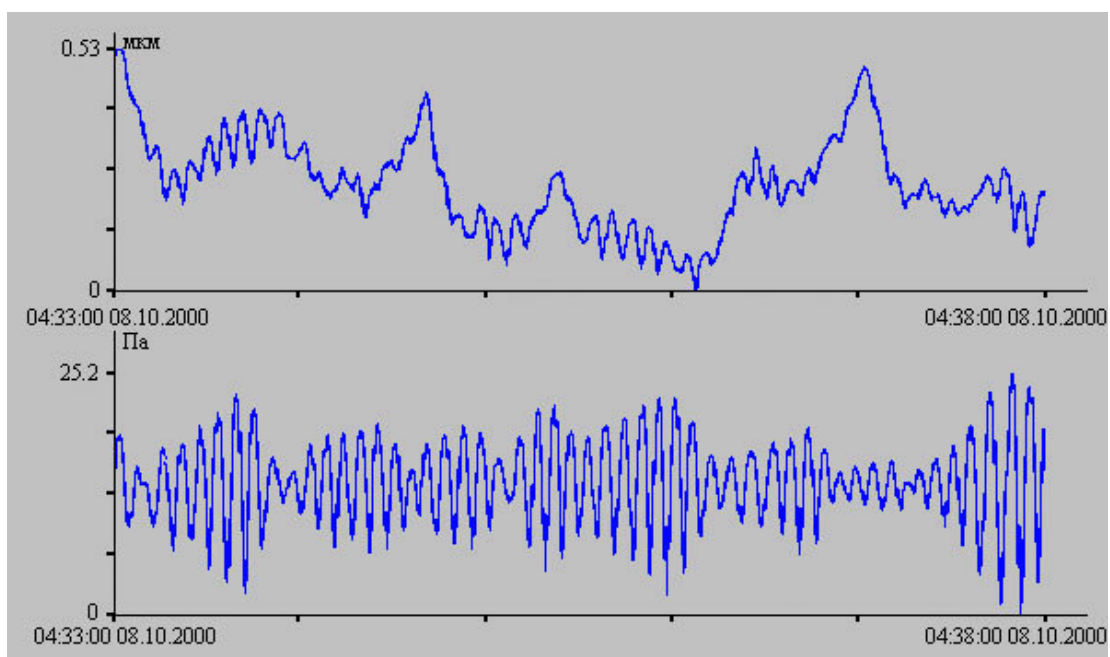


Рисунок 4.7 – Синхронные участки записи берегового лазерного деформографа (верхний) и лазерного гидрофона (нижний), установленного в прибойной зоне

Периоды выделенных инфрагравитационных волн не зависят от величины основного периода ветрового волнения. Анализ спектрограмм различных участков записей лазерного деформографа, содержащих инфрагравитационные и гравитационные волны, показал, что периоды прогрессивных и стоячих гравитационных волн изменяется, в то время как периоды инфрагравитационных волн остается неизменным. Так на рисунке 4.8 приведен пример динамической спектрограммы семичасовой записи лазерного деформографа за 8 октября 2000 года, на котором период прогрессивных волн последовательно возрастает от 4.3 до 5.4 с, а период стоячих волн возрастает от 2.4 до 2.7 с. При этом период инфрагравитационных волн остается практически неизменным и составляет 42 с.

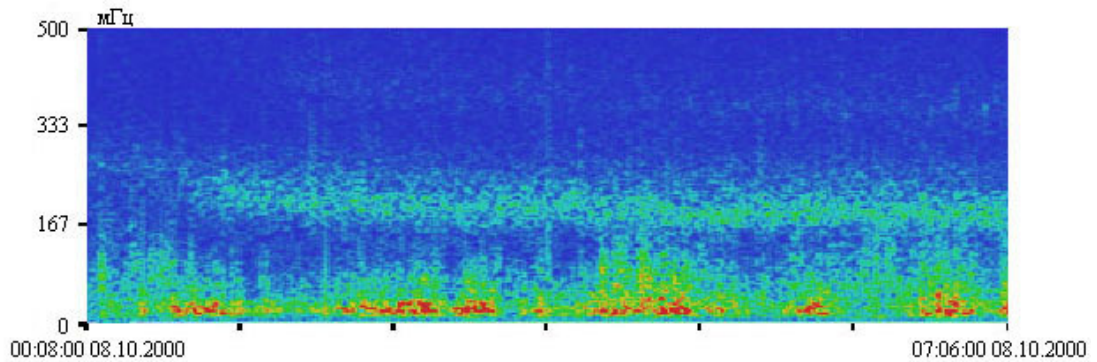


Рисунок 4.8 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа за октябрь 2000 года.

На спектре записи неравноплечего лазерного деформографа с длиной измерителя плеча 52.5 м, представленном на рисунке 4.9, выделены периоды колебаний гравитационных и инфрагравитационных волн. Так период инфрагравитационных волн равен 42 с, а периоды прогрессивных волн 5.4 с, а стоячих волн 2.6 с. Из спектра видно, что амплитуды зарегистрированных лазерным деформографом инфрагравитационных волн сравнимы с амплитудами гравитационных волн.

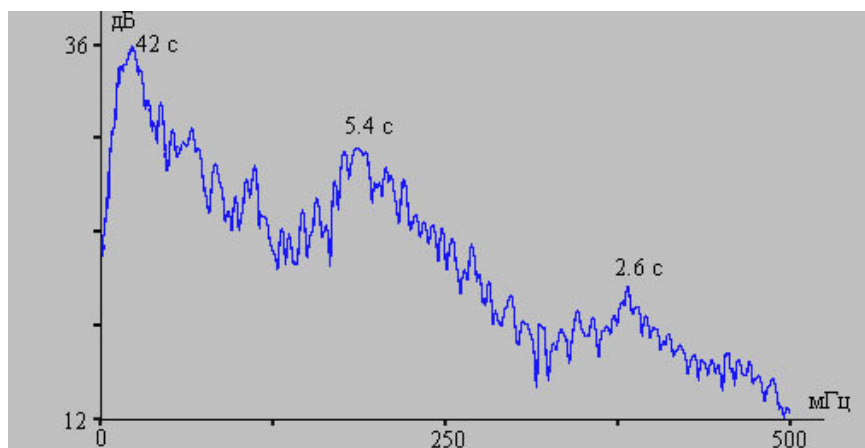


Рисунок 4.9 – Спектр фрагмента записи лазерного деформографа за октябрь 2000 года.

При анализе фрагмента записи за сентябрь 2004 года было обнаружено, что периоды прогрессивных волн сформировались и волнообразно меняются в

пределах от 6 с до 8 с, период инфрагравитационных волн составляет 37.4 с (рисунок 4.10). А на спектре записи неравноплечего лазерного деформографа, представленном на рисунке 4.11, выделены периоды колебаний гравитационных и инфрагравитационных волн. Период инфрагравитационных волн равен 37.4 с, а период гравитационных волн 7.6 с.

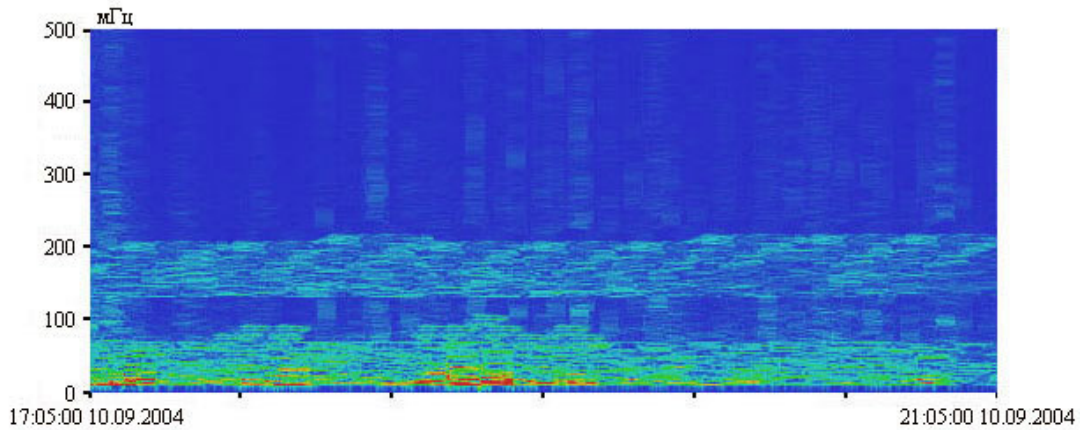


Рисунок 4.10 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа за сентябрь 2004 года.

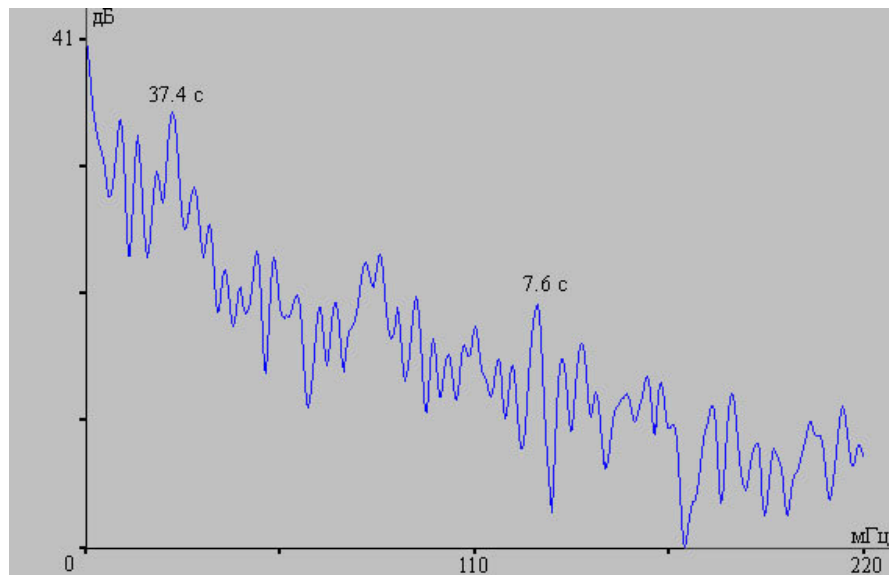


Рисунок 4.11 – Спектр фрагмента записи лазерного деформографа за сентябрь 2004 года.

Для участка записи лазерного деформографа за май 2007 года динамическая спектрограмма представлена на рисунке 4.12. При анализе рисунка было замечено,

что периоды прогрессивных волн меняются в диапазоне от 6.5 до 7.6 с, а период инфрагравитационных волн составляет 48.4 с.

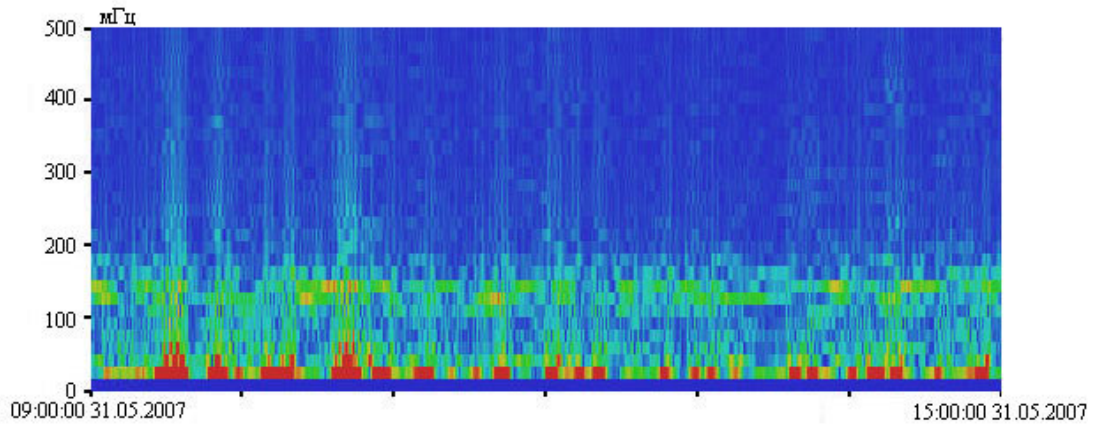


Рисунок 4.12 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа за май 2007 года.

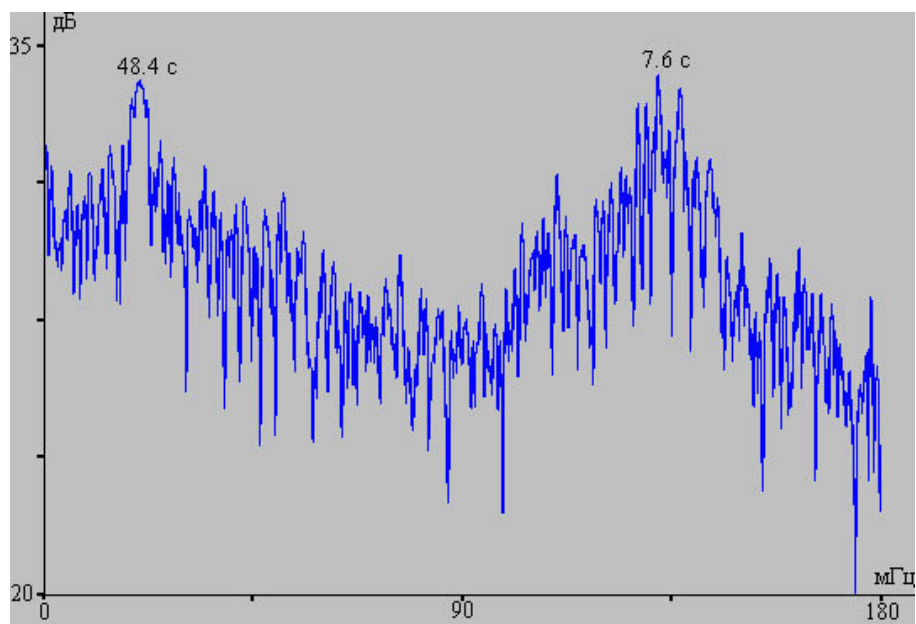


Рисунок 4.13 – Спектр фрагмента записи лазерного деформографа за май 2007 года.

На спектре записи неравноплечего лазерного деформографа, представленном на рисунке 4.13, выделены периоды колебаний гравитационных, 7.6 с, и инфрагравитационных, 48.4 с, волн. Из спектра видно, что амплитуды

зарегистрированных лазерным деформографом инфрагравитационных волн практически равны амплитудам гравитационных волн.

Для фрагмента записи лазерного деформографа за май 2015 года период группы прогрессивных волн волнообразно меняется от 9.1 до 6.2 с, а период инфрагравитационных волн составляет 57.4 с. Динамическая спектрограмма данного участка записи лазерного деформографа представлена на рисунке 4.14.

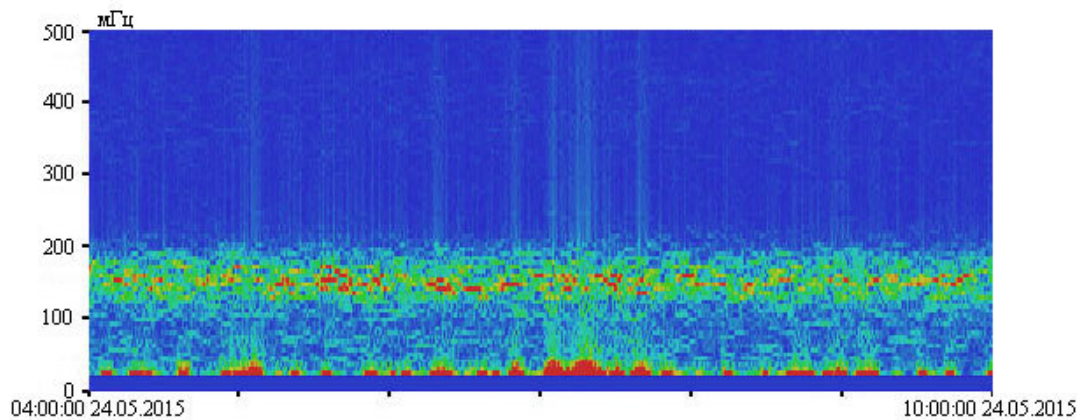


Рисунок 4.14 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа за май 2015 года.

На спектре записи неравноплечевого лазерного деформографа, представленном на рисунке 4.15, выделены периоды колебаний гравитационных и инфрагравитационных волн. Из спектра видно, что амплитуды зарегистрированных лазерным деформографом инфрагравитационных волн практически равны амплитудам гравитационных волн. Отношение величин амплитуд инфрагравитационных волн к величинам амплитуд прогрессивных и стоячих гравитационных волн на всех проанализированных участках записей меняется в пределах от 2 до 0.5.

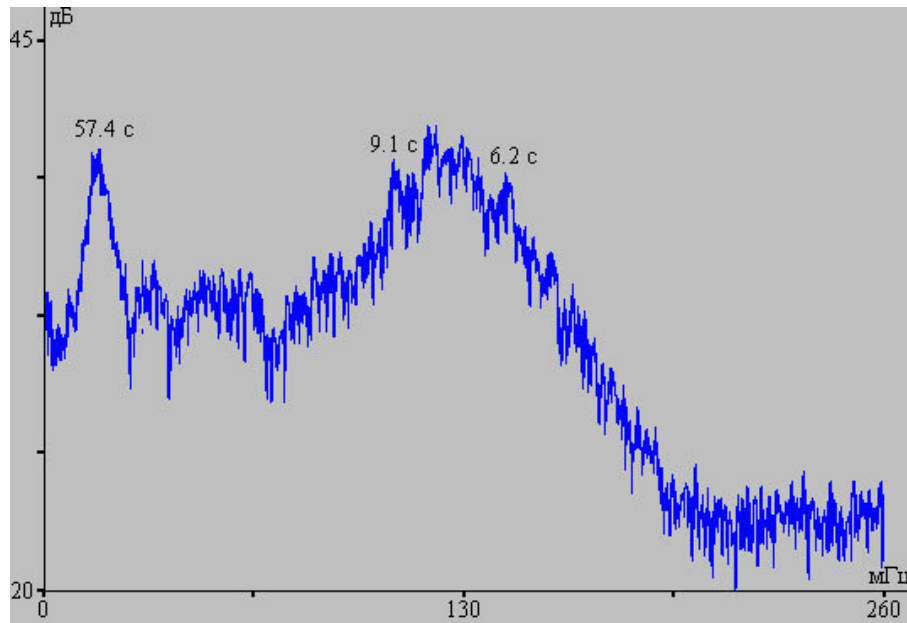


Рисунок 4.15 – Спектр фрагмента записи лазерного деформографа за май 2015 года.

Таким образом, по данным берегового неравноплечего лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м, входящего в состав сейсмоакустико-гидрофизического комплекса МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», установлено:

- амплитуды инфрагравитационных волн сравнимы по величине с амплитудами гравитационных волн.
- периоды инфрагравитационных волн не зависят от периодов гравитационных волн [41].

#### 4.3 КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ ДИАПАЗОНА МОРСКИХ ИНФРАГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НЕ МОРСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

При проведении комплексных экспериментальных исследований по синхронной регистрации вариаций микродеформаций земной коры, вариаций атмосферного и гидросферного давлений нами было установлено, что основным механизмом генерации морских внутренних волн являются атмосферные



возмущения, характер изменения которых полностью идентичен вариациям гидросферного давления в шельфовой зоне Японского моря.

Летом 2012 года группами ученых ТОИ ДВО РАН проводился эксперимент по изучению динамических особенностей термоструктуры шельфовой области Японского моря с помощью термогирлянд. В это же время на м. Шульца залива Петра Великого Японского моря работал лазерно-интерференционный комплекс, на котором регистрировались вариации атмосферного давления лазерным нанобарографом, вариации микродеформаций земной коры неравноплечими лазерными деформографами с длинами измерительного плеча 17.5 и 52.5 м, ориентацией «запад-восток» и «север-юг», соответственно. Карта расположения лазерно-интерференционного комплекса и термогирлянд представлена на рисунке 4.16. На рисунке точками ЛИК обозначен лазерно-интерференционный комплекс, точками ЛД1 и ЛД2 – лазерные деформографы с длинами измерительных плеч 52.5 и 17.5 м, ориентацией «север-юг» и «запад-восток», соответственно, точками Т1 – Т3 обозначены места установки термогирлянд. Расстояние от термогирлянд до лазерного нанобарографа составляет около 4 800 м, а расстояние от лазерного нанобарографа до лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м составляет 50 м. Расстояние от лазерного нанобарографа до лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 метров около 30 м.

Проанализируем экспериментальные данные вариаций деформаций верхнего слоя земной коры, колебаний давления атмосферы и гидросферы, полученные в 2007 году с помощью лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, для изучения закономерностей генерации морских внутренних волн атмосферными процессами. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы был установлен на шельфе Японского моря в южном направлении от м. Шульца на глубине 27 м. Лазерный нанобарограф был установлен в лабораторном помещении на расстоянии 370 м от лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и на расстоянии 50 м от 52.5-метрового лазерного деформографа. В ходе выполнения экспериментальных работ

была получена непрерывная запись начиная с 31 мая 2007 года длительностью около четырех месяцев.

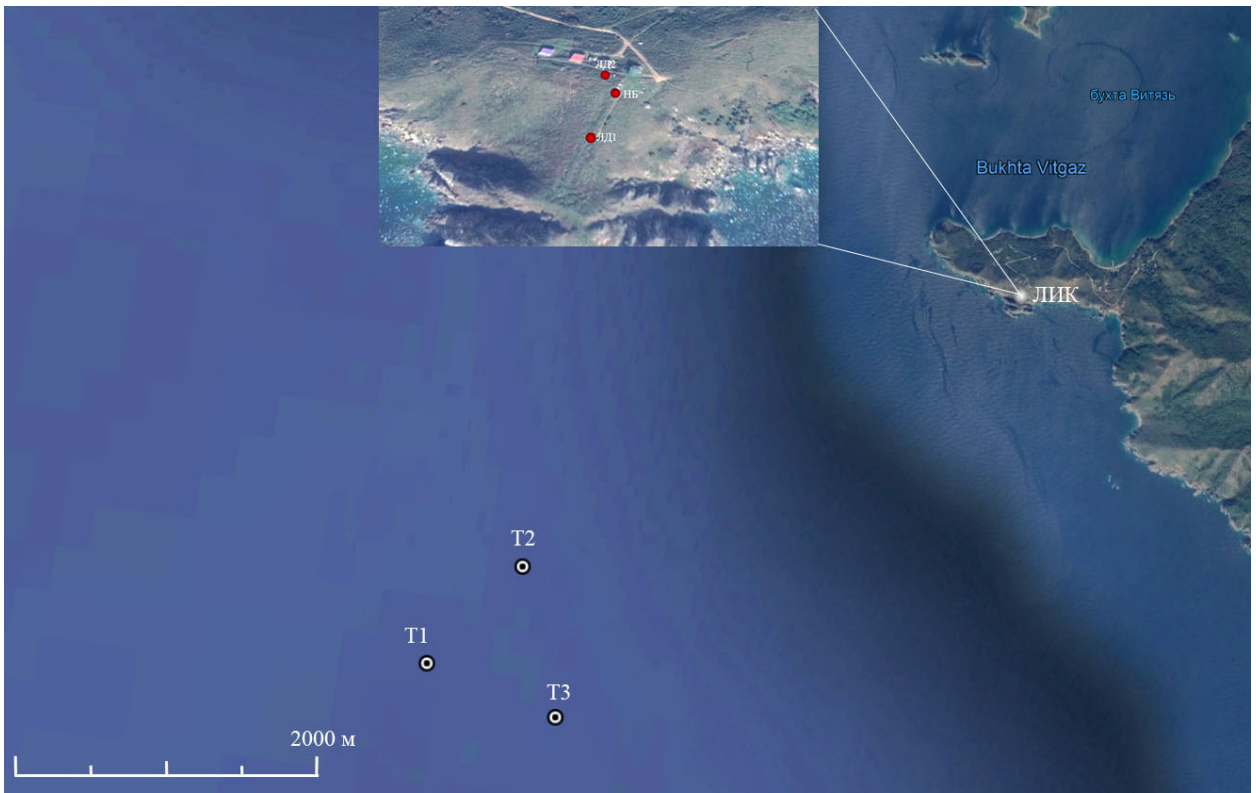


Рисунок 4.16 – Карта-схема постановки приборов в июле 2012 года в заливе Петра Великого Японского моря и на м. Шульца

При анализе экспериментальных данных основное внимание было уделено частотному диапазону короткопериодных внутренних волн, соответствующих периодам от 5 до 20 мин. Длительность цугов вариаций давления атмосферы и гидросферы, а так же вариаций деформаций верхнего слоя земной коры составляет 1.5 – 2 ч. К таковым относятся возмущения, зарегистрированные в июне 2007 года. Пример подобных возмущений, зарегистрированных лазерным деформографом, лазерным нанобарографом и лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, приведен на рисунке 4.17. Периоды наблюдаемых колебаний, зарегистрированные приборами, на рисунке 4.17, около 8.5 мин, причем вариации атмосферного давления запаздывают по сравнению с вариациями гидросферного давления примерно на 2 мин. Учитывая, что расстояние между лазерным

нанобарографом и лазерным измерителем вариаций давления гидросферы около 370 м, то вероятная максимальная скорость распространения атмосферной депрессии равна 3.1 м/с.

При обработке экспериментальных данных, полученных с помощью лазерно-интерференционного комплекса в июле 2012 г., был обнаружен цуг волн, схожий с цугом волн, зарегистрированным термогирляндой. На рисунке 4.18 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 наряду со схожестью была установлена идентичность периодов, равных примерно 9 мин.

Анализ записей лазерно-интерференционных приборов показал, что происхождение колебаний, зарегистрированных термогирляндой, вызвано соответствующими атмосферными возмущениями, а не гидросферными процессами. Цуг волн на записи лазерного нанобарографа был зарегистрирован на 10 минут позже, чем на записи термогирлянды. Учитывая расстояние между лазерным нанобарографом и термогирляндой (рисунок 4.16), можно вычислить вероятную максимальную скорость фронта распространения атмосферного возмущения по прямой, которая равна 8 м/с.

Анализ большого количества экспериментальных данных диапазона периодов морских внутренних волн показал, что:

- появление колебаний давления гидросферы в исследуемом диапазоне периодов почти всегда сопровождается колебаниями давления атмосферы;
- резкое изменение атмосферного давления сопровождается колебаниями гидросферы и соответствующими колебаниями верхнего слоя земной коры [49].

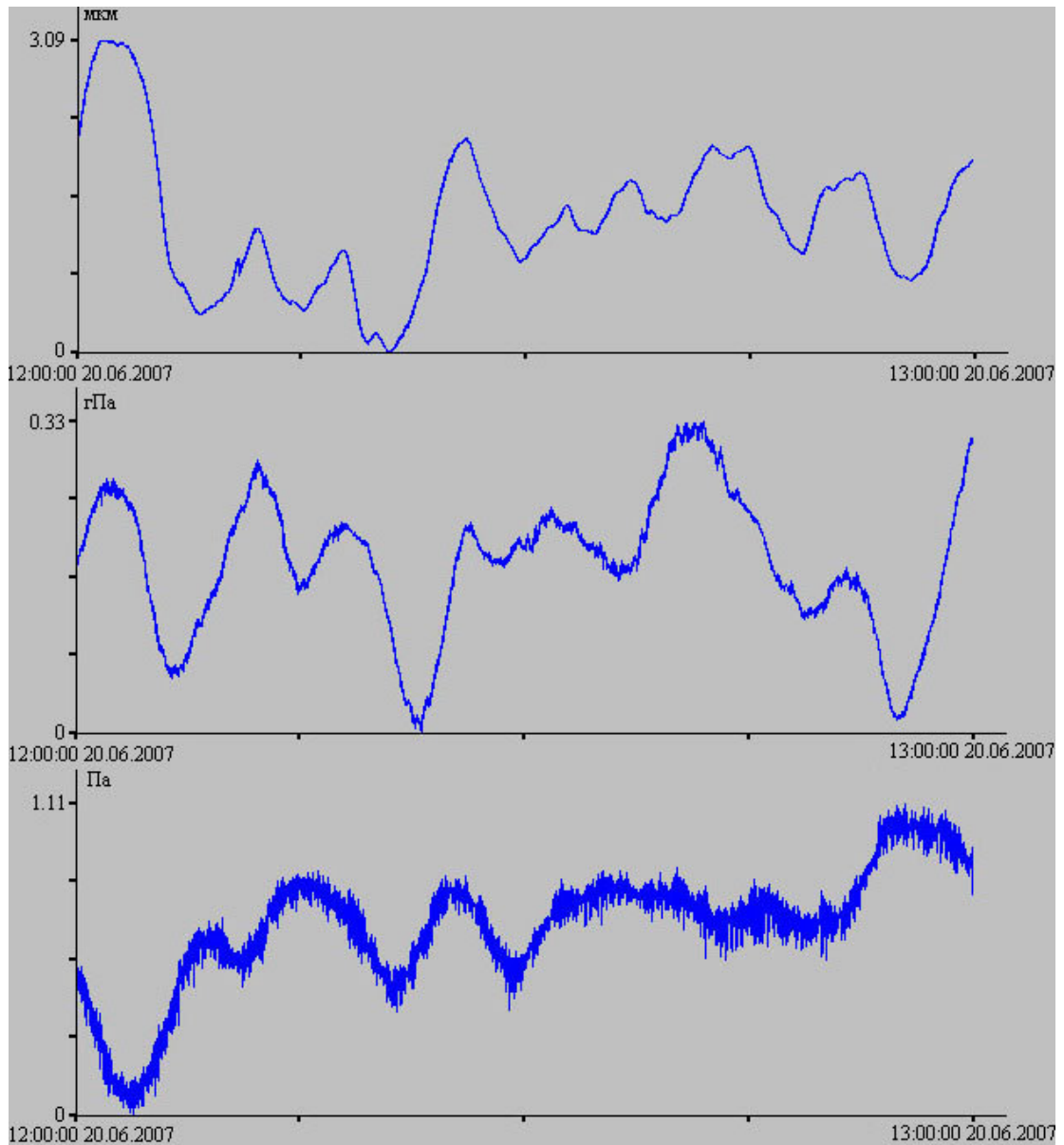


Рисунок 4.17 – Синхронные записи лазерного деформографа (верхний), лазерного нанобарографа (средний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) за 20 июня 2007 г.

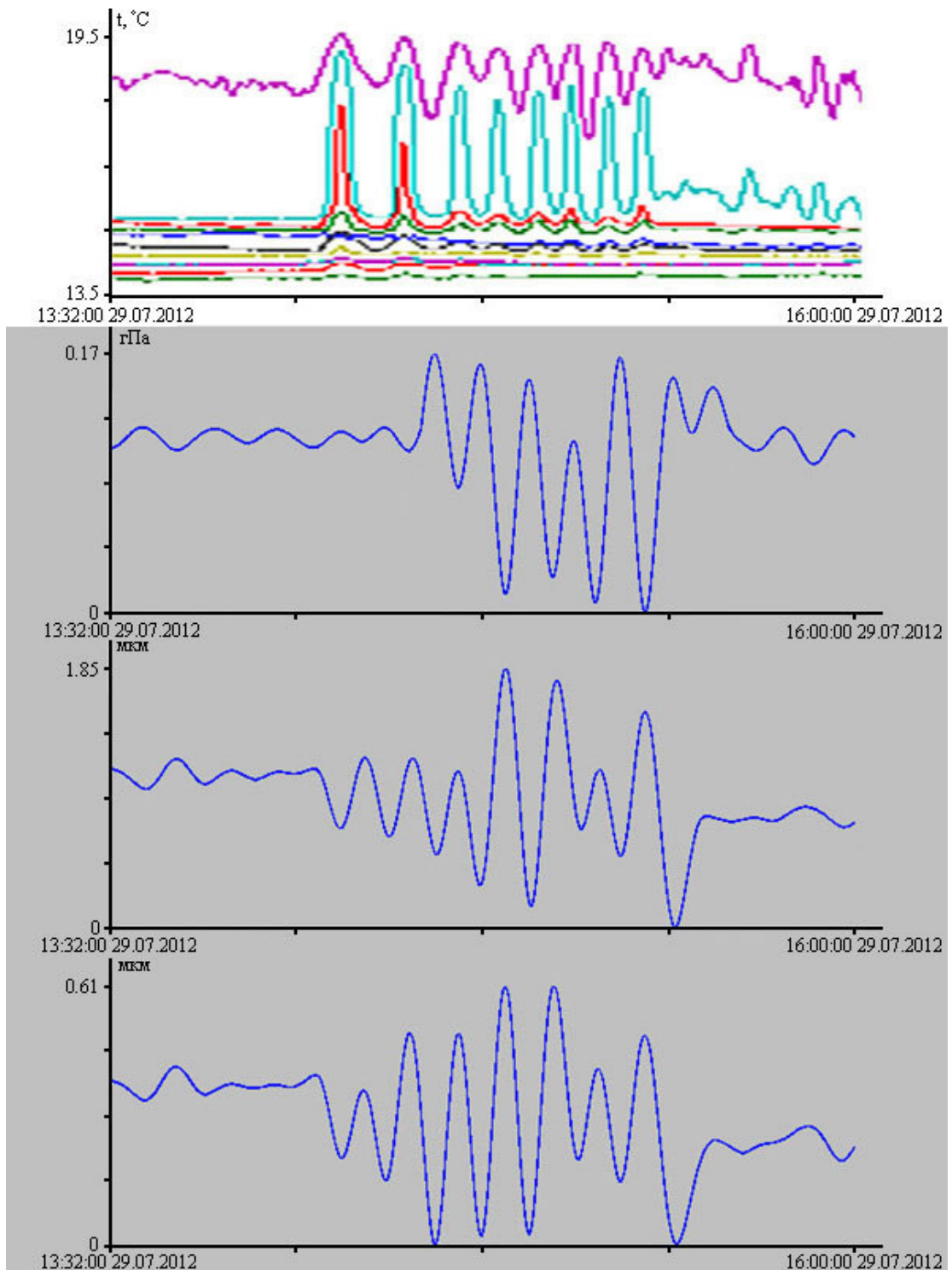


Рисунок 4.18 – Синхронные записи термогирлянды, лазерного нанобарографа и лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» (сверху вниз) за 29 июля 2012 г.

Учет вклада вариаций давления атмосферы в микродеформации земной коры и вариации давления гидросферы очень важен, так как способствует

определению первоисточника тех или иных колебаний в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера». Так же учет атмосферных процессов позволяет выделить тонкие «замаскированные» атмосферой литосферные и гидросферные эффекты. Анализ синхронных экспериментальных данных вариаций давления атмосферы и гидросферы, а так же вариаций микродеформаций земной коры позволил установить, что первоисточником колебаний с периодом около 9 минут была атмосфера. Также крайне важно учитывать определенное воздействие вариаций атмосферного давления на показания применяемой аппаратуры [76].

Об учете влияния вариаций атмосферного давления на вариации микродеформаций земной коры описано в работе [240]. Вычитание вариаций атмосферного давления из вариаций микродеформаций земной коры позволяет выделить тонкие литосферные процессы «замаскированные» атмосферой. Для связи вариаций микродеформаций верхнего слоя земной коры с вариациями атмосферного давления в работе вводится следующая формула:

$$\varepsilon_a = -P(r, Q)/(2(\lambda + \mu))$$

где:  $\varepsilon_a$  – региональная деформация на упругом полупространстве,  $P(r, Q)$  – атмосферное давление на поверхности (в гектопаскалях),  $\lambda$  и  $\mu$  – коэффициенты Ламе данного упругого полупространства,  $r$  и  $Q$  – координаты в цилиндрической системе координат. В связи с тем, что лазерные деформографы расположены на неоднородной среде, особенно лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией «север-юг», применение данной формулы затруднительно. Для учета воздействия вариаций атмосферного давления на измеряемую деформацию была разработана следующая методика. Были выбраны часовые синхронные записи лазерных деформографов и лазерного нанобарографа, где график изменения атмосферного давления совпадал с графиком изменения микродеформаций верхнего слоя земной коры (рисунок 4.19). Всего было проанализировано более пятидесяти таких участков записей с 5 по 25 апреля 2015 года. Мы считаем, что рассматриваемые участки записей лазерных деформографов обусловлены практически одинаковым воздействием атмосферного давления. Для

каждого участка записи был определен передаточный коэффициент связи показаний лазерного нанобарографа и лазерных деформографов, а затем был рассчитан средний коэффициент. В результате чего для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 м и ориентацией «запад-восток» передаточный коэффициент равен 0.080 мкм/Па, а для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией «север-юг» он равен 0.203 мкм/Па. В пересчете на деформацию для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 м передаточный коэффициент равен  $4.6 \cdot 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>, а для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м он равен  $3.9 \cdot 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>. Различие передаточных коэффициентов объясняется особенностями постановки лазерных деформографов. Устои лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 м расположены на суглинке, так же как и один устой лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52,5 метра, 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. В связи с этим в дальнейшей обработке можно из экспериментальных данных лазерных деформографов вычесть деформацию, вызванную воздействием атмосферного давления, изменения которой фиксируются лазерным нанобарографом. В результате чего мы получим вариации микродеформаций земной коры без воздействия атмосферных процессов.

При анализе синхронных экспериментальных данных лазерно-интерференционного комплекса современными спектральными методами было установлено присутствие значительных спектральных максимумов на спектрах записей лазерного нанобарографа и лазерных деформографов. Так были выделены значительные спектральные максимумы на периодах около 2.35, 4.55, 7.58, 8.53, 11.38, 13.65, 22.75 и 34.13 мин. Эти периоды вызваны различными процессами, протекающими в атмосфере, гидросфере или литосфере. Учитывая, что данные периоды присутствуют на спектрах записей лазерного нанобарографа, можно предположить, что первоисточник их находится в атмосфере.

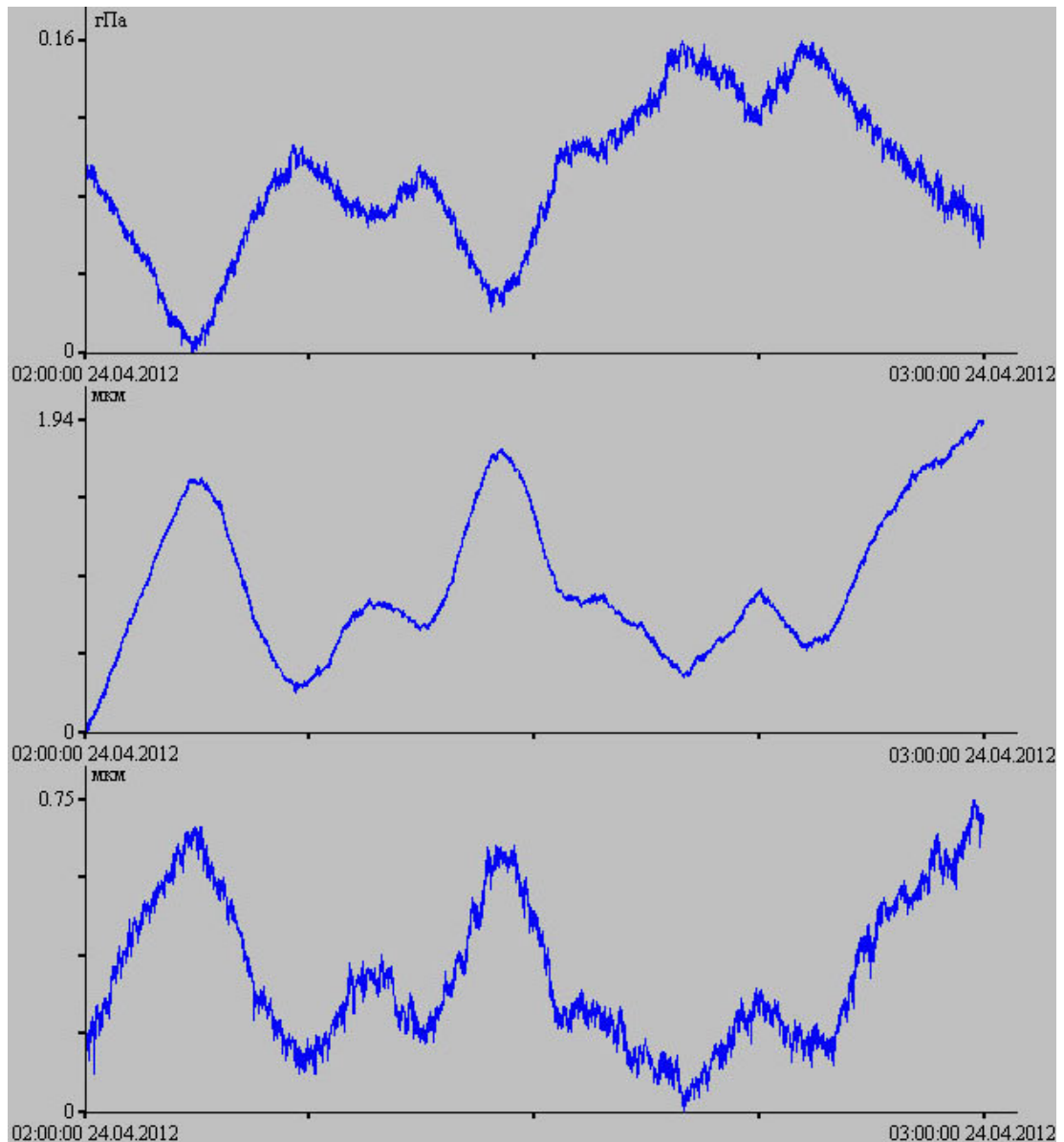


Рисунок 4.19 – Синхронные записи лазерного нанобарографа и лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» (сверху вниз) за апрель 2012 г.

Однако работы различных авторов говорят о том, что колебания и волны, распространяющиеся в литосфере, вызывают колебания соответствующих периодов в атмосфере. Например, в работе [230] основной сфероидальный тон  ${}_0S_2$ , возникший после мощного землетрясения в литосфере, вызвал колебания соответствующего периода в атмосфере. Такой же результат был получен при обработке экспериментальных данных лазерно-интерференционного комплекса. На синхронных записях лазерного нанобарографа и лазерных деформографов были обнаружены схожие колебания. В этот период лазерными деформографами было



зарегистрировано землетрясение с магнитудой 5.5, произошедшее в Южной Суматре, Индонезии. Упругие волны, распространяющиеся в земной коре, вызванные землетрясением, возбудили в атмосфере колебания соответствующих периодов, что и было зарегистрировано лазерным нанобарографом и лазерными деформографами (рисунок 4.20).

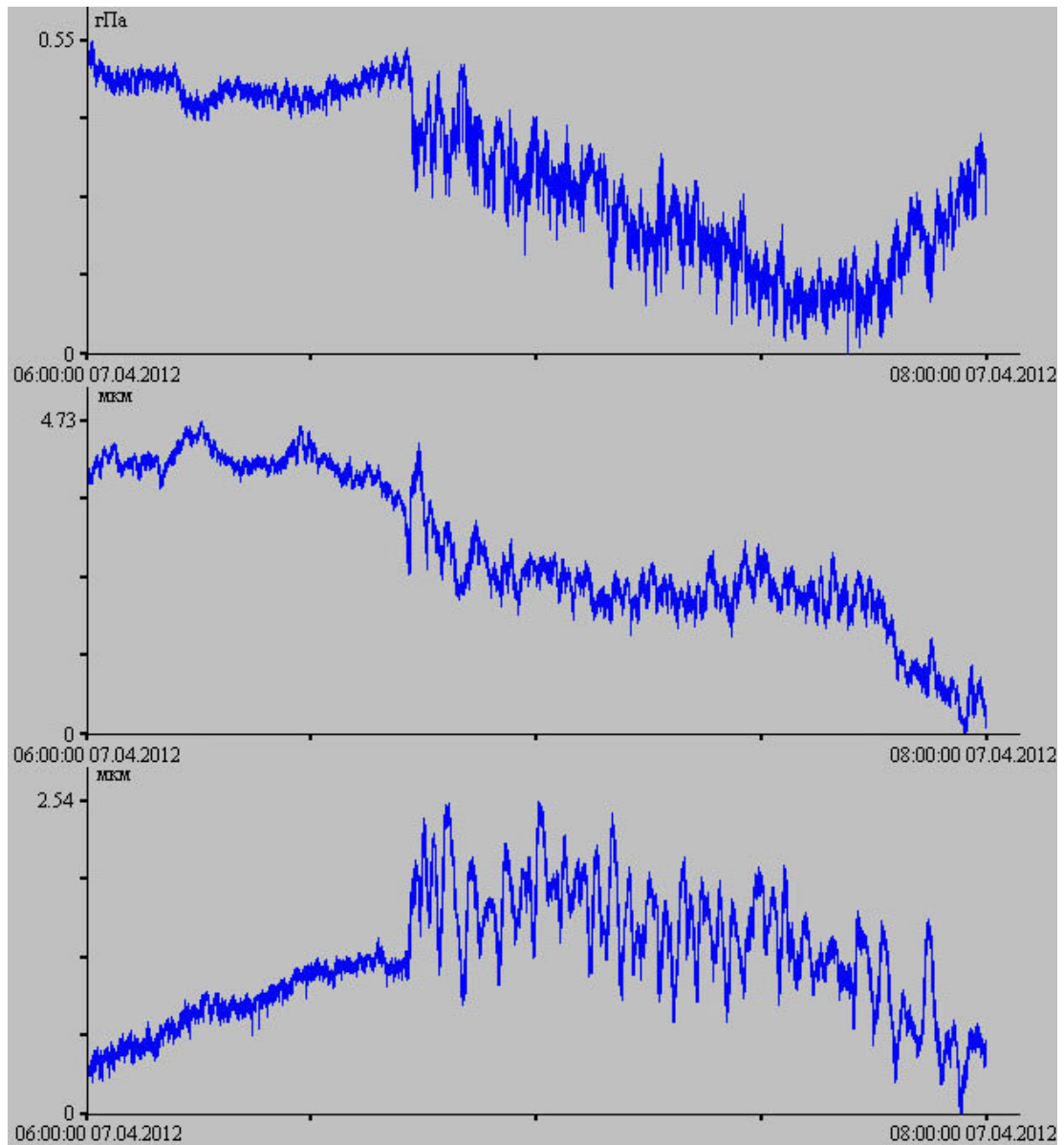


Рисунок 4.20 – Синхронные записи лазерного нанобарографа и лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» (сверху вниз) за апрель 2012 г.

Несмотря на это, учет вклада вариаций атмосферного давления в уровень микродеформаций верхнего слоя земной коры очень важен и дает эффективные

результаты. При анализе синхронных экспериментальных данных лазерных деформографов и лазерного нанобарографа за июль 2015 года по данной методике были определены передаточные коэффициенты, отражающие вклад вариаций атмосферного давления в уровень микродеформаций земной коры. С целью демонстрации данной методики были обработаны экспериментальные данные лазерного нанобарографа и лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 м и ориентацией «запад-восток» с 27 по 31 июля 2015 года. На рисунке 4.21 представлены записи лазерного нанобарографа (верхний), лазерного деформографа (средний) и скорректированная запись лазерного деформографа (нижний).

Рассмотрим спектры синхронных участков записей лазерного нанобарографа, лазерного деформографа «запад-восток» и скорректированного участка записи лазерного деформографа «запад-восток» для наглядного представления работоспособности предложенной модели. Спектры участков записей выделим в области основного сфероидального тона Земли  ${}_0S_0$  (рисунок 4.22). 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 значимости пик соответствует сфероидальному обертому  ${}_1S_3$  с экспериментально определенным периодом 17.51 мин.

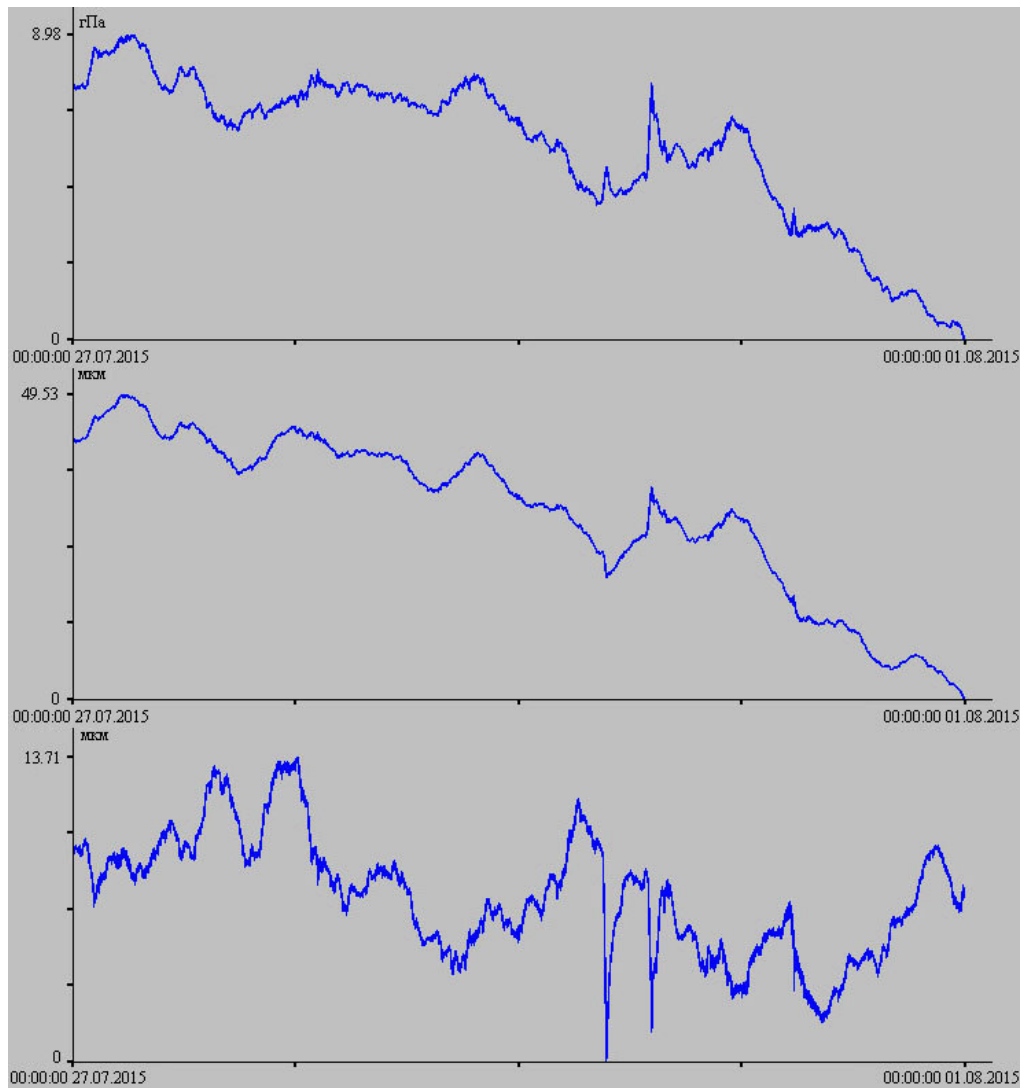


Рисунок 4.21 – Записи лазерного нанобарографа, лазерного деформографа и скорректированная запись лазерного деформографа (сверху вниз) за июль 2015 г.

Сравнение спектров неоткорректированной записи лазерного деформографа «запад-восток» и откорректированной записи лазерного деформографа «запад-восток» показало, что только 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 [58].

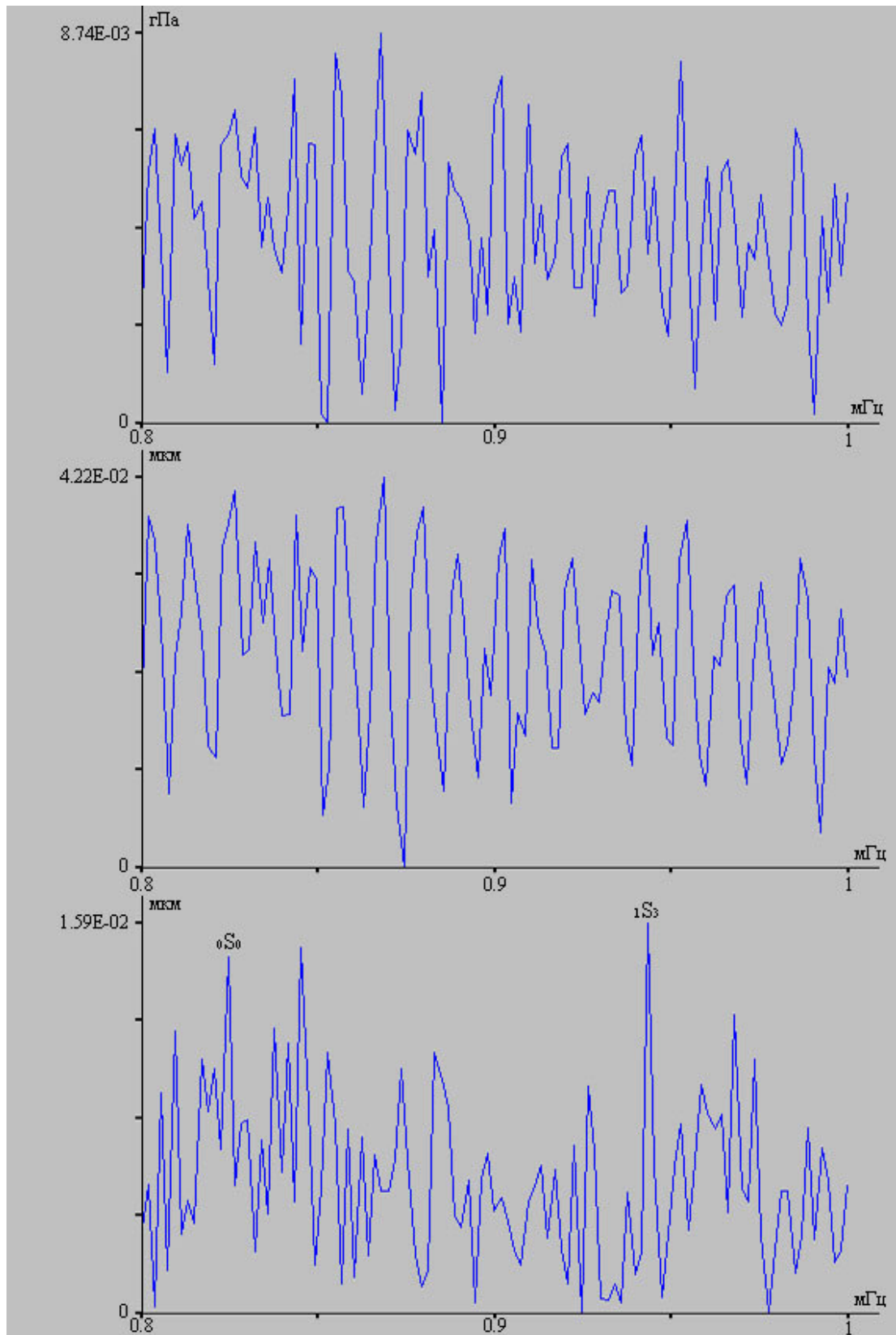


Рисунок 4.22 – Спектры участка записи лазерного нанобарографа, участка записи лазерного деформографа «запад-восток», скорректированного участка записи лазерного деформографа «запад-восток» (сверху-вниз)

#### 4.4 ВЫВОДЫ

С целью исследования природы возникновения, развития и трансформации колебаний и волн ветрового и инфрагравитационного диапазонов были проанализированы экспериментальные данные приборов, входящих в состав лазерно-интерференционного комплекса. 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, и энергия в нем перераспределяется в более высокочастотную область. Величины изменения зависят не только от длин ветровых волн и степени уменьшения глубины, но и от их амплитуд.

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.

Для изучения колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн не морского происхождения были проанализированы синхронные экспериментальные данные лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. В результате анализа многочисленных экспериментальных данных рассматриваемого диапазона периодов было установлено, что колебания давления гидросферы, зарегистрированные лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, 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.

Анализ синхронных экспериментальных данных лазерного нанобарографа и лазерных деформографов показал, что необходимо учитывать влияние вариаций атмосферного давления на уровень микродеформаций верхнего слоя земной коры. Так 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.

## ГЛАВА 5. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ АНОМАЛИИ СОПУТСТВУЮЩИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЮ ЦУНАМИ

Разработка новых технологий краткосрочного прогноза опасных гидродинамических процессов Земли (волны цунами, «волны-убийцы» и др.), их пеленгации и идентификации на стадии зарождения и развития имеет громадное значение. На данный момент практически нет достаточно надежных методов регистрации возникновения опасных гидродинамических процессов Земли, на что указывают катастрофические события последних лет. В качестве характерного примера можно привести два события, которые связаны с землетрясениями, произошедшими в земной коре под морским дном. Так в декабре 2004 года произошло мощное землетрясение в Индийском океане, в результате чего образовалась цунами, унесшая жизни более 283 000 человек [105]. При этом не была объявлена тревога в связи с образованием цунами. А в январе 2007 года произошло мощное землетрясение в Тихом океане, в результате была объявлена опасность цунами на Курильских островах и на острове Хоккайдо. Цунами не было. Данные примеры говорят о том, что службы предупреждения, связанные с опасностью возникновения цунами, работают не эффективно. Если в первом случае погибла масса людей и нанесен большой экономический и социально-политический ущерб, то во втором случае нанесен большой экономический ущерб хозяйствующим объектам в зоне, где была объявлена тревога, в связи с прекращением их функционирования и проведением противцунамиопасных мероприятий, эвакуацией людей из предполагаемых районов затопления.

Деформационные аномалии, вызывающие цунами, возникают при различных геодинамических процессах. Подавляющее их большинство связано с землетрясениями. Сами землетрясения всего лишь «трясут» дно в диапазоне периодов от нескольких секунд до нескольких десятков секунд и не могут вызвать цунами. А деформационные аномалии, вызванные землетрясениями, находятся в крайне левом частотном диапазоне и не могут быть зарегистрированы любыми, даже широкополосными сейсмографами. В связи с тем, что гидрологические

установки находятся на небольшом расстоянии от места выхода цунами на шельф и времени недостаточно для эффективного проведения противцунамиопасных мероприятий, они тоже являются не эффективными. Наиболее эффективными для регистрации цунами являются установки, способные регистрировать деформационные подвижки, приводящие к возникновению цунами. Скорость распространения деформационной подвижки в упругой среде на порядок больше скорости распространения цунами. Наиболее перспективными для их регистрации и пеленгации являются лазерные деформографы благодаря своим основным характеристикам: точность измерения микросмещений земной коры 0.3 нм, рабочий частотный диапазон от 0 (условно) до 10 000 Гц.

#### 5.1 РЕГИСТРАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ АНОМАЛИИ ИНДОНЕЗИЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 26 ДЕКАБРЯ 2004 ГОДА

В 00:58:53 по Гринвичу 26 декабря 2004 года вблизи западного побережья Суматры, Индонезия, произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 9.1. Оценкой магнитуды цунамигенного Суматринского землетрясения занималось большое количество ученых по всему миру. В публикациях значение магнитуды по разным источникам изменяется в пределах от 9.0 до 9.3. Максимальное значение магнитуды, равное 9.3, приведено в работе [232] при анализе наибольших длиннопериодных нормальных мод собственных колебаний Земли. Такую же величину магнитуды получили в своей работе американские ученые при анализе длиннопериодных поверхностных волн по данным сейсмографов [238]. Данная оценка магнитуды оспаривается в других работах, так, например, в работе [216] по амплитудам собственных колебаний Земли значение магнитуды равно 9.15. При анализе данных длиннопериодных поверхностных волн и интегральных соотношений российскими учеными получено значение магнитуды 9.2 [22]. В работе [173] описывается совместная обработка собственных колебаний Земли и длиннопериодных поверхностных волн в результате было получено значение магнитуды 9.15. Другими специалистами были получены значения магнитуды в



пределах от 9.1 до 9.2 при анализе данных собственных колебаний Земли, длиннопериодных поверхностных волн, данных GPS, модельно-теоретических расчетов [174, 205, 219, 223, 239].

Гипоцентр основного землетрясения находился в точке с координатами 3.30° N, 95.87° E, на расстоянии около 160 км к западу от Суматры, на глубине 30 км от уровня моря. Землетрясение было необыкновенно большим в географическом смысле. Произошёл сдвиг около 1200 км породы на расстояние в 15 м вдоль зоны субдукции, в результате чего Индийская плита сдвинулась под Бирманскую плиту. Сдвиг не был единовременным, а был разделён на две фазы в течение нескольких минут. Сейсмографические данные говорят о том, что первая фаза сформировала разлом размерами примерно 400 км на 100 км, расположенный на глубине 30 км под морским дном. Разлом формировался со скоростью около 2 км/с, начиная от берега Асэ в сторону северо-запада в течение около 100 с. Затем возникла пауза примерно в 100 с, после чего разлом продолжил формироваться на север в сторону Андаманских и Никобарских островов [194]. На рисунке 5.1 приведена карта, на которой обозначено место цунамигенного землетрясения (красный круг), и часть других землетрясений, произошедших в этот день в данном районе (оранжевые круги). Целая череда землетрясений возникла вдоль одного тектонического разлома. Первый, самый сильный толчок, был зафиксирован на северной части острова Суматра, далее был зарегистрирован ряд толчков до Никобарских и Андаманских островов. Стена воды до 10 м обрушилась на побережья Шри-Ланки, Индии, Индонезии, Таиланда, Малайзии [105].

Суматринское землетрясение по своим масштабам стало самым крупным землетрясением в Андаман-Суматринской островной дуге. Цунамигенное землетрясение сопровождалось большим количеством повторных толчков. На территории от о. Симелуэ до севера Андаманских островов в период с 26.12.2004 г. по 28.03.2005 г. было зафиксировано 2800 толчков. Первый афтершок был зарегистрирован почти через 17 мин после цунамигенного землетрясения. Из сейсмических данных видно, что в течении нескольких часов сразу после

основного землетрясения афтершоки регистрировались один за другим с интервалом от 1 до 5 мин. Большинство толчков имели магнитуду около 6 [10].

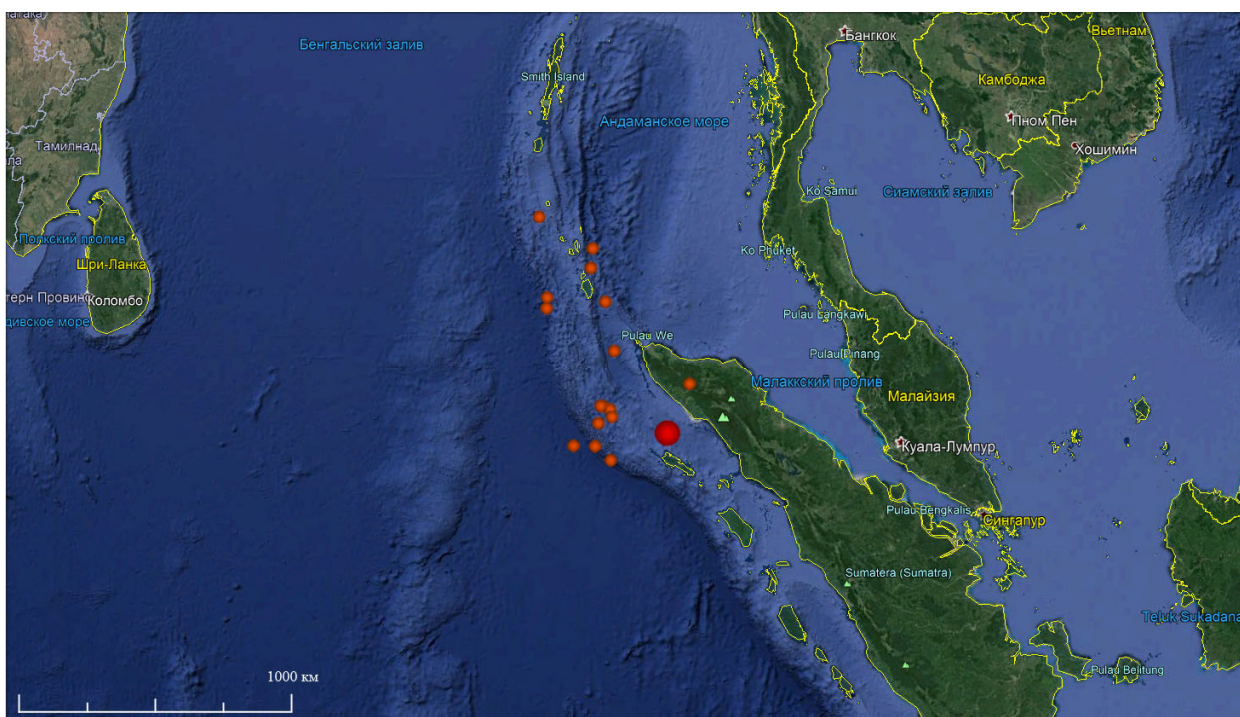


Рисунок 5.1 – Карта-схема расположения эпицентров землетрясений в районе Северной Суматры 26 декабря 2004 г.

При обработке записей 52.5-метрового лазерного деформографа неравноплечего типа ориентацией «север-юг», установленного на юге Приморского края России, обнаружена деформационная аномалия, вызванная индонезийским цунамигенным землетрясением 26 декабря 2004 года. На рисунке 5.2 приведен фрагмент записи лазерного деформографа, содержащий колебания и деформационную аномалию, которые были вызваны индонезийским цунамигенным землетрясением. На верхнем графике приведена запись лазерного деформографа длительностью около 5 ч, на которой стрелкой обозначено место начала землетрясения. На нижнем графике приведено это землетрясение в большем масштабе. На базе 52.5-метрового лазерного деформографа деформационная аномалия имеет величину около 59.3 мкм, что составляет деформацию порядка  $1.1 \cdot 10^{-6}$ , что значительно больше амплитуды суточного прилива, наблюдаемого в

месте расположения лазерного деформографа [30]. Из графика видно, что произошло резкое увеличение базы деформографа с медленной последующей релаксацией. Аналогичное поведение верхней части земной коры было и в эпицентре землетрясения. Учитывая дисперсионное соотношение, связывающее периоды волн с их скоростями, и затухание сигнала, можно утверждать, что в эпицентре скорость нарастания деформационной аномалии была выше, а величина значительно больше. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа составило примерно 5 500 км, при этом сигнал цунамигенного землетрясения был зарегистрирован через 19 мин 54 с после начала землетрясения. При условии, что землетрясение произошло под водной толщей моря или океана, по записям лазерного деформографа можно было бы с уверенностью предсказать возникновение цунами. По записям сейсмостанций можно легко определить координаты землетрясения, а величину цунами – по величинам разрыва, упругой энергии аномалии и глубине моря над эпицентром. Величина разрыва может быть определена по периодам волн, которые первыми достигли зоны расположения лазерного деформографа. Из спектра записи лазерного деформографа видно, что период первой волны цунамигенного землетрясения равен 42.7 с.

На рисунке 5.3 (верхний) приведена отфильтрованная запись лазерного деформографа полосовым фильтром Хэмминга в частотном диапазоне от 0.01 до 1 Гц. Данный диапазон частот соответствует частотному диапазону широкополосного сейсмографа. На рисунке 5.3 (нижний) приведена динамическая спектрограмма отфильтрованного участка записи лазерного деформографа.

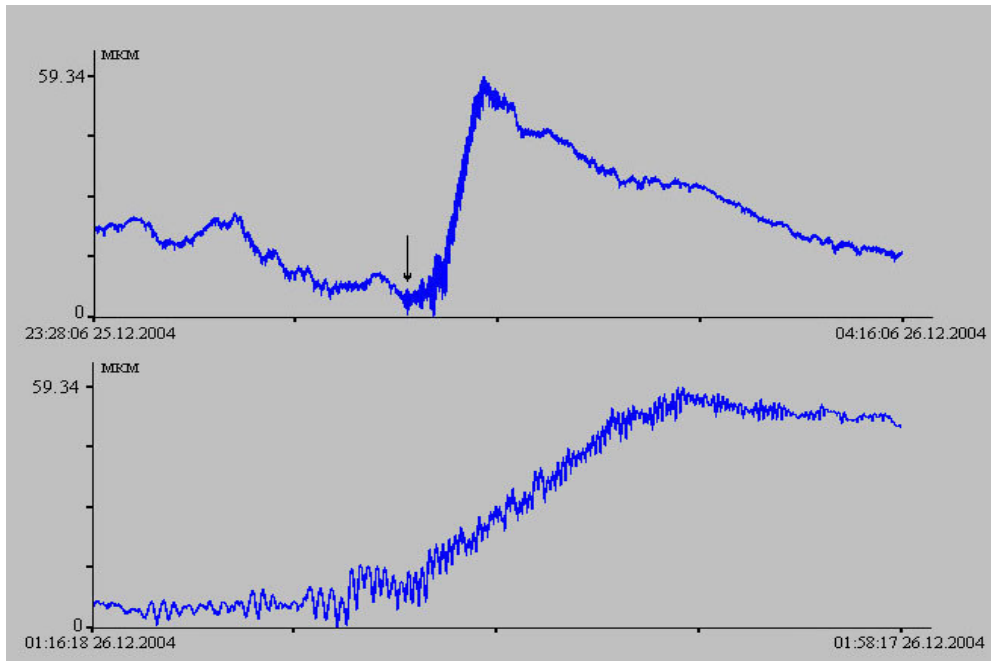


Рисунок 5.2 –Фрагмент записи 52.5 метрового лазерного деформографа за декабрь 2004 года. Запись индонезийского цунамигенного землетрясения (верхний) и выделенный участок записи землетрясения (нижний).

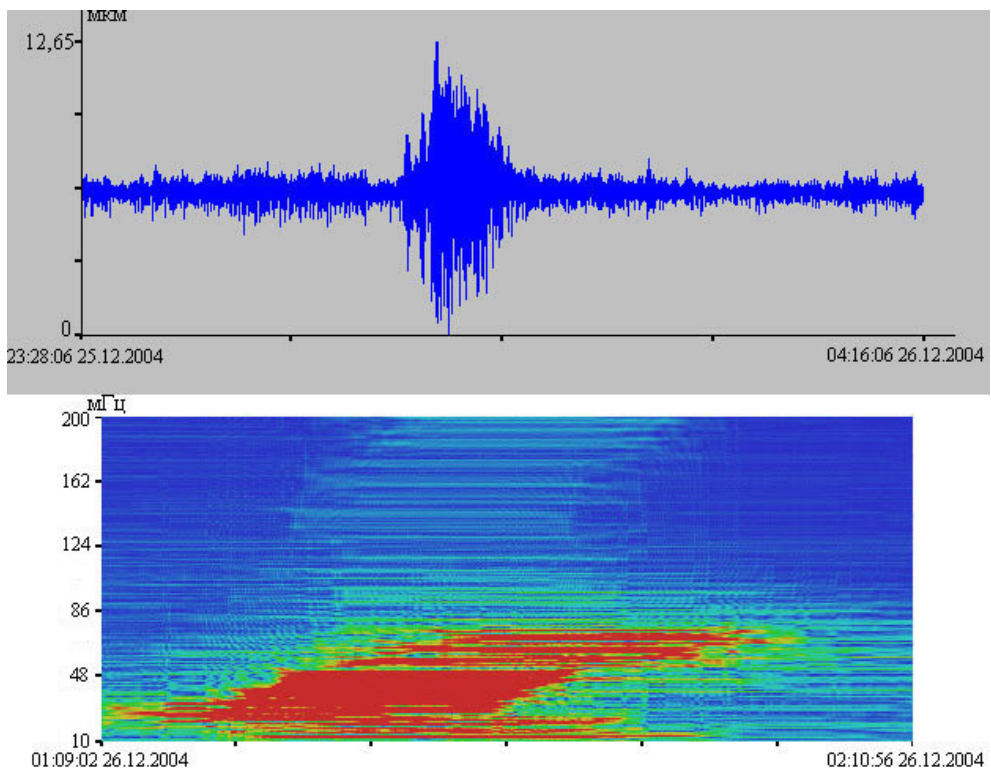


Рисунок 5.3 – Фрагмент отфильтрованной записи 52.5-метрового лазерного деформографа за декабрь 2004 года (верхний) и динамическая спектрограмма отфильтрованной записи лазерного деформографа (нижний).

При анализе динамической спектрограммы установлено, что периоды основных колебаний, вызванных землетрясением (которые также регистрируют и широкополосные сейсмографы), постепенно уменьшаются от 30 до 14 с. Зная соотношение, связывающее скорость распространения упругих волн с периодом колебаний, величину изменения периода основных колебаний и время, за которое это изменение произошло, можно определить расстояние до места землетрясения.

На рисунке 5.4 приведена запись и динамическая спектрограмма записи широкополосного сейсмографа на японской станции, содержащая это же землетрясение [217]. Практически все сеймостанции Японии снабжены подобными установками.

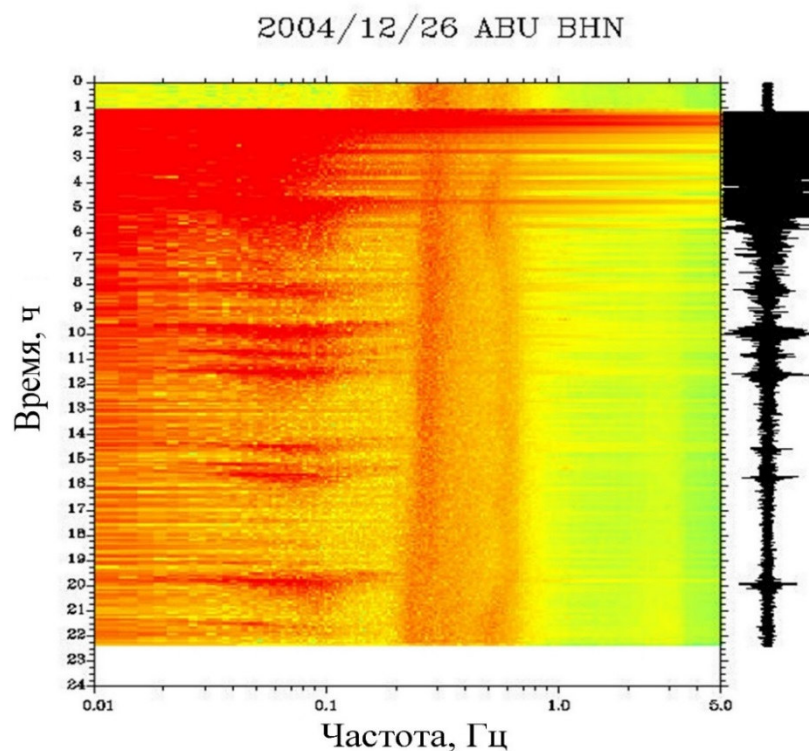


Рисунок 5.4 – Запись широкополосного сейсмографа (правый) и динамическая спектрограмма записи широкополосного сейсмографа (левый).

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. В качестве примера на рисунке 5.5 (верхний) приведена отфильтрованная запись сахалинского не цунамигенного землетрясения. Которое произошло 04 августа 2000 года в 21:13:05 в точке с координатами 48.85 N и 142.42 E на глубине 33 км с магнитудой 7.1. Фильтрация проводилась полосовым фильтром Хэмминга в частотном диапазоне от 0.01 Гц до 1 Гц. На рисунке 5.5 (нижний) приведена динамическая спектрограмма записи сахалинского землетрясения. При сравнении всех графиков видно, что даже широкополосными сейсмографами отличить цунамигенное землетрясение от нецунамигенного практически невозможно [61].

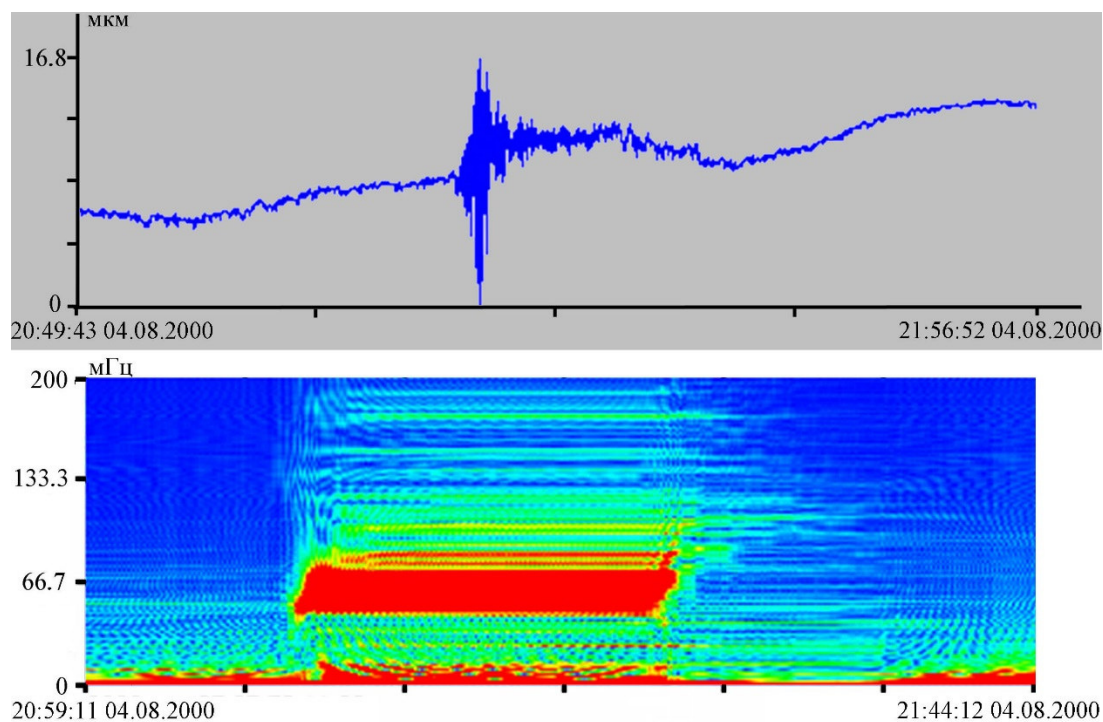


Рисунок 5.5 – Фрагмент отфильтрованной записи 52.5-метрового лазерного деформографа (верхний) и динамическая спектрограмма (нижний) сахалинского землетрясения в августе 2000 года

Первые толчки землетрясения ощутили жители близлежащих островов. Однако официальных предупреждений о цунами не было. А спустя час от берегов северной Суматры внезапно отступило море и через некоторое время на берег

вырвалась серия их четырех огромных волн. Самая высокая из которых достигала 24 м. В некоторых местах шельфа высота волн достигла 30 м. Морская вода двигалась в глубь суши на несколько сотен метров, а в некоторых местах и на два километра, «очищая» побережье Индонезии от сооружений и унесла около 168 000 человеческих жизней.



Рисунок 5.6 – Цунами в Таиланде. 2004 год.

Еще через час волны достигли побережья Таиланда, смывая все на своем пути и унеся жизни около 8200 человек. Преодолев низменные Мальдивские острова и убив около 100 человек, волны устремились к побережьям Индии и Шри-Ланке. На шельфе высота волн достигала 12 м и унесла жизни еще около 53 000 человек. Через семь часов после землетрясения волна цунами приблизилась к побережью Восточной Африки, унеся жизни более 300 человек вдоль побережья.

Волна цунами достигла ближайшего побережья через два часа после землетрясения. Используя записи данных только одного лазерного деформографа можно было бы предсказать появление волны цунами и спасти людей при организации соответствующей службы оповещения [180].

Размещение нескольких трехкоординатных лазерных деформографов в различных точках Земли позволит, на наш взгляд, решить многие задачи, связанные с краткосрочным прогнозом цунами.

Огромное количество жертв от катастрофического цунами 26 декабря 2004 г. привело к развитию системы мониторинга цунами в открытом океане DART [236, 196]. Которых до декабря 2004 г. насчитывалось всего семь. Данные системы стали устанавливаться около всех сейсмоактивных зон Мирового океана. И уже в марте 2014 г. их число выросло до 62. Из них 49 станций было установлено в Тихом океане, 7 в Атлантическом океане и 6 в Индийском океане. Станция включает в себя автономный регистратор придонного гидростатического давления, который по звуковому каналу передает сигнал на буй со спутниковой антенной. Станции устанавливаются на глубинах от 1500 до 6000 м. В пассивном режиме станция передает полученные значения с дискретностью 15 мин и находится в режиме ожидания. При регистрации волны с амплитудой более 30 мм станция переходит в активный режим, данные с которой начинают передаваться с дискретностью 15 с [211].

## 5.2 РЕГИСТРАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ ДРУГИХ ПОДВОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С момента начала работы лазерного деформографа горизонтального типа ориентацией «север-юг» и с длиной измерительного плеча 52.5 м был получен большой объем данных широкого диапазона частот искусственного и естественного происхождения. Общий вид записей землетрясений отличается от искусственных сигналов импульсного характера. Существенные отличия наблюдаются при анализе спектрограмм. Частоты, характерные для землетрясений и взрывов, определяются размером разрыва в гипоцентре землетрясений и зоной локализации взрывов [46]. Проанализируем записи лазерного деформографа при регистрации сигналов, связанных с некоторыми цунамигенными землетрясениями.



5 сентября 2004 года на южном побережье острова Хонсю, Япония, произошло два мощных землетрясения. Первое землетрясение с магнитудой 7.2 произошло в 10:07:07 в точке с координатами 33.14° N, 136.62° E, 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. Его гипоцентр находился в точке с координатами 33.19° N, 137.05° E, на расстоянии около 130 км к востоку от южной части о. Хонсю, на глубине 10 км от уровня моря. На рисунке 5.7 приведена карта-схема расположения эпицентров двух сильных землетрясений (красный круг) и череды землетрясений с магнитудой около 5 (оранжевые круги). Землетрясения с магнитудой около 5 были зарегистрированы на южном побережье о. Хонсю после второго сильного землетрясения.

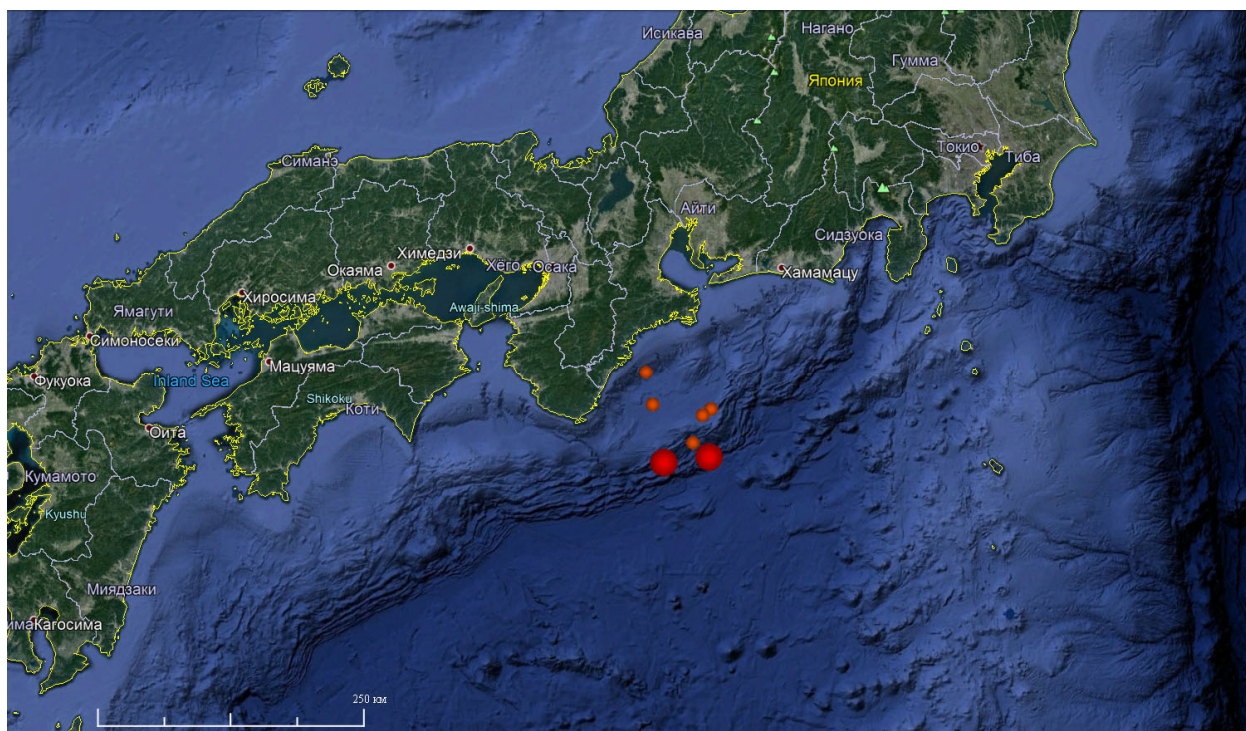


Рисунок 5.7 – Карта-схема расположения эпицентров землетрясений в районе южного побережья Хонсю 5 сентября 2004 г.

Оба сильных землетрясения были зарегистрированы лазерным деформографом, установленным на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», в точке с координатами 42.58° N, 131.13° E. Расстояние от эпицентров землетрясений до

лазерного деформографа составляет около 1162 км. На рисунке 5.8 (верхний), приведена запись первого нецунамигенного землетрясения. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом в 10:13:46 5 сентября 2004 года. Учитывая время распространения колебаний от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа, скорость их распространения примерно равна 2.909 км/с. На рисунке 5.8 (нижний) приведена запись второго цунамигенного землетрясения. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом в 15:03:52 5 сентября 2004 года. Расстояние от эпицентра землетрясения до лазерного деформографа составляет около 1152 км. Учитывая время распространения колебаний от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа, скорость их распространения примерно равна 2.909 км/с.

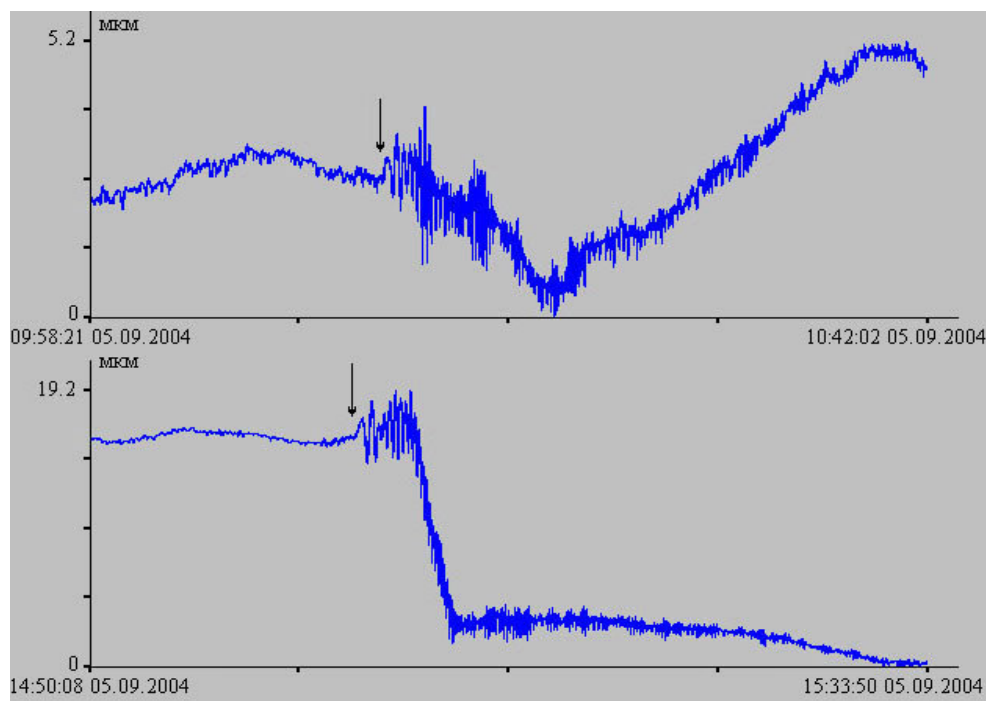


Рисунок 5.8 – Фрагменты записи 52.5-метрового лазерного деформографа за сентябрь 2004 года. Запись нецунамигенного землетрясения (верхний) и запись цунамигенного землетрясения (нижний) на юге западного побережья Хонсю.

На рисунке 5.9 приведена увеличенная запись лазерного деформографа горизонтального типа первого нецунамигенного землетрясения (верхний) и

динамическая спектрограмма этого землетрясения (нижний). 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.

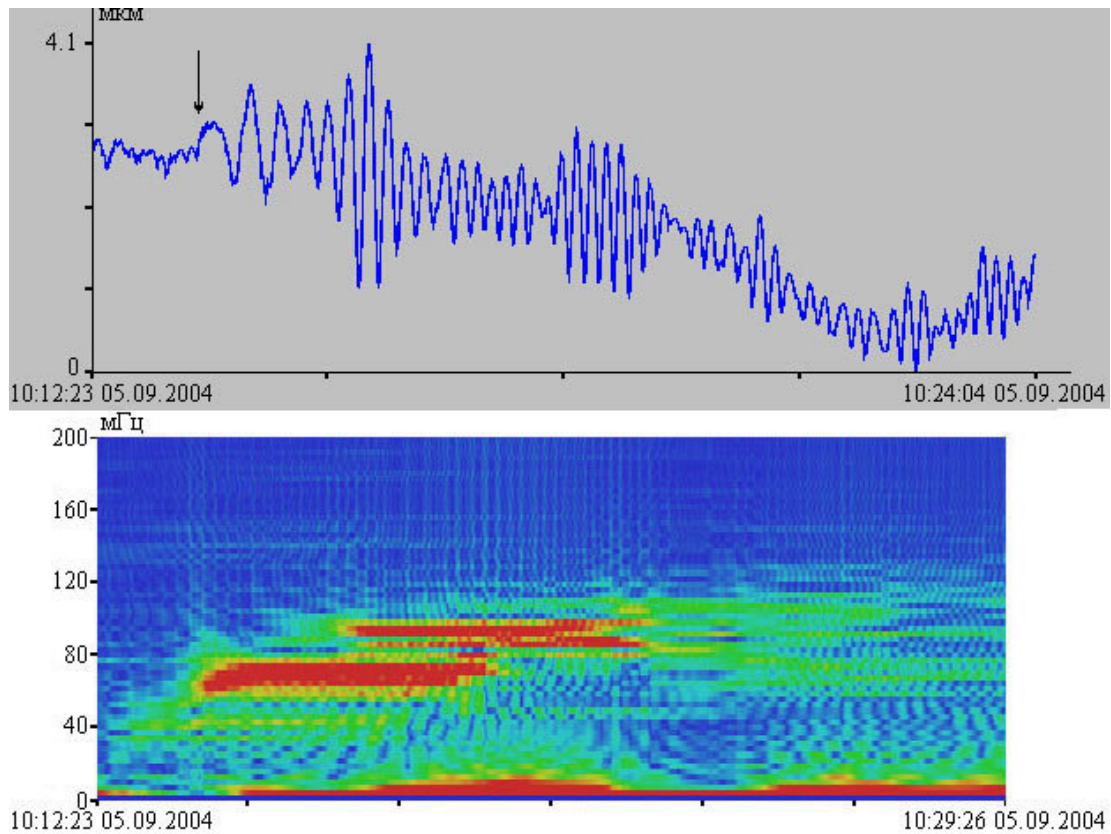


Рисунок 5.9 – Фрагмент записи 52.5-метрового лазерного деформографа нецунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма этого землетрясения (нижний).

На рисунке 5.10 приведена запись цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма записи этого землетрясения (нижний). Начало землетрясения отмечено стрелкой. По записи видно, что после начала землетрясения 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 присутствуют колебания с периодами 10 и 16 с.

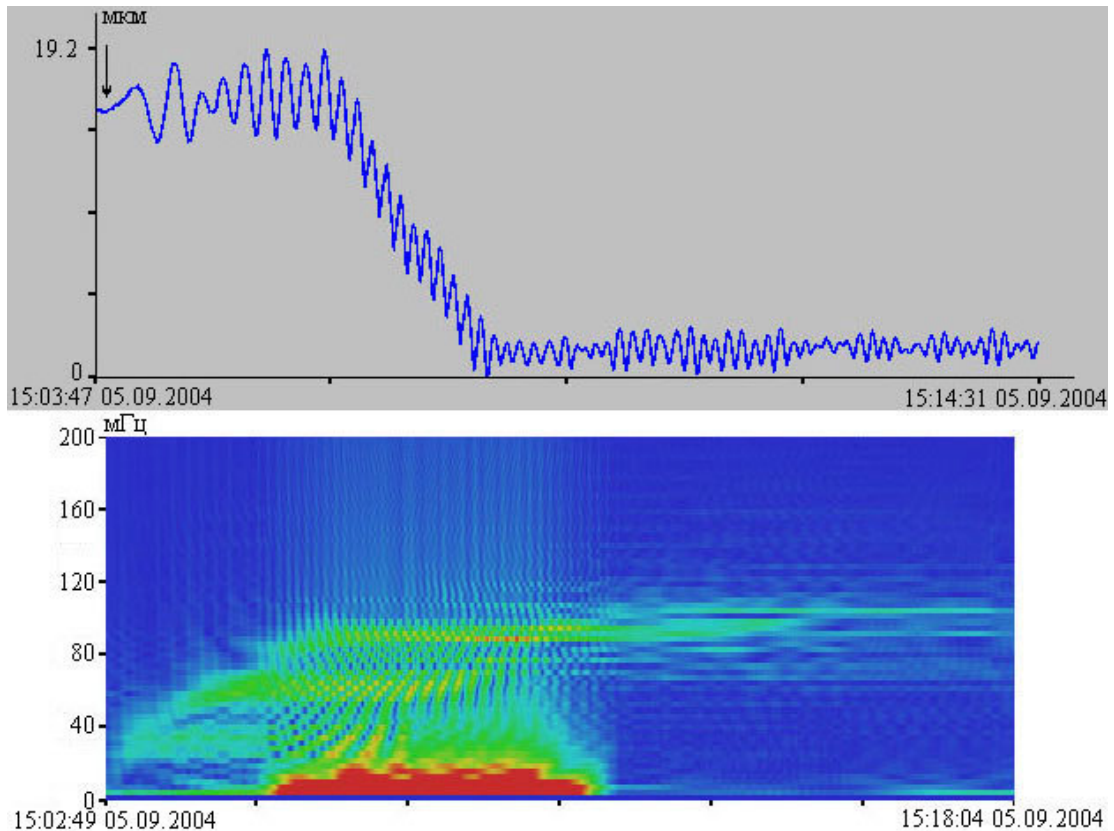


Рисунок 5.10 –Фрагмент записи 52,5 метрового лазерного деформографа цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма записи этого землетрясения (нижний).

Цунамигенное землетрясение произошло в месте, где глубина моря составляет 2700 м, при этом скорость цунами может составлять 0.16 км/с. Учитывая, что до ближайшего побережья около 130 км, то волна цунами достигнет берега через 812 с. Получаем, что лазерный деформограф, установленный на юге Приморского края, на 9 мин раньше зарегистрировал деформационную аномалию, которая привела к образованию цунами, чем самая большая волна дошла до ближайшего побережья [64].

По данным местных СМИ эпицентр землетрясения находился рядом с полуостровом Кии, выходящим в Тихий океан. Толчки землетрясения ощущались на большой территории, вплоть до г. Токио, удаленного на 600 км от эпицентра. Колебания пришли и на древнюю столицу Японии г. Нара. После первого и второго землетрясения была объявлена тревога цунами. Но после первого

землетрясения наблюдалась только приливная волна высотой около 0.5 м. А после второго землетрясения наблюдалось небольшое цунами с высотой волны около метра. После первого толчка было прекращено движение электричек и скоростных поездов. В результате воздействия цунами пострадали 14 человек, в префектуре Вакаяма произошла авария, приведшая к прекращению подачи электроэнергии, у побережья префектуры Миэ перевернулись 4 небольших судна. Небольшая волна цунами нанесла незначительный ущерб экономике Японии.

Еще одно цунамигенное землетрясение было зарегистрировано лазерным деформографом 16 июля 2007 года. Землетрясение с магнитудой 6.7 произошло в 01:13:23 в точке с координатами 37.55° N, 138.6° E на расстоянии 7 км от западного побережья о. Хонсю, на глубине 33 км от уровня моря. Эпицентр землетрясения находился в Японском море, на расстоянии около 60 км к юго-западу от г. Ниигата, примерно в 100 км к северо-востоку от г. Нагано и в 840 км к юго-востоку от г. Владивостока. На рисунке 5.11 приведена карта-схема расположения эпицентров землетрясений. Большим красным кругом обозначено цунамигенное землетрясение с магнитудой 6.7. Оранжевыми кругами обозначены последующие землетрясения с магнитудами около 5. Всего в этот день было зафиксировано 4 землетрясения в районе западного побережья Хонсю, Япония.

Цунамигенное землетрясение было зарегистрировано лазерным деформографом, установленным на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Расстояние от эпицентра землетрясения до лазерного деформографа составляет около 845 км. На рисунке 5.12 приведена запись цунамигенного землетрясения 16 июля 2007 года, сделанная 52.5-метровым лазерным деформографом. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован в 01:17:54. Учитывая время распространения колебаний от эпицентра землетрясения до места регистрации, скорость их распространения равна примерно 3.1 км/с.

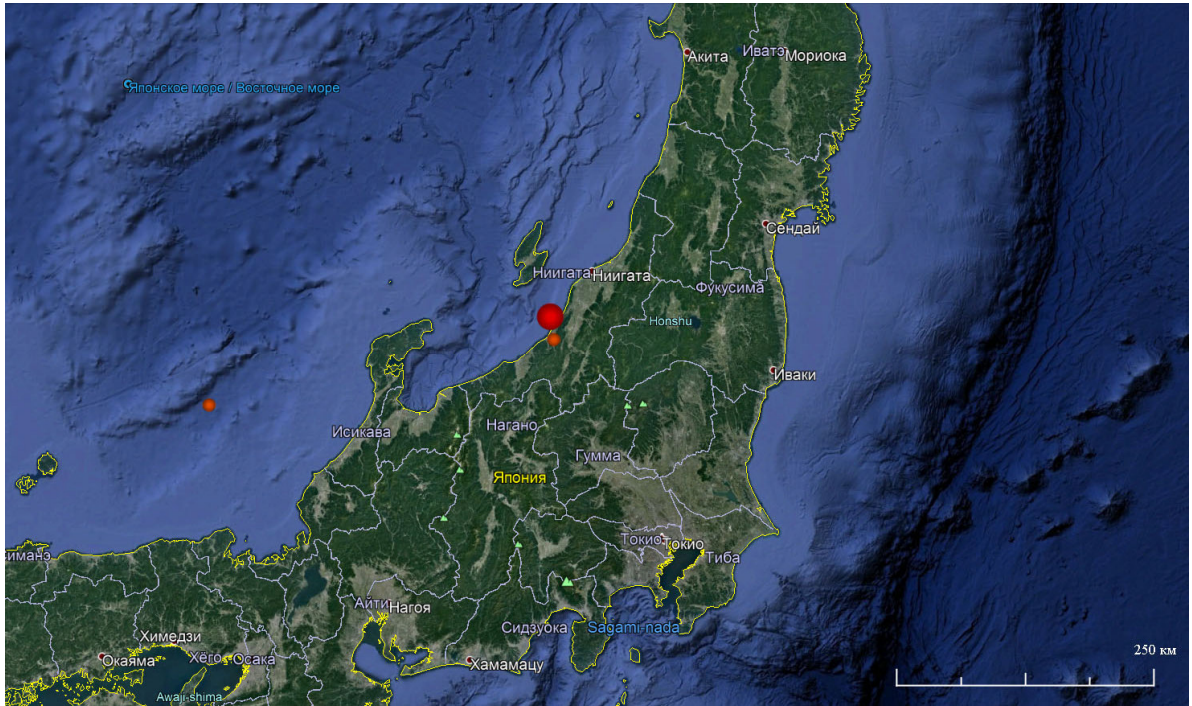


Рисунок 5.11 – Карта-схема расположения эпицентров землетрясений в районе западного побережья Хонсю 16 июля 2007 г.

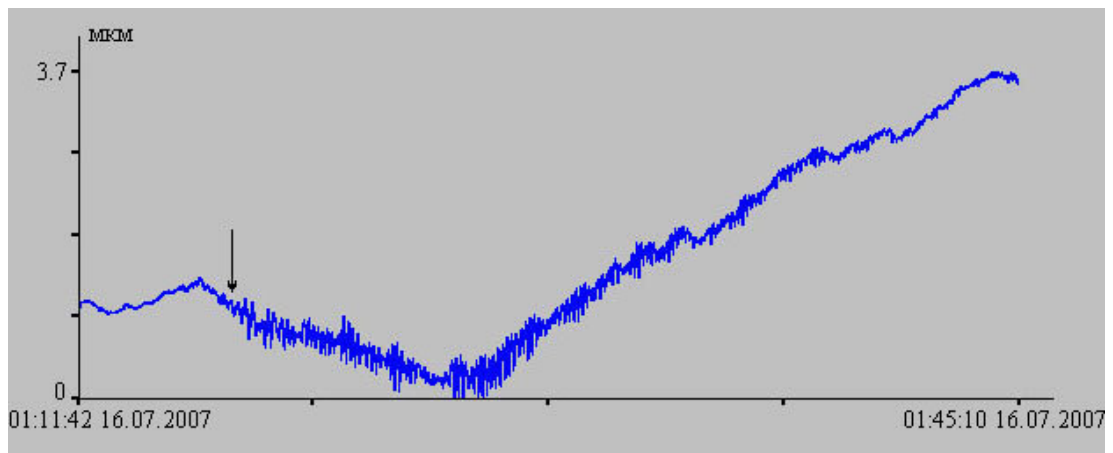


Рисунок 5.12 –Фрагмент записи 52.5-метрового лазерного деформографа за июль 2007 года.

На рисунке 5.13 приведена запись цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма записи этого землетрясения (нижний). Начало землетрясения отмечено стрелкой. По записи видно, что до начала землетрясения и после произошло изменение характера записи. Деформационная аномалия возникла примерно через 8 мин после начала землетрясения. На базе лазерного

деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м деформационная аномалия составляет величину 3.7 мкм. На динамической спектрограмме присутствуют колебания с периодами от 10 до 16 с. Динамическая спектрограмма по своему виду больше напоминает динамическую спектрограмму, полученную при анализе первого землетрясения 5 сентября 2004 г. в районе южного побережья Хонсю, Япония.

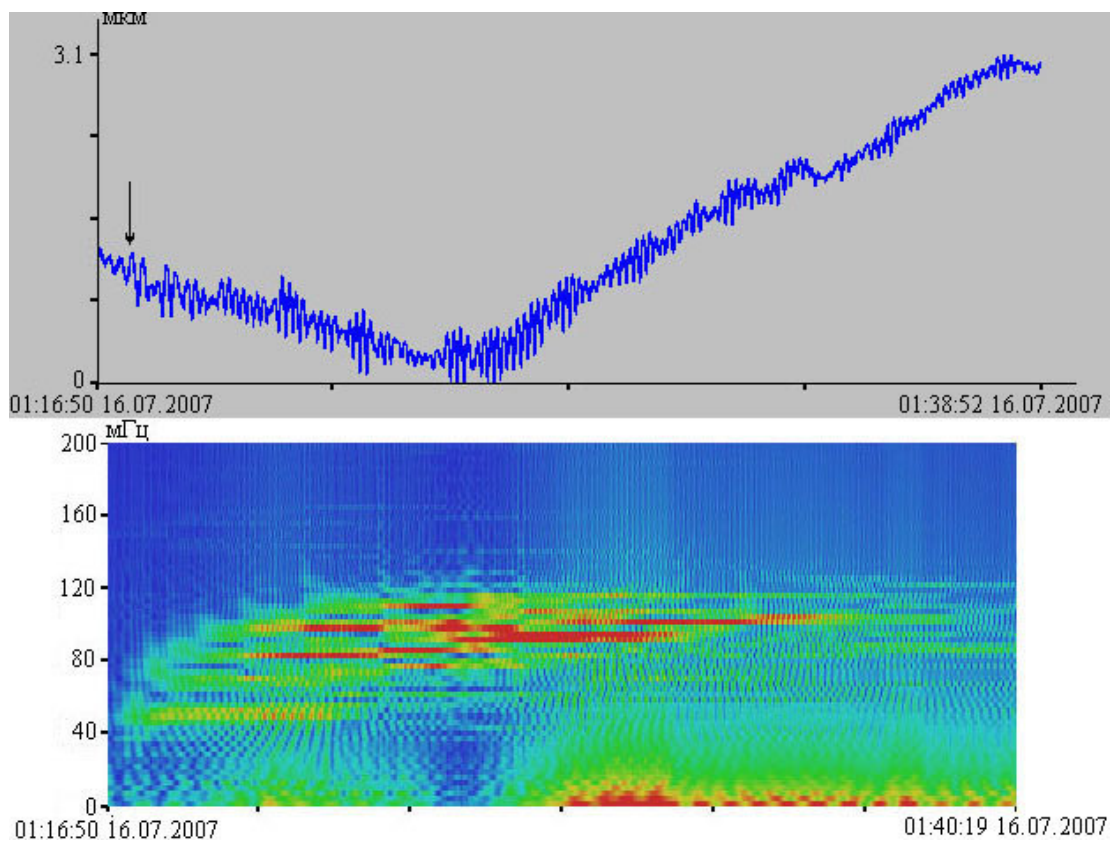


Рисунок 5.13 – Фрагмент записи 52.5-метрового лазерного деформографа цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма этого землетрясения (нижний).

Сильные подземные толчки привели к большим разрушениям в японских населенных пунктах, расположенных на западном побережье острова Хонсю. В префектурах Ниигата и Нагано пострадало более 700 человек, семеро из них погибли. По данным местных СМИ, сильное землетрясение привело к остановке трех блоков атомной электростанции в г. Касивадзаки. Близкое расположение

эпицентра землетрясения к побережью вызвало небольшие волны цунами. Их высота достигала 0.5 м.

Крупное цунамигенное землетрясение произошло на северо-востоке Японии 11 марта 2011 года, которое получило официальное название «Великое землетрясение Восточной Японии». Первое и самое сильное землетрясение с магнитудой 8.8 произошло 05:46:22 в точке с координатами 38.29 N, 142.69 E, на глубине 33 км от уровня моря, на расстоянии около 105 км к востоку от о. Хонсю, в 155 км к востоку от г. Сендая, в 330 км к юго-востоку от г. Аумори и в 382 км к северо-востоку от г. Токио. Всего в этот день было зарегистрировано более 90 землетрясений с магнитудой более 5. На рисунке 5.14 приведена карта-схема расположения эпицентров цунамигенного землетрясения (красный круг) и нескольких землетрясений с магнитудой более 6 (оранжевый круг). Большинство землетрясений произошло вдоль восточного побережья о. Хонсю, Япония.

Цунамигенное землетрясение было зарегистрировано 52.5-метровым лазерным деформографом, установленным на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Расстояние от эпицентра землетрясения до лазерного деформографа составляет около 1080 км. На рисунке 5.15 приведена запись данного землетрясения. Начало землетрясения отмечено стрелкой. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом в 05:50:54 11 марта 2011 года. По записи видно, что через несколько минут после землетрясения произошло изменение характера записи. Деформационная аномалия возникла примерно через 17 мин после начала землетрясения. На базе лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м деформационная аномалия составила около 158 мкм. Что почти в три раза больше чем при землетрясении 2004 года. Учитывая время распространения колебаний от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа, скорость их распространения примерно равна 3.9 км/с.



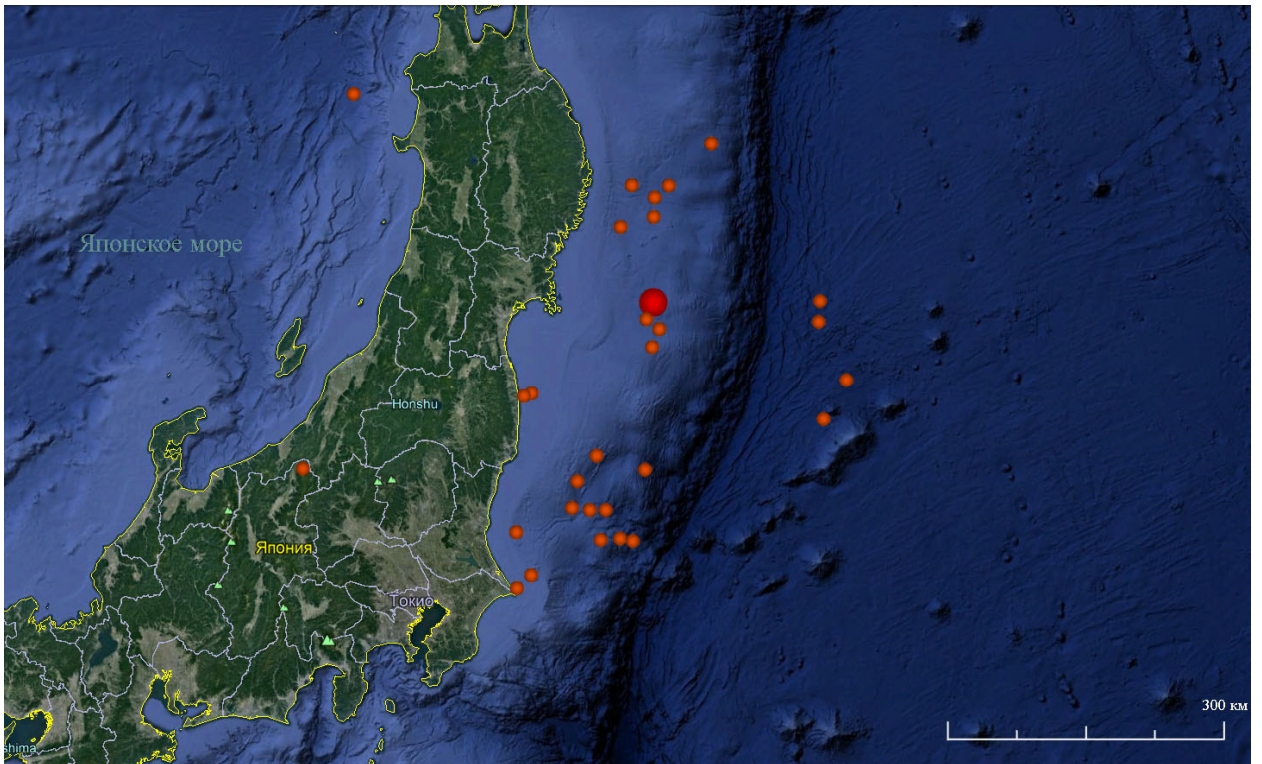


Рисунок 5.14 – Карта-схема расположения эпицентров землетрясений в районе северо-восточного побережья Хонсю 11 марта 2011 г.

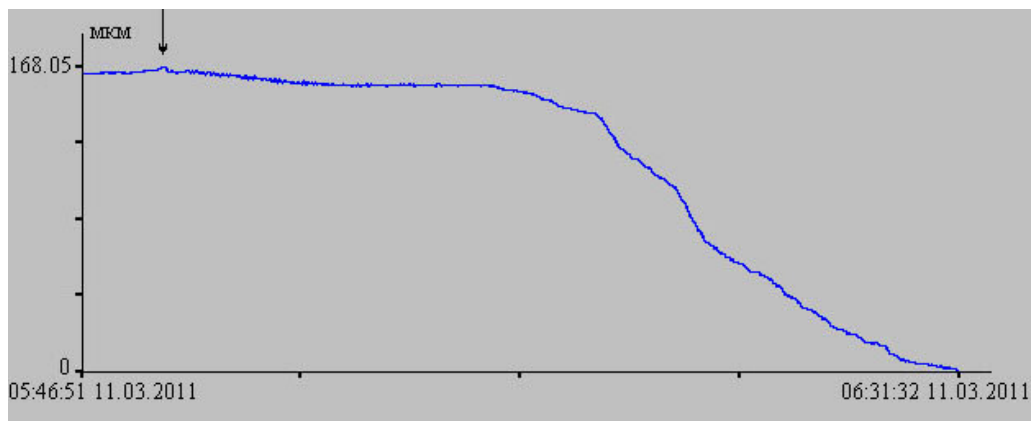


Рисунок 5.15 –Фрагмент записи 52.5-метрового лазерного деформографа за март 2011 года.

На рисунке 5.16 приведена увеличенная запись цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма записи этого землетрясения (нижний). На динамической спектрограмме записи выделяются колебания с периодами 10 и 16 с.

На рисунке 5.17 (верхний) приведена отфильтрованная запись лазерного деформографа полосовым фильтром Хэмминга в частотном диапазоне от 0.003 до 50 Гц. Данный диапазон частот соответствует частотному диапазону широкополосного сейсмографа, установленного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». При анализе отфильтрованной записи лазерного деформографа и записи широкополосного сейсмографа (рисунок 5.17 нижний) не обнаружено деформационного сигнала, приведшего к образованию цунами. Деформационная аномалия находится вне рабочего диапазона сейсмографа, а значит с его помощью невозможно определить вероятность возникновения волны цунами.

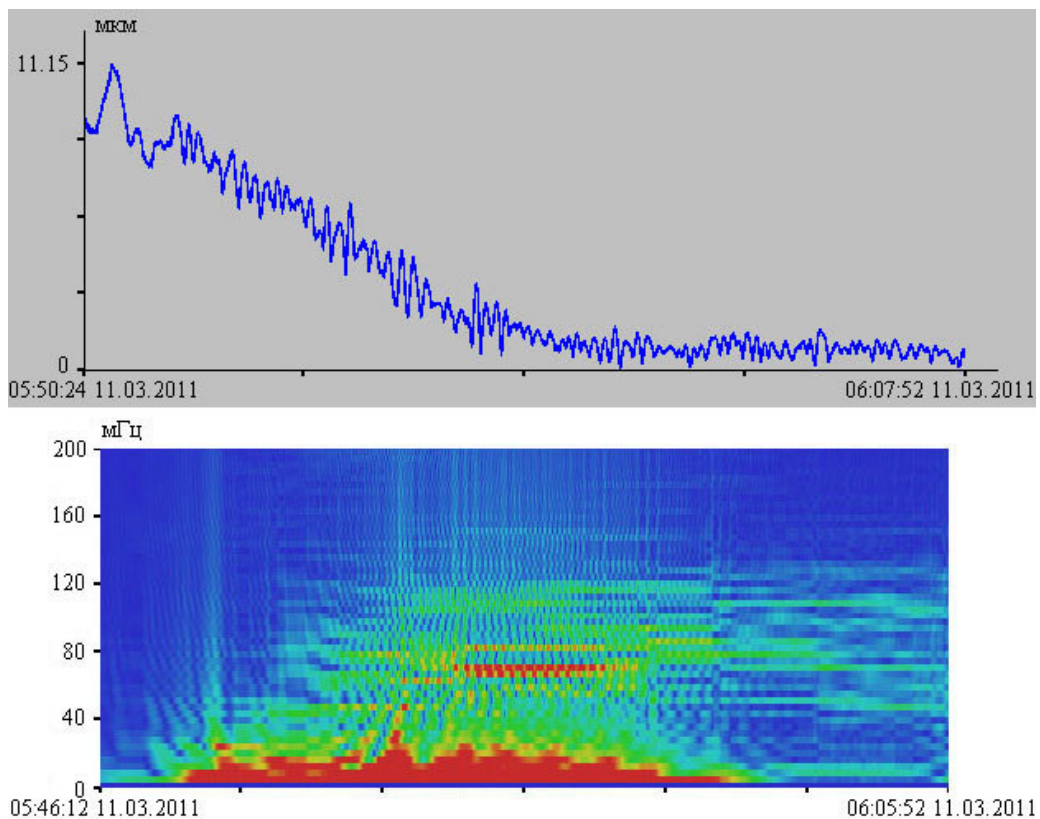


Рисунок 5.16 – Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма этого землетрясения (нижний).

Данное землетрясение вызвало вторую крупнейшую волну цунами в этом тысячелетии. Служба предупреждения о цунами в Японии объявило тревогу спустя три минуты после начала землетрясения. А первая волна обрушилась на берег уже

через 30 мин. Мощная волна накрыла водой территорию общей площадью 560 квадратных километров. Первыми на себя приняли удар префектуры Мияги, Ивате и Фукусима. Больше половины территории префектуры Мияги оказались под водой, было затоплено 327 квадратных километров. Самая большая высота волны цунами была зарегистрирована в городе Мияко, префектуре Ивате, она составила около 40.5 м. Рядом, в деревне Нода, высота волны, обрушившаяся на берег составила 37.8 м. Город Онагава, префектура Мияги, был разрушен волной цунами высотой 34.7 м. От гигантского цунами в шести восточных префектурах пострадало 62 города и деревни. По данным СМИ, в результате воздействия волны цунами было разрушено более 50 тысяч домов. На территории Японии прекратили работу несколько атомных и теплоэлектростанций. Водой полностью накрыло взлетно-посадочные полосы аэропорта Сендай. Волна спровоцировала сильные пожары на сталелитейном заводе и на нефтеперерабатывающих и газовых сооружениях. В результате воздействия волны цунами и последующих землетрясений произошла тяжелая авария на Японской АЭС «Фукусима – 1». Общий ущерб, который нанесло цунами экономике Японии, без учета аварии на АЭС, составил почти 17 триллионов иен. Несмотря на то, что информация о цунами поступила сразу после землетрясения, не обошлось и без человеческих жертв. В 12 префектурах погибло почти 16 тысяч человек, причем около 93% стали жертвами цунами. В связи с ранним предупреждением об угрозе цунами было эвакуировано более 450 тысяч человек. Многочисленные афтершоки были зарегистрированы и на территории России. Так в 06:25 11 марта 2011 г. был зафиксирован толчок магнитудой 5 в г. Южно-Курильске, а в районе г. Курильска магнитудой 4. В результате чего была объявлена угроза цунами на Курильских островах. Из зоны возможного подтопления было эвакуировано 11 тысяч человек. Волна цунами была зарегистрирована на Курильских островах, в районе о. Кунашир, о. Шикотан, о. Итуруп. Высота волны достигала двух метров.

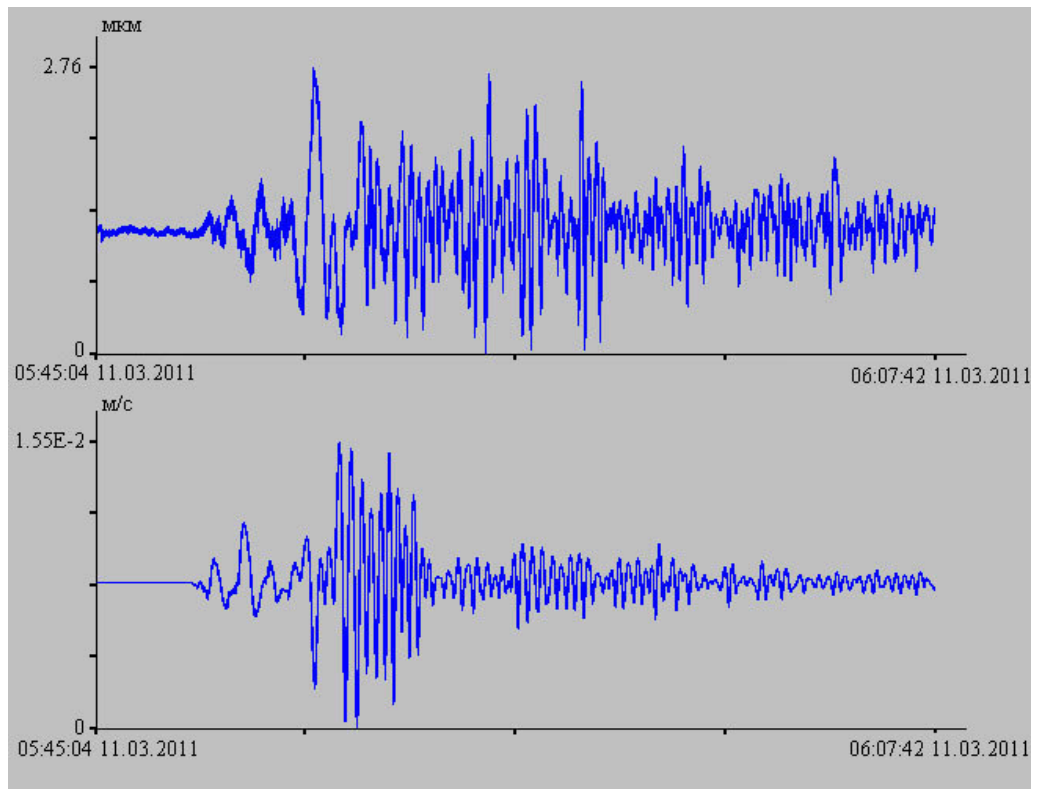


Рисунок 5.17 –Фрагмент отфильтрованной записи 52.5-метрового лазерного деформографа (верхний) и записи широкополосного сейсмографа (нижний) цунамигенного землетрясения.



Рисунок 5.18 – Цунами в Японии 2011 год

28 сентября 2018 года в центральной части острова Сулавеси (Индонезия) произошло землетрясение магнитудой 7.5. Землетрясение было зарегистрировано

лазерным деформографом горизонтального типа 28 сентября 2018 года. Землетрясение произошло в 10:02:41 в точке с координатами  $0.2^{\circ}$  S,  $119.91^{\circ}$  E на глубине 10 км от уровня моря. Эпицентр землетрясения находился на полуострове Минахасса, Сулавеси. Его источник находился на расстоянии 77 км от административного центра провинции Палу и ощущался на достаточно большом расстоянии, на Восточном Калимантане а также в Малайзии [97]. На рисунке 5.19 приведена карта-схема расположения эпицентров землетрясений. Большим красным кругом обозначено цунамигенное землетрясение с магнитудой 7.5. Оранжевыми кругами обозначены землетрясения с магнитудами более 5.

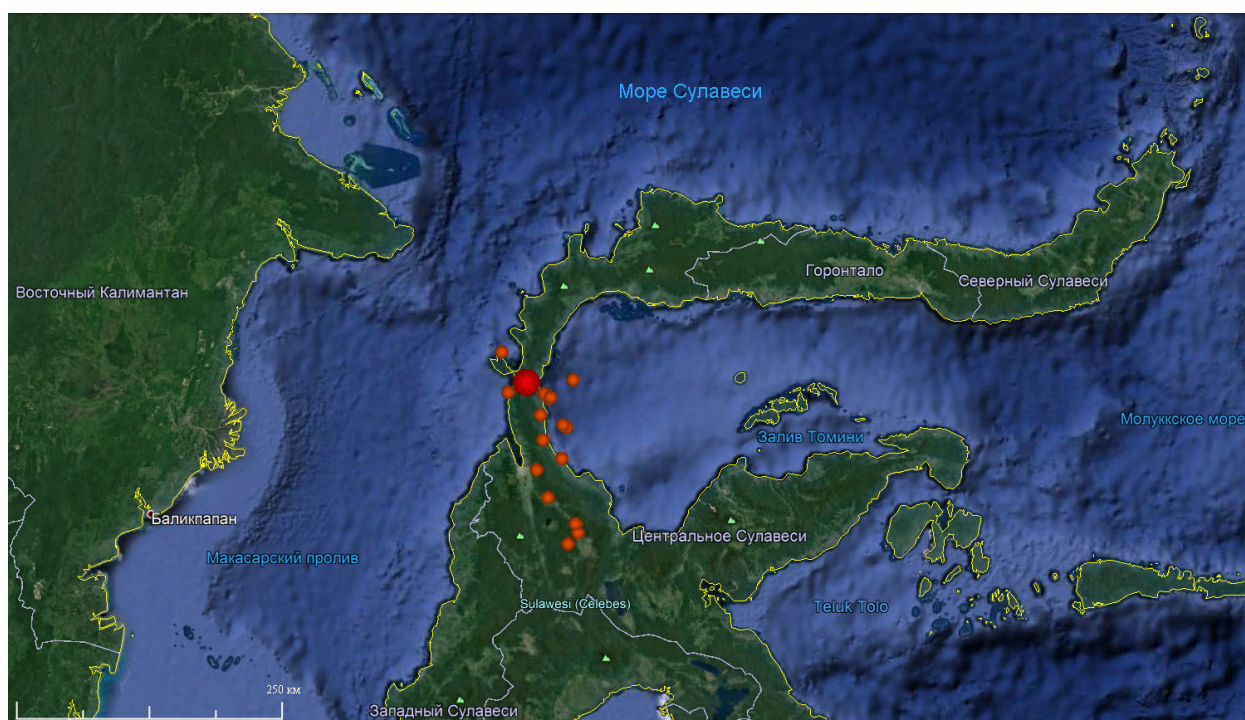


Рисунок 5.19 – Карта-схема расположения эпицентров землетрясений на полуострове Минахасса, Сулавеси 28 сентября 2018 г.

Землетрясение было зарегистрировано лазерным деформографом, установленным на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Расстояние от эпицентра землетрясения до лазерного деформографа составляет около 5000 км. На рисунке 5.20 приведена запись землетрясения 28 сентября 2018 года, сделанная 52.5 - метровым лазерным деформографом. Сигнал от землетрясения был

зарегистрирован в 10:17:54. На записи лазерного деформографа стрелкой отмечено начало землетрясения. Через 7 мин после начала землетрясения была зарегистрирована деформационная аномалия. После землетрясения в начале залива Томини произошел оползень, который и привел к образованию волны цунами. На записи хорошо виден момент начала оползня.

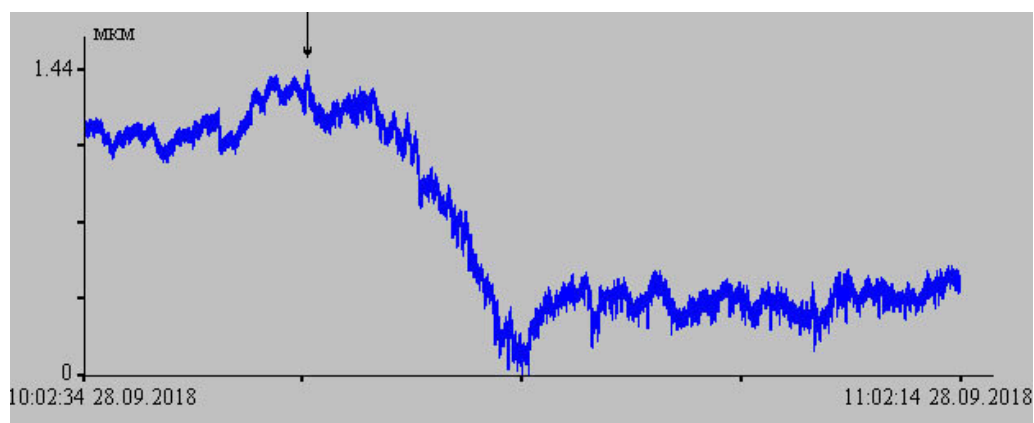


Рисунок 5.20 – Фрагмент записи 52.5-метрового лазерного деформографа за сентябрь 2018 года.

На рисунке 5.21 приведена запись цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма записи этого землетрясения (нижний). Начало землетрясения отмечено стрелкой. По записи видно, что до начала землетрясения и после произошло изменение характера записи. Деформационная аномалия возникла примерно через 7 мин после начала землетрясения. На базе лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м деформационная аномалия составляет величину 1 мкм. На динамической спектрограмме присутствуют колебания с периодами от 20 до 25 с. Динамическая спектрограмма по своему виду больше напоминает динамическую спектрограмму, полученную при анализе цунамигенного землетрясения 11 марта 2011 г. к востоку от о. Хонсю, Япония.

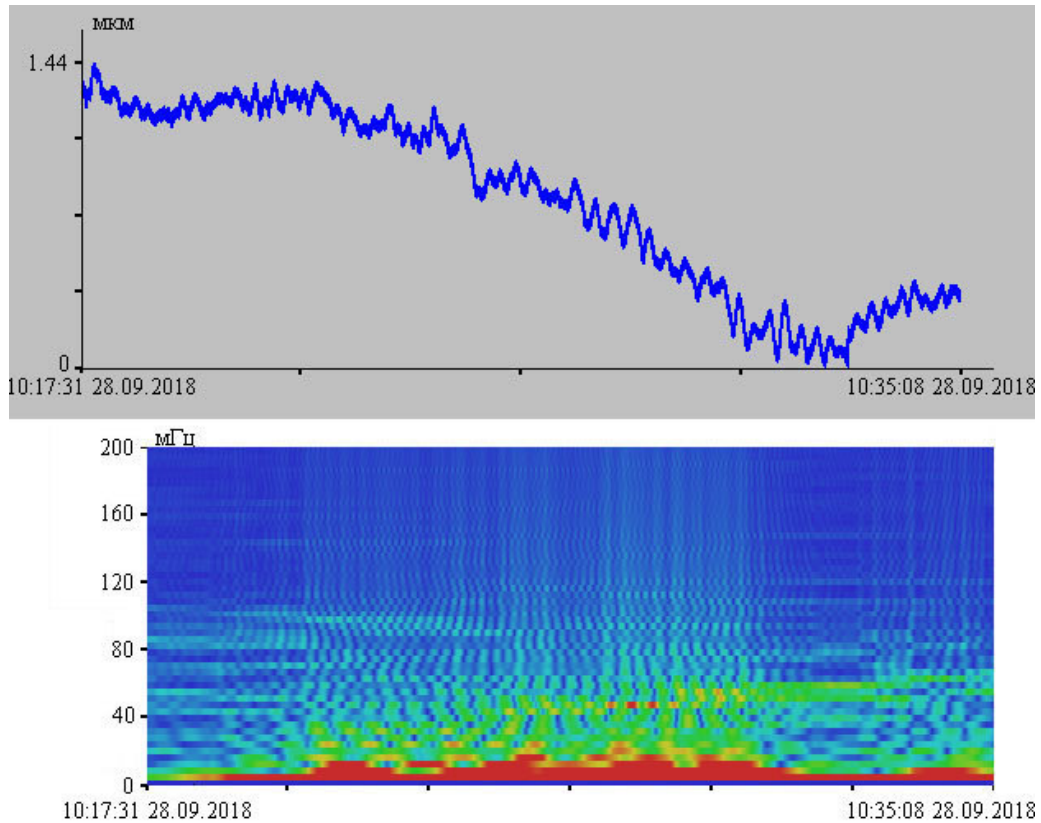


Рисунок 5.21 – Фрагмент записи 52.5-метрового лазерного деформографа цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма этого землетрясения (нижний).

На рисунке 5.22 (верхний) приведена отфильтрованная запись лазерного деформографа полосовым фильтром Хэмминга в частотном диапазоне от 0.003 Гц до 50 Гц. Данный диапазон частот соответствует частотному диапазону широкополосного сейсмографа, установленного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». При анализе отфильтрованной записи лазерного деформографа и записи широкополосного сейсмографа (рисунок 5.22 нижний) не обнаружено деформационного сигнала, приведшего к образованию цунами. Деформационная аномалия находится вне рабочего диапазона сейсмографа, а значит с его помощью невозможно определить вероятность возникновения волны цунами.

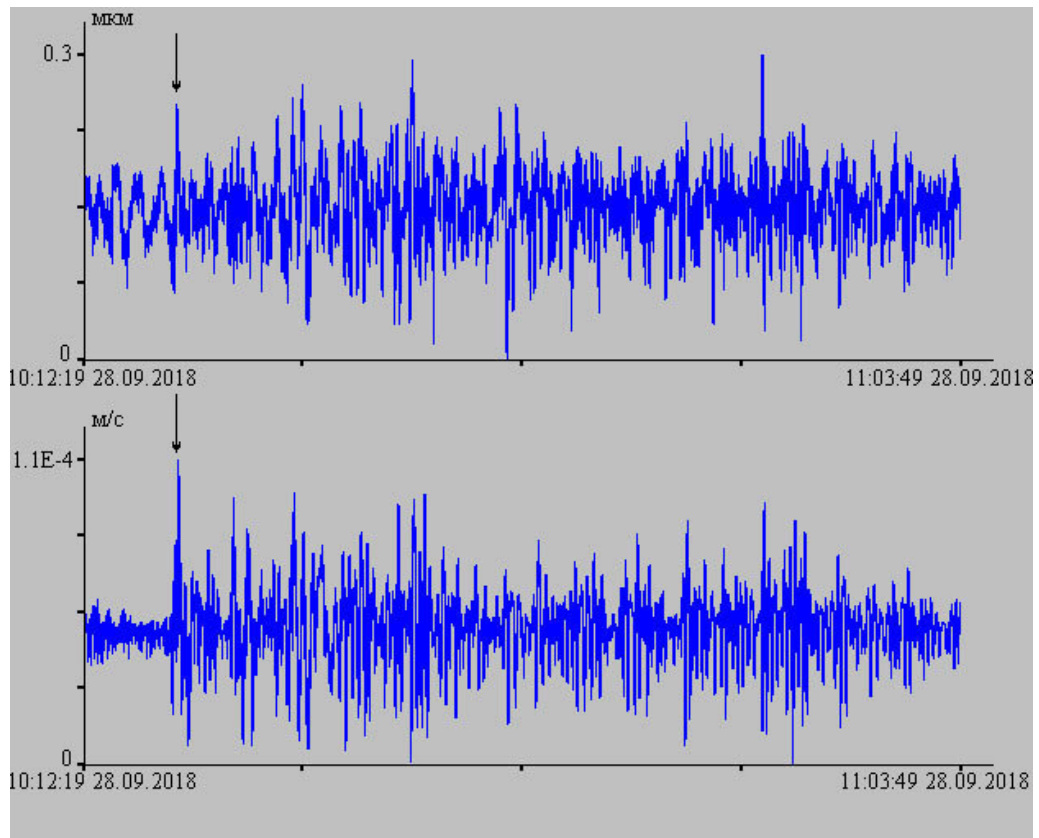


Рисунок 5.22 – Фрагмент отфильтрованной записи 52.5-метрового лазерного деформографа (верхний) и записи широкополосного сейсмографа (нижний) землетрясения.

В результате землетрясения возникли волны цунами (до 11 м высотой), достигшие город Палу, где погибло более 2 тысячи человек, большинство из них — на пляжах, куда приехали на фестиваль в честь Дня города. Подземные толчки разрушили взлетные полосы аэродромов, и спасатели не смогли сразу вылететь к месту катастрофы. К сожалению, почти все пункты регистрации уровня моря не работали из-за сбоя в питании электричеством после землетрясения. Исключением стал мареограф в поселке Пантолан (Pantolan), зарегистрировавший приход волны цунами через 7 мин после основного толчка. Запись показывает, что цунами началось с понижения уровня воды приблизительно на 2 м от своего исходного положения, затем уровень воды поднялся на высоту более чем 1.5 м от нулевого уровня. Максимальная высота волны (от подошвы до пика) достигла почти 4 м и период колебаний составил приблизительно 5 мин. Спустя неделю после цунами



выполнено полевое обследование следов цунами и измерение высоты волн на берегу [213, 226]. Эти измерения позволили получить оценки высот волн цунами в пунктах наблюдения. Так в г. Чеверная Нгапа высота волны составила 2.1 м, в Пантолан порту 4.8 м, в г. Вани составила 4.5 м, в г. Лабуан 2.3 м, а самая высокая волна была зарегистрирована в г. Палу 10.9 м.

При анализе многочисленных экспериментальных данных вариаций микродеформаций земной коры, полученных с помощью лазерного деформографа, обнаружены деформационные аномалии, возникающие при генерации цунами. Эти скачки деформации, зарегистрированные лазерным деформографом, по-видимому, вызваны подвижками дна, приводящими к образованию цунами. По данным многих зарегистрированных цунамигенных землетрясений рассчитаны коэффициенты затухания выделенных деформационных аномалий по трем регионам планеты, которые оказались практически одинаковыми для всех случаев.

Рассмотрим три цунамигенных землетрясения в Индонезии в 2012, 2014 и 2018 годах. На рисунке 5 представлены участки записей лазерного деформографа в момент регистрации трех землетрясений в Индонезии. На всех рисунках присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений. Так на рисунке 5.23 а) представлена запись первого мощного землетрясения, которое произошло 11.04.2012 г. в 08:38:36 на западном побережье северной Суматры, Индонезия в точке с координатами 2.327°N 93.063°E, на глубине 20 км с магнитудой 8.6. На данном рисунке красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент регистрации землетрясения запись отклонилась от тренда. Произошёл скачок деформации (деформационная ступенька). Максимально зарегистрированная высота волны цунами составила 1.08 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа более 5800 км. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован на записях лазерного деформографа почти через 18 мин в 08:55:39. Средняя скорость распространения упругой волны составила 5.66 км/с. На динамической спектрограмме (рисунок 5.24

а) выделяются колебания с периодами от 30 до 14 с, характерные для землетрясения.

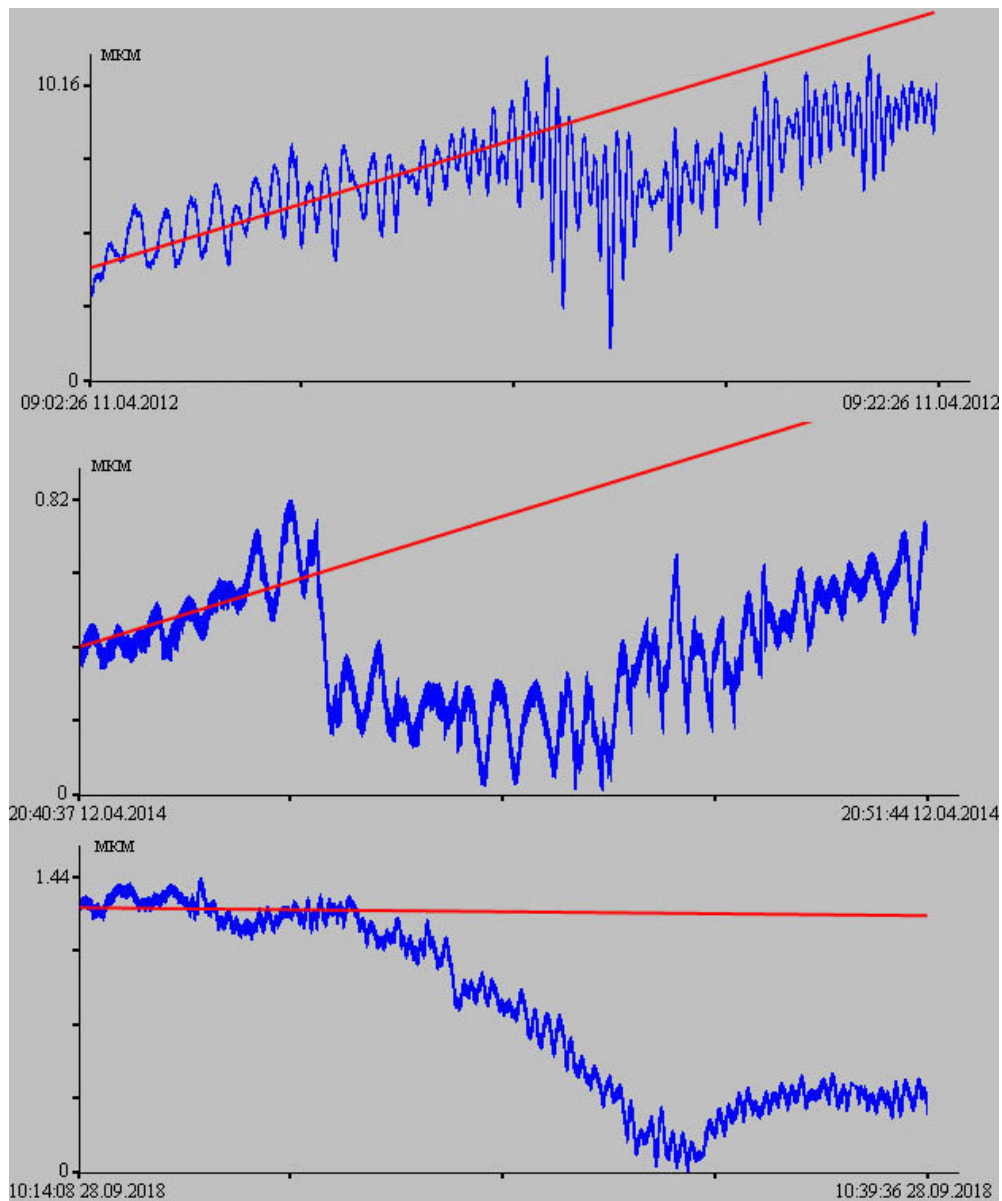


Рисунок 5.23 – Фрагменты записей 52.5-метрового лазерного деформографа за апрель 2012 года (а), апрель 2014 года (б) и сентябрь 2018 года (в).

На фрагменте участка записи лазерного деформографа (рисунок 5.23 б) приведена запись цунамигенного землетрясения, произошедшего 12.04.2014 г в 20:14:39 в точке с координатами  $11.270^{\circ}\text{S}$   $162.148^{\circ}\text{E}$  вблизи Соломоновых островов, на глубине 22.6 км с магнитудой 7.6, красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка. В

прибрежной зоне высота цунами достигла 0.5 м. Сигнал землетрясения на лазерном деформографе, установленном на расстоянии более 6700 км, был зарегистрирован почти через 20 мин в 20:33:58. Для этого землетрясения средняя скорость составила 5.58 км/с. На динамической спектрограмме записи лазерного деформографа, представленной на рисунке 5.24 б, амплитуда сигнала землетрясения меньше, чем в предыдущем случае, но на ней так же присутствуют колебания в диапазоне периодов от 30 до 14 с. Во время регистрации сигнала землетрясения в апреле 2014 г. деформационный скачок был не таким продолжительным по времени, как в 2012 и 1018 гг., он был более резким. В связи с чем динамическая спектрограмма для этого землетрясения отличается от двух остальных.

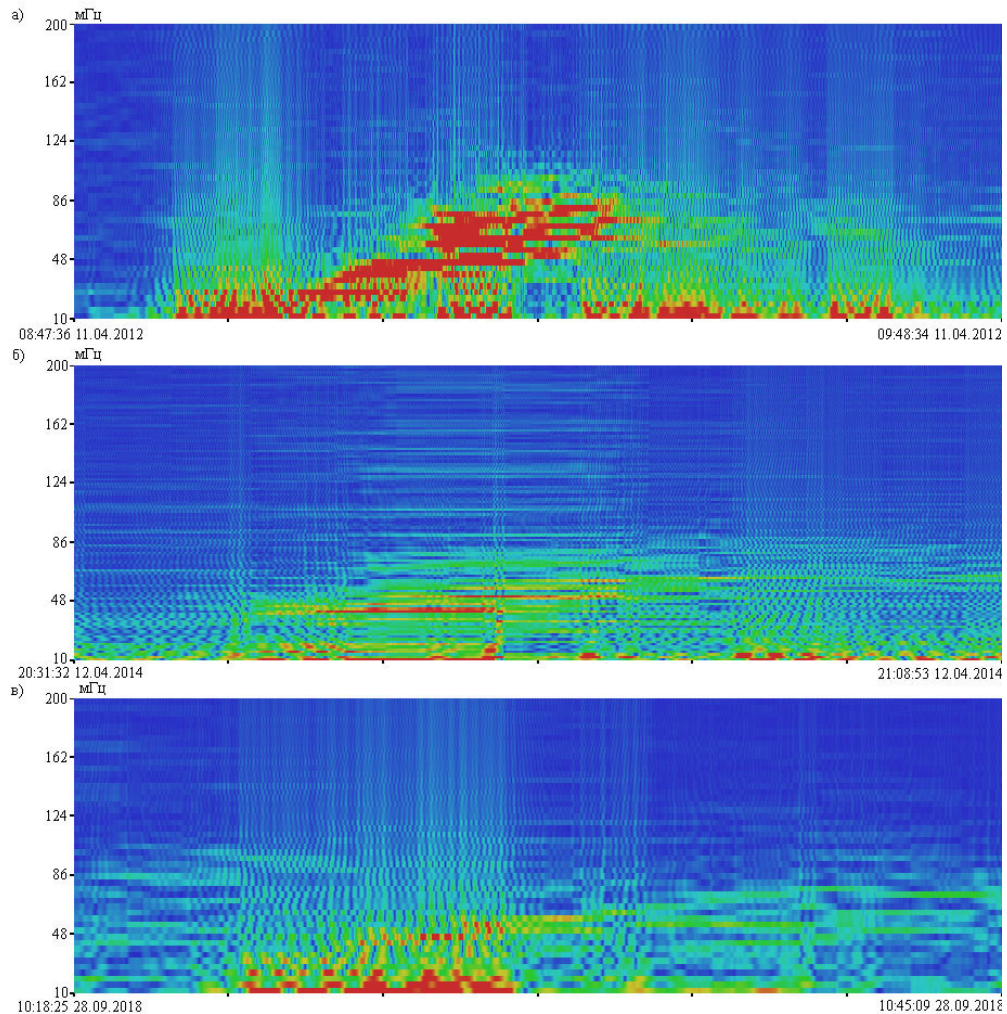


Рисунок 5.24 – Динамические спектрограммы записей 52.5-метрового лазерного деформографа за апрель 2012 года (а), апрель 2014 года (б) и сентябрь 2018 года (в).

Следующее из рассмотренных землетрясений, это землетрясение, которое произошло 28.09.2018 г. в 10:02:45 с магнитудой 7.5 и с высотой волны около 11 м. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами  $0.256^{\circ}\text{S}$   $119.846^{\circ}\text{E}$  на глубине 20 км, на расстоянии более 4800 км от места установки лазерного деформографа. Расчетная средняя скорость поверхностной упругой волны равна 5.49 км/с. На динамической спектрограмме записи лазерного деформографа (рисунок 5.24 в) сигнал землетрясения был зарегистрирован через 15 мин в 10:17:54.

На записях 52.5-метрового лазерного деформографа было выделено три сильных землетрясения, произошедших вблизи побережья Чили в период с 2010 по 2018 гг. При анализе записей лазерного деформографа в момент регистрации этих землетрясений были выявлены деформационные скачки. На рисунке 5.25 (а, б, в) представлены фрагменты записей этих землетрясений, где на каждом из рисунков видно отклонение записи от среднего записи лазерного деформографа (красная линия), что и свидетельствует о цунамигенности землетрясения (наличие деформационной аномалии – скачка деформации) в момент регистрации сейсмических волн.

Первое землетрясение произошло 27.02.2010 г. в 06:34:11 на северо-западном побережье Чили в точке с координатами  $36.122^{\circ}\text{S}$   $72.898^{\circ}\text{W}$  на глубине 22.9 км, максимальная высота катастрофического цунами была 29 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа более 17800 км. На записи 52.5-метрового лазерного деформографа сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 07:19:00. Рассчитаем среднюю скорость распространения упругой волны, она равна 6.62 км/с.

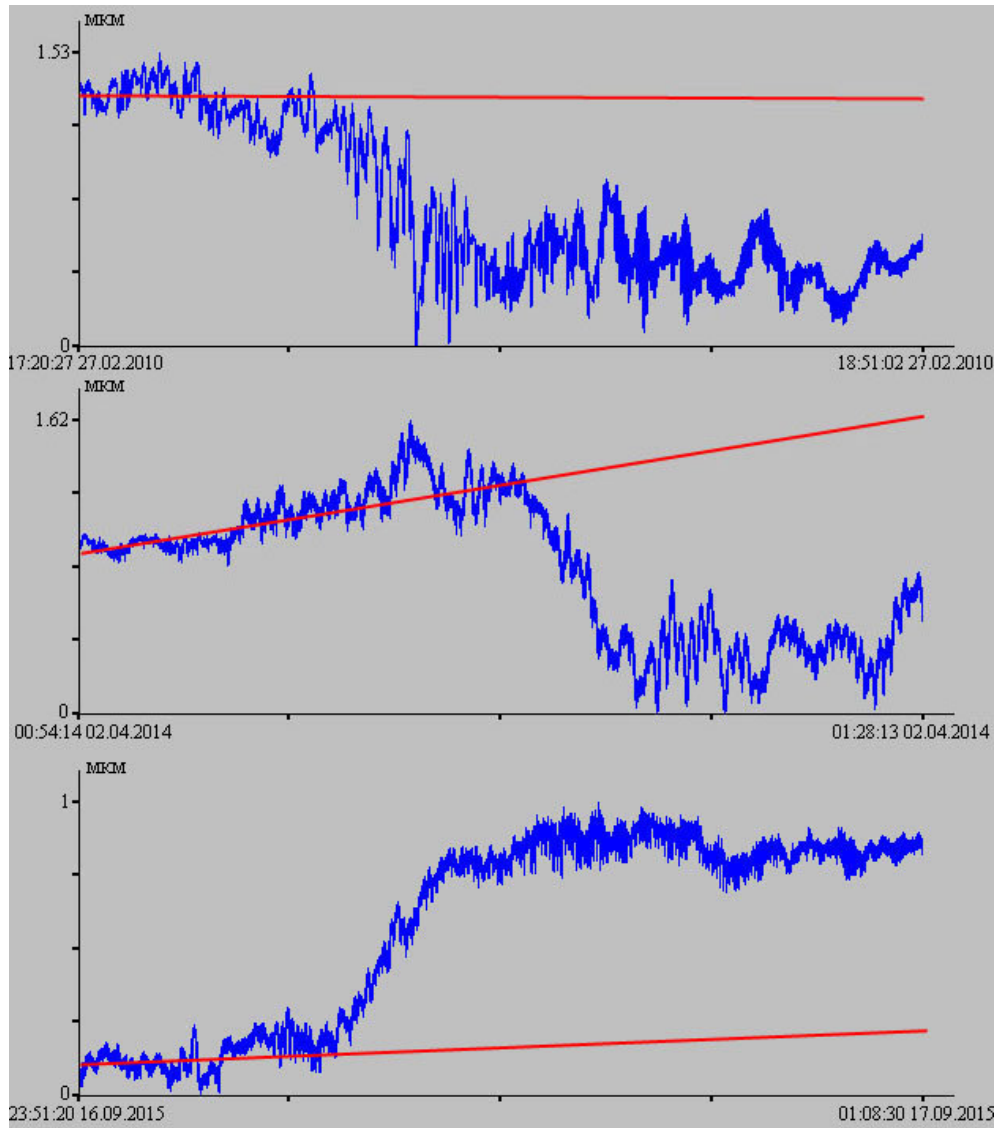


Рисунок 5.25 – Фрагменты записей 52.5-метрового лазерного деформографа за февраль 2010 года (а), апрель 2014 года (б) и сентябрь 2015 года (в).

Проанализируем динамические спектрограммы участков записей 52.5-метрового лазерного деформографа за апрель 2014 года и сентябрь 2015 года. В это время произошли два сильных цунамигенных землетрясения вблизи северо-западного побережья Чили. 01.04.2014 г. в 23:46:47 произошло сильное землетрясение в точке с координатами  $19.610^{\circ}\text{S}$   $70.769^{\circ}\text{W}$  на глубине 25 км, с высотой волны у берега 4.6 м. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом, установленным на расстоянии более 16700 км, 02.04.2014 г. в 00:24:10. А 16.09.2015 г. в 22:54:32 произошло сильное землетрясение, эпицентр которого находился в точке с координатами  $31.573^{\circ}\text{S}$

71.674°W на глубине 22.4 км. В результате происшедшего землетрясения образовалось цунами высотой 13.6 м. На записи лазерного деформографа, расположенного на расстоянии около 17650 км, сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 23:45:01. Для этих землетрясений средняя скорость распространения упругой волны составляет 7.44 км/с и 6.47 км/с, соответственно. На динамических спектрограммах записей лазерного деформографа этих землетрясений (рисунок 5.26 б и в) присутствуют как колебания с периодами около 20 с, характерные для землетрясений такой магнитуды.

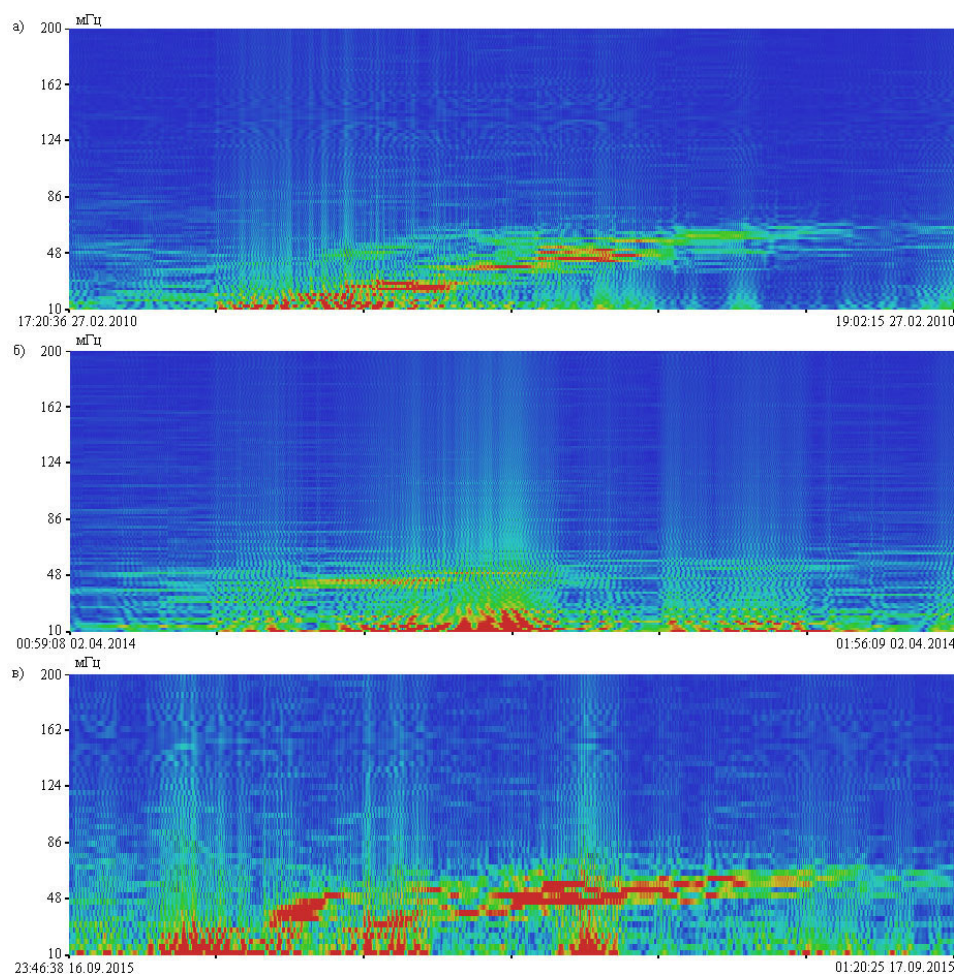


Рисунок 5.26 – Динамические спектрограммы записей 52.5-метрового лазерного деформографа за февраль 2010 года (а), апрель 2014 года (б) и сентябрь 2015 года (в).

На рисунке 5.27 (а, б, в) представлены фрагменты записей лазерного деформографа в момент регистрации трех землетрясений, происшедших на

западном побережье Северной Америки. На всех рисунках присутствует деформационный скачок, 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, что и свидетельствует о цунамигенности землетрясения.

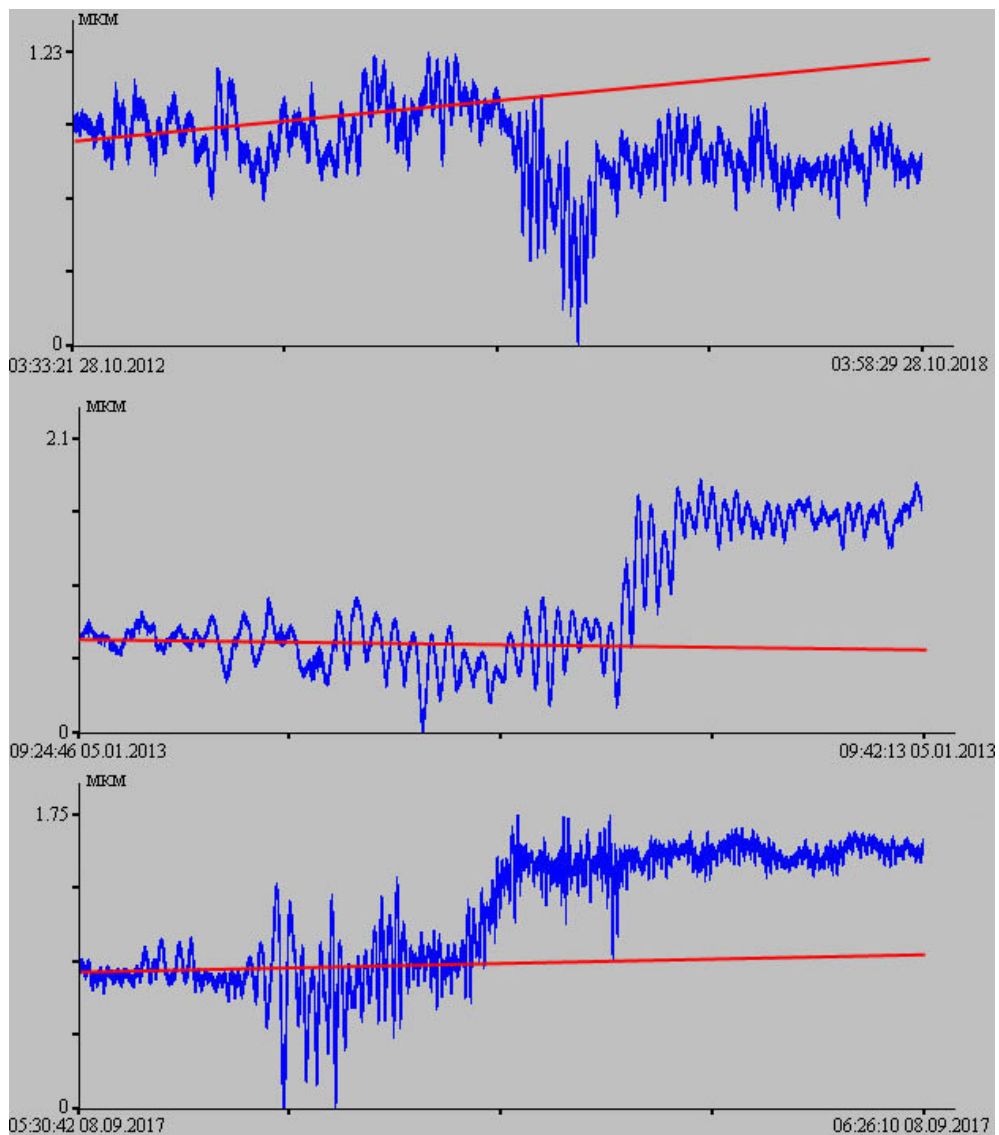


Рисунок 5.27 – Фрагменты записей 52.5-метрового лазерного деформографа за октябрь 2012 года (а), январь 2013 года (б) и сентябрь 2017 года (в).

Первое мощное землетрясение произошло 28.10.2012 г. в 03:04:08 на юго-западном побережье Канады в точке с координатами 52.788°N 132.101°W на

глубине 14 км с магнитудой 7.8, и высотой цунами на шельфе 12.98 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа почти 6800 км. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован на записях лазерного деформографа почти через 19 мин в 03:23:13. Для этого землетрясения средняя скорость распространения упругой волны составляет 5.94 км/с. На динамической спектрограмме (рисунок 5.28 а) выделяются колебания с периодами от 30 до 14 с, характерные для землетрясения такой магнитуды.

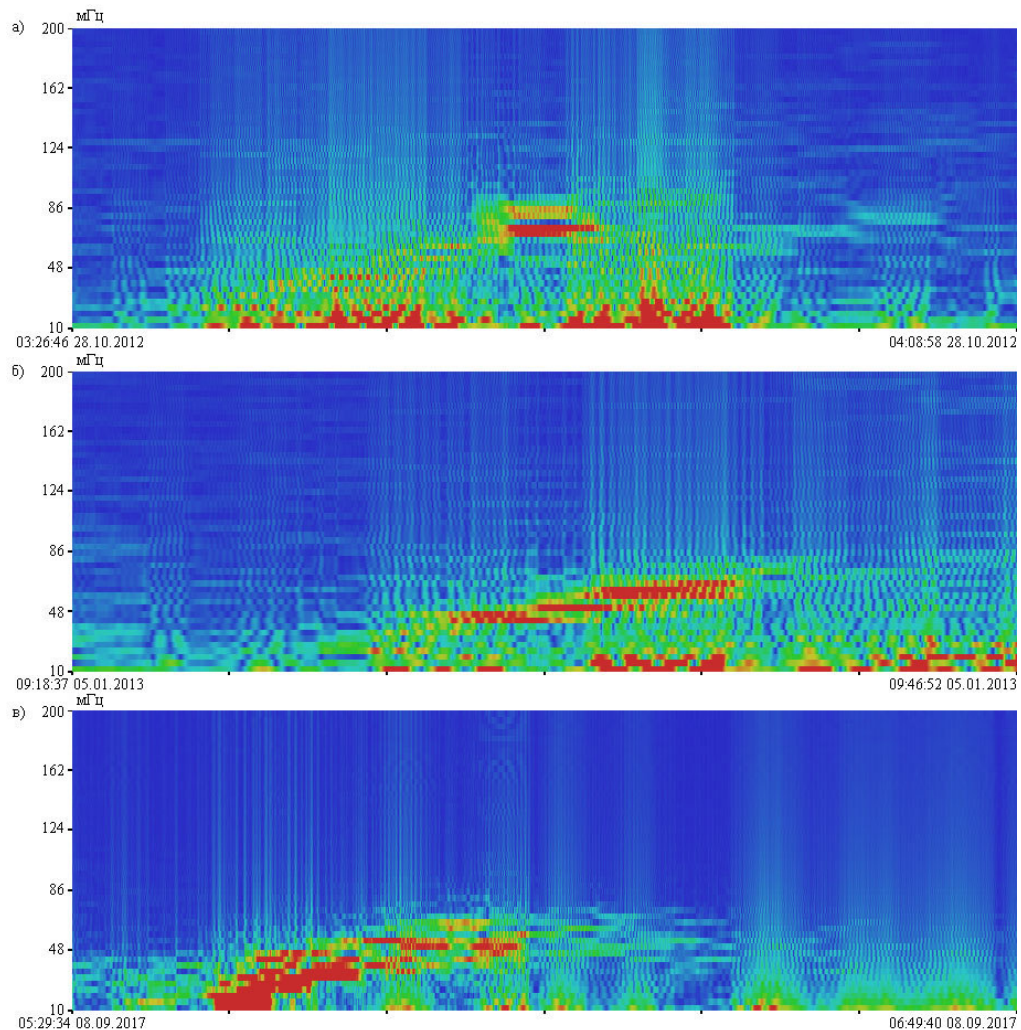


Рисунок 5.27 – Динамические спектрограммы записей 52.5-метрового лазерного деформографа за октябрь 2012 года (а), январь 2013 года (б) и сентябрь 2017 года (в).



На рисунке 5.28 б представлена динамическая спектрограмма фрагмента записи лазерного деформографа за 05.01.2013 г., где выделяется цунамигенное землетрясение, произошедшее в 08:58:14 у берегов Аляски, США. Землетрясение с магнитудой 7.5 произошло в точке с координатами  $55.228^{\circ}\text{N}$   $134.859^{\circ}\text{W}$  на глубине 8.7 км, в результате чего образовалась цунами с максимальной высотой 1.5 м. Сигнал этого землетрясения на записях лазерного деформографа был выявлен 09:16:31. Лазерный деформограф расположен в 6500 км от эпицентра. Еще одним из рассмотренных землетрясений, является землетрясение, произошедшее возле берегов Мексики 08.09.2017 г. в 04:49:19 с магнитудой 8.2. После него возникла цунами высотой 2.7 м. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами  $15.022^{\circ}\text{N}$   $93.899^{\circ}\text{W}$  на глубине 47.4 км, на расстоянии 12150 км от места установки лазерного деформографа. Рассчитаем среднюю скорость распространения упругих волн. Для землетрясения 2013 года она равна 5.92 км/с, а для землетрясения 2017 года – 5.48 км/с. На динамической спектрограмме записи лазерного деформографа (рисунок 5.28 в) сигнал землетрясения был зарегистрирован в 05:34:28. Во всех случаях при регистрации деформационного скачка, через некоторое время после землетрясения происходит возврат записи к тренду, наблюдаемому до скачка, но с вкладом других естественных деформационных процессов [187].

Смещение геоблоков друг относительно друга, провоцирующиеся землетрясениями вблизи геологического разлома, возможно и приводит к разрушению связи геоблоков, отдельных геоблоков с мощным движением высвободившихся отдельных геоблоков и их частей. Наряду с оползнями, именно это движение становится причиной возникновения цунами. На большом расстоянии амплитуды этих медленных смещений очень малы, а зарегистрировать эти смещения непосредственно в очаге невозможно. Это смещение можно определить только дистанционно. Для оценки смещений применяются различные модели с использованием непрерывных геодезических данных, сейсмических данных, данных GPS приемников с низкой частотой дискретизации и данных о цунами, полученных по сети DART. Преимущество имеют модели о конечных разломах, созданные USGS NEIC, которые используют кинематический подход,

основанный на методе Ji [204]. Для расчета используются как объемные волны Р и S, так и поверхностные волны Рэлея и Лява. 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, представленные в сети интернет [203]. В таблице 4.1 приведены расчетные смещения в очаге и величины деформационных аномалий, зарегистрированных лазерным деформографом в момент регистрации землетрясений.

Таблица 4.1 – Расчетные смещения геоблоков (частей геоблоков, и т.п.) и величины деформационных аномалий, зарегистрированных 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:

$$A = A_0 \frac{l(m)}{R^\alpha(m)}$$

Где:  $A$  – величина смещения, зарегистрированная лазерным деформографом,  $R$  – расстояния от места генерации землетрясения до лазерного деформографа,  $\alpha$  – степень [55].

### 5.3 МЕТЕОЦУНАМИ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПРИБОРОВ

Причиной возникновения метеоцунами или метеорологического цунами служат нелинейные процессы. Причиной возникновения в большинстве случаев служит резкое изменение атмосферного давления, атмосферные гравитационные волны или резкое изменение направления и скорости ветра над водной поверхностью. Далеко не каждый атмосферный фронт или атмосферное волнение приводит к возникновению метеоцунами, основную роль играют резонансные эффекты, когда период и скорость распространения собственных колебаний акватории близки к периоду и скорости распространения атмосферных процессов. Так же важен градиент атмосферного давления, который на прямую воздействует на океан [221, 222]

Обработка экспериментальных данных лазерно-интерференционных приборов, входящих в состав сесмоакустико-гидрофизического комплекса, расположенного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», выявила геосферные особенности метеоцунами. Так на записях лазерного измерителя вариаций давления гидросферы были обнаружены несколько уединенных волн с амплитудой

в несколько раз больше амплитуды суточного прилива. Лазерным нанобарографом было зарегистрировано резкое изменение атмосферного давления. На записях лазерного нанобарографа и лазерного деформографа, через несколько часов после прохождения волн, были зарегистрированы сильные полтора часовые колебания [84].

На экспериментальных данных лазерного нанобарографа за 25 мая 2015 года было выявлено резкое изменение атмосферного давления величиной 13.5 гПа. На рисунке 5.28 приведена запись лазерного нанобарографа с резким изменением атмосферного давления. Резкое изменение атмосферного давления было зарегистрировано в 15:20 25 мая 2015 года. Совпадение скорости распространения атмосферного возмущения со скоростью распространения длинных океанических волн и направлением распространения атмосферного возмущения, а так же резкое изменение атмосферного давления характерны при возникновении метеоцунами.

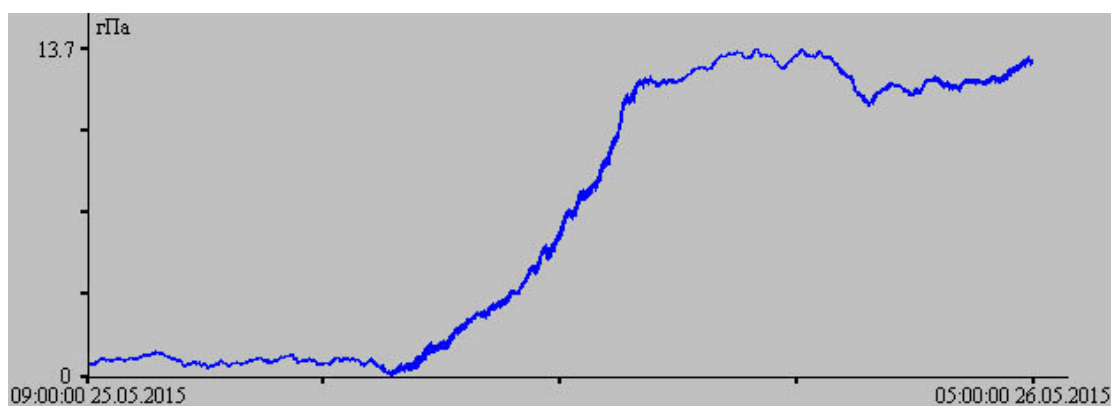


Рисунок 5.28 – Фрагмент записи лазерного нанобарографа за 25 мая 2015.

Резкое изменение атмосферного давления стало причиной появления одиночных длинных волн в гидросфере. Данные волны были зарегистрированы лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, установленным на шельфе Японского моря на расстоянии 200 м от берега на глубине 33 м. На рисунке 5.29 приведена запись вариаций гидросферного давления за 25 – 26 мая 2015 года. При анализе записи было выявлено две волны, первая почти через полтора часа после регистрации атмосферного возмущения, а вторая более чем через 12 часов.

Первая волна была зафиксирована в 16:44 25 мая 2015 года, а вторая в 04:20 26 мая 2015 года. На рисунке 5.30 приведены увеличенные записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы первой и второй волны. Эти волны отличаются по своему характеру. Первая была уединенная волна почти солитоноподобной формы (рисунок 5.30 верхний), а вторая волна была зарегистрирована с оттоком водных масс (рисунок 5.30 нижний). Первая волна вызвала только приток водных масс (увеличение гидросферного давления), и, по своим характеристикам, очень похожая на волну цунами. Высота, зафиксированной волны, соизмерима с амплитудой суточного прилива в данном регионе. Время прохождения первой волны через точку, где был установлен лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, составило около 14.5 мин.

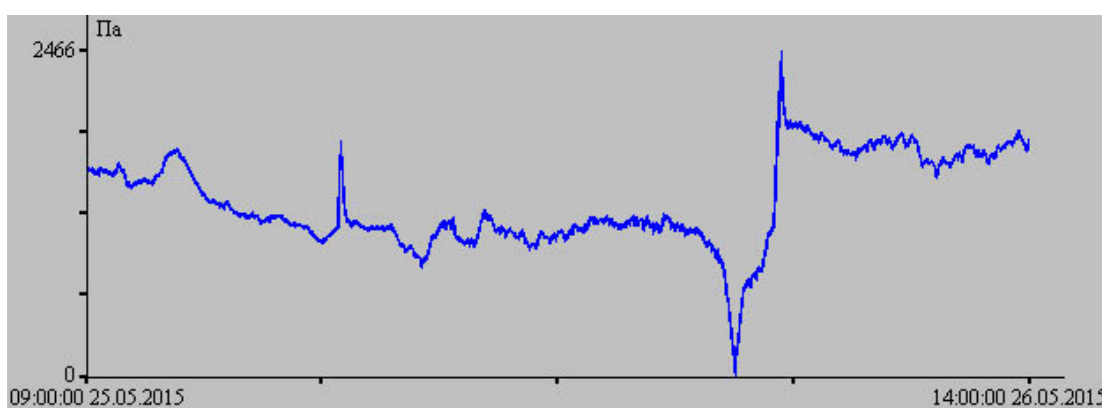


Рисунок 5.29 – Фрагмент записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы за 25 – 26 мая 2015.

Во время прихода второй волны сначала был зафиксирован отток водных масс (уменьшение гидросферного давления). Глубина моря, в месте установки прибора, уменьшилась на величину примерно равную пяти амплитудам суточного прилива. Отток водных масс длился 25.5 мин., а затем наблюдалось возвращение уровня моря в прежнее положение в течении 16 мин. Третья волна была зафиксирована лазерным измерителем вариаций давления гидросферы примерно через час. Как и при приходе первой волны наблюдался приток водных масс. Но их формы отличаются, а высота волны почти в два раза больше, высоты первой волны.

По записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы можно сказать, что форма третьей волны похожа на догнавшие друг друга две волны. На графике видно, что уровень моря начал резко увеличиваться, а через 5 мин началось уменьшение на треть этой величины. Но с приходом еще одной волны опять начинается увеличение гидросферного давления. Общее время прохождения волны через точку установки лазерного измерителя вариаций давления гидросферы составили 23 мин.

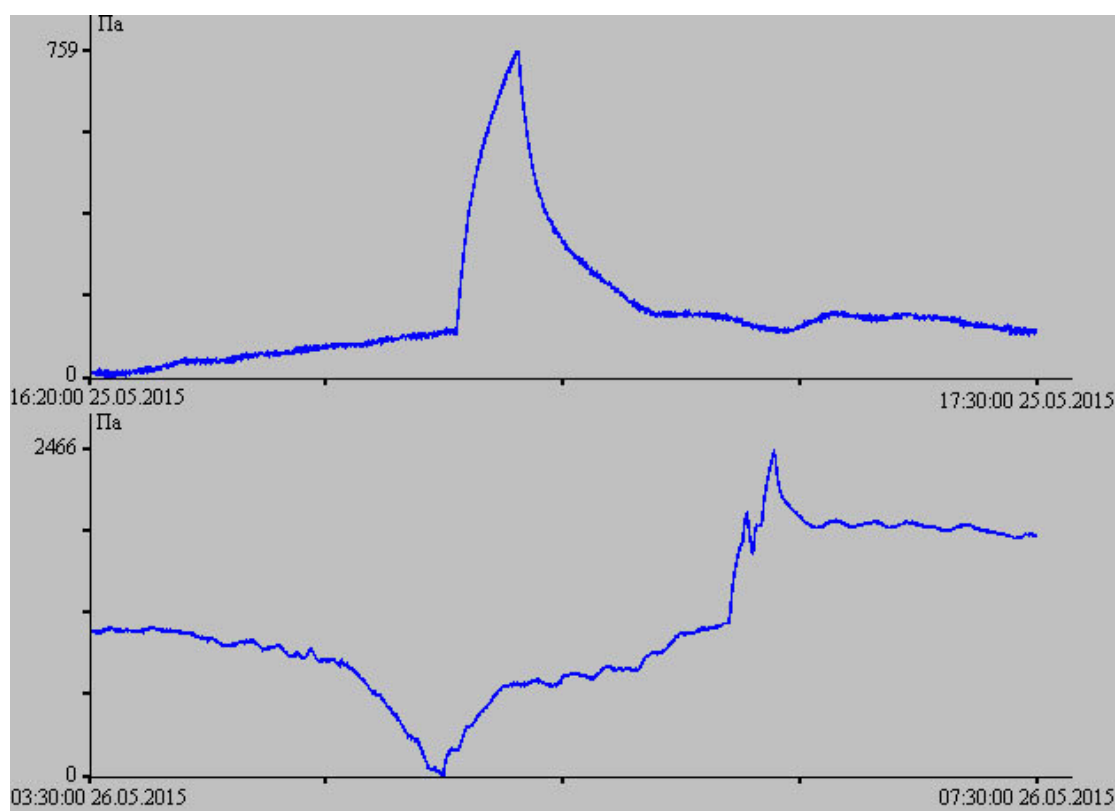


Рисунок 5.30 – Увеличенный фрагмент записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы за 25 и 26 мая 2015.

За время прохождения метеоцунами начальный уровень моря изменился только после прихода третьей волны. Если после первой волны уровень моря восстановился сразу, после оттока водных масс уровень моря вернулся на первоначальное положение спустя 40 мин. После второй волны уровень моря увеличился и его возвращение в первоначальное состояние длилось несколько дней. Это связано с тем, что во втором случае пришло две волны.

Изучение экспериментальных данных лазерных деформографов и широкополосного сейсмографа, установленных на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», не выявило подводных землетрясений и оползней, которые могли привести к возникновению цунами в данном регионе. По данным Геофизической службы РАН землетрясений не было во время регистрации лазерными измерителями метеоцунами.

На рисунке 5.31 представлены фрагменты записей лазерных деформографов ориентацией «север-юг» с длиной измерительного плеча 52.5 м (верхний) и ориентацией «запад-восток» с длиной измерительного плеча 17.5 м (нижний) при резком изменении атмосферного давления. На записях видно увеличение амплитуды колебаний с периодами от 2 до 2.5 мин в 15:20 25 мая 2015 года во время прихода атмосферного возмущения. А в момент стабилизации атмосферного давления амплитуда данных колебаний падает до уровня фона.

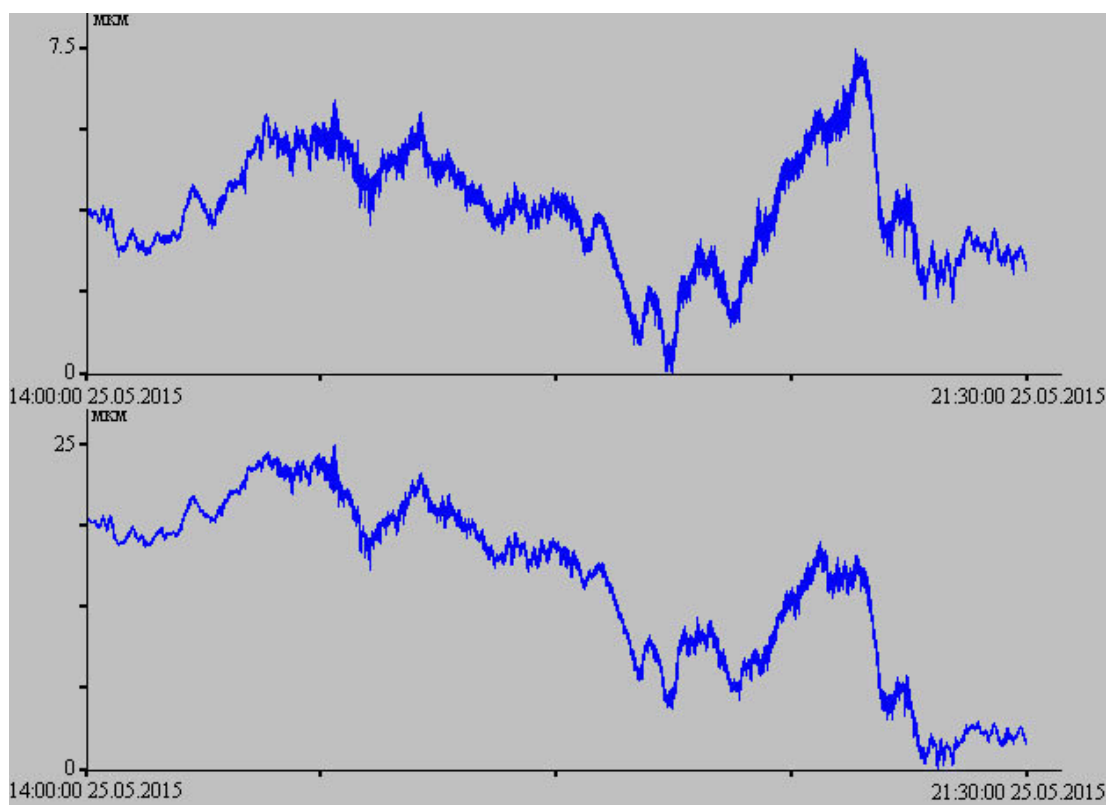


Рисунок 5.31 – Фрагменты записей лазерных деформографов ориентацией «север-юг» (верхний) и «запад-восток» (нижний) за 25 мая 2015.

При сопоставлении данных лазерных деформографов и широкополосного сейсмографа было обнаружено, что на записях широкополосного сейсмографа наблюдается увеличение амплитуды колебаний с периодами от 2 до 2.5 мин. Для большей наглядности отфильтруем запись лазерного деформографа ориентацией «север-юг» полосовым фильтром Хемминга с границами от 0.003 до 50 Гц (рисунок 5.32 а). После фильтрации запись лазерного деформографа стала похожа на запись широкополосного сейсмографа (рисунок 5.32 б), у которого рабочий частотный диапазон каждого датчика находится в пределах от 0.003 до 50 Гц. На отфильтрованной записи лазерного деформографа хорошо видно увеличение колебаний микродеформаций земной коры с периодами от 2 до 2.5 мин. На спектрах записей лазерного деформографа (рисунок 5.32 в) и широкополосного сейсмографа (рисунок 5.32 г) выделяются пики с периодами 2 мин 17 с.

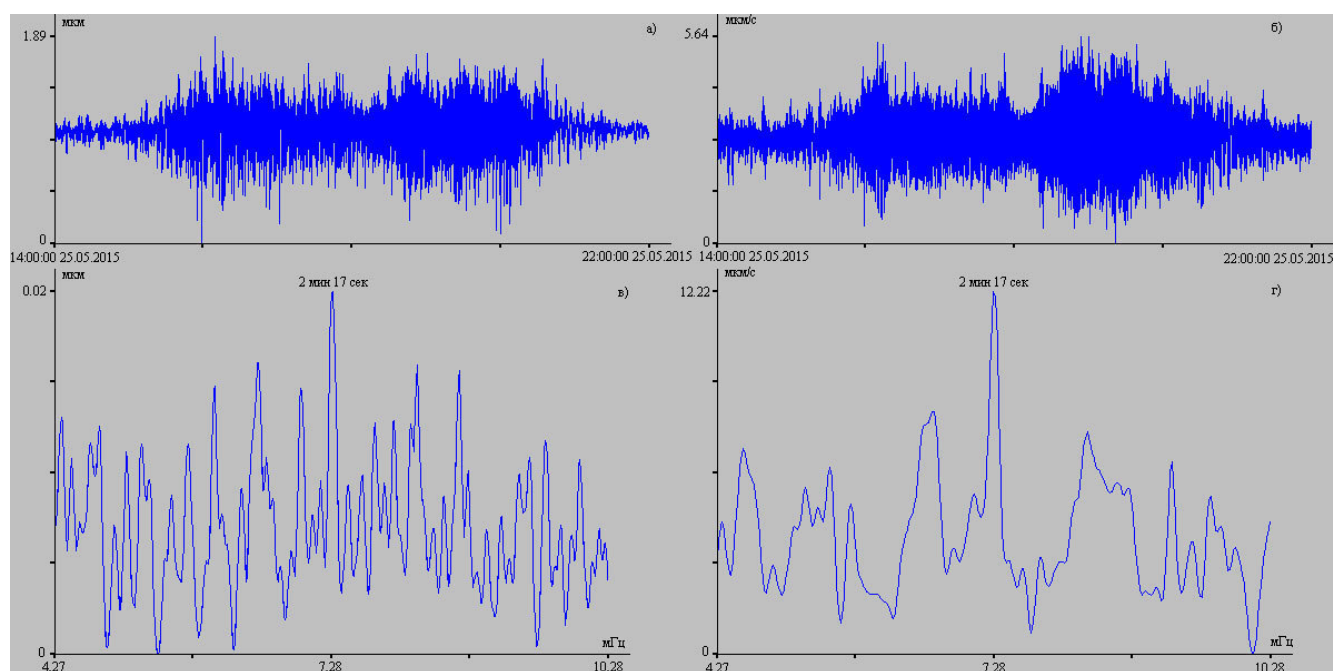


Рисунок 5.32 – Фрагменты и спектры записей лазерного деформографа ориентацией «север-юг» и широкополосного сейсмографа за 25 мая 2015.

Присутствие колебаний от 30 мин до 2 ч является еще одним признаком, характеризующим метеоцунами. Анализ данных лазерно-интерференционных приборов за 26 и 27 мая 2015 года выявил полуторачасовые колебания. На рисунке



5.33 представлены фрагменты записей лазерного нанобарографа (верхний) и лазерных деформографов ориентацией «север-юг» (средний) и «запад-восток» (нижний). На всех трех графиках наблюдаются мощные колебания с периодами 1 ч 37 мин.

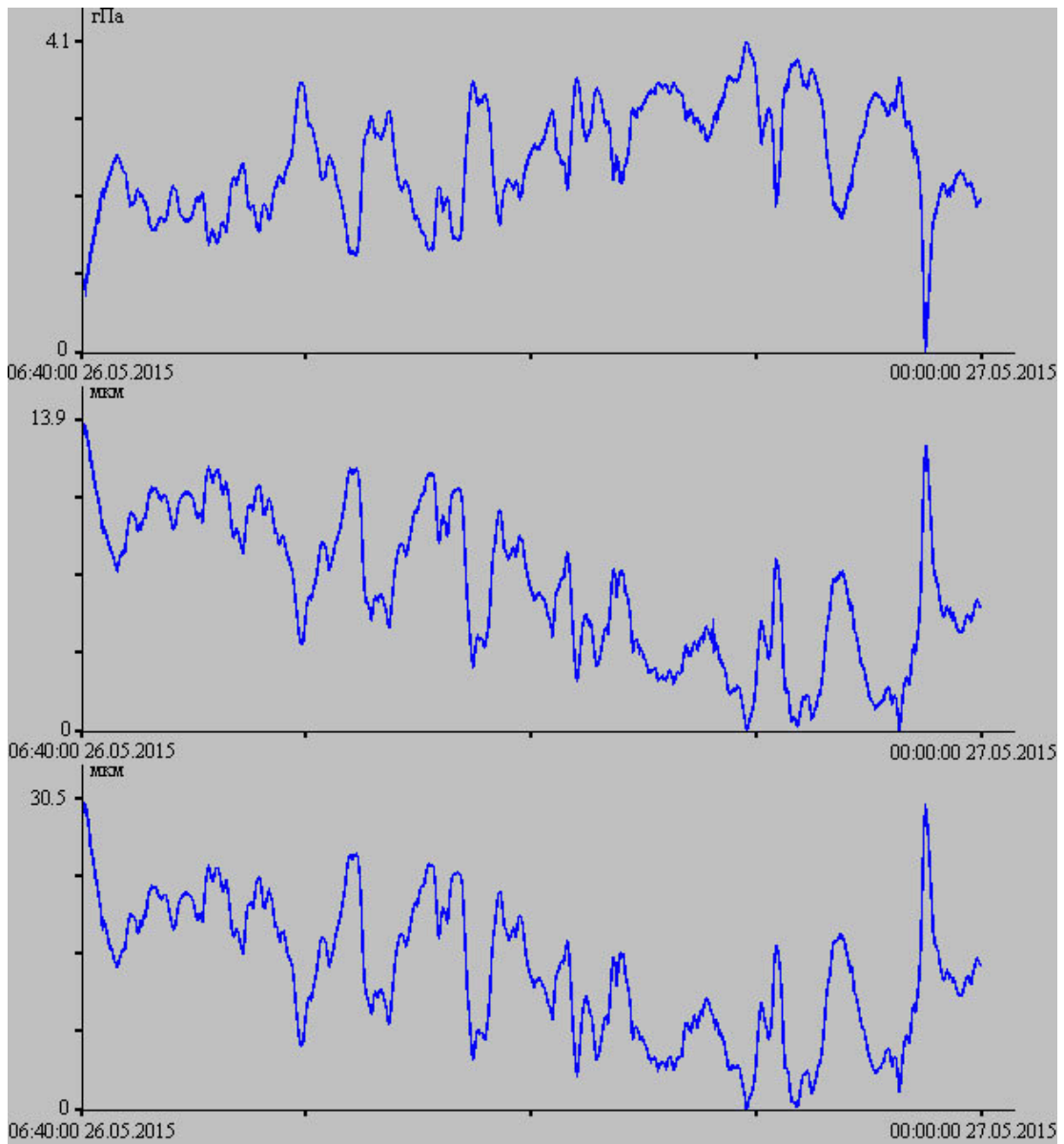


Рисунок 5.33 – Фрагменты записей лазерного нанобарографа (верхний), лазерного деформографа ориентацией «север-юг» (средний) и лазерного деформографа ориентацией «запад-восток» (нижний) за 22 мая 2015.

Анализ данных вариаций гидросферного давления, полученных с помощью лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, показал наличие колебания

с подобными периодами. Но эти колебания не так ярко выражены как в соседних геосферах. Присутствие колебаний с периодом 1 ч 37 мин в атмосфере, литосфере и гидросфере говорит об их общем происхождении, связанной с одной из геосфер. Использование комплексных методов исследования, одновременно в трех геосферах, на основе применения лазерно-интерференционных измерителей позволяет определить первоисточник данных колебаний. При обработке данных лазерного нанобарографа, лазерных деформографов и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, было выявлено что максимальное отношение амплитуды полуторачасовых колебаний к фоновым 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 [87].

#### 5.4 ВЫВОДЫ

На записях лазерного деформографа, установленного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», было выявлено несколько цунамигенных землетрясений. При анализе данных за декабрь 2004 года, используя деформационный метод определения степени цунамигенности землетрясения, можно с высокой вероятностью определить, что данное землетрясение вызовет волну цунами. Деформационная аномалия, вызвавшая цунами, дошла от эпицентра землетрясения до места размещения лазерного деформографа через 12 мин. Зная координаты землетрясения по данным сейсмостанций, можно было бы уже через 15 мин предупредить население об опасности возникновения цунами. А если учесть, что волна цунами дошла до ближайшего побережья через 2 ч, хватило бы времени для эвакуации населения из опасных зон.

Размещение нескольких трехкоординатных лазерных деформографов в различных точках Земли позволит решить многие задачи, связанные с прогнозом

событий катастрофического характера и их предвестников. Но тем не менее даже по данным одного лазерного деформографа можно с большой уверенностью говорить о принадлежности любого землетрясения к цунамигенным или нецунамигенным. Исходя из данных лазерного деформографа, деформационный метод определения цунамигенности землетрясений является наиболее эффективным и перспективным при его использовании в службах предупреждения.

Деформационный метод определения степени цунамигенности подводных землетрясений метод был апробирован на катастрофических цунами, произошедших после сильных землетрясений за последние двадцать лет. Присутствие деформационного скачка в момент или после землетрясения свидетельствует о смещении дна, характерном при возникновении цунами. Для всех рассмотренных землетрясений были рассчитаны коэффициенты затухания данных смещений. С помощью рассчитанных коэффициентов по данным лазерного деформографа можно не только определить относится землетрясение к цунамигенным или нет, но и вычислить величину смещения в очаге землетрясения. Учитывая то, что скорость распространения данных деформационных аномалий значительно больше скорости распространения цунами в океане/море, деформационный метод можно отнести к одним из самых перспективных дистанционных методов по определению степени цунамиопасности конкретных землетрясений. Деформационный метод определения степени цунамигенности подводных землетрясений является хорошим дополнением к уже существующим методам регистрации цунами ближнего зоны действия.

При обработке данных лазерного нанобарографа, лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, лазерных деформографов и широкополосного сейсмографа за 2015 год было выявлено природное явление по своим характеристикам схожее с метеоцунами. Резкий скачек атмосферного давления явился причиной появления в гидросфере уединенных длинных волн. Лазерным измерителем вариаций давления гидросферы было зафиксировано несколько волн, причем первая из них была почти солитоноподобной формы, а последняя складывалась из двух таких волн. Высота этих волн была в несколько раз больше

амплитуды суточного прилива в данном регионе. Высота первой волны, меньше последующих, а более ровная её форма говорит о том, что она сформировалась ближе к месту постановки прибора.

При обработке данных лазерных деформографов и широкополосного сейсмографа было зарегистрировано увеличение амплитуды микродеформаций земной коры с периодами от 2 до 2.5 мин в момент резкого изменения атмосферного давления. Через несколько часов после прохождения последней волны на записях всех лазерно-интерференционных приборов были выявлены колебания с периодом около полутора часов. Дальнейший анализ данных показал, что первоисточником этих колебаний является атмосфера, возмущение которой и стало причиной появления метеоцунами на юге Дальнего Востока России.

## 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 натуральных 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 деформографа 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айхлер Ю., Айхлер Г. И. Лазеры, Исполнение, управление, применение // М.: Техносфера 2012. -496с.
2. Александров Д.В., Дубров М.Н., Кравцов В.В. Результаты испытаний лазерных интерферометров-деформографов на Фрязинском лучеводном полигоне // Нелинейный Мир. 2018. Т.16. №2. С. 44 – 46.
3. Александров Д.В., Дубров М.Н., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. Сейсмо-деформационный и акустический мониторинг геодинамических процессов высокочувствительными пространственно разнесенными приборами в сейсмоэнергоактивной и асейсмической зонах // Вулканология и сейсмология. 2019. №3. С. 72 – 80.
4. Алексеев А.В., Долгих Г.И., Новотрясов В.В., Корень И.А., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В. Генерация литосферного прилива в шельфовой зоне // Доклады Академии наук. 1999. Т. 364. № 5. С. 679-682.
5. Алешин В.А., Борисюк Ю.А., Дубров М.Н., Луканенков А.В., Матвеев Р.Ф., Николаев А.В. О регистрации быстрораспространяющихся компонент сейсмических сигналов лазерным деформографом // Вулканология и сейсмология. 2004. №1. 70 с.
6. Алешин В.А., Дубров М.Н., Яковлев А.П. Лазерный интерферометр для измерения деформаций земной коры // ДАН СССР. 1980. Т.256, №6. С.1343-1346.
7. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов // М.: Машиностроение. 1981. 388 с.
8. Багаев С.Н., Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Опарин В.Н. О волнах маятникового типа и методе их выделения от крупных землетрясений по записям лазерного деформографа // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. № 3. С. 3-11.

9. Багаев С.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаев В.П. Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений // Физика Земли. 1992. №1. С.85 – 91.
10. Балакина Л.М., Москвина А.Г. Андаман-Суматринская островная дуга. Землетрясение 26.12.2004 г. - один из главных эпизодов сейсмогенной активизации дуги в начале XXI века // Физика Земли. 2013. №2. С. 55 – 93.
11. Батюшин Г.Н. Двухкорпусный простой и технологичный электромеханический вибратор // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 143-144.
12. 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.
13. Бергер и Ловберг. Лазерный измеритель деформаций земной коры // Приборы для научных исследований. 1969. Т.40, №12. С.41-48.
14. Биндер Б.Л. Датчик атмосферного давления // Труды НИИГМП. 1973. Вып. 29. С. 3-13.
15. Биндер Б.Л. Измерение атмосферного давления // Труды НИИГМП. 1973. Вып. 30. С. 22-26.
16. Бондаренко А.Н., Долгих Г.И., Копвиллем У.Х. и др. Регистрация СКЗ с помощью лазерного измерителя деформаций // В кн.: “Динамические процессы в океане и атмосфере”. Владивосток. 1981. С.18-29.
17. Борисов С.В., Кабанов Н.Ф., Рутенко А.Н. Экспериментальные исследования флуктуации акустического поля на стационарных трассах // Акустический журнал. 1996. Тот 42. №3. С. 347-358.
18. Бородин А.Е., Долгих А.Г., Долгих Г.И., Фищенко В.К. Регистрация сейсмоакустических сигналов надводного судна двухкоординатным лазерным деформографом // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 1. С. 59.

19. Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод // М. Мир. 1988. 324 с.
20. Браславский Д.А., Логунов С.С., Пельпор Д.С. Расчёт и конструкция авиационных приборов // М.: ОборонГИЗ. 1954. 575 с.
21. 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.
22. Букчин Б.Г., Мостинский А.З. Интегральные характеристики очагов землетрясений на Суматре 26.12.2004 г. и 28.03.2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2007. № 4. С. 58–68.
23. Вали В., Бостром Р.С. Лазерный интерферометр с базой 1000 м // Приборы для научных исследований. 1968. Т.39, №9. С.52-61.
24. Вали В., Кругстад Р., Мосс Р. Интерферометр с ОКГ для измерения деформаций земной поверхности // ТИИЭР. 1965, №9. С.186-194.
25. Вардья В.П., Дубров М.Н., Коршунов И.П., Матвеев Р.Ф. Подземные лучеводные линии с периодической коррекцией светового пучка // Радиотехника и электроника. 1978. Т.23. №10. С.2069 – 2083.
26. Вольнов М.И., Гарнов В.В., Губин М.А., Никитин В.В., Петрухин Л.И. Лазерный геофизический сейсмограф // Препр. №144. М. 1979. 29 с.
27. Гореликов А.И., Давыдов А.В., Долгих Г.И. и др. Генерация и прием низкочастотных акустических колебаний // Деп. В ВИНТИ. 1988. №3755-В88. 9 с.
28. Громков Н.В. Преобразователи параметров резистивных датчиков в частотные сигналы // Датчики и системы. 2009. №1. С. 32-37.
29. Давыдов А.В., Долгих Г.И. Акустический мониторинг переходной зоны океан-материк лазерными деформографами // Акустический журнал. 1994. Т. 40. № 3. С. 466-467.
30. Давыдов А.В., Долгих Г.И. Модуляционные свойства собственных колебаний Земли // Физика Земли. 1997. № 8. С. 46-49.

31. Давыдов А.В., Долгих Г.И., Распространение акустических волн на границе гидросфера-литосфера // Тез. докл. Школы-семинара «Применение лазерных деформографов в сейсмоакустике». Владивосток. 1989. С. 5-6.
32. Давыдов А.В., Долгих Г.И. Регистрация сверхнизкочастотных колебаний 52.5-м лазерным деформографом // Физика Земли. 1995. № 3. С. 64-67.
33. Давыдов А.В., Долгих Г.И., Запольский А.М., Копвиллем У.Х. Регистрация гидроакустических колебаний лазерным деформометром // Тез. Докл. II межотр. Акуст. Сем. «Модели, алгоритмы, принятие решений». М.: Акуст. Ин-т. 1988. С. 122.
34. Давыдов А.В., Долгих Г.И., Кабанов Н.Ф. Применение лазерных деформографов в гидроакустике // Акустический журнал. 1995. Т. 41, №2. С. 235-239.
35. Давыдов А.В., Долгих Г.И., Копвиллем У.Х. Регистрация гидроакустических колебаний лазерным деформографом // Тез. докл. Всесоюзной конференции по гидроакустическим методам исследования океана. Геленджик. 1989. С. 58-59.
36. Дмитриев М. Т. О конвекционном манометре. // Приборы и техника эксперимента. 1959. № 3. С.148-150.
37. Дмитриев М.Т. Электрические методы измерения давления атмосферы и радиоактивно-ионизационные манометры// Труды НИИГМП. 1965. вып. 14. С. 28-59.
38. Дмитриев М. Т., Золотарев Е. И. Увеличение точности и пределов измерений термоэлектрическим манометром. Теория манометра // Химия и технология азотных удобрений. М., 1961. С. 120-180.
39. Долгих Г.И. Исследование волновых полей океана и литосферы лазерно-интерференционными методами // Владивосток, Дальнаука, 2000 г. 160 с.
40. Долгих Г.И. Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых низкочастотным

гидроакустическим излучателем // Акустический журнал. 1998. Т. 44. № 3. С. 358-361.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

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

47. 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.

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 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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 // ДАН. 2011. Т. 441. №1. С. 376-379.

53. 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.

54. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Дистанционные лазерно-интерференционные методы исследования шельфовых волн // Метеорология и гидрология. 1999. №7. С. 100-106.

55. 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.

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

57. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Валентин Д.И., 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. №8. С. 69-73

58. 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.

59. 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

60. 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.

61. 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.

62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. 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 Тривант. 2008. Выпуск 9. С.174-182.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.



70. 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.
71. 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.
72. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В., Чупин В.А., Шве́ц В.А., Яковенко С.В. Инфразвуковые колебания японского моря // Доклады Академии наук. 2011. Т. 441. № 1. С. 98-102.
73. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Чебров В.Н., Шевченко Ю.В. Геофизический полигон м. Шульца // Вестник ДВО РАН. 2010. №5. С.165-169
74. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Шве́ц В.А., Яковенко С.В. Цифровая система регистрации лазерно-интерференционных установок // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 158-159.
75. Долгих Г.И., Копвиллем У.Х., Павлов А.Н. Интерференционные измерения малых смещений // Деп. в ВИНТИ. 1981. №2488-81. 47 с.
76. Долгих Г.И., Копвиллем У.Х. Измерение низкочастотных морских шумов в диапазоне 0,01-100 Гц при помощи сейсмоакустического канала в прибрежной зоне // Научный отчет. 1985, № Гос. регистрации 81067363. 107 с.
77. Долгих Г.И., Корень И.А., Овчаренко В.В. Влияние вариаций атмосферного давления на показания лазерного деформографа // Физика Земли. 2001. № 11. С. 92-96.
78. Долгих Г.И., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76-81.
79. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марापалец Ю.В., Шве́ц В.А., Шевцов Б.М., Широков О.П., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и

акустические предвестники землетрясений // Доклады академии наук. 2007. Т. 413, № 1. С. 96-100.

80. 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.

81. Долгих Г.И., Плотников А.А., Швец В.А. Лазерный гидрофон // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 1. С. 159-160.

82. Долгих Г.И., Овчаренко В.В. Изучение инфрагравитационных и поверхностных морских волн на границе "гидросфера-литосфера" // Материалы докладов третьего Всероссийского симпозиума "Сейсмоакустика переходных зон". Владивосток. 2003. С. 70-72.

83. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазеры. Лазерные системы // Владивосток: Изд-во «Дальнаука». 2009. 203 с.

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

85. 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.

86. 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.

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

88. 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

89. 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
90. Долгих С.Г., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Геофизический комплекс "Горнотаежное" // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 2. С. 159-160
91. Долгих Г.И., Яковенко С.В. Широкодиапазонная региональная система мониторинга литосферных процессов // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 6. С. 142-143.
92. Дубров М.Н., Александров Д.В. Проведение испытаний мобильного лазерного деформографа на морской экспедиционной станции м. Шульца // Пятый Всероссийский симпозиум «Физика геосфер». Материалы докладов. Владивосток, 3-7 сентября 2007 г. С. 65-70.
93. Дубров М.Н., Алешин В.А. Высокоточные лазерные интерферометры в многокомпонентных измерительных системах // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 10. С. 7 – 11.
94. Дубров М.Н., Казанцева О.С., Манукин А.Б., Понятовская В.И. Исследование синхронных деформаций Земной поверхности и вариаций уровня подземных вод // Физика Земли. 2007. №5. С. 71 – 79.
95. Дубров М.Н., Латынина Л.А., Матвеев Р.Ф., Пономарев А.В. Наблюдение сверхдлиннопериодных деформационных колебаний земной поверхности, связанных с малыми вариациями атмосферного давления // Физика Земли. 1998. №12. С. 22-30.
96. Евтютов А. П., Колесников А. Е., Корепин Е. А. и др. Справочник по гидроакустике // Л.: Судостроение, 1988. 548 с.
97. 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.

98. Захаров Н.Г., Воронов С.В. Пьезоэлектрический датчик давления // Радиоэлектронная техника. 2009. №1(2). С. 80-82.
99. Зачек С.И., Карпуша В.Е. Датчик атмосферного давления // Авторское свидетельство SU 1649323 А1, 15.05.1991. Заявка № 4684521 от 25.04.1989.
100. Калитаевский Н.И. Волновая оптика // М.: ВШ. 1978. 182 с.
101. Карпуша В.Е. Датчик абсолютного давления // Авторское свидетельство SU 1589086 А1, 30.08.1990. Заявка № 4458234 от 17.05.1988.
102. Касимадзе М.С., Халилов Р.Ф., Балашов А.Н. Электрокинетические преобразователи информации // М. Энергия, 1973, 134 с.
103. Кварцевый деформограф // В кн.: “Каталог геофизической аппаратуры”. (Информационный справочник). Вып.4. М.: Наука. 1981. С.146-148.
104. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику // М.: Наука. 1984. 399 с.
105. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Беляков В.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В. Новые тенденции в обследовании цунами // Инженерная физика. 2016. № 5. С. 96-106.
106. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости // М.: Наука, 1987. 246 с.
107. Маклаков А.Ф., Снежинский В.А., Чернов Б.С. Океанографические приборы // Л. Гидрометеиздат, 1975, 384 с.
108. Милюков В.К. Мониторинг состояния магматических структур вулкана Эльбрус по наблюдениям литосферных деформаций // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 3–15.
109. Милюков В.К., Виноградов М.П., Лагуткина А.В., Миронов А.П., Мясников А.В., Перельгин Н.А., Пустовитенко Б.Г., Боборыкина О.В., Вольфман Ю.М., Насонкин В.А. Наблюдение собственных колебаний Земли лазерными интерферометрами-деформографами // Измерительная техника. 2015. № 12. С. 25-30.

110. Милюков В.К., Виноградов М.П., Миронов А.П., Мясников А.В., Перельгин Н.А. Собственные колебания Земли, возбужденные тремя крупнейшими землетрясениями последнего десятилетия, по деформационным наблюдениям // Физика Земли. 2015. №2. С. 21-36.

111. Милюков В.К., Клячко Б.С., Мясников А.В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н. Лазерный интерферометр-деформограф для мониторинга движений Земной коры // Приборы и техника эксперимента. 2005. №6. С. 87-103.

112. Милюков В.К., Копаев А.В., Лагуткина А.В., Миронов А.П., Мясников А.В. Наблюдения приливных деформаций земной коры в Приэльбрусье // Физика Земли. 2007. №11. С. 21-29.

113. Милюков В.К., Кравчук В.К., Миронов А.П., Латынина Л.А. Деформационные процессы в литосфере, связанные с неравномерностью вращения Земли // Физика Земли. 2011. № 3. С. 96–109.

114. Милюков В.К., Клячко Б.С., Мясников А.В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н. Лазерный интерферометр-деформограф для мониторинга движений земной коры // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 87-103.

115. Милюков В.К., Мясников А.В. Долговременные наблюдения литосферных деформаций Баксанским лазерным интерферометром в условиях подземного размещения // Измерительная техника. 2012. №1. С. 44-47.

116. Милюков В. К., Мясников А. В. Компенсация термоупругих и барических процессов в измерениях литосферных деформаций Баксанским лазерным интерферометром // Измерительная техника. 2006. № 2. С. 32-35.

117. Милюков В. К., Мясников А. В. Метрологические характеристики Баксанского лазерного интерферометра // Измерительная техника. 2005. № 12. С. 26-30.

118. Мокров Е.А., Лебедев Д.В., Селифанова В.В. Емкостные датчики абсолютных давлений // Датчики и системы. 2001. №7. С. 23-25.

119. Молоденский М.С., Молоденский С.М. Сравнение временных изменений приливного отклика среды в сейсмически активных и неактивных регионах // Физика Земли. 2015. № 1. С. 63–72.

120. Морозов В.П., Шкадаревич А.П. Датчик давления // Авторское свидетельство SU 1545115 А1, 23.02.1990. Заявка № 4394314 от 21.03.1988.

121. Мочалов К.К. Устройство для измерения атмосферного давления // Авторское свидетельство SU 1182290 А1, 30.09.1985. Заявка № 3727915 от 06.04.1984.

122. Невмержицкий И.С., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Семибаламут В.М., Терешкин Д.О., Фомин Ю.Н., Панов С.В., Парушкин М.Д., Узбеков Н.Б. Деформографические наблюдения в Средней Азии и Байкальской рифтовой зоне. Результаты наблюдений и связь с сейсмичностью // Доклад на конференции Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XII Международной сейсмологической школы (г. Алматы, Казахстан, 11-15 сентября 2017 г.). С. 236-240.

123. Николаев А.В., Луканенков А.В., Дубров М.Н. Новые возможности совместной обработки данных регистрации смещений и деформаций в поле сейсмической волны // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430. №6. С. 816 – 819.

124. Олсон Л.Е., Саттон Дж.Х., Юинг М. Наблюдение собственных колебаний Земли с помощью стрейн- и маятниковых сейсмографов // В кн.: “Собственные колебания Земли”. М.: Мир. 1964. С.80-105.

125. Орлов В.А., Парушкин М.Д. Явление суточной повторяемости возбуждения шума в сигналах лазерного деформографа // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2012. Т.2. №3. С. 124 – 130.

126. Орлов В. А., Семибаламут В. М., Панов С. В., Парушкин М. Д., Терешкин Д. О. и др. Результаты первых лазерных деформографических наблюдений в штольне «Талгар» Алматинского прогностического полигона // Вестник КазНАЕН (Казахстанская национальная академия естественных наук). 2013. № 3. С. 79–83.

127. Панов С.В., Парушкин М.Д., Рыбушкин А.Ю., Семибаламут В.М., Фомин Ю.Н. Лазерные деформографические измерения в условиях открытой атмосферы // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2015. Т.2. №2. С. 332 – 338.

128. Парушкин М. Д., Терешкин Д. О. Методика непрерывного мониторинга деформационных процессов в штольне с помощью лазерного интерферометра-деформографа // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2016. Т. 1. № 3. С. 150-155.

129. Поляков В., Поляков А., Одинцов М. Перспективные кварцевые пьезорезонансные датчики давления // *Компоненты и технологии*. 2011. №1(114). С. 18-20.

130. Попандопуло Г. К., Голуненко А. С. Датчик атмосферного давления для автоматических гидрометеорологических станций // *Труды НИИГМП*. 1972. Вып. 26. С. 22-26.

131. Попов Г.А., Нгуен С.М. Волоконно-оптический датчик давления // Патент на полезную модель RU 162945 U1, 27.06.2016. Заявка №2015128830/28 от 15.07.2015.

132. Рутенко А.Н. Сезонная изменчивость флуктуации интенсивности и фазы низкочастотных гидроакустических сигналов, распространяющихся в шельфовой зоне Японского моря // *Акустический журнал*. 1997. Тот 43. №1. С. 98-105.

133. Рыкунов Л.Н., Старовойт Ю.О., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Связь штормовых микросейсм с высокочастотными сейсмическими шумами // *Известия Академии наук СССР. Физика Земли*. 1982. №2. С. 88-91.

134. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // *Известия Академии наук СССР. Физика Земли* 1979. №11. С. 72-77.

135. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Лунно-солнечная приливная периодичность в линиях спектров временных вариаций высокочастотных микросейсм // *Доклады Академии наук СССР*. 1980. Т. 252, №3. С. 577-580.

136. Семенов В.А., Марин В.Н., Бекетова Т.А. Датчик абсолютного давления // Авторское свидетельство SU 1081448 A1, 23.03.1984. Заявка № 3559570 от 01.03.1983.

137. Слободян В.Ю., Королев И.А., Маринчева М.Б. Устройство контроля параметров окружающей среды // Патент на изобретение RU 2707395, 26.11.2019. Заявка №2018145899 от 24.12.2018.

138. Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи // Л. Гидрометеиздат, 1986, 272 с.

139. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В., Семибаламут В.М., Фомин Ю.Н., Панов С.В., Парушкин М.Д. Применение деформографов в исследовании колебательных процессов в широком частотном диапазоне // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 1. С. 5-24.

140. Тимофеев В.Ю., Грибанова Е.И., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Семибаламут В.М., Панов С.В., Парушкин М.Д., Панин С.Ф. Регистрация геофизических процессов с помощью лазерного деформографа (сейсмостанция Талая, Байкальская рифтовая система) // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2016. Т. 2. №2. С.239-244.

141. Тимофеев В.Ю., Семибаламут В.М., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Фомин Ю.Н., Грибанова Е.И., Бойко Е.В., Панов С.В., Парушкин М.Д. Лазерный деформограф и вариации приливной деформации во времени // Вестник СГУГИТ. 2019. Т. 24. №1. С. 42 – 58.

142. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С., Основы гидроакустики // Л. Судостроени, 1966. 295 с.

143. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики // Л. Судостроение, 1970, 454 с.

144. Фалеев М.И., Малышев В.П., Макиев Ю.Д. и др. Раннее предупреждение о чрезвычайных ситуациях // МЧС России. Москва. 2015. 232 с.

145. Фомин Ю.Н., Жмудь В.А., Семибаламут В.М., Панов С.В., Парушкин М.Д., Димитров Л. Результаты деформографических измерений в штольне на обсерватории Талая // Автоматика и программная инженерия. 2019. №1(27). С. 65 – 76.

146. Чупин В.А. Некоторые результаты экспериментального исследования преобразования гидроакустических сигналов в переходной зоне // Материалы



докладов V Всерос. Симп. “Физика геосфер”. Владивосток, Дальнаука, 2007. С. 101-104.

147. Чупин В.А., Бородин А.Е., Долгих Г.И. Регистрация двухосевым лазерным деформографом сейсмоакустических сигналов, создаваемых гидроакустическими источниками // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 8. № 4. С. 55-60.

148. Шевченко Г.В. Влияние прилива на формирование опасных подъемов уровня на побережье Охотского моря при цунами и штормовых нагонах//*Океанология*. 2017. Т. 57. №5. С. 690-701.

149. Штанговый деформограф // В кн.: “Каталог геофизической аппаратуры”. (Информационный справочник). Вып.4. М.: Наука. 1981. С.149-150.

150. Яковенко С.В. Комплексный мониторинг литосферных процессов с использованием GPS и лазерной интерферометрии // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2010. № 6 (154). С. 109-112.

151. 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.

152. 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.

153. Янг М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы // Под. Ред. Михайлина В.В. М.: Мир. 2005. 542 с.

154. AANDERAA instruments data collecting instruments for land sea and air. Data sheet. 2000. 6 p.

155. Aasi J., Abbott B.P., Abbott R, Abbott T et al. Advanced LIGO // *Classical and Quantum Gravity*, 2015. V.32, №7. P. 074001.

156. Abadie J., Abbott B.P., Abbott R., Adhikari R. et al. Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors // *Classical and Quantum Gravity*. 2010. V. 27. №17. P. 173001.
157. Abbott B.P., Abbott R., Abernathy M.R., Adhikari R.X. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Physical review letters*. 2016. V.116. №6. P.061102.
158. Abbott B.P., Abbott R., Abernathy M.R., Adhikari R.X. et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with advanced LIGO and advanced Virgo // *Living Reviews in Relativity*. 2016. V. 19. P. 1-39.
159. Abbott B.P., Abbott R., Adhikari R.X., Ananyeva A. et al. Binary black hole population properties inferred from the first and second observing runs of advanced LIGO and advanced Virgo // *The Astrophysical Journal Letters*. 2019. V. 882. №2. P. L24.
160. Abbott B.P., Abbott R., Adhikari R.X., Ananyeva A. et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with advanced LIGO, advanced Virgo and KAGRA // *Living Reviews in Relativity*. 2018. V. 21. №1. P. 3.
161. Abbott B.P., Abbott R., Adhikari R.X., Anderson S.B. et al. GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence // *Physical Review Letters*. 2016. V. 116. №24. P. 241103.
162. Acernese F., Agathos M., Agatsuma K., Aisa D. et al. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector // *Classical and Quantum Gravity*, 2015. V.32, №2. P.024001.
163. Akal Tuncay, Jensen F.B. Ocean seismo-acoustic propagation // *Progr. Congr. Acoust. Symp. Underwater Acoust. Halifax. London*. 1987. P. 493-500.
164. Akutsu T., Ando M., Arai K., Arai Y. et al. First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA // *Classical and Quantum Gravity*, 2019. V.36, №16. P.165008.
165. Akutsu T., Ando M., Barton M.A., Capocasa E. et al. KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector // *Nature Astronomy*. 2019. V. 3. №1. P. 35-40.

166. Alekseev A.V., Doigikh G.I., Kovalev S.N., Koren I.A., Novotryasov V.V., Ovcharenko V.V. The generation of lithospheric tide in the shelf zone // *Doklady Chemistry*. 2001. V. 378. № 1-3. P. 214-216.
167. Alekseev A.V., Valentin D.I., Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V., Kholodkevich E.D., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Registration of infragravity waves at the hydrosphere-lithosphere boundary using coastal laser strainmeter // *Doklady Earth Sciences*. 2003. V. 389. № 2. P. 291-293.
168. Avsar N.B., Jin S., Kutoglu H., Gurbuz G. Sea level change along the Black sea coast from satellite altimetry, tide gauge and GPS observations // *Geodesy and Geodynamics*. 2016. V.7. №1. P. 50-55.
169. Bacon P., Barsuglia M., Bouffanais Y., Buy C. et al. Status of the advanced virgo gravitational wave detector // *International Journal of Modern Physics A*. 2017. V. 32. № 28-29. P. 1744003.
170. Batyushina I.V., Valentin D.I., Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovaliv S.N., Koren I.A., Kholodkevich E.D., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Atmospheric and hydrospheric laser interferometers // *J. Proceeding SPIE 2002 №752*. P. 325-329.
171. Benioff H. A linear strain seismograph // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1935. V.25, 4. P.283-309.
172. Bilham R.G. The location of Earth strain instrumentation // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A*. 1973. V.274. P.429-433.
173. Braitenberg C., Zadro M. Comparative analysis of the free oscillations generated by the Sumatra - Andaman Islands 2004 and the Chile 1960 earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2007. V. 97. № 1. Part A. Suppl. P. 6–17.
174. Chlieh M., Avonac J-P., Hjorleifsdottir V., et al. Coseismic slip and afterslip of the great Mw 9.15 Sumatra – Andaman earthquake of 2004 // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2007. V. 97. № 1. Part A. Suppl. P. 152–173.

175. De Vries K.D., De Wasseige G., Vereecken M., Frère J.-M. Constraints and prospects on gravitational-wave and neutrino emissions using gw150914 // *Physical Review D*. 2017. V. 96. №8. P. 083003.
176. 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.
177. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Kovalev S.V., Plotnikov A.A., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. The laser-interference superlow-frequency hydrophone // *J. Proceeding SPIE*. 2007. P. 659409.
178. Dolgikh G.I., Butyrin P.G., Dolgikh S.G., Dyagilev R.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Recording of infrasound deformation perturbations by spatially separated laser strainmeters // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 441. № 1. P. 1583-1586.
179. Dolgikh G. I., Chupin V. A. Experimental estimate for the transformation of underwater acoustic radiation into a seismoacoustic wave // *Acoust. Phys.* 2005. V. 51(5). P. 538–542.
180. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. A deformation method for determining the tsunami potential of earthquakes // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 417. № 1. P. 1261-1264.
181. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Novikova O.V., Ovcharenko V.V., Okuntseva O.P., Shvets V.A., Chupin V.A., Yakovenko S.V. A laser nanobarograph and its application to the study of pressure-strain coupling // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2004. V. 40. № 8. P. 683-691.
182. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Rasskazov I.Yu., Lugovoy V.A., Saksin B.G. A 50-m laser strainmeter system installed in Transbaikalia: testing results // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57. № 12. P. 1768-1774.
183. 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.

184. Dolgikh G.I., Plotnikov A.A., Budrin S.S. Mobile laser meter of hydrosphere pressure variations // *Instruments and Experimental Techniques*. 2011. V. 54. № 4. P. 598-599.
185. Dolgikh G.I., Valentin D.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V., Fishchenko V.K. Application of horizontally and vertically oriented strainmeters in geophysical studies of transitional zones // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2002. V. 38. № 8. P. 686-689.
186. Dolgikh Grigoriy, Dolgikh Stanislav, Kovalyov Sergey, Chupin Vladimir, Shvets Vyacheslav, Yakovenko Sergey Super-low-frequency laser instrument for measuring hydrosphere pressure variations // *Journal of Marine Science and Technology*. 2009. V.14. no.4. P.480-488.
187. Dolgikh Grigoriy, Dolgikh Stanislav Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9(10), 1144
188. Dolgikh Grigory I., Dolgikh Stanislav G, Kovalev Sergei N., Ovcharenko Vladimir V., Chupin Vladimir A., Shvets Vyacheslav A., Yakovenko Sergei 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.
189. Dolgikh Grigory I., Dubrov Mstislav N., Dolgikh Stanislav G., Kovalev Sergei N., Ovcharenko Vladimir V., Savvin1 Egor A., Chupin Vladimir A., Shvets Vyacheslav A., Yakovenko Sergei V. Application of laser strainmeters to the study of earthquake physics // *Acta Geophysica*. 2006. V.54, №.2. P.187-197.
190. Dolgikh S.G. The contribution hydrospheres processes in level of microdeformations of earth crust // *Proceedings of the international offshore and polar engineering conference*. 2009. P. 616-619
191. Dolgikh S.G., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Gornotaezhnoe geophysical system // *Instruments and Experimental Techniques*. 2012. V. 55. № 2. P. 298-299.

192. Dubrov M.N., Lukoshkov S.V., Pososhenko L.Z., Poyasnik Yu.V., Starostina E.E. Laser interferometer-deformographs LID-M and LID-MP // *Pribery i Tekhnika Eksperimenta*. 1995. V. 38. № 5. P. 201-203.
193. Duncan Carr Agnew, Frank K. Wyatt. Long-Base Laser Strainmeters: A Review // *Institute of Geophysics and Planetary Physics Scripps Institution of Oceanography University of California, San Diego, Scripps Institution of Oceanography Technical Report*, 6 January 2003.
194. Duputel Z., Rivera L., Kanamori H., Hayes G. M 9.1 - 2004 Sumatra - Andaman Islands Earthquake//*Geophysical Journal International*. 2012. 189(2). P. 1125-1147.
195. Falck C., Ramatschi M., Bartsch M., Merx A., Hoeberechts J., Schmidt G., Subarya C. Near real-time gps applications for tsunami early warning systems // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2010. T. 10. № 2. P. 181-189.
196. González F.I., Bernard E.N., Meinig C. et al. The NTHMP tsunameter network // *Natural Hazards*. 2005. V. 35. № 1. P. 25–39.
197. Grigory I. Dolgikh, Sergey S. Budrin, Stanislav G. Dolgikh, et al. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // *J. Acoust. Soc. Am.* 142 (4), October 2017. PP. 1990-1996.
198. Hagihara Y., Era N., Iikawa D., Asada H. Probing gravitational wave polarizations with advanced LIGO, advanced Virgo, and KAGRA // *Physical Review D*. 2018. V. 98. №6. P. 064035.
199. Herbers T. H. C. et al. Infragravity-frequency (0.005-0.05 Hz) motions on the shelf. art II: Free waves // *J. Phys. Oceanogr.* 1995. V. 25, P. 1063-1079.
200. Herbers T. H. C., Elgar S., Guza R.T. Generation and propagation of infragravity waves // *J. Geophys. Res.*, 1995. V.100, C12, P. 24863-24872.
201. Hirose I., Kawasaki I., Takemoto S., Tamura Y. Temporal variations of tidal constituents in strainmeter records prior to the occurrence of two large earthquakes // *Journal of the Geodetic Society of Japan*. 2003. V. 49. №4. P. 227-242.

202. Howe M. S. Surface pressures and sound produced by turbulent flow over smooth and rough walls // *JASA*. 1991. Vol.90. P. 1041-1047.
203. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
204. Ji C., Wald D.J., Helmberger D.V. Source description of the 1999 Hector Mine, California earthquake; Part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002. V. 92, No. 4. P. 1192-1207
205. Lay T., Kanamori H., Ammon Ch.J., et al. The great Sumatra - Andaman earthquake of 26 December 2004 // *Science*. 2005. V. 308. № 5725. P. 1127–1133. 1
206. Lee S. J., Chen H. W., Liu Q., et al. Three-dimensional simulations of seismic wave propagation in the Taipei basin with realistic topography based upon the spectral-element method // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2008. V. 98(1). P. 253–264.
207. Leonard M. Analysis of tide gauge records from the December 2004 Indian ocean tsunami // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. №17. P. L17602.
208. Lognorme P. et al. Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal mode summation for a spherical earth model with a realistic atmosphere *Geophys // Journal Int.* 1998. Vol. 135, P. 388-406.
209. Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume IV. — 2006. 80 p.
210. Meecham W. C. On aerodynamic infrasound // *J. Appl. Atmos. Terr. Phys.* 1971. Vol. 33. P. 149-155.
211. Mofjeld H.O. Tsunami measurements // *The Sea*. 2009. V. 15. Tsunamis / Eds: Robinson A., Bernard E. Cambridge: Harvard University Press, 2009. P. 201–235.
212. Mortari R. A new method of stating recent sea level rises and a comparison with tide gauge records // *Global and Planetary Change*. 2004. V. 40. №1-2. P. 183-194.
213. Muhari A., Imamura F., Arikawa T., Hakim A.R. and Afriyanto B. Solving the Puzzle of the September 2018 Palu, Indonesia, Tsunami Mystery: Clues from the Tsunami Waveform and the Initial Field Survey Data // *Journal of Disaster Research* Vol. 13, 2018, Disaster Letter: sc20181108

214. Mungov G., Eblé M., Bouchard R. DART® tsunameter retrospective and real-time data: a reflection on 10 years of processing in support of tsunami research and operations // *Pure and Applied Geophysics*. 2013. V. 170, №9-10. P. 1369-1384.
215. Operating manual for Pressure/depth sensors/recorders models TD301 – TD303. 2011. 38 p.
216. Park J., Song T-R.A., Tromp J., et al. Earth's free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake // *Science*. 2005. V. 308. № 7044. P. 1139–1144.
217. Park, J., Song T. A., Tromp J., Okal E., Stein S., Roullet G., Clevede E., G. Laske, H. Kanamori, P. Davis, J. Berger, C. Braitenberg, M. van Camp, X. Lei, H. Sun, H. Xu, and S. Rosat, Earth's free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake // *Nature*. 2005. 308. P. 1139–1144.
218. Peng D., Hill E.M., Meltzner A.J., Switzer A.D. Tide gauge records show that the 18.61-year nodal tidal cycle can change high water levels by up to 30 cm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. V. 124. №1. P. 736-749.
219. Pollitz F.F., Bürgmann R., Banerjee P. Postseismic relaxation following the great 2004 Sumatra - Andaman earthquake on a compressible self gravitating Earth // *Geophys. J. Intern.* 2006. V. 167. № 1. P. 397–420.
220. Rabinovich A.B., Eblé M.C. Deep-ocean measurements of tsunami waves // *Pure and Applied Geophysics*. 2015. T. 172. № 12. P. 3281-3312.
221. Rabinovich A.B., Monserrant S. Generation of meteorological tsunamis (large amplitude seiches) near the Balearic and Kuril Islands // *Natural Hazards*. 1998. №18. P. 27-55.
222. Ranguelov Boyko. *Natural Hazards-Nonlinearities and Risk Assessment* // Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, Bulgaria. 2011. 326 p.
223. Rhie J.R., Dreger D., Bürgmann R., Romanowicz B. Slip of the 2004 Sumatra - Andaman earthquake from joint inversion of longperiod global seismic waveforms and



GPS static offsets // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2007. V. 97. № 1. Part A. Suppl. P. 115–127.

224. Rhie J., Romanowicz B. Excitation of the Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // Nature. 2004. Vol. 431, P. 552-556.

225. Romanowicz B., Rhie J., Colas B. Insights into the origin of the Earth's hum and microseisms // Eos 86(52). Fall Meet. Suppl. abstr. 2005. S31A-0271.

226. Schiermeier Q. Clash over tsunami access // Nature. 2018. Vol.562. P. 317-318.

227. Serdar Erol Time-frequency analyses of tide-gauge sensor data // Sensors 2011, 11, P. 3939-3961.

228. Sheremet A., Guza R. T., S. Elgar S., Herbers T. H. C. Observations of nearshore infragravity waves: Seaward and shoreward propagating components // Journal of Geophysical Research. 2002. V. 107, NO. C8, 10.1029/2001JC000970.

229. Shuzo Takemotoa, Hideo Momosea, Akito Arayab, Wataru Moriic, Junpei Akamatsuc, Masatake Ohashid, Akiteru Takamorib, Shinji Miyokid, Takashi Uchiyamad, Daisuke Tatsumie, Toshihiro Higashia, Souichi Teladaf and Yoichi Fukuda. A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains. // Journal of Geodynamics Volume 41, Issues 1-3, January-April 2006. P. 23-29.

230. Shved G.M., Petrova L.N., Polyakova O.S. Penetration of the Earth's free oscillations at 54 minute period into the atmosphere // Annales Geophysicae. 2000. V. 18. № 5. P. 566-572.

231. Spada G., Galassi G. New estimates of secular sea level rise from tide gauge data and GIA modelling // Geophysical Journal International. 2012. V. 191. №3. P. 1067-1094.

232. Stein S., Okal E.A. Speed and size of the Sumatra earth quake // Nature. 2005. V. 434. № 7033. P. 581–582.

233. Takemoto S., Araya A., Akamatsu J. et al. A 100 m laser strainmeter system installed in a 1 km deep tunnel at Kamioka, Gifu, Japan // *J. Geodynamics*. 2004. Vol. 38. P. 477-488.
234. Takemoto S., Yamamoto T., Mukai A., Otsuka S., Fujimori K. Crustal strain observation for nine years with a laser strainmeter in Kobe, Japan // *Journal of Geodynamics*. 2003. V. 35. №4-5. P. 483-498.
235. Tanimoto T. The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the Earth // *Geophys. J. Int.* 2005. Vol. 160. P. 276-298.
236. Titov V.V., González F.I., Bernard E.N. et al. Real-time tsunami forecasting: Challenges and solutions // *Natural Hazards*. 2005. V. 35. № 1. P. 41–58.
237. Tompson J., Elgar S., Raubenheimer B., Herbers T. H. C., Guza R.T. Tidal modulation of infragravity waves via nonlinear energy losses in the surfzone // *Geophysical Research Letters*. 2005. vol. 33, 105601, doi:10.1029/2005gl025514.
238. Tsai V.C., Nettles M., Ekström G., Dziewonski A.M. Multiple CMT source analysis of the 2004 Sumatra earthquake // *Geophys. Res. Letters*. 2005. V. 32. № 17. L 17304.
239. Vallée M. Rupture properties of the giant Sumatra earthquake imaged by empirical Green's function analysis // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2007. V. 97. № 1. Part A. Suppl. P. 103–114.
240. W Zürn, AMG Ferreira, R Widmer-Schmidrig, K Lentas, L Rivera, E Clévéde High-quality lowest-frequency normal mode strain observations at the Black Forest Observatory (SW-Germany) and comparison with horizontal broad-band seismometer data and synthetics // *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2015. V.203. №3. P.1787-1803.
241. Webb S.C., Xin Zhang, W. Crawford Infragravity Waves in the Deep Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 1991. V. 96, NO. C2, P. 2723-2736.

242. Yakovenko S.V., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Chupin V.A., Shvets V.A. A hydrophysical laser-interference complex // Instruments and Experimental Techniques. 2016. V. 59. № 2. P. 282-286.

243. Yakovenko S.V., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Plotnikov A.A., Chupin V.A., Shvets V.A. The Primorye-Sakhalin laser-interference system // Measurement Techniques. 2015. V. 58. № 3. P. 314-316.