На правах рукописи

Долгих Станислав Григорьевич

Исследование закономерностей генерации, динамики и трансформации геосферных процессов на границе системы «атмосфера-гидросфера-литосфера» с помощью лазерно-интерференционного комплекса

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Владивосток 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии Наук

Научный консультант:

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится

С диссертацией можно ознакомиться в

Автореферат разослан

Ученый секретарь
Диссертационного совета,

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию волновых полей геосфер низкочастотного звукового и высокочастотного звукового диапазонов, в котором рассматриваются особенности развития и трансформации излучённых гидроакустических гармонических волн на границе «вода-суша» и их взаимодействие с более низкочастотными процессами, закономерности возникновения и развития морских волн гравитационного и инфрагравитационного диапазонов с определением вклада атмосферы, а также «атмосферно-гидросферно-литосферное» взаимодействие в диапазоне короткопериодных морских волн, деформационные проявления идентификационных характеристик цунами. Все экспериментальные результаты получены с помощью лазерно-интерференционного комплекса, состоящего из лазерных деформографов, лазерных нанобарографов и лазерных измерителей вариаций гидросферного давления.

Создание уникальных лазерно-интерференционных комплексов, состоящих из прецизионных лазерных деформографов, лазерных нанобарографов и лазерных измерителей вариаций гидросферного давления, методических основ их применения в качестве сверхчувствительных детекторов геосферных источников низкочастотного звукового и инфразвукового диапазонов, позволило разработать ряд новых методов исследования волновых полей геосфер естественного и искусственного происхождения, отслеживания вероятного их перемещения.

Организация многолетних наблюдений вариаций деформаций земной коры, колебаний атмосферного и гидросферного давлений дала возможность получить ряд новых результатов в диапазоне поверхностных и внутренних морских волн, изучить закономерности динамики и трансформации колебаний и волн широкого диапазона частот, исследовать энергетический вклад гидросферных и атмосферных процессов в литосферные на границе раздела сред.

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 изучения закономерностей возникновения, развития и трансформации геосферных процессов и явлений широкого диапазона частот в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера». Спектр существующих геосферных процессов и явлений крайне широк и, поэтому, в рамках одной работы необходимо ограничиться начальным шагом и рассмотреть закономерности возникновения, развития и трансформации на границе геосфер, колебаний и волн одной

природы, более узкого диапазона частот. На начальном шаге можно ограничиться рассмотрением данных процессов в низкочастотном звуковом диапазоне, в диапазоне гравитационных (ветровых, волн зыби) и инфрагравитационных морских волн, короткопериодных внутренних волн, а также рассмотрением некоторых особенностей нелинейного развития деформационных процессов при землетрясениях, связанных с природой возникновения цунами. Изучение особенностей возникновения, развития и трансформации колебаний и волн низкочастотного звукового диапазона на границе системы «шельф – земная кора» на основе применения низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых приёмных систем необходимо для более точного описания результатов, полученных при исследовании закономерностей возникновения, развития и трансформации более низкочастотных океанологических процессов (например, гравитационных и инфрагравитационных морских волн, короткопериодных внутренних волн и т.п.).

Успешное изучение данных процессов в зоне перехода «атмосфера-гидросфера-литосфера» невозможно без аппаратуры, позволяющей проводить измерения на новом, прецизионном уровне, в широком диапазоне частот. К такому оборудованию, в первую очередь, относятся приборы, созданные на основе современных лазерно-интерференционных методов: 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 10 000 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 исследовании закономерностей возникновения, развития и трансформации колебаний и волн в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» низкочастотного звукового диапазона, диапазона гравитационных и инфрагравитационных морских волн с помощью разработанного и созданного лазерно-интерференционного комплекса.

В связи с этим были сформированы следующие задачи:

1. 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.

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

3. 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».

4. 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».

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

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

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

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

Научная новизна

1. 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.

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

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

4. 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.

5. 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.

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

Основные положения выносимые на защиту

Защищаемые положения:

1. Разработка и создание лазерно-интерференционных комплексов, установленных на берегах Японского и Охотского морей, позволяет изучать взаимодействие геосфер системы «атмосфера-гидросфера-литосфера» на новом прецизионном уровне, практически от 0 Гц до килогерц на уровне фона.

2. Результаты экспериментальных исследований характеристик гидроакустических и сейсмоакустических полей, генерируемых низкочастотными гидроакустическими и сейсмоакустическими излучателями и регистрируемые лазерно-интерференционными приборами, позволяют изучать закономерности трансформации гидроакустических колебаний в сейсмоакустические и воздействие на них более низкочастотных морских волновых процессов на границе «вода-верхний слой земной коры».

3. Установленные закономерности динамики и трансформации ветровых морских волн при их движении по шельфу убывающей глубины позволяют сформулировать новое представление о динамике основных параметров морских ветровых волн, о физике взаимодействия волновых полей океана с литосферой.

4. Применение комплексных лазерно-интерференционных методов исследования природы возникновения и динамики колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн морского и не морского происхождения, дает возможность более точного определения первоисточников разномасштабных геосферных процессов в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера».

5. Выявленная деформационная аномалия на записях лазерных деформографов, обозначающая момент возникновения опасных гидродинамических процессов Земли, способствовала разработке деформационного метода определения цунамигенности землетрясений.

Обоснованность полученных результатов

Обоснованность полученных экспериментальных результатов подтверждается путем многократного и тщательного проведения экспериментов для изучении 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_а «Атмосферно-гидросферно-литосферное взаимодействие в инфрагравитационном диапазоне частот», № 12-05-00180-а «Изучение закономерностей возникновения и развития собственных колебаний Мирового океана, а также их взаимодействия с разномасштабными геосферными процессами», № 12-05-31417-мол_а «Трансформация энергии волн на границе геосфер при разнообразии динамических процессов моря», № 16-29-02023-офи_м. «Разработка технологии томографии земной коры шельфа и глубокого моря на основе применения береговых лазерных деформографов и широкополосных низкочастотных гидроакустических излучателей», гранта РНФ № 14-17-00041. «Изучение физики возникновения, динамики, трансформации и пространственно-временной структуры геосферных процессов инфразвукового диапазона», грантов ДВО РАН. В процессе выполнения работы были созданы лазерно-интерференционные комплексы для мониторинга вариаций деформаций земной коры, атмосферного и гидросферного 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 47 научных трудах.

Личный вклад автора

Выбор научного направления, 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.

Объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 239 наименования. Работа содержит 278 страниц текста, 12 таблиц и 130 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен анализ современного состояния геофизических, атмосферных и гидрофизических установок и комплексов, предназначенных для измерения микродеформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений инфразвукового и звукового диапазонов.

В параграфе 1.1 анализируются установки и комплексы вариаций уровня микродеформаций земной коры инфразвукового и звукового диапазонов. Рассматриваются лазерные интерферометры равноплечего и неравноплечего типов, созданные на основе интерферометров Майкельсона и Фабри-Перо, установленных как в России, так и за рубежом. Отмечено, что большинство лазерных деформографов дополнительно оснащены датчиками атмосферного давления для более точного определения вариаций микродеформаций земной коры.

В параграфе 1.2 анализируются установки и комплексы колебаний атмосферного давления инфразвукового и звукового диапазонов. Рассматриваются волоконно-

оптические, оптоэлектрические, магнитные, емкостные, ртутные, пьезоэлектрические и пьезорезонансные датчики давления. В результате анализа были выявлены основные недостатки всех датчиков, а именно ограниченность динамического диапазона и низкая чувствительность.

В параграфе 1.3 анализируются установки и комплексы колебаний гидросферного давления инфразвукового и звукового диапазонов. Рассматриваются современные гидрофоны, магнитные, индуктивные, емкостные, пьезоэлектрические, пьезорезонансные и резистивные датчики измерения гидростатического давления. Также в параграфе описаны волнографы и мареографы, в состав которых входят, наряду с несколькими гидростатическими датчиками, датчики атмосферного давления и температуры.

В параграфе 1.4 сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе описываются лазерно-интерференционные приборы, входящие в состав лазерно-интерференционных комплексов вариаций микродеформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений инфразвукового и звукового диапазонов.

В параграфе 2.1 описываются принцип действия и функциональная схема однокоординатных и двухкоординатных лазерных деформографов. Все лазерные деформографы собраны на основе современных лазерно-интерференционных методов по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, с использованием в качестве источника света частотно-стабилизированного лазера. В неравноплечих лазерных деформографах существует два плеча: измерительное и эталонное. Длина эталонного плеча колеблется в пределах от 0.2 до 0.3 м, а длина измерительного плеча может быть от нескольких метров до километра. В состав лазерно-интерференционного комплекса, описанного в главе и расположенного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», входят три лазерных деформографа с длинами измерительных плеч 3.5, 17.5 и 52.5 м. Горизонтальный лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 52.5 м ориентирован по линии «север-юг». Второй горизонтальный лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 17.5 м ориентирован по линии «запад-восток». Третий лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 3.5 м является деформографом вертикального типа. Все лазерные деформографы установлены под землей в гидротермоизолированных помещениях. Неравноплечие лазерные деформографы горизонтального типа также были установлены на МЭС СКБ САМИ «м. Свободный» (о. Сахалин), на территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН Приморский край, в г. Соликамске

(Урал), в г. Краснокаменске (Читинская область). На МЭС СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный» установлен неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа с длиной измерительно плеча 10.5 м. На территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН Приморского края установлен неравноплечий горизонтальный лазерный деформограф поверхностного типа с длиной измерительного плеча 18 м. Еще один неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа установлен в г. Соликамске (Урал) на глубине 300 м под землей с длиной измерительного плеча 52.5 м. Неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа установлен в г. Краснокаменске (Читинская область) в шахте на глубине 270 м под землей, длина измерительного плеча прибора 50 м.

В главе отмечено, что в последнее время в качестве источника света в лазерных деформографах используются частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры фирмы Melles Griot. На лазерном деформографе неравноплечего типа, установленном на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» с длиной измерительного плеча 52.5 м, использовался такой частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер, стабильность частоты которого находится на уровне 10^{-9}, которую можно поднять на порядок за счёт лучшей гидротермоизоляции помещения, в котором установлен интерферометр. В дальнейшем оптико-механическая часть данного неравноплечего лазерного деформографа претерпела изменения, а в качестве источника света в нём стали использовать гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер фирмы NEOARK со стабильностью частоты ~ 10^{-12}. Замена лазера и модернизация оптико-механической части прибора позволили создать практически новый лазерный деформограф неравноплечего типа со следующими техническими характеристиками: точность измерения деформации на базе прибора 10^{-12} – 10^{-13}, точность измерения смещения 0.3 пм в том же частотном диапазоне.

Чувствительность лазерных деформографов неравноплечего типа напрямую зависит от долговременной стабильности частоты лазера и шумов фотоэлектронной аппаратуры. В качестве приемника в системе регистрации лазерных деформографов используется фотодиод ФД 24К, предельный порог чувствительности которого определяется дробовым шумом. Установлено, что предельная чувствительность к абсолютным смещениям зеркал в интерферометре Майкельсона, вызванная шумами фотоэлектронной аппаратуры равна около 10^{-13} м, что ниже точности измерения. Ошибки измерения, вызванные сезонными вариациями температуры, давления и влажности для лазерных деформографов поверхностного типа составляют величину порядка $0.8 \cdot 10^{-8}$ м. При изучении колебаний и волн с периодами менее суток ошибка измерений уменьшается на порядок. При установке

лазерных деформографов в термоизолированных помещениях ошибки измерений, вызванные вариациями температуры, давления и влажности уменьшатся еще на 1 – 2 порядка.

Во второй части параграфа 2.1 рассматриваются двухкоординатные лазерные деформографы, которые можно разделить на два типа: с единым основанием интерференционных узлов и с разнесенными интерференционными узлами. Интерференционные узлы с одним основанием могут быть как с единым источником света, так и с различными источниками света. На МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» работает в непрерывном режиме двухкоординатный лазерный деформограф с разнесенными интерференционными узлами. Данная схема расположения приборов вызвана рельефом местности. Двухкоординатный лазерный деформограф состоит из двух неравноплечих лазерных деформографов с взаимно перпендикулярными плечами с ориентацией «север-юг» и «запад-восток» и длинами 52.5 и 17.5 м, соответственно. Синхронные данные с обоих приборов по кабельным линиям поступают в лабораторное помещение, где, после предварительной обработки, записываются на твёрдые носители компьютера.

В параграфе 2.2 описан, созданный на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, лазерный нанобарограф, оптическая схема которого практически идентична оптической схеме равноплечего лазерного деформографа за исключением чувствительного элемента, в качестве которого применяется блок анероидных коробок. Блок состоит из трех анероидных коробок, изготовленных из бериллиевой бронзы диаметром 50 мм и толщиной 0.1 мм. Измерительная часть луча проходит между делительной пластиной и системой «кошкин глаз», состоящей из собирающей линзы и блока анероидных коробок с зеркальным напылением. Применение в качестве источника света частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера фирмы Melles Griot с долговременной стабильностью 10^{-9}, позволяет проводить измерения вариаций атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Ошибка измерений лазерного нанобарографа напрямую зависит от изменения геометрических размеров анероидной коробки, которые могут быть вызваны несколькими причинами: сейсмический шум, изменение влажности и температуры. Расчеты изменения размеров анероидной коробки под воздействием сейсмического шума и влажности показали, что эти параметры вносят пренебрежимо малый вклад в полезный измеряемый сигнал. С учётом того, что лазерный нанобарограф располагается в термоизолированном помещении, где вариации температуры за 30 суток наблюдения составляют величину порядка 0.1℃, в диссертации

показано, что данные вариации температуры не оказывают существенного влияния на показания прибора.

В параграфе 2.3 описываются, созданные на основе модифицированного интерферометра Майкельсона, лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны, оптические схемы которых очень похожи на схему лазерного нанобарографа, за исключением чувствительного элемента. В качестве чувствительного элемента в них применяется металлическая мембрана, жестко закрепленная с торца прибора. С внутренней стороны на мембрану падает луч лазера на закреплённое на ней зеркало, входящее в состав интерферометра Майкельсона, а на внешнюю сторону мембраны воздействуют вариации давления гидросферы, смещая ее центр, которое и фиксируется лазерным интерферометром, расположенным внутри прибора. В качестве источников света в лазерных измерителях вариаций давления гидросферы используются частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры фирмы Melles Griot с долговременной стабильностью 10^{-9}, что позволяет проводить измерения вариаций гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа.

В настоящее время создано несколько модификаций данного прибора. С целью улучшения характеристик интерферометра, используемого в лазерных измерителях вариаций гидросферного давления, с точки зрения вибро- и удароустойчивости, увеличения времени работы без подстройки интерференции, упрощения настройки оптической части прибора, была разработана гибридная схема прибора, в которой вместо делительной пластины применяется делительный куб, что позволило повысить желаемые характеристики. Для исключения возможного влияния температуры на работоспособность прибора разработана система механической компенсации температурного воздействия. В данной схеме вместо оптической скамьи применяются стержни из инвара, коэффициент температурного расширения которого более чем в десять раз меньше, чем у нержавеющей стали. Оптическая часть прибора построена таким образом, что увеличение геометрических размеров креплений элементов оптической части лазерного интерферометра компенсировалось увеличением геометрических размеров других элементов. Применение механической системы компенсации температурного воздействия позволило продлить работу лазерного измерителя вариаций давления гидросферы без подстройки интерференции. С целью уменьшения габаритов и массы прибора был создан мобильный лазерный измеритель вариаций давления гидросферы. Его конструктивными особенностями являются новая схема расположения оптических элементов на скамье и модернизированный корпус прибора, который изготовлен из нержавеющей стали с

крышками с обоих сторон. На одной крышке расположен интерференционный узел, а на другой расположена система регистрации прибора с блоком питания лазера.

Большие геометрические размеры прибора и его существенный вес привели к созданию ряда приборов под общим названием «лазерный гидрофон». Существенным отличием их от лазерных измерителей вариаций давления гидросферы является применение в качестве источника света полупроводникового лазера, который позволил в несколько раз уменьшить габариты и вес прибора, а также существенно сократить энергопотребление. В лазерных гидрофонах была применена схема равноплечего интерферометра Майкельсона, что позволило повысить точность измерения до $2.4 \cdot 10^{-2}$ Па в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц. Созданный новый лазерный гидрофон на основе применения в качестве источника света частотно-стабилизированного полупроводникового зеленого лазера LCM-S-111 с длиной волны 532 нм способен регистрировать вариации давления гидросферы в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0.5 мПа.

В параграфе 2.4 описываются лазерно-интерференционные комплексы, созданные на берегах Японского и Охотского морей. На берегу Японского моря на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» создан лазерно-интерференционный комплекс для мониторинга атмосферных процессов на границе раздела системы «атмосфера-гидросфера-литосфера», в состав которого входят неравноплечие лазерные деформографы горизонтального типа с длиной измерительного плеча 52.5 и 17.5 м и ориентацией «север-юг» и «запад-восток», соответственно, неравноплечий лазерный деформограф вертикального типа с длиной измерительного плеча 3.5 м для измерения вариаций микродеформаций верхнего слоя земной коры, лазерный нанобарограф для измерения вариаций атмосферного давления, лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны для измерения вариаций гидросферного давления. Наряду с лазерно-интерференционными приборами в состав комплекса входят: GPS приемник Trimble 5700, широкополосный сейсмограф Guralp CMG-3ESPB, метеостанция Aanderaa, гидрологический зонд RBR_XR-620, гидрологический зонд Aanderaa, вертикальная цифровая термокоса, профилограф ADP (SY-51208); гидроакустические излучатели, низкочастотный сейсмоакустический излучатель. Данные со всех измерительных приборов по кабельным линиям поступают в лабораторное помещение для предварительной обработки, накопления и передачи по сети ДВО РАН в институт. Лабораторное помещение оборудовано системой бесперебойного питания измерительных приборов, обеспечивающей их непрерывную работу в аварийном режиме энергопитания до 1 суток.

На берегу Охотского моря на базе СКБ САМИ ДВО РАН «м. Свободный» о. Сахалина создан лазерно-интерференционный комплекс для мониторинга геосферных процессов на границе раздела системы «атмосфера-гидросфера-литосфера», в состав которого входят неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа с длиной измерительного плеча 10.5 м и ориентацией «север-юг» для измерения вариаций микродеформаций верхнего слоя земной коры, лазерный нанобарограф для измерения вариаций атмосферного давления. Оба прибора расположены в термоизолированном помещении. В состав комплекса также входят лазерный гидрофон для измерения вариаций гидросферного давления, GPS-приёмник Trimble 5700, метеостанция. Данные со всех приборов поступают в лабораторное помещение для предварительной обработки и накопления. Лабораторное помещение оборудовано системой бесперебойного питания измерительных приборов, позволяющей обеспечить их непрерывную работу в аварийном режиме энергопитания до 4 ч.

В параграфе 2.5 приведены основные результаты 2 главы, которые кратко описывают: 1) созданные на основе современных лазерно-интерференционных методах лазерные деформографы горизонтального и вертикального типов, лазерные нанобарографы, лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны; 2) лазерно-интерференционные комплексы, созданные на берегах Японского и Охотского морей, в состав которых входят различные лазерно-интерференционные приборы и вспомогательная аппаратура для мониторинга геосферных процессов на границе раздела системы «атмосфера-гидросфера-литосфера».

В третьей главе рассмотрены результаты гидроакустических исследований, выполненных на границе системы «атмосфера-гидросфера-литосфера» с помощью лазерно-интерференционного комплекса.

В параграфе 3.1 рассматриваются экспериментальные исследования закономерностей распространения и трансформации гидроакустических колебаний на границе «вода-дно». В ходе исследований был проведен ряд экспериментов в 2004, 2009 и 2015 годах с применением неравноплечих лазерных деформографов различной ориентации и длины, лазерных измерителей вариаций давления гидросферы и низкочастотных гидроакустических излучателей на лазерно-интерференционном комплексе «м. Шульца». В первом эксперименте, проведённом в 2004 году, работы выполнялись с борта маломерного судна с применением гидроакустических излучателей, работающих на частотах 30 – 40 и 240 – 270 Гц. Для регистрации сейсмоакустических волн использовался 52,5-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа ориентацией «север-юг»

(рисунок 1 точка ЛД). В ходе эксперимента излучение низкочастотных гидроакустических колебаний проводилось на восьми станциях, причем на станциях 1 и 2 судно стояло на якоре, а на станциях 3 – 8 находилось в дрейфе (рисунок 1). На станции 1 излучение проводилось на глубинах 5, 12 и 22 м с одинаковой мощностью излучения, на станции 2 излучение проводилось на глубинах 5 и 12 м. На станциях 3, 5 и 7 излучение проводилось на глубине 5 м, а на станциях 4, 6 и 8 на глубине 21 м. На станции 1 на глубине 5 м излучался тоновый сигнал на частоте 32,2 Гц, на глубине 12 м излучался тоновый сигнал на частоте 32 Гц, на глубине 22 м излучался тоновый сигнал на частоте 36 Гц. Мощность излучения на всех глубинах была одинакова. На рисунке 2 (верхний) представлена динамическая спектрограмма участка записи неравноплечего лазерного деформографа в момент работы гидроакустического излучателя на станции 1. Начало и конец приема сейсмоакустического сигнала на спектрограмме обозначены стрелками.

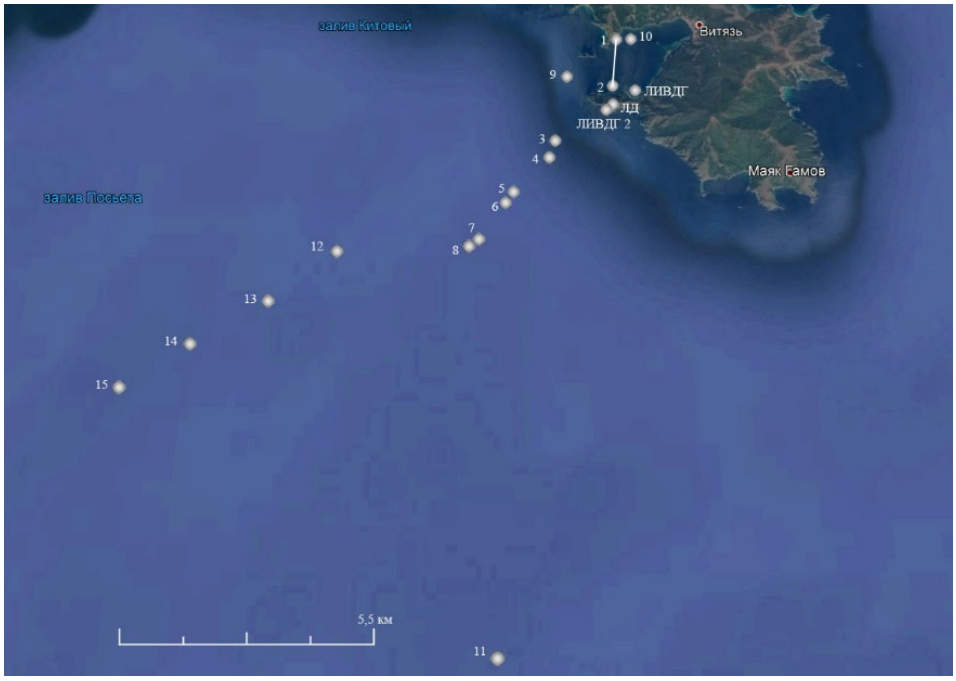

Рисунок 1 – Расположение станций гидроакустического излучения и места постановки приемных систем при выполнении экспериментальных работ в 2004, 2009 и 2015 годах

При анализе полученных результатов в главе отмечено, что при одинаковой мощности излучения наибольший уровень сигнала наблюдается при работе гидроакустического излучателя, погруженного на глубину 12 м. Аналогичная ситуация наблюдалась и в момент работы излучателя на станции 2.

При выполнении экспериментальных работ были проведены исследования по обнаружению возможного влияния низкочастотных гидрофизических процессов на излучённый гидроакустический сигнал, результаты которых рассмотрены в главе. В ходе эксперимента проведено гидроакустическое излучение тонального сигнала при движении судна по оси неравноплечего лазерного деформографа ориентации «север-юг» от станции 2 к станции 1. Низкочастотный гидроакустический излучатель был опущен на глубину 15 м с борта катера, двигающегося поперек бухты. В начальной точке излучения расстояние от излучателя до лазерного деформографа составляла 656 м при глубине моря 20.1 м, а в конечной точке расстояние составляло 1718 м при глубине моря 26.6 м. Средняя скорость движения катера составила 0.3 м/с. На рисунке 2 (нижний) приведена динамическая спектрограмма записи неравноплечего лазерного деформографа в момент работы излучателя, где стрелками обозначено начало и конец работы. При спектральной обработке зарегистрированного лазерным деформографом гидроакустического сигнала было обнаружено, что он модулирован колебанием с периодом около 17 мин, соответствующим сейшам б. «Витязь».

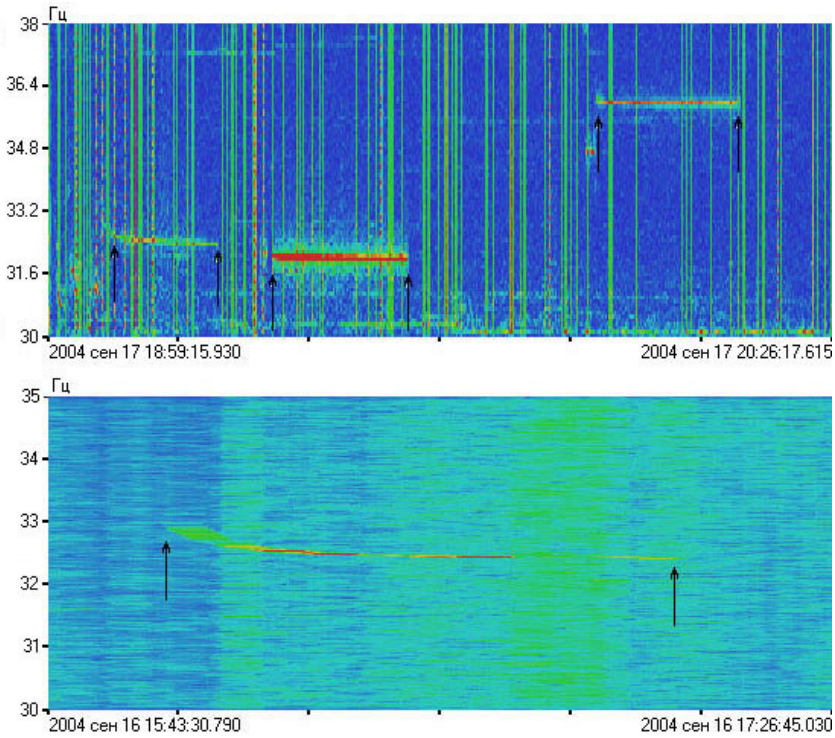

Рисунок 2 – Динамическая спектрограмма записи лазерного деформографа в момент работы гидроакустического излучателя

Во втором эксперименте, проведённом в 2009 году, работы выполнялись с борта маломерного судна с применением гидроакустического излучателя, работающего на частотах 30 – 40 Гц. Для регистрации сейсмоакустических и гидроакустических волн использовался 52.5-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа ориентацией «север-юг» (рисунок 1 точка ЛД) и лазерный измеритель вариаций давления гидросферы (рисунок 1 точка ЛИВДГ). Лазерный деформограф установлен на высоте около 60 м над уровнем моря, а лазерный измеритель вариаций давления гидросферы был установлен в бухте Витязь на расстоянии 200 м от берега на глубине 15 м. В ходе эксперимента излучение низкочастотных гидроакустических сигналов проводилось на двух станциях (рисунок 1). Расстояние от станции 9 до лазерного деформографа составляет около 1.5 км, а до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы около 1.8 км. Расстояние от станции 10 до лазерного деформографа составляет около 2.2 км, а до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы около 1.6 км. Причем станция 9 находилась вне бухты Витязь и была отделена от лазерного измерителя вариаций давления гидросферы частью суши, а станция 10 располагалась в бухте Витязь в прямой видимости от лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. Излучение проводилось на глубинах 5 и 15 м на обоих станциях на частоте 33 Гц с одинаковой мощностью. На рисунке 3 приведены динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (в) в момент работы гидроакустического излучателя на станции 9, лазерного деформографа (б) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (г) в момент работы гидроакустического излучателя на станции 10. Стрелками обозначено начало и окончание работы излучателя. Первый сигнал соответствует излучению на глубине 5 м, а второй на глубине 15 м.

На динамических спектрограммах записей лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы видно, что при одинаковой мощности излучения амплитуда принимаемого сигнала, при излучении на глубине 15 м больше, чем при излучении на глубине 5 м. При рассмотрении отношения амплитуды выделенного гидроакустического сигнала к фоновым колебаниям (при излучении на станции 9), установлено, что оно больше для данных лазерного деформографа, чем для данных лазерного измерителя вариаций гидросферного давления, что связано с расположением измерительных приборов. Расстояние от гидроакустического излучателя до лазерного деформографа меньше, чем до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. А также то, что на линии от станции 9 до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы нет прямой видимости, трасса преграждается участком суши. При рассмотрении отношения амплитуды выделенного гидроакустического сигнала,

излучённого гидроакустическим излучателем на станции 10 к фоновым колебаниям было выявлено, что для лазерного деформографа оно меньше, чем для лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. Расстояние от гидроакустического излучателя до лазерного деформографа больше, чем до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы.

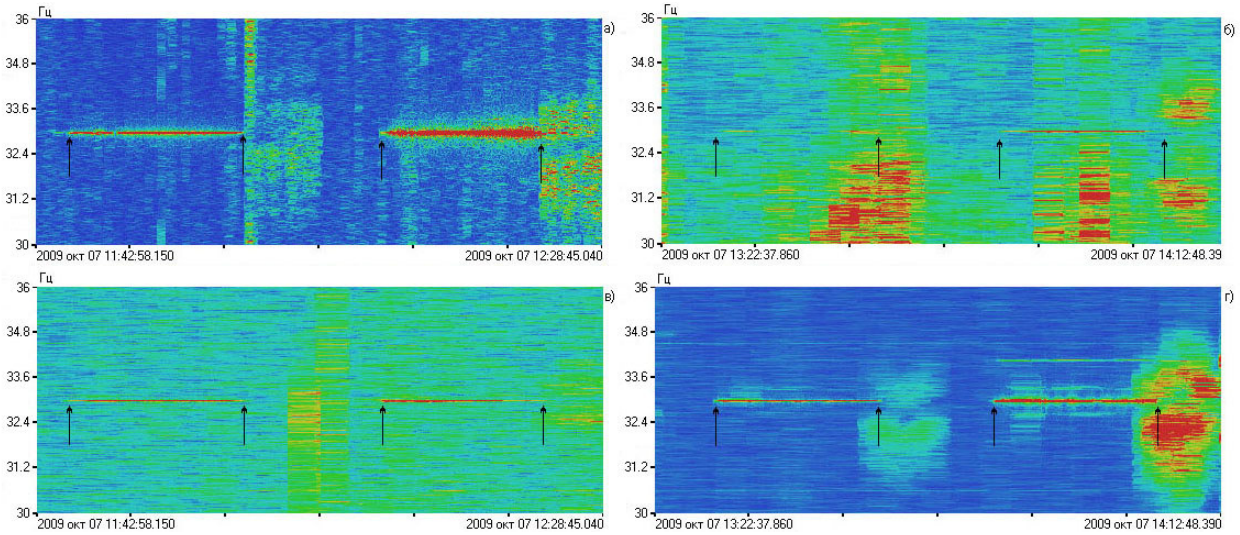

Рисунок 3 – Динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (а и б) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (в и г) в момент работы гидроакустического излучателя

При проведении конкретного эксперимента излучаемая мощность поддерживалась на одном уровне, хотя от эксперимента к эксперименту это не выполнялось. Поэтому невозможно объективно сравнить экспериментальные данные, полученные в различные годы. Но, тем не менее в рамках одного конкретного эксперимента это можно сделать. При анализе каждого конкретного эксперимента установлено, что при работе гидроакустического излучателя на глубинах 12 – 15 м излучённые им гидроакустические волны наиболее эффективно трансформируются в сейсмоакустические волны, регистрируемые лазерным деформографом.

В третьем эксперименте, проведённом в 2015 году, работы выполнялись с применением гидроакустических излучателей с центральной частотой излучения 22 и 33 Гц, неравноплечего лазерного деформографа с ориентацией «север-юг» и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. На рисунке 1 точкой ЛД показано место постановки лазерных деформографов, точкой ЛИВДГ 2 место постановки лазерного

измерителя вариаций давления гидросферы, точками 11 – 15 обозначены станции работы гидроакустического излучателя. На станции 11 работы велись с помощью гидроакустического излучателя с центральной частотой 22 Гц, на станциях 12 – 15 работы велись с помощью гидроакустического излучателя с центральной частотой 33 Гц. В качестве приемных систем использовались неравноплечие лазерные деформографы с длинами измерительных плеч 52.5 и 17.5 м и ориентацией «север-юг» и «запад-восток», соответственно, и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, установленного на шельфе на глубине 33 м.

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

При выполнении работ на станциях 12 – 15 работы велись с помощью гидроакустического излучателя с максимальной мощностью на частоте 33 Гц. В ходе работы излучатель выдавал сигнал, состоящий из тонального сигнала и М-последовательности. На всех станциях излучатель погружался на глубину 15 м, мощность гидроакустического сигнала была одинакова.

При рассмотрении сигналов неравноплечего лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией «север-юг» и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в момент работы гидроакустического излучателя на станциях 12 – 15 были обнаружены сигналы на частоте 33 Гц, соответствующей частоте излучения.

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.

В параграфе 3.2 рассматриваются результаты экспериментальных исследований по изучению закономерностей распространения и трансформации сейсмоакустических колебаний на границе суша-вода. В ходе изучения был проведен ряд экспериментов в 2007 и 2016 годах по генерации упругих волн в земной коре низкочастотным сейсмоакустическим излучателем и их приему 52.5-метровым лазерным деформографом ориентации «север-юг» на берегу, а также приёму гидроакустических волн, возникающих в результате трансформации упругих волн на границе дно-вода, лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. В первом эксперименте, проведённом в мае 2007 года, низкочастотный сейсмоакустический излучатель был установлен в 100 м от лазерного деформографа под углом 25° относительно его главной оси и в 320 м от лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, установленном на шельфе Японского моря на глубине 27 м. В ходе эксперимента частота излученного сигнала менялась скачками и плавно в частотном диапазоне от 13 до 19 Гц.

Излученный сигнал синхронно регистрировался лазерным деформографом и лазерным измерителем вариаций давления гидросферы. Было выбрано несколько участков синхронных записей измерительных приборов. На рисунке 4 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 различных частотах.

Во втором эксперименте, проведённом в октябре 2016 года, низкочастотный сейсмоакустический излучатель был жестко закреплен к бетонной плите, установленной на берегу б. Витязь. Расстояние от сейсмоакустического излучателя до лазерного деформографа было около 680 м, а до лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, установленном на дне б. Витязь на глубине 12 м, около 160 м.

На динамических спектрограммах записей лазерного деформографа (рисунок 5 верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 5 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 спектрах записей приборов выделяется два пика с частотами 13.02 и 13.12 Гц.

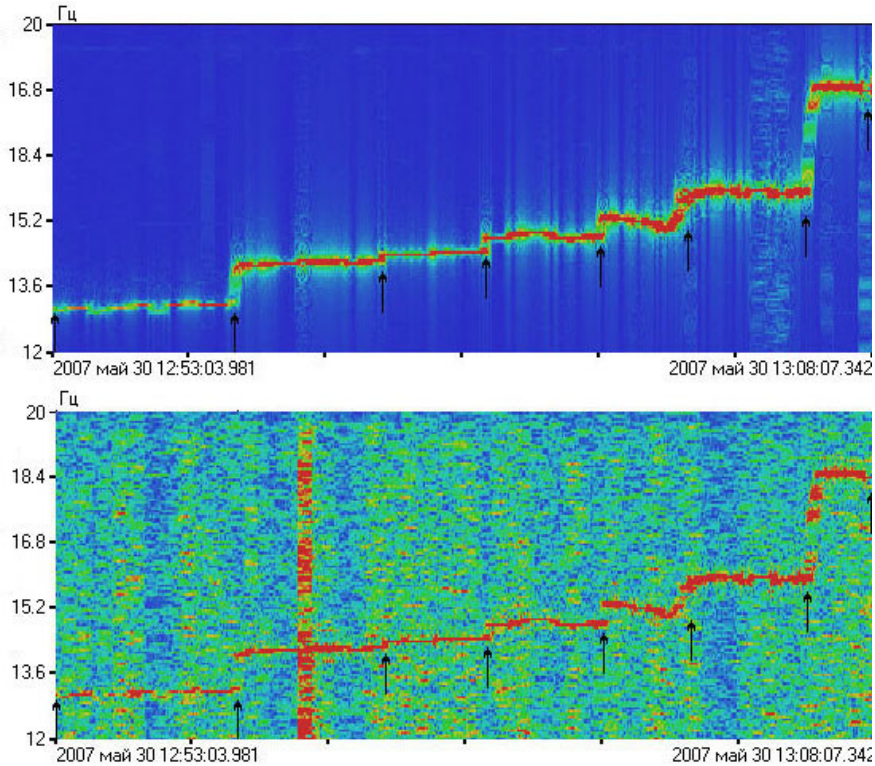

Рисунок 4 – Динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы сейсмоакустического излучателя.

В дальнейшем по полученным экспериментальным данным неравноплечего лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы были выполнены оценки сейсмоакустической и гидроакустической энергий. Среднюю по времени плотность энергии упругой волны с учетом диаграммы направленности лазерного деформографа можно записать в виде:

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

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

Плотность энергии гидроакустической гармонической волны можно записать в виде:

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

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

Из анализа полученных экспериментальных данных лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в момент работы сейсмоакустического излучателя при $\Theta = 25^{\circ}$, $\rho = 2000$ кг/м^3 следует, что около 0.3% энергии упругих волн трансформируется в энергию гидроакустической волны. При подстановке в расчеты ρ с более высокими значениями данное процентное отношение пропорционально уменьшается.

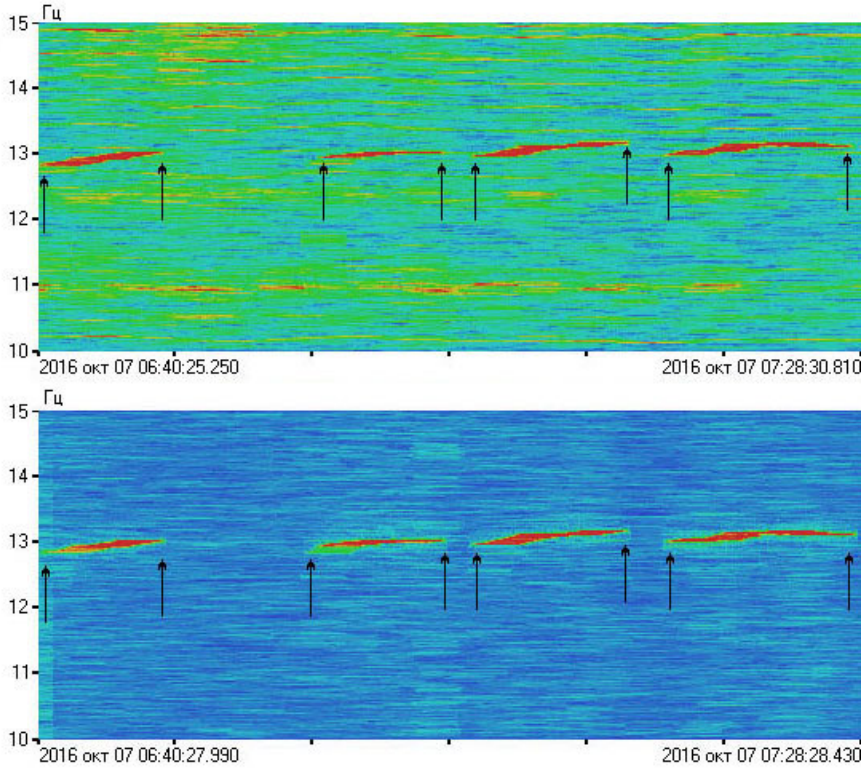

Рисунок 5 – Динамические спектрограммы записей лазерного деформографа (верхний) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний) в момент работы сейсмоакустического излучателя.

В параграфе 3.3 рассматривается вопросы взаимодействия излучённых гидроакустических волн с ветровыми морскими волнами. С целью изучения возможного взаимодействия в октябре 2007 года был проведен эксперимент в б. Витязь с применением в качестве приемной системы лазерного гидрофона, а в качестве излучающей системы – низкочастотного гидроакустического излучателя, работающего на частоте 245 Гц. Лазерный гидрофон был установлен на глубину 17.5 м, а гидроакустический излучатель

работал в непрерывном режиме на удалении 1000 м от лазерного гидрофона на глубине 10 м при глубине моря в данной точке 25 м.

При изучении взаимодействия низкочастотных гидроакустических волн с ветровыми морскими волнами были выполнены оценки применимости прямых и параметрических методов. Рабочий диапазон частот лазерного гидрофона позволяет независимо рассматривать вариации гидросферного давления, вызванные морскими ветровыми волнами и излученными гидроакустическими волнами. Показано, что применимость прямых методов даёт выигрыш в несколько порядков по сравнению с параметрическими методами.

С целью изучения воздействия ветровых волн на распространяющийся излучённый гидроакустический сигнал был проведён анализ участков записей лазерного гидрофона до и после обработки, динамических спектрограмм и спектров записей лазерного гидрофона. На рисунке 6 слева приведены (сверху вниз) запись исходного ряда, его динамическая спектрограмма и спектр исходной записи лазерного гидрофона, а справа приведены ряд после обработки, его динамическая спектрограмма и спектр обработанного участка записи лазерного гидрофона.

На исходном ряде (рисунок 6 а) лазерного гидрофона видно ветровое волнение с периодом 7.28 с. На динамической спектрограмме и спектре (рисунок 6 в и д) выделяется сигнал гидроакустического излучателя на частоте 244.81 Гц. На рисунке 6б приведён график изменения амплитуды гармоники на частоте излучённого сигнала, выделенной из записи лазерного гидрофона. Спектральная обработка участка записи в области излученного сигнала показала наличие двух пиков на частотах 244.66 и 244.95 Гц (рисунок 6 г и е). Появление двух пиков на этих частотах, согласно [Рутенко А.Н. Акустический журнал. 1997. Тот 43. №1], можно объяснить модулирующим воздействием более низкочастотных волн с периодами 6.54 и 7.30 с, что близко к периоду основного ветрового волнения.

Для исключения влияния низкочастотных спектральных составляющих на высокочастотные составляющие, был отфильтрован исходный ряд высокочастотным фильтром Хэмминга с граничной частотой 200 Гц. В спектре отфильтрованного ряда на частоте ветрового волнения обнаружен максимум с амплитудой в четыре раза меньше исходной, а на частоте излученного сигнала обнаружен максимум с той же амплитудой. При выделении сигнала на частоте излучения и анализе вариаций его амплитуды, на спектрах обнаружены максимумы на частотах 244.66, 244.81 и 245.06 Гц, но их амплитуды

почти на четыре порядка меньше, чем в предыдущем случае. При повторной фильтрации не обнаружено максимумов на частоте ветрового волнения, а максимум излученного сигнала остался без изменений. Затем был выделен сигнал на частоте излучаемого сигнала и проанализировано изменение его амплитуды со временем. На спектре выделяются три максимума с теми же частотами, но их амплитуды находятся на уровне шумовых компонент спектра.

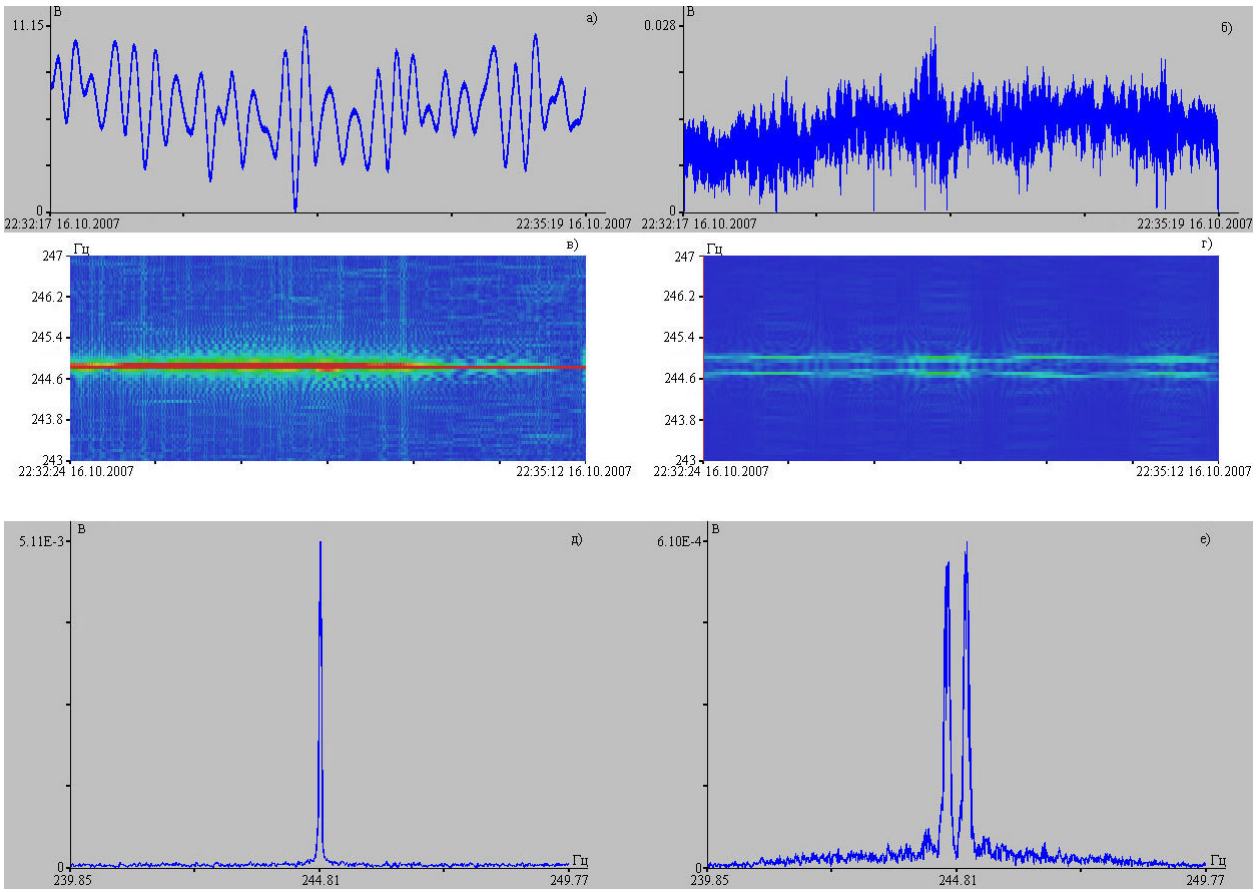

Рисунок 6 – Участки записей лазерного гидрофона исходного ряда (а) и после обработки (б), динамические спектрограммы исходного сигнала гидроакустического излучателя (в) и после обработки (г), спектрограммы записей лазерного гидрофона исходного сигнала (д) и после обработки (е) во время проведения экспериментальных работ

Если бы мы не фильтровали ряды данных высокочастотным фильтром Хэмминга с частотой среза 200 Гц, то можно было бы говорить о влиянии ветрового волнения на параметры излученного сигнала. Но дальнейшая фильтрация исходного ряда высокочастотным фильтром указывает на то, что никакой модуляции нет, а присутствует

“эффект обработки”, связанный с влиянием низкочастотной спектральной составляющей на высокочастотную часть спектра в области излученного сигнала.

Для проверки этого утверждения был построен модельный ряд, состоящий из двух гармоник, не связанных друг с другом, и амплитудами равным величинам экспериментальных амплитуд. При проведении обработки в соответствии с вышеуказанной методикой обработки установлено, что в пределах ошибок обработки никакого воздействия ветрового волнения на параметры распространяющегося гидроакустического сигнала нет.

В параграфе 3.4 приведено краткое описание основных результатов 3 главы, которые сводятся к следующему: 1) применение лазерно-интерференционных приборов, гидроакустических и сейсмоакустических излучателей позволили изучить трансформацию волн низкочастотного звукового диапазона и высокочастотного инфразвукового диапазона на границе «вода-дно»; 2) определено наиболее эффективное соотношение длины волны излучаемого гидроакустического сигнала к его заглублению, вызывающее наиболее мощные сейсмоакустические волны, регистрируемые лазерными деформографами; 3) около 0.3 % энергии излучённых сейсмоакустических поверхностных волн переходит в энергию гидроакустических волн на частоте излучённого сигнала; 4) цикл натурных и модельных экспериментов установил, что морские ветровые волны не оказывают модулирующего воздействия на распространяющиеся гидроакустические волны с частотами около 32, 245 и 321 Гц; 5) сейши оказывают модулирующее воздействие на распространяющиеся излучённые гидроакустические волны.

В четвертой главе приведены результаты исследований природы возникновения, развития и трансформации колебаний и волн ветрового и инфрагравитационного диапазонов.

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

Анализ динамических спектрограмм записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, а также графика изменения скорости ветра в районе бухты Витязь за август 2011 года показали, что ветровое волнение с периодами от 5 до 10 с не так сильно зависит от скорости и направления ветра, как ветровое волнение с периодами от 2 до 5 с. Для примера на рисунке 7 приведены динамические спектрограммы участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а), мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б) и график скорости ветра (в). Из динамических спектрограмм видно, что ветровое волнение с периодом от 2 до 5 с возникает не сразу, а при воздействии на водную поверхность ветра определенного направления. Так в процессе смены направления ветра и последующего его усиления возникает ветровое волнение с периодом около 2.8 с, которое по истечении некоторого времени развивается до волнения с периодом 4.2 с. Последующее усиление ветра привело к увеличению интенсивности и периода ветрового волнения. Ветровое волнение в диапазоне периодов от 5 до 10 с присутствует на всем участке записи. Изменение направления ветра также влияет на ветровое волнение в диапазоне периодов от 2 до 5 с. Так при анализе динамических спектрограмм участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы установлено, что в моменты присутствуя умеренного ветра северного направления ветровое волнение есть, а когда ветер меняет направление на южное, то ветровое волнение в диапазоне периодов от 2 до 5 с постепенно затухает.

Анализ данных за январь 2012 года показал, что ветровое волнение с периодами от 2 до 5 с принадлежит ветровому волнению, возникающему в б. Витязь. На динамической спектрограмме участка записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, приведенной на рисунке 8, в начальный и конечной части присутствует ветровое волнение с периодом от 3.5 до 4 с, а в остальной части его нет. При этом сила ветра оставалась неизменной, менялось только его направление с северо-западного на северо-восточное. Это и привело к тому, что ледяной покров «пригнало» в бухту, а затем разломало и «выгнало» из бухты. В момент времени, когда водная поверхность над прибором была покрыта льдом ветрового волнения с периодом от 3.5 до 4 с не наблюдалось, а когда над прибором открылась вода, прибор стал регистрировать ветровое волнение в данном диапазоне периодов. Ветровое волнение с периодом около 10 с регистрировалось на протяжении всего времени, даже когда водная поверхность бухты была скованна льдом.

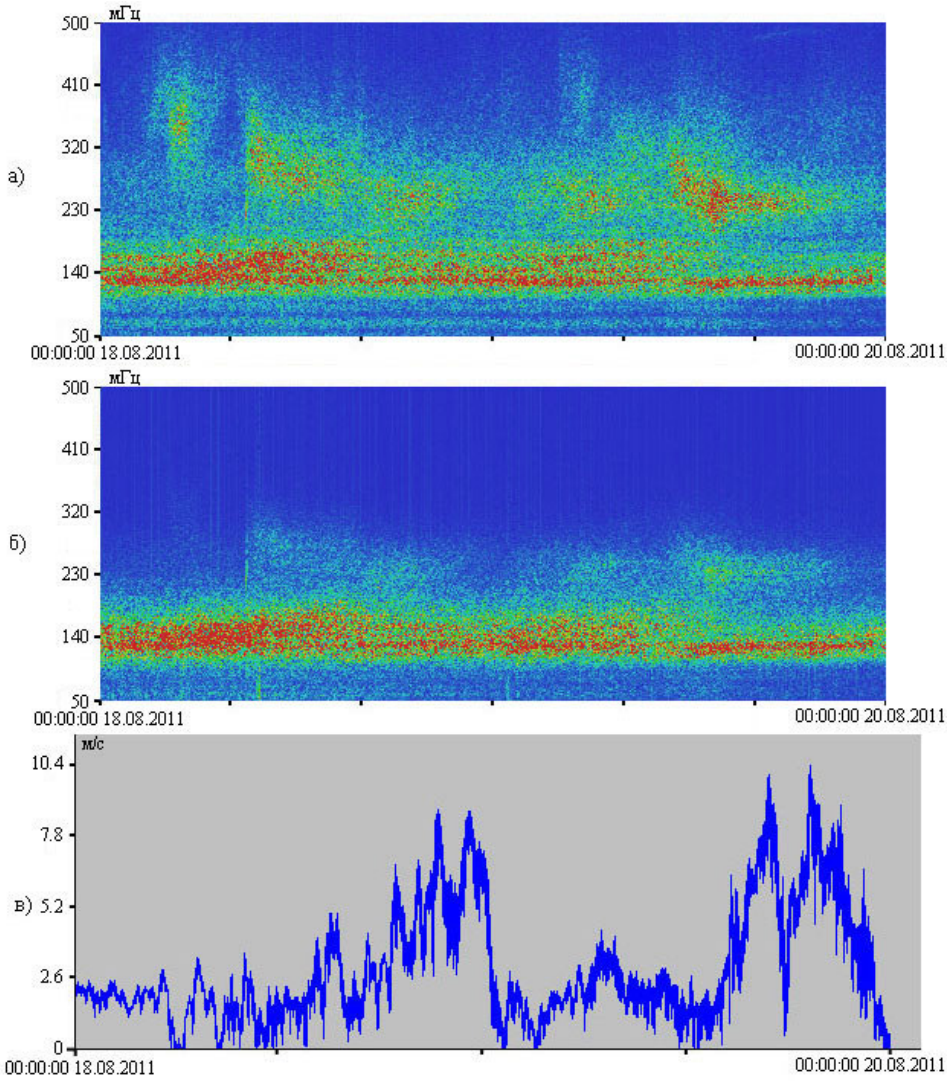

Рисунок 7 – Динамические спектрограммы участков записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а), мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (б) и график изменения скорости ветра (в).

При анализе данных лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и мобильного лазерного измерителя вариаций гидросферы за август 2011 года основное внимание уделялось динамике ветрового волнения открытой части Японского моря. В результате было выявлено, что периоды и амплитуды ветрового волнения уменьшаются при уменьшении глубины. В диапазоне глубин от 11.8 до 4.5 м ветровая волна взаимодействует с дном, отдавая часть своей энергии верхнему слою земной коры. Данный процесс наблюдался не только при значительных амплитудах, но и при малых амплитудах. При распространении ветрового волнения на исследуемом участке средний процент изменения периодов ветрового волнения в диапазоне от 5 до 6 с составляет около 6 %, а

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

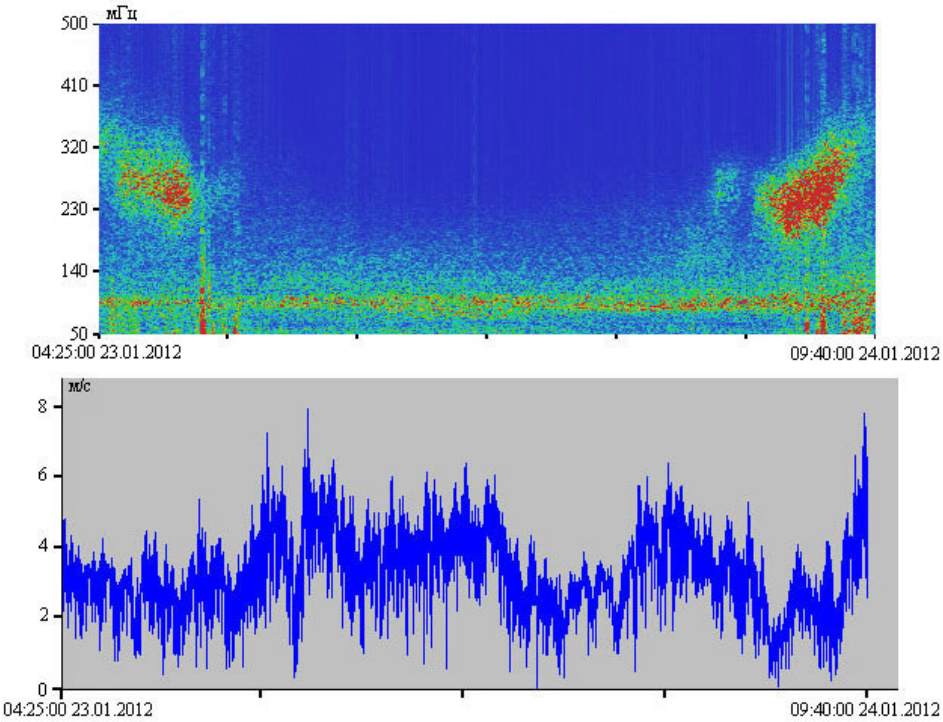

Рисунок 8 – Динамическая спектрограмма участка записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (верхний) и график изменения скорости ветра (нижний).

В параграфе 4.2 исследуется природа возникновения и динамики колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн. При анализе экспериментальных данных лазерного деформографа, начиная с 2000 года, основной акцент делался на изучение соотношения амплитуд инфрагравитационных волн и амплитуд компонент морского волнения в зоне перехода «гидросфера-литосфера». Анализ данных показал зависимость от погодных условий и морского волнения спектральных составляющих в диапазоне периодов от 25 до 50 с. Так в безветренную погоду над значительной акваторией вблизи м. Шульца, где установлен лазерный деформограф, данные колебания не наблюдались. Связь данных колебаний с поверхностным ветровым волнением Японского моря и диапазон периодов позволяют отнести их к инфрагравитационным волнам.

При обработке данных гидрофона было установлено, что ветровые волны, входящие в прибойную зону, сильно модулированы по амплитуде (рисунок 9 нижний). Гидрофон был установлен в прибойной зоне недалеко от 52.5-метрового лазерного деформографа. При

обработке данных 52.5-метрового неравноплечего лазерного деформографа были обнаружены микросейсмы, вызванные этим поверхностным волнением (рисунок 10 верхний). Период модуляции и ее глубина определяют период и амплитуду инфрагравитационных волн.

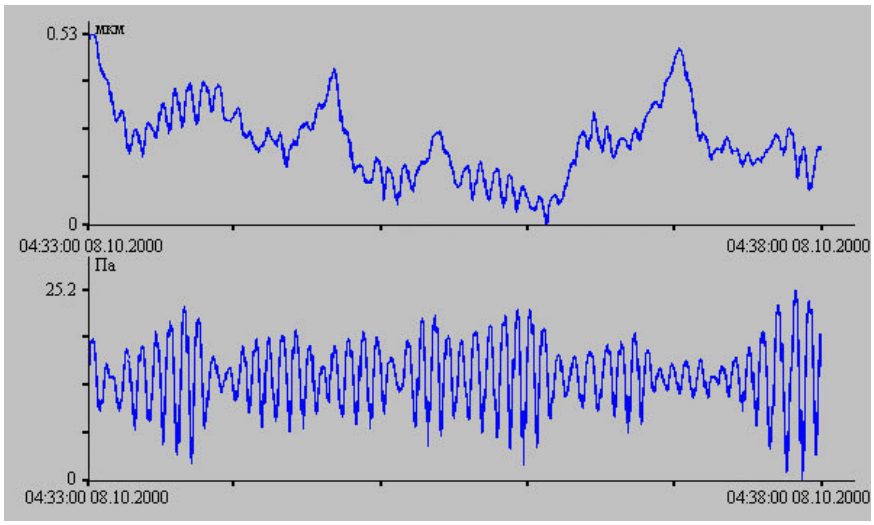

Рисунок 9 – Синхронные участки записей берегового лазерного деформографа (верхний) и гидрофона (нижний), установленного в прибойной зоне

Анализ спектрограмм участков записей лазерного деформографа за разные периоды времени, содержащих инфрагравитационные и гравитационные волны, показал, что периоды инфрагравитационных волн остаются неизменными, в то время как периоды прогрессивных и стоячих гравитационных волн могут меняться. На рисунке 10 (верхний) приведена динамическая спектрограмма участка записи 52,5-метрового неравноплечего лазерного деформографа за октябрь 2000 года. При анализе экспериментальных данных было установлено, что период прогрессивных волн последовательно возрастает с 4.3 до 5.4 с, период стоячих волн возрастает с 2.4 до 2.7 с, а период инфрагравитационных волн остается практически неизменным и равным 42 с. Анализ спектров записи неравноплечего лазерного деформографа показывает, что амплитуды инфрагравитационных волн сравнимы с амплитудами гравитационных волн (рисунок 10 нижний).

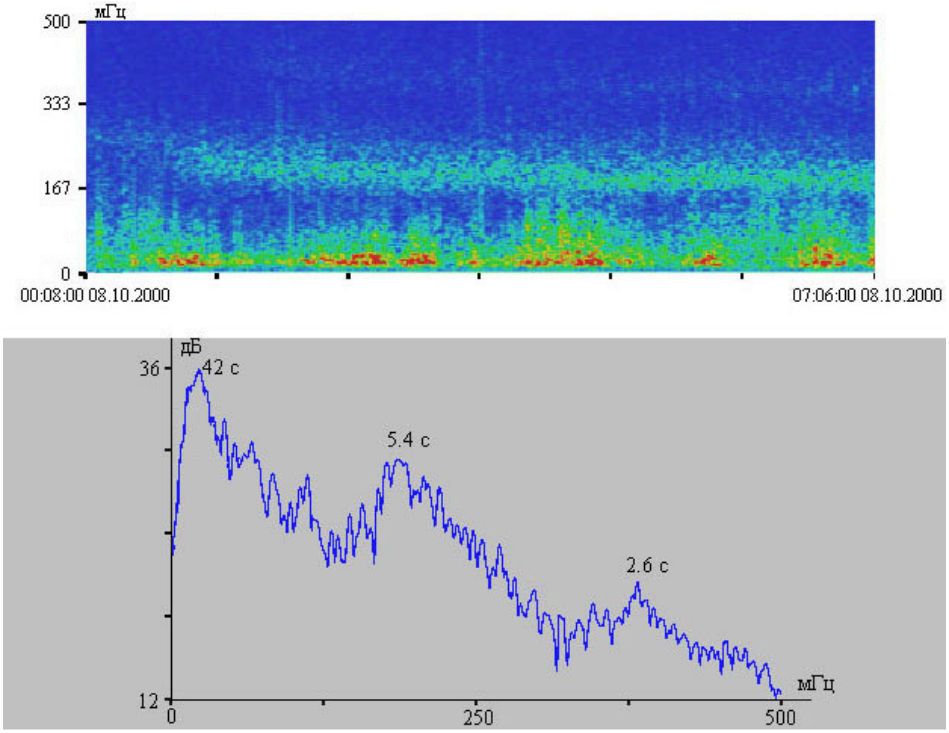

Рисунок 10 – Динамическая спектрограмма (верхний) и спектр (нижний) записи лазерного деформографа за октябрь 2000 года.

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

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

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

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

Анализ экспериментальных данных лазерного нанобарографа и лазерных деформографов показал наличие цуга волн схожего с цугом волн, зарегистрированного термогирляндой. На рисунке 11 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.

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

Для точной оценки первоисточника тех или иных колебаний в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» учет вклада вариаций давления атмосферы в микродеформации земной коры очень важен. Анализ синхронных данных вариаций атмосферного давления и вариаций микродеформаций земной коры с последующим вычитанием вклада атмосферы в уровень деформации позволяет выделить тонкие литосферные процессы, «замаскированные» атмосферой. Как показано в диссертации для оценки вклада вариаций атмосферного давления в вариации уровня деформаций земной коры необходимо по синхронным данным лазерного нанобарографа и лазерного деформографа вычислить передаточный коэффициент. Для этого были выбраны часовые синхронные участки записей лазерного нанобарографа и лазерного деформографа, где график изменения атмосферного давления совпадает с графиком изменения верхнего слоя земной коры. Всего

было проанализировано более пятидесяти таких участков. Получили, что для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 м и ориентацией «запад-восток» он равен 0.08 мкм/Па, а для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией «север-юг» он равен 0.203 мкм/Па. Различие передаточных коэффициентов объясняется особенностями установки лазерных деформографов. Устои лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17.5 м расположены на суглинке, так же, как и один устой лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м. Второй устой лазерного деформографа с длиной измерительного плеча расположен на скальной породе. Величины этих коэффициентов зависят от времени года, насыщенности водой пород, на которых установлены лазерные деформографы и других факторов.

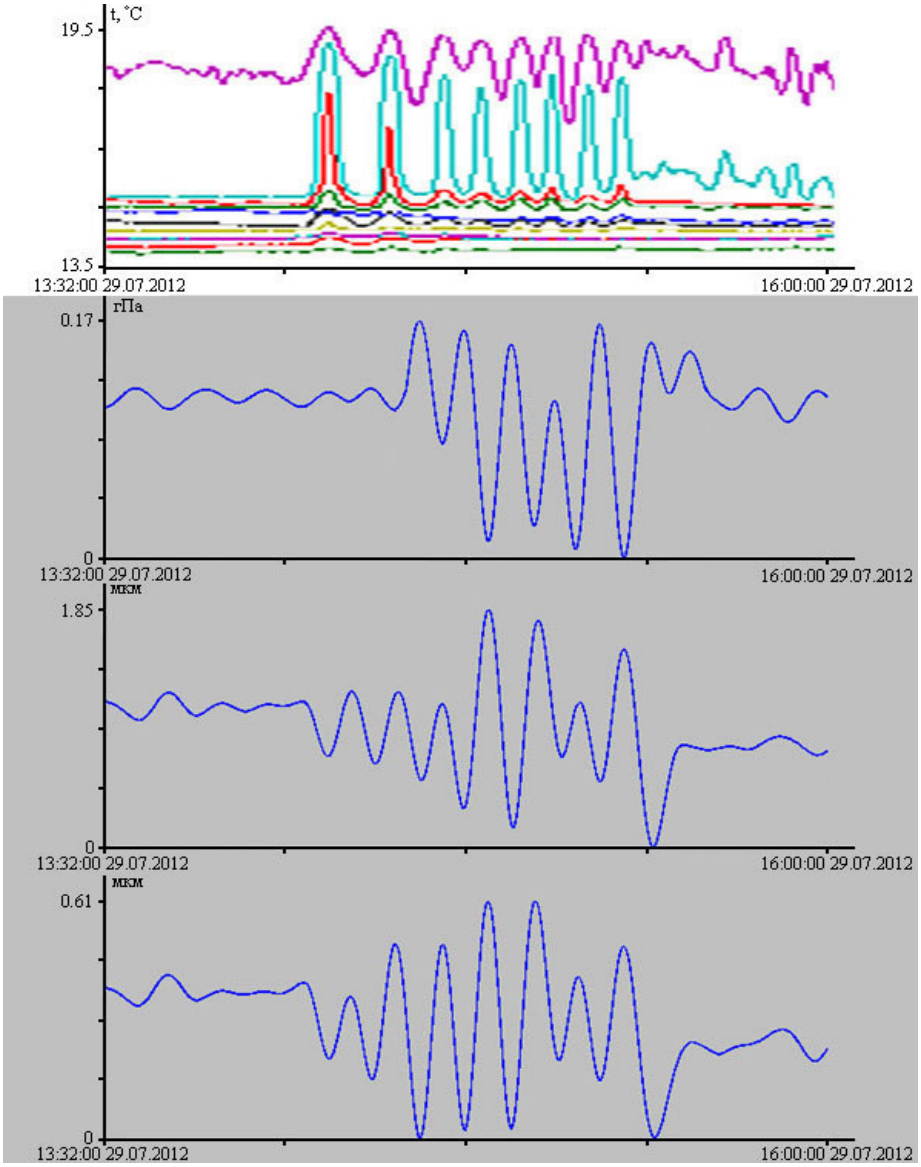

Рисунок 11 – Синхронные записи термогирлянды, лазерного нанобарографа и лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» (сверху вниз) за июль 2012 года.

Работоспособность данной методики была продемонстрирована при обработке участка записи 17.5-метрового лазерного деформографа, полученного с 27 по 31 июля 2015 года. Были рассмотрены спектры синхронных участков записей лазерного нанобарографа, лазерного деформографа и скорректированного участка записи лазерного деформографа. Скорректированная запись была получены при вычитании вклада вариаций атмосферного давления из вариаций уровня деформаций земной коры. На спектрах участков записей была выделена область основного сфероидального тона Земли ${}_0S_0$ (рисунок 12). Как видно из рисунка 12 на спектре неоткорректированной записи лазерного деформографа присутствуют максимумы существенной амплитуды, вызванные вариациями атмосферного давления, присутствующие в спектре записи лазерного нанобарографа. В спектре откорректированной записи лазерного деформографа таких максимумов нет. В результате корректировки записи лазерного деформографа «запад-восток» пики, соответствующие собственным колебаниям Земли, стали ярко выражены. Так первый значительный пик соответствует сфероидальному тону ${}_0S_0$ с экспериментально определенным периодом 20.09 мин, а второй по значению пик соответствует сфероидальному обертону ${}_1S_3$ с экспериментально определенным периодом 17.51 мин.

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

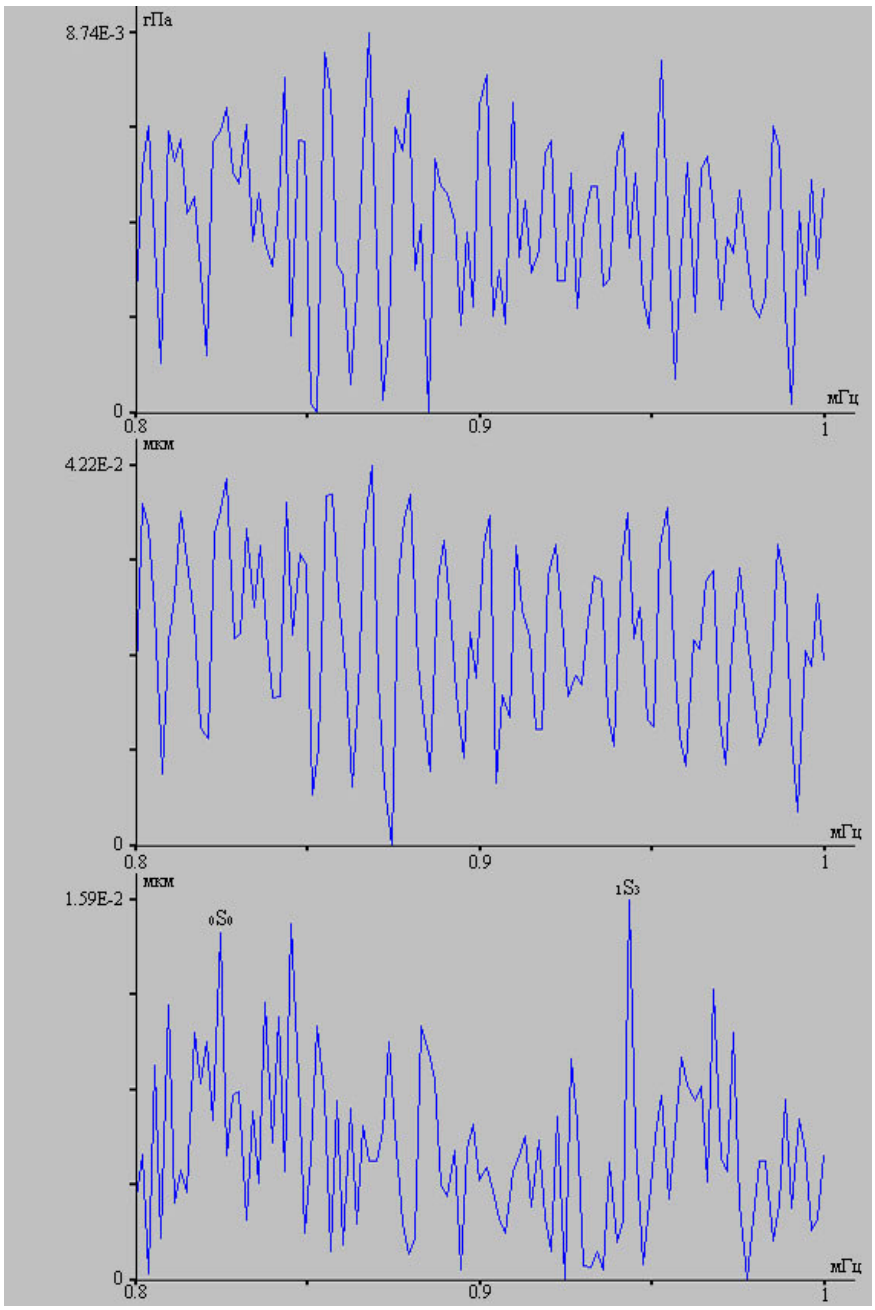

Рисунок 12 – Спектры участка записи лазерного нанобарографа, участка записи лазерного деформографа «запад-восток» и скорректированного участка записи лазерного деформографа «запад-восток» (сверху-вниз)

В параграфе 4.4 приведено краткое описание основных результатов 4 главы, которые сводятся к следующему: 1) по мере распространения по шельфу убывающей глубины ветровая волна при взаимодействии с дном теряет часть своей энергии (передает дну), что приводит к трансформации ее спектра, и энергия в нем перераспределяется в более высокочастотную область; 2) амплитуды инфрагравитационных волн сравнимы с амплитудами гравитационных волн, а периоды инфрагравитационных волн не зависят от

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

В пятой главе анализируется деформационный метод определения степени цунамигенности землетрясений.

В параграфе 5.1 описывается регистрация деформационной аномалии индонезийского землетрясения 26 декабря 2004 года. При анализе данных неравноплечего лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м и ориентацией север-юг, установленного на юге Приморского края России, была выявлена деформационная аномалия, вызванная этим цунамигенным землетрясением. Запись лазерного деформографа этого землетрясения имеет существенное отличие от записей многих других нецунамигенных землетрясений, которые «трясут» дно с периодом от 10 до 30 с и не приводят к образованию цунами. Волна цунами могла быть вызвана медленной, но значительной по амплитуде подвижкой морского дна в эпицентре землетрясения, которая не может быть зарегистрирована даже широкополосным сейсмографом. Для регистрации цунамигенного землетрясения необходимо использовать широкополосную аппаратуру, работающую практически от 0 Гц. На фрагменте записи лазерного деформорафа длительностью около 5 ч (рисунок 13 верхний) стрелкой обозначено место начала регистрации землетрясения. Запись содержит колебания и деформационную аномалию, вызванные индонезийским цунамигенным землетрясением. Деформационная аномалия на базе 52.5-метрового лазерного деформографа составила величину около 59.3 мкм, что составляет величину деформации порядка $1.1 \cdot 10^{-6}$, что значительно больше величины амплитуды суточного прилива в данном регионе.

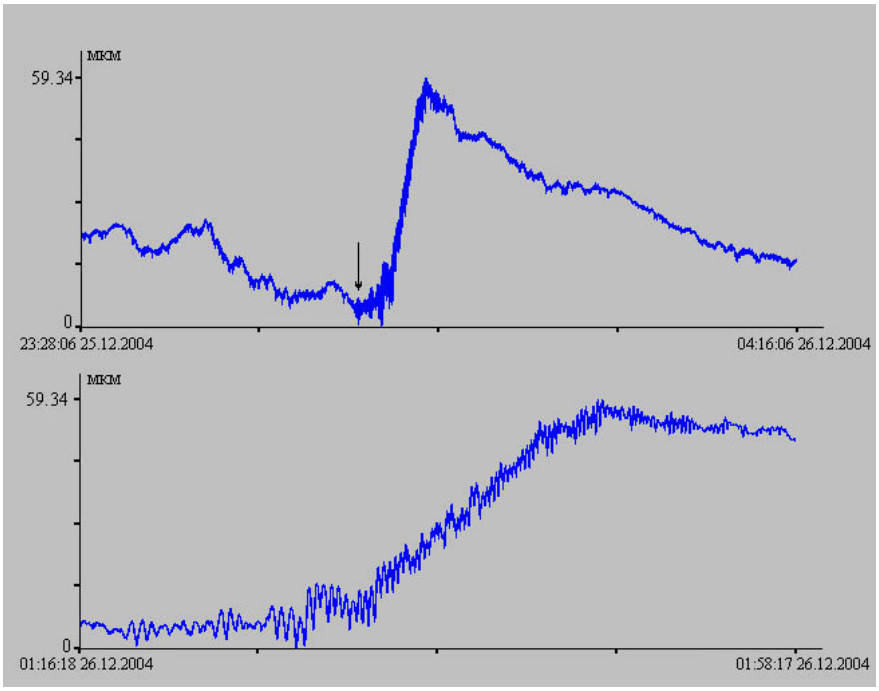

Рисунок 13 –Фрагмент записи 52.5-метрового лазерного деформографа за декабрь 2004 года. Запись индонезийского цунамигенного землетрясения (верхний) и выделенный участок записи землетрясения (нижний).

Анализ записи показал, что произошло резкое увеличение базы деформографа с последующей медленной релаксацией. Учитывая дисперсионное соотношение, связывающее периоды волн и их скорости, а также затухание сигнала, можно утверждать, что в эпицентре скорость нарастания деформационной аномалии была выше, а величина значительно больше. Сигнал цунамигенного землетрясения был зарегистрирован через 19 мин 54 с, а расстояние от эпицентра до лазерного деформографа составило примерно 5 500 км. При условии, что землетрясение произошло под водной толщей, что легко определяется по записям сейсмостанций, можно было бы с большой уверенностью предсказать возникновение цунами. Для наглядности преимуществ применения лазерных деформографов по сравнению с широкополосными сейсмографами по отождествлению деформационной аномалии, характеризующей возникновение цунами, были отфильтрованы полосовым фильтром записи неравноплечего лазерного деформографа цунамигенного и нецунамигенного землетрясений в частотном диапазоне широкополосного сейсмографа. На рисунке 14 приведена отфильтрованная запись индонезийского цунамигенного землетрясения, отфильтрованная запись не цунамигенного землетрясения и запись широкополосного сейсмографа на японской станции.

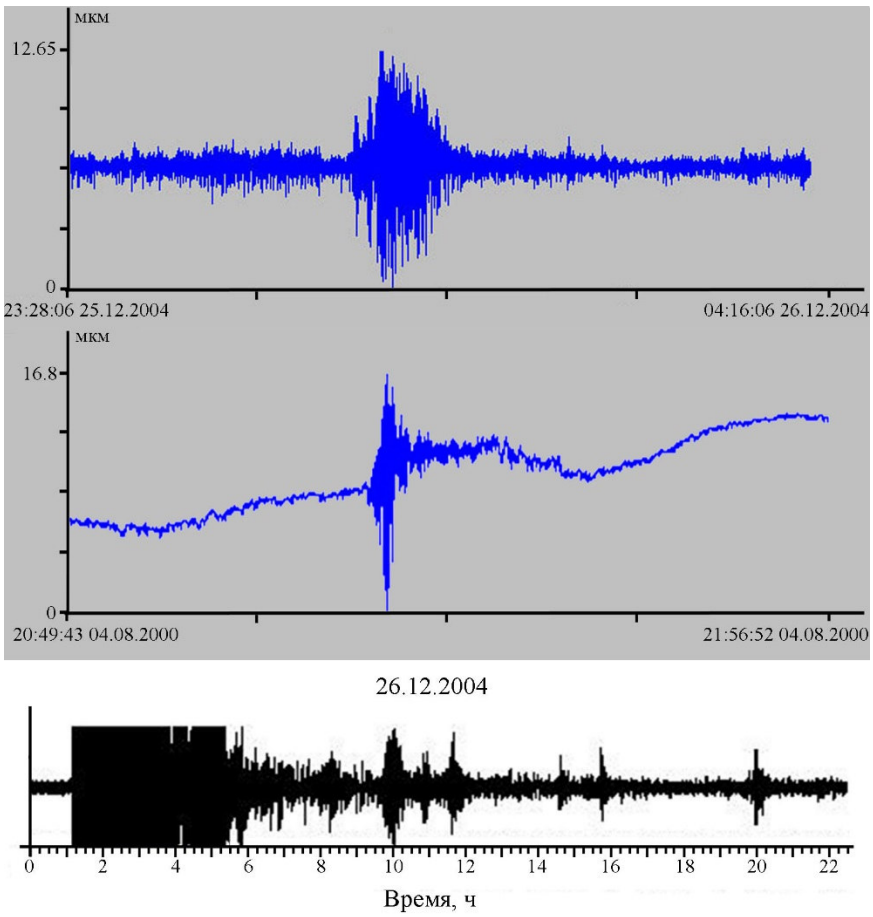

Рисунок 14 – Отфильтрованная запись индонезийского цунамигенного землетрясения (верхний), отфильтрованная запись нецунамигенного землетрясения (средний) и запись широкополосного сейсмографа на японской станции (нижний).

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

В параграфе 5.2 описывается регистрация деформационных аномалий других подводных землетрясений. В ходе выполнения работы был проведён анализ данных 52.5-метрового лазерного деформографа при регистрации сигналов некоторых цунамигенных землетрясений. Так при анализе данных за 5 сентября 2004 года были зарегистрированы два мощных землетрясения, которые произошли на южном побережье острова Хонсю, Япония. Первое землетрясение с магнитудой 7.2 произошло в 10:07:07 на расстоянии около 75 км к востоку от о. Хонсю на глубине 20 км от уровня моря. Второе землетрясение с магнитудой

7.5 произошло в 14:57:16 на расстоянии около 130 км к востоку от южной части о. Хонсю на глубине 10 км от уровня моря. Первое нецунамигенное землетрясение было зарегистрировано лазерным деформографом в 10:13:46 (рисунок 15 а), второе цунамигенное землетрясение было зарегистрировано в 15:03:52 (рисунок 15 б).

На записи цунамигенного землетрясения (рисунок 15 б, г) видно, что после начала землетрясения, отмеченного стрелкой, произошло изменение характера записи. Деформационная аномалия возникла примерно через 2.5 мин после начала землетрясения, на записях нецунамигенного землетрясения (рисунок 15 а, в) подобная деформационная аномалия отсутствует. На базе лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м деформационная аномалия составляет величину 19.2 мкм. На динамической спектрограмме (рисунок 15 е) присутствуют колебания с периодами 10 и 16 с, но наиболее сильные колебания выделяются в более низкочастотной области.

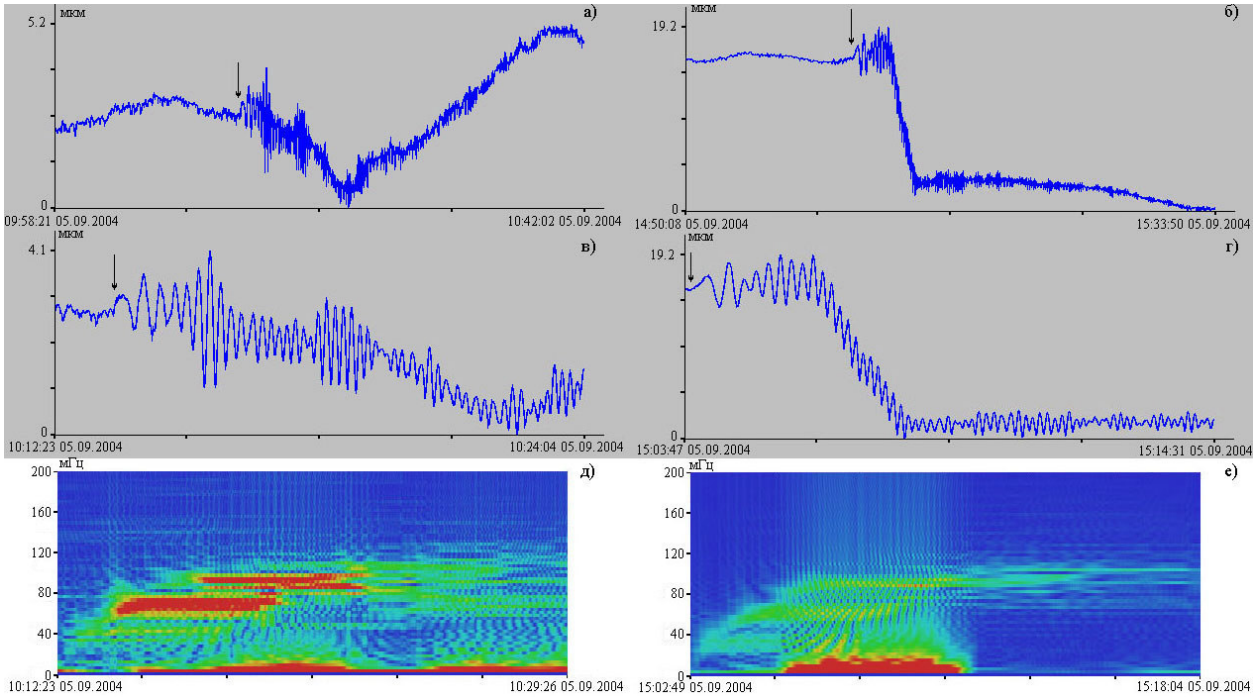

Рисунок 15 –Фрагменты записей 52.5-метрового лазерного деформографа за сентябрь 2004 года. Запись нецунамигенного землетрясения (а), выделенный участок записи нецунамигенного землетрясения (в), динамическая спектрограмма нецунамигенного землетрясения (д), запись цунамигенного землетрясения (б), выделенный участок записи цунамигенного землетрясения (г), динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (е).

Еще одно крупное цунамигенное землетрясение, зарегистрированное лазерным деформографом, с магнитудой 8.8 произошло в 05:46:22 11 марта 2011 года на расстоянии около 105 км к востоку от о. Хонсю, Япония, на глубине 33 км от уровня моря. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован в 05:50:54. На записи лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м деформационная аномалия возникла примерно через 17 мин и составила около 158 мкм (рисунок 16 верхний). На динамической спектрограмме, рисунок 16 нижний, выделяются колебания с периодами 10 и 16 с. Но их амплитуды меньше амплитуд более низкочастотных колебаний, ярко выраженных на спектрограмме.

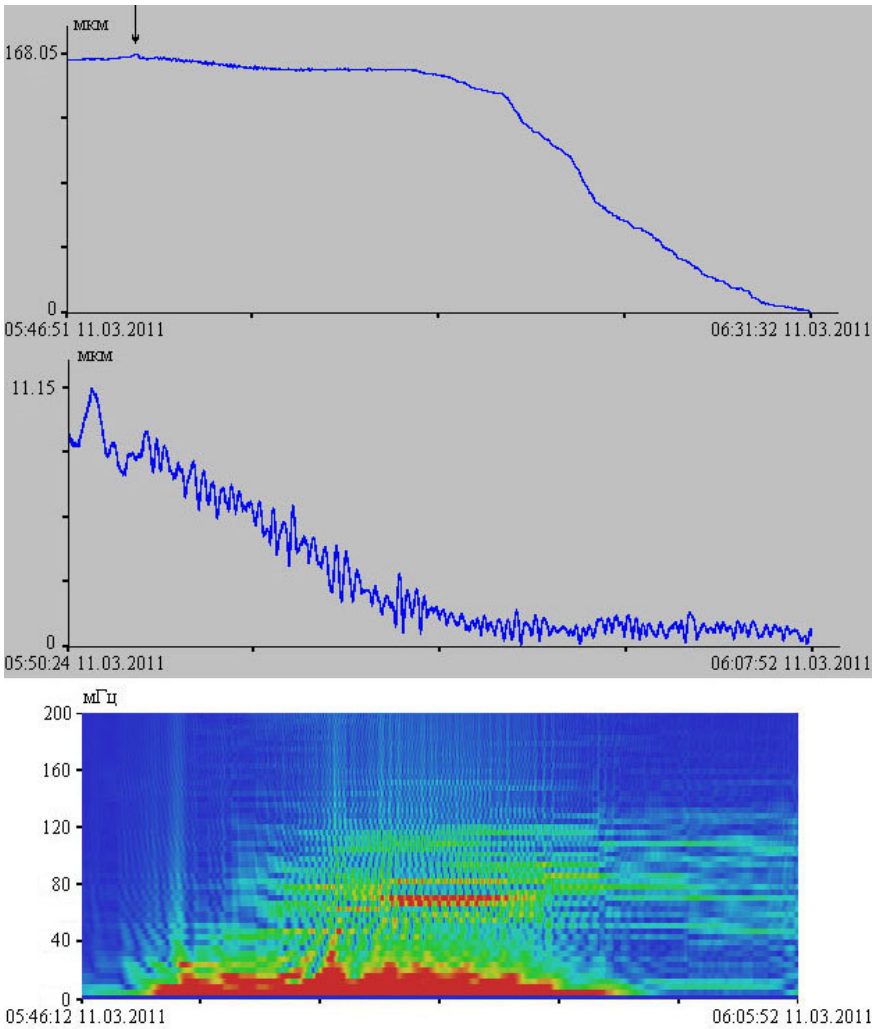

Рисунок 16 – Фрагменты записей 52,5-метрового лазерного деформографа за март 2011 года. Запись цунамигенного землетрясения (верхний), выделенный участок записи цунамигенного землетрясения (средний), динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (нижний)

Цунамигенное землетрясение, зарегистрированное лазерным деформографом, с магнитудой 7.5 произошло в 10:02:41 28 сентября 2018 года в центральной части о. Сулавеси, Индонезия, на глубине 10 км от уровня моря. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован в 10:17:54. На записи лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м деформационная аномалия возникла примерно через 7 мин и составила около 1.44 мкм (рисунок 17 верхний). После землетрясения в начале залива Томини произошел оползень, который и привел к образованию волны цунами. На записи хорошо виден момент начала оползня. На динамической спектрограмме, рисунок 18 нижний, выделяются колебания с периодами от 20 до 25 с. Как и в случае цунамигенных землетрясений 5 сентября 2004 г. и 11 марта 2011 г. наблюдались возмущения в низкочастотной области.

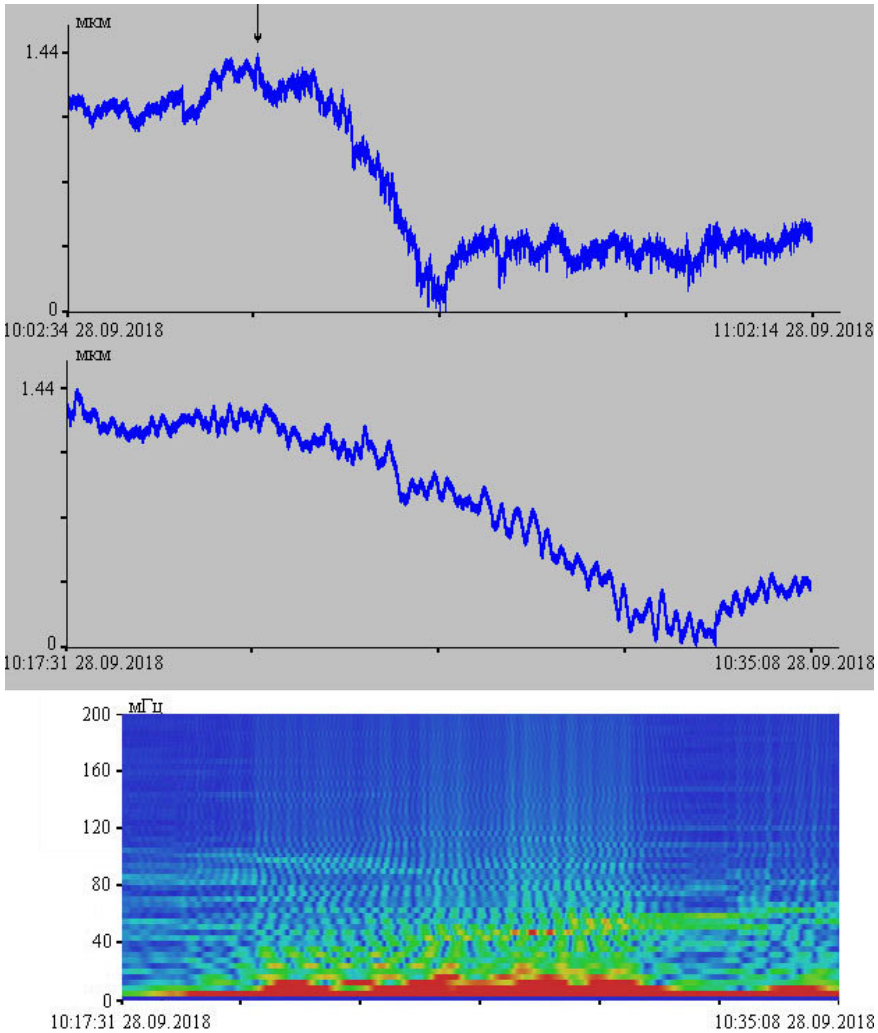

Рисунок 17 – Фрагменты записей 52.5-метрового лазерного деформографа за сентябрь 2018 года. Запись цунамигенного землетрясения (верхний), выделенный участок записи цунамигенного землетрясения (средний), динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (нижний)

В параграфе 5.3 анализируется метеоцунами по данным лазерно-интерференционных приборов. При обработке экспериментальных данных приборов, входящих в состав сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, расположенного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», выявлены геосферные особенности метеоцунами. На записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы было выявлено несколько уединенных волн, на записи лазерного нанобарографа было выявлено резкое изменение атмосферного давления, а на записях лазерного нанобарографа и лазерного деформографа, через несколько часов после прохождения волн, были выявлены сильные полуторачасовые колебания.

Резкое изменение атмосферного давления, величиной 13.5 гПа было зарегистрировано на экспериментальных записях лазерного нанобарографа в 15:20 25 мая 2015 года (рисунок 18). Данное изменение атмосферного давление стало причиной появления в гидросфере длинных волн. Эти волны были зарегистрированы лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, установленном на шельфе Японского моря на расстоянии 200 м от берега на глубине 33 м, 25 – 26 мая 2015 года. При анализе экспериментальной записи было выявлено две волны, первая почти через полтора часа после начала регистрации атмосферного возмущения, а вторая более чем через двенадцать часов (рисунок 19 верхний).

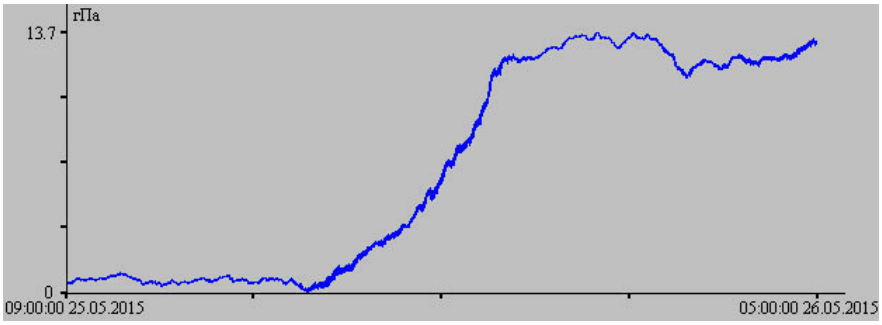

Рисунок 18 – Фрагмент записи лазерного нанобарографа за 25 мая 2015.

Первая уединенная волна почти солитоноподобной формы была зарегистрирована в 16:44 25 мая 2015 года (рисунок 19 средний). Высота этой волны сравнима с амплитудой суточного прилива данном регионе, а время прохождения через точку установки прибора составило около 14.5 мин. Первая волна вызвала только приток водных масс (увеличение

гидросферного давления), и по своим характеристикам похожа на волну цунами. Перед приходом второй волны был зафиксирован отток водных масс, глубина моря уменьшилась. Примерно через час наблюдался приток водных масс на высоту почти в два раза большую чем после прихода первой волны. По записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рисунок 19 нижний) видно, что ее форма похожа на догнавшие друг друга две волны. Общее время прохождения волны через точку установки прибора составило 23 мин.

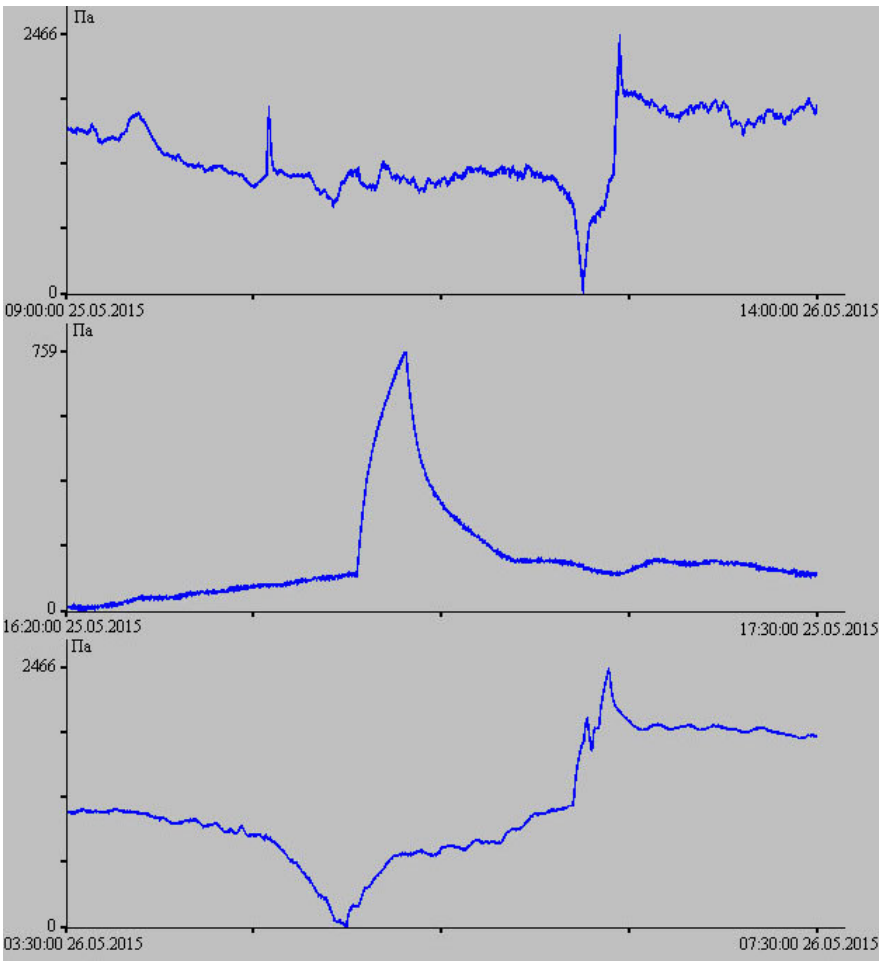

Рисунок 19 – Фрагменты записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы за 25 – 26 мая 2015. Фрагмент записи прибора длительностью 29 ч (верхний), увеличенный фрагмент записи первой волны (средний), увеличенный фрагмент записи второй волны (нижний).

Еще одним признаком, характеризующим метеоцунами, является присутствие колебаний с периодами от 30 мин до 2 ч. При анализе данных лазерно-интерференционных приборов за 26 и 27 мая 2015 года были выявлены полуторачасовые колебания. На записях

лазерного нанобарографа (рисунок 20 верхний), лазерных деформографов ориентацией «север-юг» (рисунок 20 средний) и запад-восток (рисунок 20 нижний) наблюдаются мощные колебания с периодом 1 ч 37 мин. Анализ записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы показал наличие колебаний с этим периодом, но они 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, связанном с одной из геосфер. Использование комплексных методов исследования, одновременно в трех геосферах, на основе лазерно-интерференционных измерителях 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.

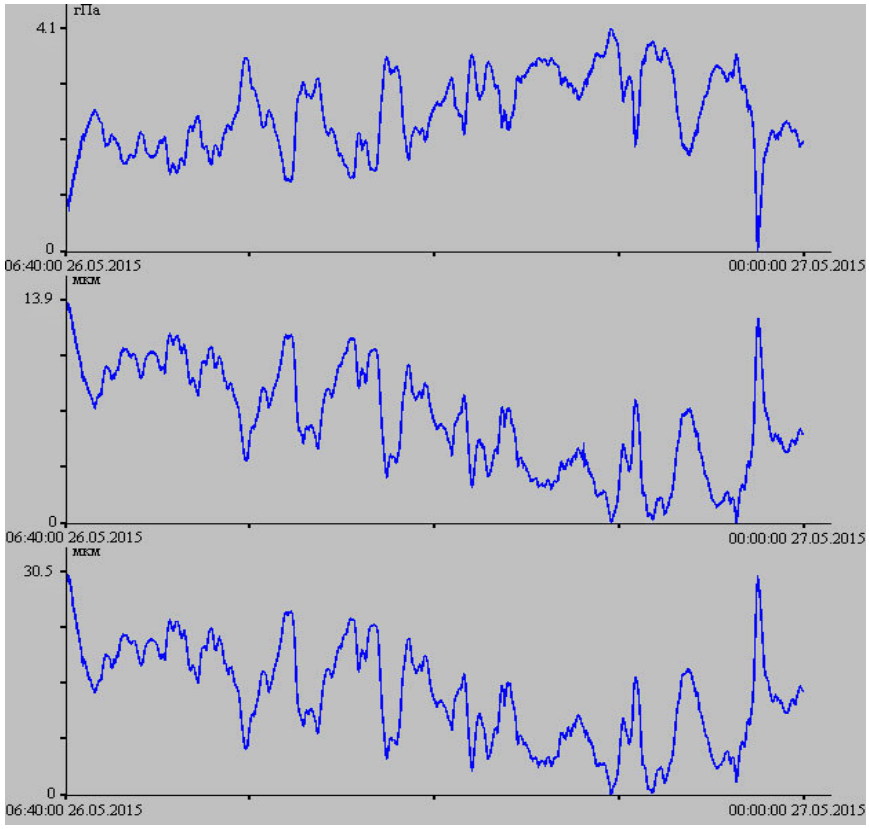

Рисунок 20 – Фрагменты записей лазерного нанобарографа (верхний), лазерного деформографа ориентацией «север-юг» (средний) и лазерного деформографа ориентацией «запад-восток» (нижний) за 26 мая 2015.

В параграфе 5.4 приведено краткое описание основных результатов 5 главы, которые сводятся к следующему: 1) используя данные неравноплечего лазерного деформорграфа, разработан метод определения степени цунамигенности землетрясений, являющийся наиболее перспективным и эффективным при его применении в службах предупреждения; 2) при обработке совместных данных лазерно-интерференционных приборов было выявлено природное явление по своим характеристикам схожее с метеоцунами.

В заключении приведены наиболее важные результаты данного исследования:

1. На основе применения современных лазерно-интерференционных методов был создан ряд приборов, позволяющих проводить измерения в атмосфере, литосфере, гидросфере на уровне фона. С использованием этих 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.

2. 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».

3. 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

4. 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.

5. 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.

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

7. Установлено, что сейши оказывают модулирующее действие на излучённые гидроакустические гармонические сигналы, что связано с вариациями плотности воды по всей толще от поверхности до дна.

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. 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 РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные положения диссертации представлены в 47 (сорока семи) работах, включая:

31 статья в изданиях, рекомендованных ВАК:

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

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

3. Долгих Г.И., Батюшин Г.Н., Валентин Д.И., **Долгих С.Г.**, Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы "атмосфера-гидросфера-литосфера" // Приборы и техника эксперимента. 2002. №3. С.120-122.

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

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

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

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

8. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Регистрация деформационной аномалии цунамигенного

землетрясения лазерным деформографом // Доклады академии наук. 2007. Т. 412, № 1. С. 104-106.

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

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

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

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

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

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

15. Долгих Г.И., Плотников А.А., **Долгих С.Г.**, Чупин В.А., Яковенко С.В. Взаимодействие низкочастотных гидроакустических волн с ветровыми морскими волнами // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430. №2. С. 257-260.

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

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

18. Долгих Г.И., 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.

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

20. Долгих Г.И., **Долгих С.Г.**, Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Чупин В.А., Швырёв А.Н., Ярощук И.О. О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. № 3. С. 321-325.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. **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.

27. 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.

28. **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.

29. 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.

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

31. 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.

32. Долгих Г.И., Piao Shengchun, Будрин С.С., 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.

И 15 статей и материалов конференций

33. Dolgikh Grigory I., Dubrov Mstislav N., **Dolgikh Stanislav G.**, Kovalev Sergei N., Ovcharenko Vladimir V., Savvin 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, no.2. P.187-197.

34. 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.

35. 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.

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

37. Dolgikh Grigoriy, **Dolgikh Stanislav**, Kovalyov Sergey, Chupin Vladimir, Shvets Vyacheslav and 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.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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

42. **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

43. **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

44. **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

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

46. 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.

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