



На правах рукописи

Яковенко Сергей Владимирович

ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ОКЕАНА

Специальность 25.00.28 - «Океанология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владивосток — 2006

Работа выполнена в Тихоокеанском океанологическом институте
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук

Научный руководитель: чл.-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук
Долгих Г.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Моргунов Ю.Н.
профессор, доктор физ.-мат. наук
Каневский И.Н.

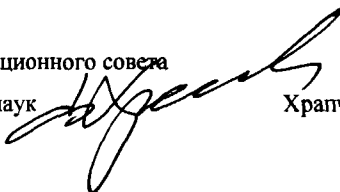
Защита состоится 7 июля 2006 года в 14 часов на заседании диссертационного
совета Д 005.017.02 в Тихоокеанском океанологическом институте
им.В.И. Ильичева РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТОИ ДВО РАН

Автореферат разослан 2 июня 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Кандидат географических наук



Храпченков Ф.Ф.

2006A
13935

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Большое значение имеют исследования, направленные на изучение процессов геосфер на стадии их зарождения и развития. Это, в первую очередь, касается землетрясений, цунами, тайфунов, циклонов и других явлений и процессов линейной и нелинейной природы широкого диапазона частот. Геодинамические процессы, играющие существенную роль в формировании вышеуказанных явлений, относятся к крайне левому частотному диапазону и имеют, в основном, небольшие амплитудные изменения на значительных временных интервалах. Известно, что все процессы имеют причинно-следственную связь и играют существенную роль в энергообмене геосфер, особенно в зоне перехода системы «атмосфера-гидросфера-литосфера». Поэтому для объективного решения задачи по изучению природы возникновения и развития различных процессов и явлений необходимо проводить исследования во всех геосферах одновременно в широком частотном диапазоне с применением измерительных комплексов, измеряющих основные параметры геосфер на уровне фоновых колебаний.

Актуальность данной работы определяется необходимостью создания широкополосной аппаратуры, способной проводить измерения основных параметров геосфер на уровне фоновых колебаний. Особую важность при этом имеют работы, направленные на оснащение измерительных комплексов современной аппаратурой, разработанной на основе современных лазерно-интерференционных методов измерений. К таким установкам относятся лазерные деформографы различных вариантов, лазерные нанобарографы и лазерные измерители вариаций давления гидросферы.

Для решения задач изучения закономерностей энергообмена в широком диапазоне частот в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера», необходимо создание комплексов, подобных тому, который функционирует на МЭС ТОИ ДВО РАН «м.Шульца», способных обеспечивать оперативный

контроль и оценку вариаций параметров геосфер Земли в частотном диапазоне от 0 условно до 1000 Гц.

Цель работы состоит в разработке и создании измерительного комплекса для изучения закономерностей генерации, динамики и трансформации колебаний и волн на границе геосфер диапазона приливов, собственных колебаний Земли, поверхностных и внутренних морских волн, краевых и инфрагравитационных морских волн, и иных процессов искусственного и естественного характера, происходящих в атмосфере, гидросфере и литосфере на границе раздела системы этих геосфер.

В соответствии с этим были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать и создать измерительный комплекс на основе приборов, работающих на лазерно-интерференционных методах, таких, как лазерный деформограф и лазерный нанобарограф, а также дополнить комплекс другими современными приборами: измерителями температуры, скорости и направления ветра, гидрофонами, излучателями и т.д. Исследовать основные технические характеристики комплекса.

2. Разработать и создать прецизионную установку «лазерный измеритель вариаций давления гидросферы» и исследовать основные ее технические характеристики.

3. Провести мониторинговые измерения вариаций микродеформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений и других параметров геосфер с целью отработки проведения комплексных измерений, испытания комплекса в целом, изучения некоторых процессов и явлений зоны перехода.

Научная новизна

1. Разработан уникальный лазерный интерференционный комплекс, предназначенный для изучения закономерностей генерации, динамики и трансформации колебаний и волн на границе раздела геосфер диапазона приливов, собственных колебаний Земли, поверхностных и внутренних морских волн, краевых и инфрагравитационных морских волн.

2. Разработан лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, способный проводить измерения изменения давления в частотном диапазоне условно от 0 до 1000 Гц.

3. Впервые разработана методика проведения комплексных исследований по изучению взаимодействия волновых полей системы «атмосфера-литосфера-гидросфера» в широком диапазоне частот на лазерном интерференционном комплексе.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Технические решения по построению лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, применение которого позволяет исследовать процессы и явления гидросферы частотного диапазона от условно 0 Гц до 1000 Гц на уровне фоновых колебаний.

2. Технические решения по созданию лазерного интерференционного комплекса для изучения динамических процессов в шельфовой зоне океана, состоящего из лазерных деформографов, лазерного нанобарографа, лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, других вспомогательных измерителей параметров геосфер, с помощью которого исследуются закономерности генерации, динамики и трансформации колебаний и волн геосфер широкого диапазона частот в зоне перехода системы «атмосфера-гидросфера-литосфера».

3. Длительные экспериментальные исследования по отработке методики проведения синхронных измерений вариаций микродеформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений с организацией банка данных позволили выявить новые закономерности в динамике гравитационных и инфрагравитационных морских волн, преобразовании их энергии в энергию микродеформаций земной коры.

Обоснованность экспериментальных результатов, приведенных в диссертации, подтверждена путем многократного и тщательного проведения экспериментов при исследовании колебаний и волн широкого диапазона частот лазерно-интерференционными методами и сравнения полученных результатов с литературными данными и модельно-теоретическими оценками.

Подтверждение литературными данными свидетельствует о корректной работе комплекса.

Практическая значимость результатов

Тема диссертационной работы соответствует одному из направлений работ в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН по развитию методов и средств дистанционного исследования атмосферы, океана, литосферы и их взаимодействия, а научные результаты, изложенные в ней, получены при выполнении программ, проводимых ТОИ ДВО РАН: ФЦП «Мировой Океан», грантов РФФИ (03-05-65216 «Изучение законов генерации, динамики и трансформации инфразвуковых колебаний и волн в области переходных зон», № 05-05-79165К «Организация и проведение экспедиции в пассивно-активном режиме на м. Шульца и на прилегающем шельфе по изучению взаимодействия геосфер»), грантов ДВО, ФЦНТП «Разработка технологии раннего обнаружения предвестников опасных геодинамических процессов в береговой зоне России и способов защиты ее прибрежных территорий» (№ 2005-РП-13.4/001 III очередь).

Личный вклад

1. Все расчеты и схемы по лазерному измерителю вариаций давления гидросферы сделаны самостоятельно. Рабочий макет прибора изготовлен совместно с соавторами соответствующих статей.

2. Принимал активное участие в создании лазерного интерференционного комплекса в равной доле с соавторами.

3. Основная работа по обработке данных, представленных в диссертации, выполнена самостоятельно.

4. Интерпретация обработанных данных сделана совместно с Г.И. Долгих.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 107 наименований. Работа содержит 116 страниц текста, 6 таблиц и 28 рисунков.

Нумерация пунктов, формул и рисунков внутри глав сквозная. При

этом используется двухуровневая система нумерации. То есть ссылка «рисунок 2.4» означает, что это четвертый рисунок во второй главе. Список литературы составлен в порядке упоминания ссылок в тексте диссертации.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 19 работ. Из них 4 – в центральных научных журналах, 1 – патент на полезную модель, 10 – в сборниках материалов международных конференций и российских симпозиумов, 4 – в тезисах докладов на международных конференциях и российских симпозиумах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы тема диссертации, ее цели и задачи, обоснованы актуальность, научная новизна, достоверность выводов и практическая значимость.

В первой главе «Взаимодействие геосфер, техника и методы его изучения» описывается специфика изучения процессов, происходящих в различных геосферах. Так, в разделе 1.1 литосфера рассматривается, как индикатор процессов и средство для выявления закономерностей, связанных с возникновением колебаний и волн в других геосферах нашей планеты. **В разделе 1.2** приведен обзор измерительной аппаратуры, предназначенной для регистрации и изучения колебаний и волн в упругой среде. Приборы соответствующим образом классифицированы на устройства инерционного и безинерционного типа. Последние представлены деформографами построенными на различных физических принципах и имеющие разнообразные конструкционные особенности. Рассмотрены некоторые виды деформографов механического типа, приведены их основные достоинства, среди которых можно указать относительную простоту конструкции, а также недостатки, которыми обладает эта аппаратура. Это и недостаточная в ряде приложений чувствительность и ширина рабочего диапазона, значительная погрешность, зависящая от температурных вариаций, давления и влажности. Все это усложняет эксплуатацию такого оборудования.

Во многом недостатки механических деформографов решены в новом поколении этих приборов – лазерных деформографах. Принцип действия данных устройств состоит в том, что при изменении базы деформографа, изменяется оптический путь лазерного луча. Изменение оптического пути влечет за собой изменение фазы волны лазерного излучения вследствие дополнительного фазового набегга. Это изменение фазы и является измеряемой величиной. Преимуществом лазерных деформографов перед механическими аналогами является, в первую очередь, исключение механического чувствительного элемента как такового. Влияние вариаций метеорологических параметров на показания прибора сводится, в основном, к их воздействию на изменение оптического пути лазерного луча. Оно может быть сведено к минимуму при использовании герметизированных или вакуумированных лучеводов. Кроме того, использование дифференциальных свойств среды и специфических конструктивных особенностей установок позволило еще выше поднять точность измерения микродеформаций земной коры при некотором даже снижении требований к стабильности метеорологических параметров (давление, температура, влажность) и относительно невысокой стабильности частоты лазера.

Для проведения исследований по вопросам, решаемым в обозначенных задачах, необходимо иметь инструментальные средства, позволяющие осуществлять регистрацию атмосферного давления. В связи с этим были рассмотрены приборы, используемые для его измерения. Все устройства соответствующим образом разделены на классы по принципам действия и конструктивным особенностям. Для всех указаны основные недостатки.

Так, следует отметить недостаточную чувствительность приборов, основанных на непосредственном измерении сил, возникающих при воздействии вариаций атмосферного давления на чувствительный элемент. С другой стороны, приборы, основанные на так называемых электрических методах измерения и обладающих более высокими характеристиками чувствительности, имеют ограниченный динамический диапазон измерений, а

попытки получить прибор с достаточно широким динамическим диапазоном ведут к соответствующему снижению чувствительности. Высокая чувствительность лазерно-интерференционных методов была получена при создании лазерных деформографов на основе интерферометров Фабри-Перо и Майкельсона различных вариантов. Данные установки имеют практически неограниченный динамический диапазон.

С учетом вышеизложенного, можно сделать вывод о целесообразности создания в качестве измерителя атмосферного давления интерференционный измеритель перемещений на основе неравноплечего интерферометра с чувствительным элементом – блоком барокоробок. Такой прибор, наряду с низкой стоимостью барочувствительного узла, имеет достаточно высокую чувствительность, может работать в широком частотном диапазоне (не имея ограничения по частоте снизу) и обладает практически неограниченным динамическим диапазоном при измерении естественных вариаций давления.

Далее рассмотрены установки, созданные на основе лазерно-интерференционных методов измерений, предназначенные для изучения вариаций давления гидросферы. Приведено краткое описание конструкции и основные недостатки, связанные в основном с инерционностью механики этих приборов и применением световолоконных элементов, характеристики которых сильно зависят от параметров окружающей среды.

В заключении главы приведены выводы, в которых обосновывается необходимость создания лазерного измерителя вариаций давления и лазерного интерференционного комплекса с целью проведения синхронных измерений вариаций микродеформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений на уровне фоновых колебаний.

Во второй главе «Лазерный интерференционный комплекс для изучения динамических процессов в шельфовой зоне океана» приведено описание приборной базы измерительного комплекса изучения закономерностей генерации, динамики и трансформации колебаний и волн широкого диапазона частот на границе геосфер.

Лазерный интерференционный комплекс введен в строй в 2000 году на полигоне Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН «мыс Шульца».

Раздел 2.1 содержит общее описание измерительного полигона с указанием всех приборов, входящих в него. Комплекс (рисунок 1) состоит из лазерных деформографов горизонтального с ориентацией север-юг (1) и вертикального (2) типов, лазерного нанобарографа (3), лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (4), донной станции с гидрофоном и термодатчиком (5), атмосферных термодатчиков (6 и 7), анеморумбографа (8), сейсмоакустического излучателя (9). Данные со всех измерителей и датчиков собираются в лабораторном помещении (10) для последующей оцифровки и записи на информационный носитель. Эпизодически работает лазерный деформограф с ориентацией запад-восток (11), который в настоящее время вводится в режим непрерывных измерений.

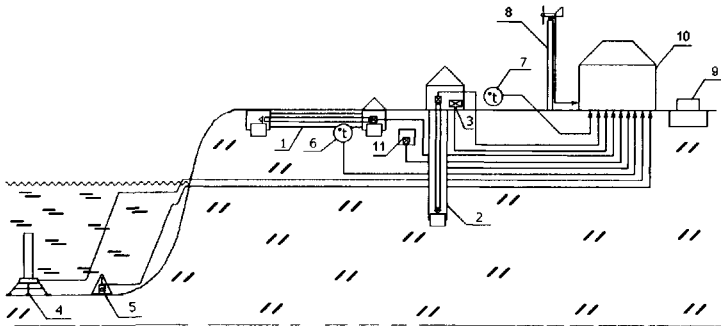
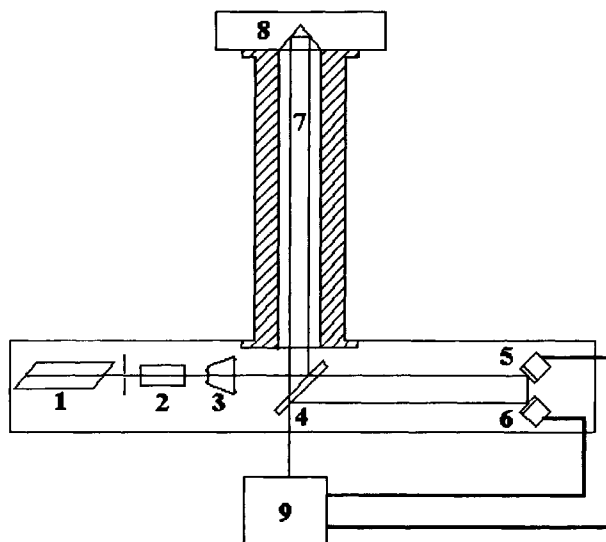


Рисунок 1 – Лазерный интерференционный комплекс

Поскольку эффективность работы комплекса в основном определяется измерениями приборов, работающих с использованием лазерно-интерференционных методов, то описанию этих приборов и было уделено особое внимание.

В разделах 2.2 и 2.3 подробно рассмотрены принцип действия и функциональная схема лазерных деформографов неравноплечего типа, оптическая часть которых построена на основе модифицированного

интерферометра Майкельсона (рисунок 2). Сделаны выводы о точности измеряемых перемещений используемыми в комплексе установками. Применяемые методы интерферометрии позволяют измерять смещение между устойчивыми установками с точностью $10^{-11} \div 10^{-12}$ м. При этом установки, использующие в своем принципе действия лазерно-интерференционные методы измерений имеют широкий рабочий диапазон 0-1000 Гц и практически неограниченный динамический диапазон.



1 - лазер, 2 - оптический затвор, 3 - коллиматор, 4 - полупрозрачная плоско-параллельная пластина ПИ-100, 5 и 6 плоскопараллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах типа PZT фирмы Clevite, 7 - световод, 8 - уголкового отражатель, 9 – система регистрации

Рисунок 2 – Оптическая схема лазерного деформографа неравноплечего типа

Описаны особенности компонентов интерференционного узла, рассмотрены особенности настройки узла, а также прибора в целом. Описана функция освещенности фотодиода, являющегося чувствительным элементом прибора, регистрирующего изменение базы прибора посредством вариаций

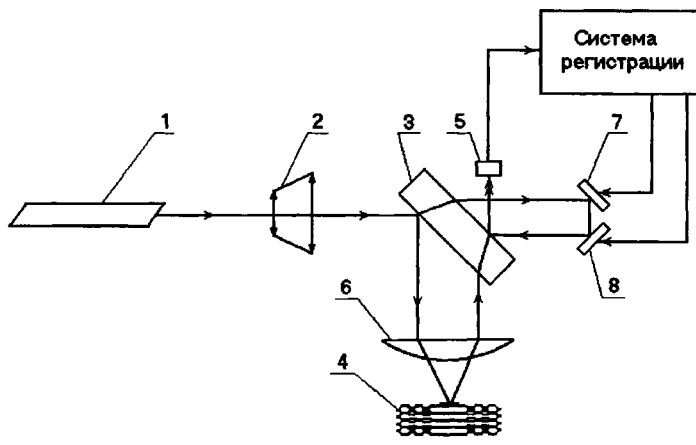
интенсивности света, вызванных изменением фазового набега лазерного луча в опорном и измерительном плечах интерферометра.

Интенсивность света, падающего на фотодиод, описывается следующим выражением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left\{\frac{4\pi(L_2 - L_1)}{\lambda}\right\}, \quad (1)$$

где: I_1 и I_2 - интенсивности интерферирующих лучей; L_1 и L_2 - оптическая длина опорного и измерительного лучей интерферометра, соответственно; λ - длина волны лазера.

В разделе 2.4 приводится описание нанобарографа, созданного на основе модифицированного интерферометра Майкельсона равноплечего типа с длиной измерительного плеча 20 см (рисунок 3).



- 1 - частотно-стабилизированный He-Ne-лазер ЛГН-303, 2 - коллиматор,
 3 - делительная пластина ПИ-100, 4 - блок анероидных коробок с наклеенным
 зеркалом, 5 - фотоприемник, 6 - линза, 7 - зеркало компенсации, 8 - зеркало
 расщепки

Рисунок 3 – Схема размещения оптических элементов лазерного нанобарографа

Подробно рассмотрен принцип действия и устройство оптической схемы. Указаны характеристики прибора. Точность измерения вариаций атмосферного давления с учетом температурной погрешности составляет 0,003 Па.

Рассмотрены факторы, влияющие на оптическую разность хода лучей. Измеряемое смещение Δl блока анероидных коробок описывается выражением:

$$\Delta l = \frac{\Delta i}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi} \pm \sqrt{\left(l \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\Delta i_1}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 + \left(\frac{\Delta i_2}{i_0} \right)^2}, \quad (2)$$

где: $\frac{\Delta i}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi}$ - изменение оптической разности хода, связанной с вариациями атмосферного давления, воздействием сейсмоакустического шума, температуры и влажности на интерференционный узел; $l \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$ - шумы, обусловленные нестабильностью частоты лазерного излучения; $\frac{\Delta i_1}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi}$ - шумы фотоэлектронной аппаратуры; $\frac{\Delta i_2}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi}$ - шумы, вызванные нестабильностью мощности лазерного излучения.

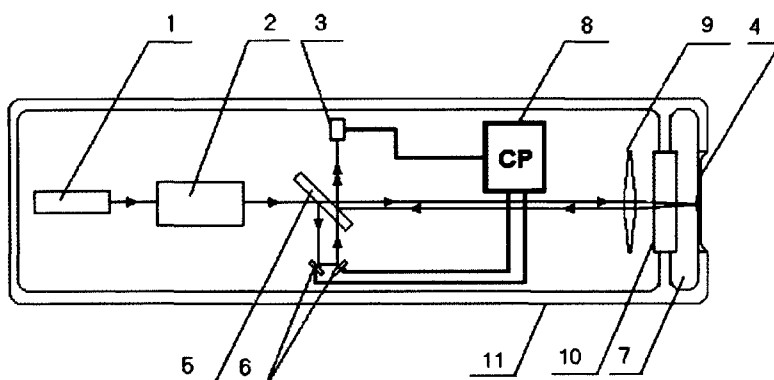
Проанализирован вклад каждого слагаемого в измеряемую величину Δl .

Приведены примеры спектров записей лазерного деформометра и лазерного нанобарографа.

Раздел 2.5 содержит описание еще одного прибора, построенного на лазерно-интерференционных методах – лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. Этот прибор введен в состав лазерного интерференционного комплекса в 2005 году и предназначается для измерения

вариаций давления толщи морской воды в месте его постановки, где глубина может составлять до 500 м. Точность измерения вариаций давления гидросферы 0,45 мПа при использовании мембраны со следующими параметрами: радиус мембраны $R=5$ см, толщина мембраны $h=0,5$ мм, модуль Юнга для нержавеющей стали $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коэффициент Пуассона для нержавеющей стали $\sigma=0,25$.

Оптическая схема лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, изображенная на рисунке 4, очень походит на оптическую схему нанобарографа, но вместе с тем она имеет свои характерные особенности, подробно описанные в этой части диссертации.



1 - лазер, 2 - оптический затвор и коллиматор, 3 - фотодиод, 4 - мембрана с наклеенным зеркалом, 5 - полупрозрачная плоско-параллельная пластина ПИ-100, 6 - плоскопараллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах типа PZT фирмы Clevite, 7 - компенсационная камера, 8 - система регистрации, 9 - линза, 10 - плоско-параллельная пластина, 11 - герметичный корпус прибора

Рисунок 4 – Оптическая схема лазерного измерителя вариаций давления гидросферы

Давление которое регистрирует данная установка можно рассчитать по формуле для круговой мембраны, закрепленной на концах:

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

где: Δl – смещение мембраны; h – толщина мембраны; E – модуль Юнга; σ – коэффициент Пуассона, R – диаметр мембраны.

Рассчитано изменение оптического пути измерительного луча прибора при изменении температуры на 20°C , возможное при погружении прибора на значительную глубину и сделаны рекомендации по работе с прибором в таких условиях. Проведен расчет угловых и линейных смещений юстировочных механизмов для автоматической подстройки интерференционного узла с целью удаленного улучшения качества интерференционной картины.

Приведены примеры записей, полученных лазерным измерителем вариаций давления гидросферы (рисунок 5).

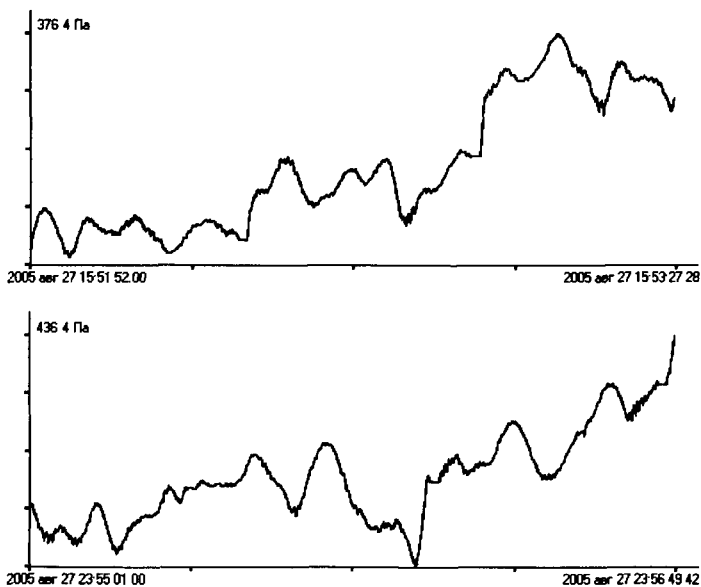


Рисунок 5 – Примеры записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы

В разделе 2.6 приводится описание систем регистрации интерферометров лазерного интерференционного комплекса. Все приборы комплекса, работающие на основе лазерно-интерференционного метода, а именно два лазерных деформографа, лазерный наноборограф и лазерный измеритель вариаций давления гидросферы оснащены специальными электронными системами регистрации, обрабатывающими поток информации, идущий с каждого из приборов. Эти системы работают по одной и той же принципиальной схеме, хотя элементная база и исполнение имеют некоторые отличия. Система регистрации лазерного измерителя вариаций давления гидросферы отличается еще и тем, что часть аналоговых узлов в ней удалена и их функции выполняются цифровыми микроконтроллерами. Однако принципы работы этой системы те же.

На рисунке 6 приведена блок-схема системы регистрации.

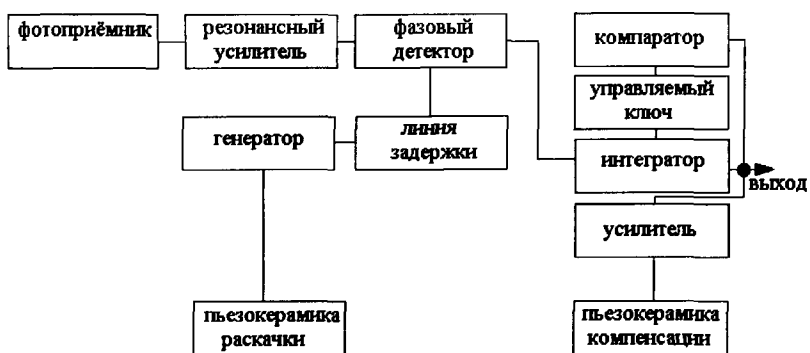


Рисунок 6 – Блок - схема системы регистрации

В диссертации приведено подробное описание назначения и работы всех узлов системы регистрации.

В разделах 2.7-2.10 содержится описание входящих в лазерный интерференционный комплекс датчиков температуры и влажности, донной станции, сейсмоакустического излучателя и анеморумбографа. Характеристики этих приборов таковы: датчики температуры и влажности имеют погрешности

измерений соответственно 0,3% и 5%; постоянная времени температурных датчиков составляет 1 с, т.е. рабочий диапазон 0-1 Гц. Технические данные приборов донной станции: частотный диапазон работы гидрофона 0,01-300 Гц, термодатчик 0-1 Гц. Сейсмоакустический излучатель: частота излучения с плавной регулировкой 2-20 Гц.

Раздел 2.11 посвящен тому, как в лазерном интерференционном комплексе организована запись и хранение полученных данных.

Информация со всех приборов и датчиков комплекса по кабельным линиям подается в лабораторное помещение, где поступает в аналогово-цифровой преобразователь. После оцифровки данные фиксируются на дисковом пространстве персонального компьютера, откуда регулярно заносятся в единую базу данных на носителях типа DVD.

Ведется разработка технологии, которая позволит сопровождать файлы данных метками точного времени, поступающими с приемника GPS (Global Positioning System). Благодаря этим меткам комплекс сможет участвовать в экспериментах по синхронной записи данных с приборов, разнесенных на неограниченное расстояние.

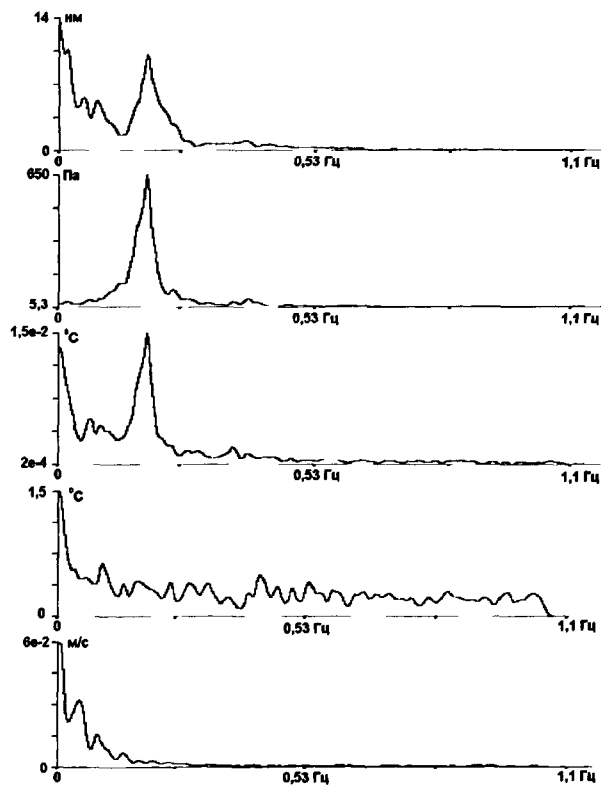
Для промежуточной и полной обработки полученных экспериментальных данных создан пакет прикладных программ «DEFORMOGRAF», написанных для использования в семействе операционных систем Windows 9X и WindowsXP, в котором предусмотрено множество удобных функций и возможностей начиная от сшивания файлов и фильтрации до моделирования, спектров, спектрограмм и еще многих других.

В заключении главы в краткой форме приведены основные технические характеристики основных установок лазерного интерференционного комплекса.

В третьей главе «Регистрация колебаний и волн инфразвукового диапазона на границе системы «атмосфера-гидросфера-земная кора» лазерным интерференционным комплексом» речь идет о результатах работы комплекса, показывающих его работу и возможности. Приведены графики синхронных записей различных приборов комплекса, обсуждаются результаты обработки

этих данных и делаются выводы. Несомненно, возможности комплекса гораздо шире, нежели показанные в диссертации, поэтому воспринимать их следует лишь как демонстрацию работы полигона.

В разделе 3.1 приведен анализ спектров сигналов диапазона гравитационных и инфрагравитационных морских волн, полученных при обработке синхронных данных лазерного деформографа, гидрофона, гидросферного термографа, атмосферного термографа, анеморумбографа.



Сверху вниз: лазерный деформограф горизонтального типа, гидрофон, гидросферный термограф, атмосферный термограф, анеморумбограф
Рисунок 7 – Примеры спектров, полученных при обработке сигналов с приборов лазерного интерференционного комплекса

В спектрах данных лазерного деформографа, гидрофона и гидросферного термографа выделяются отчетливые максимумы, вызванные поверхностными морскими волнами, рисунок 7. Из проведенного анализа следует, что в микросейсмическом диапазоне существует связь между вариациями микродеформаций земной коры, температуры и давления гидросферы.

Далее проведены расчеты амплитуд волн основных энегронесущих максимумов по графикам и спектрам деформографа, гидрофона и гидросферного термографа. Кроме того, по полученным данным были рассчитаны соотношения удельных энергий в гидросфере и упругой среде в месте расположения деформографа. При этом получено, что среднее значение $W_{\text{ср,м}}/W_{\text{ср,д}}$ для графиков равно $9,6 \cdot 10^{-9}$, а для спектров – $14,8 \cdot 10^{-9}$, где $W_{\text{ср,м}}$ – средняя энергия в единице объема гидросферы, $W_{\text{ср,д}}$ – средняя энергия в единице объема литосферы. Часть энергии, регистрируемая деформографом оценивается, как $6 \cdot 10^{-11}$ Дж.

Из литературных данных, приведенных в диссертации следует, что для микросейсм второго рода, которые возбуждаются прогрессивными морскими волнами, соотношение между спектрами морских волн в прибрежной зоне и микродеформаций земной коры (S_a/S_d) равны: 1) для теории – $6 \cdot 10^{-11}$, 2) для эксперимента – $5 \cdot 10^{-12}$. Полученные экспериментальные оценки сильно отличаются от теоретических. Т.е. большая часть энергии морских волн в неволновой зоне переходит в энергию упругих деформаций дна.

Исходя из полученного, в разделе 3.1 диссертации сделаны следующие выводы:

- внутри неволновой зоны могут существовать либо зоны концентрации и деконцентрации трансформированной энергии морских волн либо значительна потеря данной энергии;
- отношение удельной потенциальной энергии упругой деформации горизонтальных смещений верхней части земной коры внутри неволновой зоны к удельной энергии морских волн равно $0,8 \cdot 10^{-10}$;
- при условии, что горизонтальные деформации составляют третью

часть всей деформации, вызванной морскими волнами, получено, что около 0,1% внутренней энергии измененного объема жидкости, обусловленного поверхностным волнением, переходит в потенциальную энергию упругой деформации неволновой зоны верхней части земной коры;

- теоретические модели, с которыми проводится сравнение экспериментальных данных не совсем корректны.

В разделе 3.2 речь ведется о взаимодействии атмосферы, гидросферы и литосферы в месте расположения лазерного интерференционного комплекса. Для изучения этого взаимодействия использовались синхронные записи входящих в состав комплекса лазерных нанобарографа и горизонтального 52,5-метрового деформографа. Обработка данных, поступающих с этих приборов позволила установить, что на значительных временных интервалах наблюдаются как коррелированные, так и некоррелированные записи вариаций атмосферного давления и микродеформаций земной коры зоны перехода. Естественно предположить, что такое поведение вызвано барической депрессией, наполняющей на зону расположения лазерного деформографа, и связано с ее размерами, градиентом давления, скоростью и направлением движения (со стороны моря или к морю). Подобная различная реакция участка земной коры должна наблюдаться и вдалеке от моря, но, возможно, с меньшим эффектом из-за отсутствия водных масс.

Кроме того, сделаны выводы, что практически нет корреляции между вариациями атмосферного давления и уровнем микродеформаций земной коры для периодов менее 100 с.

В разделе 3.3 речь идет о регистрации комплексом инфрагравитационных морских волн на границе «гидросфера-литосфера». Приведены участки синхронной записи, проводимой лазерным деформографом и акустическим гидрофоном, а также спектрограммы записей лазерного деформографа.

Анализ показал, что периоды выделенных инфрагравитационных морских волн не зависят от величины основного периода ветрового волнения.

Этот вывод вытекает из анализа спектрограмм различных участков данных лазерного деформографа, содержащих инфрагравитационные и гравитационные морские волны. На некоторых участках записей периоды прогрессивных и стоячих гравитационных морских волн последовательно уменьшаются. Данное уменьшение периодов может быть связано как с дисперсией, так и с диссипацией энергии. При этом подобного уменьшения периодов инфрагравитационных морских волн не наблюдается (рисунок 8).

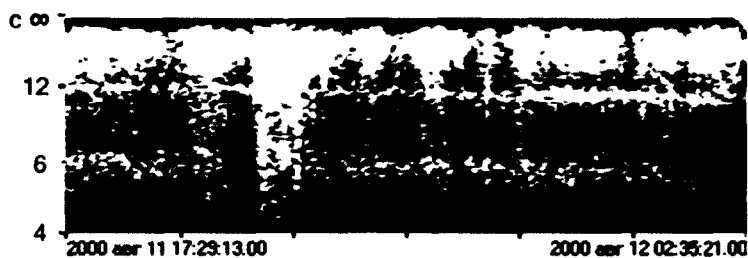


Рисунок 8 – Спектрограмма участка записи лазерного деформографа

Заключение

Результатом проведенной в рамках диссертации работы, можно считать следующие итоги.

Разработана и создана прецизионная установка «лазерный измеритель вариаций давления гидросферы» и исследованы основные ее технические характеристики. Точность измерения вариаций давления составляет 0,45 мПа (для стальной мембраны $R=50$ мм, $h=0,5$ мм), рабочий диапазон частот условно от 0 до 1000 Гц.

Создан измерительный комплекс на основе приборов, работающих на лазерно-интерференционных методах, таких, как лазерный деформограф, лазерный нанобарограф и лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, который дополнен другими современными приборами: измерителями температуры, скорости и направления ветра, гидрофонами, излучателями и т.д. Определены основные технические характеристики комплекса.

Разработана методика проведения комплексных исследований по изучению взаимодействия волновых полей системы «атмосфера-литосфера-гидросфера» в широком диапазоне частот на лазерном интерференционном комплексе.

Проведены мониторинговые измерения вариаций микродеформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений и других параметров геосфер.

При обработке синхронных данных записей лазерного нанобарографа и лазерного 52,5-метрового деформографа установлено, что существуют как коррелированные так и не коррелированные вариации атмосферного давления и микродеформации земной коры зоны перехода геосфер.

Установлено, что величина преобразованной энергии морских ветровых волн в упругую энергию зоны перехода почти на порядок превышает теоретические оценки, полученные Ф.И. Монаховым.

Выявлено, что: 1) амплитуды инфрагравитационных морских волн сравнимы по величине с амплитудами гравитационных морских волн;

2) периоды инфрагравитационных морских волн не зависят от периодов гравитационных морских волн.

Список публикаций по теме диссертации

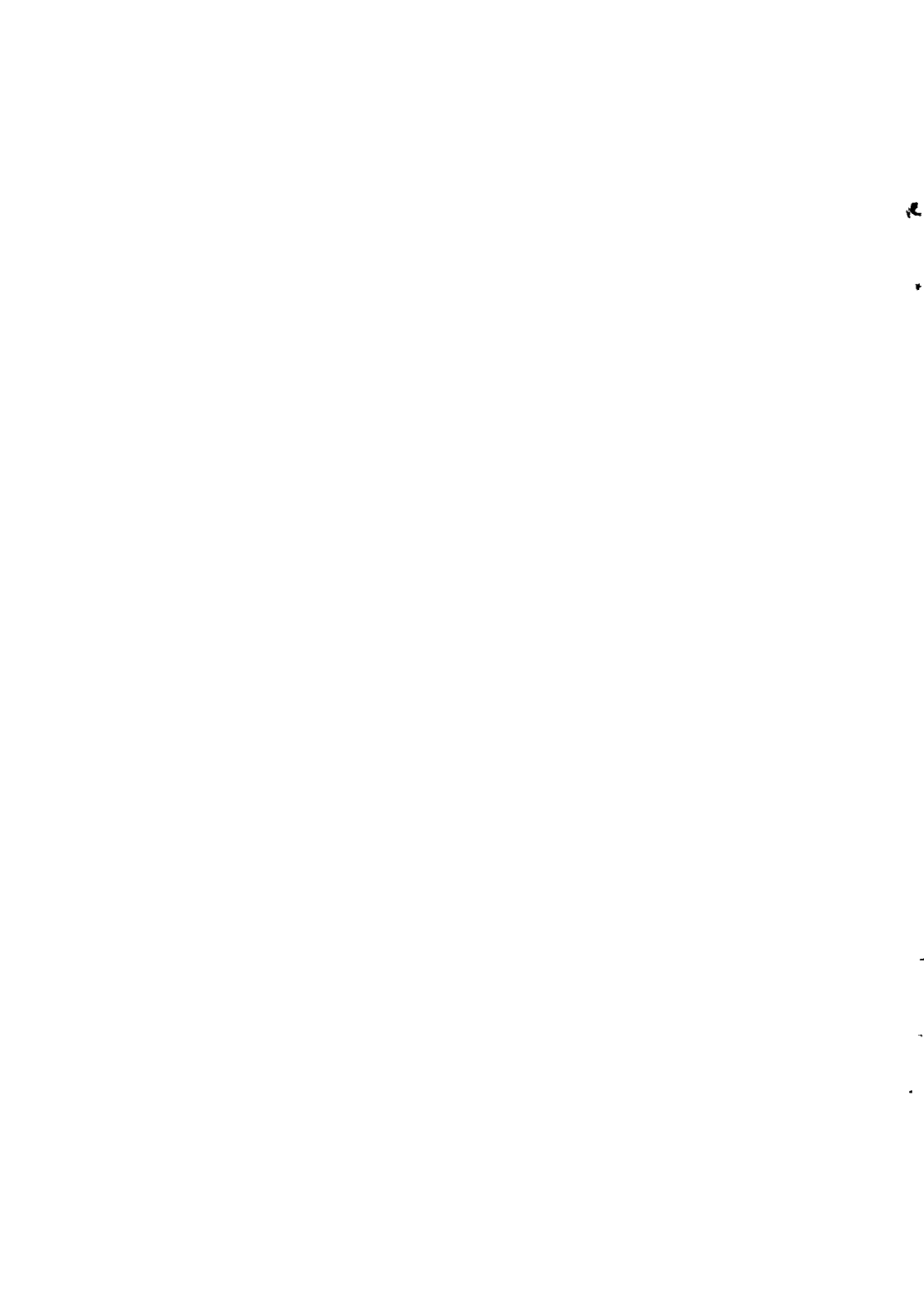
1. Бурундукова А.Ш., Валентин Д.И., Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Яковенко С.В., Яшков Д.В.. Изучение вариаций напряженно-деформационного поля Земли лазерно-интерференционными методами// Тезисы докладов международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» Санкт-Петербург 2000 г. С. 16-17.
2. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Мукомел Д.В., Швец В.А., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс // Второй всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон». Владивосток. 2001. С. 77-79.
3. Долгих Г.И., Швец В.А., Яковенко С.В. Особенности создания

- лазерного измерителя вариаций давления гидросферы // Симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон» Владивосток 3-7 сентября 2001 г. С. 82-83.
4. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Валентин Д.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы "атмосфера-гидросфера-литосфера"//Приборы и техника эксперимента. 2002. №3 С. 120-122.
 5. Batushina I.V., Valentin D.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Holodkevich E.D., Shvets V.A., Yakovenko S.V.. Atmospheric and hydrospheric laser interferometers// J. Proceeding SPIE. 2002. №752. P. 325-329.
 6. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Швец В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф // Третий Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон».Материалы докладов. Владивосток 1-5 сентября 2003г. Издательство ДВГУ. С. 44-48.
 7. Долгих Г.И., Чупин В.А., Яковенко С.В.. Изучение трансформации низкочастотных звуковых колебаний в шельфовой области моря лазерно-интерференционными методами // XIII сессия Российского акустического общества. Сб. трудов. Т.2. М.: ГЕОС, 2003. С. 128-132.
 8. Алексеев А.В., Валентин Д.И., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Холодkevич Е.Д., Швец В.А., Яковенко С.В.. Регистрация инфрагравитационных волн на границе гидросфера-литосфера береговым лазерным деформографом // Доклады Академии Наук. 2003. Т.389, №2. С.244-246.
 9. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Швец В.А., Яковенко С.В.. Оптический измеритель давления // Патент на полезную модель №45528. Заявка №2004131782. Приоритет полезной модели 03 ноября 2004 г. Зарегистрировано 10 мая 2005. Срок действия до 03 ноября 2009 г.
 10. 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 // Журнал «Физика Земли», 2004, №8. С.82-90.
11. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Плотников А.А., Швец В.А., Яковенко С.В.. Цифровая система регистрации лазерных установок // Тезисы докладов международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» Санкт-Петербург 2004 г. С. 21.
 12. Shvets V.A., Dolgikh G.I., Kovalev S.N., Yakovenko S.V.. Design features and prospect of use of laser device for measuring of variations of hydrosphere pressure for research in an infrasonic range // Bridges of science between North America and the Russian Far East. Past, present and future. An International conference of the Arctic and North Pacific. Proceedings. Vladivostok, Dalnauka, 2004. P. 47.
 13. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Швец В.А., Яковенко С.В.. Погружной прецизионный измеритель давления // IV Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон» Владивосток 5-9 сентября 2005 г. С. 38-41.
 14. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Журнал «Приборы и техника эксперимента». 2005 г. №6. С. 17-18.
 15. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Швец В.А., Яковенко С.В.. Цифровая система регистрации для измерительных приборов, работающих с использованием лазерно-интерференционных методов: принцип работы и особенности конструкции // IV Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон» Владивосток 5-9 сентября 2005 г. С. 66-68.
 16. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Швец В.А., Яковенко С.В.. Применение лазерно-интерференционного комплекса в океанологических исследованиях // Материалы международной научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового Океана». Владивосток, 14-17 сентября 2005 г. Издательство

ИПМТ ДВО РАН. С. 143-148.

17. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Швец В.А., Яковенко С.В.. Оценка соотношения энергии ветровых волн и микродеформаций земной коры в неволновой зоне на основе экспериментальных данных сейсмоакустико-гидрофизического комплекса МЭС // IV Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон» Владивосток 5-9 сентября 2005 г. С.220-225.
18. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В.. Экспериментальные и модельно-теоретические оценки влияния вариаций давления атмосферы на уровень микродеформаций земной коры // IV Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон» Владивосток 5-9 сентября 2005 г. С.93-98.
19. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Овчаренко В.В., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные процессы земной коры переходных зон Камчатского и Приморского регионов// IV Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон» Владивосток 5-9 сентября 2005 г. С.15-18.



Яковенко Сергей Владимирович

**ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ОКЕАНА**

АВТОРЕФЕРАТ

Отпечатано в ОНТИ ТОИ ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

Подписано к печати 30.05.2006 г.

Заказ 56

Формат 50x84/16

Тираж 100 экз.

2006A

13935

№ 13935