

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, проф. Кантаржи Измаила Григорьевича  
на диссертационную работу *Долгих Станислава Григорьевича*  
на тему **«ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН»**,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков  
полезных ископаемых

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

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

**Актуальность темы исследования.** Приборы, созданные на основе современных лазерно-интерференционных методах: лазерные деформографы, лазерные нанобарографы, лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны чрезвычайно важны в исследованиях возникновения и развития колебаний и волн широкого диапазона частот во всех геосферах, 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».

Научные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены в рамках выполнения нескольких госпрограмм, грантов РФФИ, гранта РНФ, грантов ДВО РАН.

**Целью диссертационной работы** являлось развитие возможностей исследований колебаний и волн в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» на уровне фоновых колебаний в широком частотном диапазоне с помощью разработки аппаратного комплекса и проведения экспериментальных исследований по изучению геосферных процессов искусственного и естественного происхождения.

В связи с этим был сформирован соответствующий набор задач, среди которых:

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

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

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

**Теоретическая и практическая значимость результатов работы.** К результатам, определяющим теоретическую значимость работы, относятся:

1. Разработанный лазерный нанобарограф и лазерный измеритель вариаций давления гидросферы для регистрации вариаций давления атмосферы и гидросферы в широком частотном диапазоне.

2. Разработанные 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».

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

4. Экспериментально полученные закономерности возникновения и динамики колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн морского и не морского происхождения.

Практическая значимость результатов работы определяется следующим:

Результатом диссертации является создание лазерно-интерференционного комплекса, что является практическим развитием методов и средств дистанционного исследования океана, атмосферы, литосферы и их взаимодействия. В процессе выполнения работы были созданы лазерно-интерференционные комплексы для мониторинга вариаций деформаций земной коры, атмосферного и гидросферного давлений и их взаимодействия. Данные комплексы были установлены на берегу Японского и Охотского морей.

По полученным результатам гидроакустического эксперимента можно оценивать закономерности распространения низкочастотных морских волн по шельфу убывающей

глубины, например, для морских ветровых волн, короткопериодных внутренних морских волн. Кроме того, появляется возможность разделения систем ветровых волн, генерируемых в бухте, и приходящих из открытого моря.

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.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертации представлены в 51 (пятьдесят одной) работе, включая: 36 статей в журналах, включенных в список ВАК и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science); 15 работ в других изданиях и трудах научных конференций.

Основные результаты диссертации были представлены также на всероссийских и международных конференциях.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность** определяются использованием современной лазерно-интерференционной измерительной техники для получения результатов, согласующихся с современными представлениями о вариациях деформаций земной коры, атмосферного и гидросферного давлений и их взаимодействия.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна результатов исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, охарактеризован личный вклад диссертанта, даны другие характеристики выполненного диссертационного исследования.

В **главе 1 «Лазерно-интерференционные приборы для измерения основных параметров системы «атмосфера-гидросфера-литосфера»** описываются созданные на основе современных лазерно-интерференционных методов следующие приборы: 1) лазерные деформографы, позволяющие проводить измерения вариаций микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 Гц до килогерц с высокой точностью; 2) лазерные нанобарографы, позволяющие измерять вариации атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа; 3) лазерные измерители вариаций гидросферного давления, позволяющие измерять вариации гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Все эти установки относятся к приборам безинерционного типа и дают возможность проводить

измерения прямыми методами, которые намного чувствительней параметрических методов.

Сформулирована задача по созданию комплексов, объединённых в единую сеть с вспомогательными установками, с разработкой методики проводимых измерений и разработкой соответствующего математического аппарата, направленного на оперативный сбор информации и обработку полученных экспериментальных данных с последующей интерпретацией полученных результатов.

Во второй главе **«Лазерно-интерференционные комплексы для измерения вариаций деформаций земной коры, микроколебаний атмосферного и гидросферного давлений инфразвукового и звукового диапазонов»** описываются лазерно-интерференционные комплексы, установленные на берегах Японского и Охотского морей, в состав которых входят различные лазерно-интерференционные приборы и вспомогательная аппаратура для мониторинга колебаний и волн на границе раздела системы «атмосфера-гидросфера-литосфера».

Были созданы два лазерно-интерференционных комплекса, расположенные на берегах Японского моря и Охотского моря. Все лазерные измерители созданы на основе интерферометра Майкельсона. Установленный на берегу Японского моря лазерно-интерференционный комплекс «м. Шульца» включает: неравноплечие лазерные деформографы горизонтального типа с длиной измерительных плеч 52.5 м и 17.5 м и ориентацией север-юг и запад-восток, соответственно; неравноплечий лазерный деформограф вертикального типа с длиной измерительного плеча 3.5 м для измерения вариаций микродеформаций верхнего слоя земной коры; лазерный нанобарограф для измерения вариаций атмосферного давления; лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны для измерения вариаций гидростатического давления.

Установленный на берегу Охотского моря лазерно-интерференционный комплекс «м. Свободный» включает: неравноплечий лазерный деформограф горизонтального типа с длиной измерительного плеча 10.5 м и ориентацией север-юг для измерения вариаций микродеформаций верхнего слоя земной коры и лазерный нанобарограф для измерения вариаций атмосферного давления.

В третьей главе **«Особенности применения лазерно-интерференционного комплекса в гидроакустических исследованиях»** приведены методы и результаты гидроакустических исследований в экспериментах разных лет.

Применение установок, созданных на основе лазерно-интерференционных методов, в гидроакустических и сейсмоакустических исследованиях позволяет изучать процессы трансформации волн на границе «вода-дно». Проведены экспериментальные

работы, с применением низкочастотных гидроакустических излучателей, береговых лазерных деформографов, лазерных измерителей вариаций давления гидросферы, которые позволили изучить трансформацию волн низкочастотного звукового диапазона и высокочастотного инфразвукового диапазона на границе «вода-дно». В ходе экспериментальных работ было определено наиболее эффективное соотношение длины волны излучаемого гидроакустического сигнала к его заглублению, вызывающее наиболее мощные сейсмоакустические волны, регистрируемые лазерными деформографами.

Было определено, что около 0,3 % энергии сейсмоакустических поверхностных волн переходит в энергию гидроакустических волн на частоте излучаемого сигнала.

В процессе проведения экспериментов установлено, что морские ветровые волны не оказывают модулирующего воздействия на распространяющиеся гидроакустические волны с частотами около 32, 245 и 321 Гц. Модулирующее воздействие на распространяющиеся гидроакустические волны оказывают более низкочастотные сейши.

Установлено, что при глубинах моря больше половины длины 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 равна 17,8 м. Можно ожидать, что с понижением частоты излучаемого гидроакустического сигнала этот эффект будет проявляться на больших глубинах. Так, например, при излучении гидроакустического сигнала на частоте 1 Гц на шельфе убывающей глубины с аналогичными упругими параметрами морского дна не будет этого гидроакустического сигнала в воде, начиная с глубин около 390 м. По полученному результату можно оценивать закономерности распространения более низкочастотных морских волн по шельфу убывающей глубины, например, для морских ветровых волн, короткопериодных внутренних морских волн. Для них также существуют глубины, при которых значительная доля их энергии трансформируется в энергию упругих колебаний верхнего слоя земной коры.

**В четвертой главе «Возникновение, развитие и трансформация колебаний и волн ветрового и инфрагравитационного диапазонов» с целью исследования природы возникновения, развития и трансформации колебаний и волн ветрового и инфрагравитационного диапазонов были проанализированы экспериментальные данные приборов, входящих в состав лазерно-интерференционного комплекса. При анализе**

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

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

Для изучения колебаний и волн диапазона морских инфрагравитационных волн не морского происхождения были проанализированы синхронные экспериментальные данные лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. В результате анализа многочисленных экспериментальных данных рассматриваемого диапазона периодов было установлено, что колебания давления гидросферы, зарегистрированные лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, сопровождаются колебаниями давления атмосферы. В результате анализа синхронных данных лазерных деформографов и лазерного нанобарографа было выявлено, что синхронно с вариациями атмосферного давления наблюдаются вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры. В редких случаях вариации давления гидросферы и вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры, рассматриваемого диапазона, не сопровождаются соответствующими колебаниями атмосферного давления.

Анализ синхронных экспериментальных данных лазерного нанобарографа и лазерных деформографов показал, что необходимо учитывать влияние вариаций атмосферного давления на уровень микродеформаций верхнего слоя земной коры. Так после вычета деформации земной коры, вызванной вариациями атмосферного давления, уверенно выделены сфероидальные колебания Земли в рассматриваемом диапазоне периодов, которые были «замаскированы» более мощными атмосферными процессами.

## Глава 5 «Деформационные аномалии, сопутствующие возникновению цунами».

Исходя из данных лазерного деформографа, деформационный метод определения цунамигенности землетрясений является наиболее эффективным и перспективным при его использовании для предупреждения.

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

В **заключении** сформулированы выводы диссертационного исследования.

По диссертационной работе возникли следующие **замечания**:

1. Положения, выносимые на защиту, сформулированы неудачно. Это не должны быть повторенные пункты научной новизны и практической значимости, а именно теоретические положения, представляемые на защиту. В положениях, выносимых на защиту, показаны приборы и методы, а должны быть результаты, прежде всего.
2. Насколько при изучении волн на границе «вода-дно» важны орографические и упругие характеристики дна? В диссертации нет ответа на этот вопрос. А от этого ответа зависит, насколько соответствующие результаты диссертации универсальны.
3. “Исследования последнего времени показали, что причиной колебаний Земли в диапазоне 30–180 с могут являться морские инфрагравитационные волны [208, 225, 235]. Работы, проведенные коллективом нашей лаборатории [81] в данном вопросе, **имеют приоритет**”. Это цитата из диссертации – стр.167.

Посмотрим работы, на которые даются ссылки.

81. Долгих Г.И., Плотников А.А., Швец В.А. Лазерный гидрофон // Приборы и техника эксперимента. **2007.** № 1. С. 159–160.
208. Lognorme P. et al. Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal mode summation for a spherical earth model with a realistic atmosphere *Geophys // Journal Int.* **1998.** Vol. 135, P. 388-406.
225. Rornanowicz B., Rhie J., Colas B. Insights into the origin of the Earth's hum and microseisms // *Eos* 86(52). Fall Meet. Suppl. abstr. **2005.** S31A-0271.
235. Tanimoto T. The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the Earth // *Geophys. J. Int.* **2005.** Vol. 160. P. 276-298.

Значит приоритет определяется не датой публикации, тогда чем?

4. В главе 4 описаны измерения с использованием лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. Приборы были установлены на глубинах 11.8 и 4.5 м в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря. Были выделены два вида ветровых волн, это волны, пришедшие из Японского моря – «волны моря» и волны, которые генерируются ветром в самой бухте – «волны бухты». Установлены частотные диапазоны для обеих систем волн. Очень полезно было бы параллельно выполнить численные эксперименты по одной из применяемых ветро-волновых программ для тех же условий. Например, спектральной моделью SWAN. Сопоставление измерений и численных результатов могло бы дать важные результаты. Кроме того, такой анализ может быть важен для определения нагрузок на портовые гидротехнические сооружения, см., например, [http://publications.isope.org/proceedings/ISOPE/ISOPE%202021/data/pdfs\\_Vol3/3262-21TPC-0303.pdf#search=%22Kantarzhi%22](http://publications.isope.org/proceedings/ISOPE/ISOPE%202021/data/pdfs_Vol3/3262-21TPC-0303.pdf#search=%22Kantarzhi%22)
5. В разделе 4.2 описаны исследования гравитационных и инфрагравитационных на входе и внутри прибойной зоны. Однако, нет никаких характеристик этой прибойной зоны. Каков уклон дна, характеристика дна, глубины, что на урезе: пляж, клиф? И т. д. Без этого трудно понимать обсуждаемые результаты.

**К редакционным замечаниям** можно отнести следующие:

1. «...при глубинах моря больше половины гидроакустической волны...». Встречается несколько раз. Половина чего?
2. «... по полученному результату можно оценивать закономерности ...». Неудачное выражение
3. «... степень уменьшения глубины ...» это уклон дна.

4. “Приборы были установлены на глубинах 11.8 и 4.5 м в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря по направлению движения морских ветровых волн.”  
Направление распространения морских волн менялось за время измерений.
5. В тексте диссертации встречаются описки.

Высказанные замечания не влияют на оценку диссертационной работы Долгих С.Г.

### **Заключение**

1. Диссертация Долгих Станислава Григорьевича соответствует паспорту научной специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.
2. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.
3. Диссертация, представленная на соискание учёной степени доктора технических наук, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения создания и применения установок, на основе современных лазерно-интерференционных методов, позволяющих проводить измерения одновременно во всех геосферах с высокой точностью в широком частотном и динамическом диапазонах, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.
4. Защищаемые положения отличаются актуальностью и научной новизной, а достоверность и обоснованность результатов исследований подтверждается использованием современной лазерно-интерференционной измерительной техники для получения результатов, согласующихся с современными представлениями о вариациях деформаций земной коры, атмосферного и гидросферного давлений и их взаимодействия.

5. Диссертация Долгих Станислава Григорьевича «Лазерно-интерференционный комплекс для исследований геосферных процессов переходных зон» соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней (пп. 9–14), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Официальный оппонент,  
Доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО Научно-исследовательский  
Московский государственный строительный университет,  
Профессор кафедры  
«Гидравлика и гидротехническое строительство»

И.Г. Кантаржи

«19» апреля 2022

Подпись Кантаржи Измаила Григорьевича заверяю:



О.И. Перевезенцева

**Контактные данные:**

Ф.И.О. Кантаржи Измаил Григорьевич

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: профессор

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Научно-исследовательский Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВО НИУ МГСУ)»

Должность: профессор кафедры «Гидравлика и гидротехническое строительство»

Почтовый адрес: 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26

Контактный телефон: +7 903 533 7830

E-Mail: kantardgi@yandex.ru