

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Долгих Станислава Григорьевича «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».

### **Актуальность исследований**

Основными задачами геофизических исследований является изучение различных физических полей Земли. Поскольку Земля и все ее сферы являются открытыми динамическими системами, тесно связанными между собой, то распределение параметров физических полей Земли зависит от общего состояния этих полей на глубине и поверхности Земли, в море или океане, а также в воздушной оболочке. Поэтому определяющим фактором, задающим состояние физических полей Земли, является взаимодействие составляющих ее сфер: атмосферы, гидросферы и литосферы. Поскольку именно в областях границ этих сфер концентрируются наиболее опасные для человека явления как природного, так и техногенного происхождения, то выявление особенностей протекания процессов на контрастных межгеосферных границах Земли является чрезвычайно важной фундаментальной и прикладной проблемой. В свою очередь это требует непрерывного совершенствования методов и средств измерения естественных физических полей Земли, а также повышения чувствительности и расширения спектрального и динамического диапазонов измерений. В связи с чем диссертационная работа С.Г.Долгих, направленная на разработку и создание уникальных лазерно-интерференционных измерительных комплексов, состоящих из лазерных деформографов, лазерных нанобарографов и лазерных измерителей вариаций давления гидросферы, создание методических основ их применения в качестве

сверхчувствительных детекторов геосферных источников низкочастотного звукового и инфразвукового диапазонов, а также разработку новых методов исследования волновых полей геосфер естественного и искусственного происхождения является чрезвычайно актуальной.

Уникальность этих лазерно-интерференционных измерительных комплексов заключается в возможности проведения измерений практически от 0 Гц с высокой точностью одновременно в атмосфере, гидросфере и литосфере. Синхронизированное использование всех установок этого измерительного комплекса позволяет изучать физику океанологических процессов на новом, прецизионном уровне. Комплексность разработанных в диссертации методов исследования процессов протекающих в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» позволяет построить модель энергообмена геосфер зоны перехода и оценить вклад энергии атмосферных и гидросферных процессов в сейсмичность верхнего слоя земной коры, а также получить ряд фундаментальных результатов по взаимодействию 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 явления на границе раздела сред.

**Обоснованность и достоверность полученных научных результатов** обусловлена использованием современного высокотехнологичного оборудования, апробированных экспериментальных методов измерения и сопоставлением полученных экспериментальных результатов с результатами, полученными другими авторами.

**Научная новизна полученных результатов:**

В диссертационной работе впервые получены следующие результаты

- Разработан уникальный комплекс измерительного лазерного оборудования, позволяющий существенно расширить спектральный частотный диапазон и увеличить точность измерений параметров геосферных процессов, протекающих на границе «атмосфера-гидросфера-литосфера», включающий:
  - лазерные деформографы, обеспечивающие точность измерений деформаций земной коры на уровне 0,3 нм- в частотном диапазоне от 0 Гц до 10 кГц;
  - лазерные нанобарографы для измерения вариаций давления атмосферы;
  - лазерные измерители вариации давления гидросферы;
- Впервые исследованы процессы зарождения и трансформации морских инфрагравитационных волн, основанных на анализе многолетних экспериментальных данных, полученных с использованием измерительного лазерно-интерференционного комплекса;
- Впервые, с использованием измерительного лазерно-интерференционного комплекса, обнаружены деформационные аномалии земной коры вызванные подвижками дна океана, характерные для цунамигенных землетрясений.

**Значимость научных результатов** работы состоит в разработке и создании измерительных лазерно-интерференционных комплексов для исследования геосферных процессов в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера» в частотном диапазоне от 0 Гц (условно) до кГц на уровне фона. Это открыло возможность проведения уникальных экспериментальных исследований для изучения закономерностей распространения и трансформации гидроакустических и сейсмоакустических колебаний на границе вода-дно, исследования динамики и трансформации морских ветровых и инфрагравитационных волн, а также выявить деформационную аномалию земной коры, характерную для цунамигенных землетрясений.

Как результат, созданные в диссертационной работе С.Г.Долгих измерительные лазерно-интерференционные комплексы позволяют получать уникальные экспериментальные данные для оценки экологических последствий, связанных с воздействием малоизученных инфразвуковых колебаний и волн на биосферу и гидросферу Земли.

**Содержание диссертации** отражено на 275 страницах и включает в себя 136 рисунков, 13 таблиц и список цитируемой литературы из 243 наименований.

**Во введении** диссертантом дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель, задачи и научная новизна работы, сформулированы защищаемые положения, дана информация о публикациях по теме диссертации и конференциях, где были представлены результаты работы.

**В первой главе** приводится описание разработанных в диссертационной работе приборов, основанных на использовании современных лазерно-интерференционных методов измерений, перспективных для регистрации колебаний и волн в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера». Отмечается, что лазерно-интерференционные методы регистрации деформационных процессов относятся к прямым методам исследования и позволяют изучать геосферные физические процессы в условиях переходных зон «атмосфера-гидросфера-литосфера» на новом, прецизионном уровне. Разработанные в диссертации лазерно-интерференционные измерительные приборы относятся к приборам безинерционного типа, и предназначены для исследования процессов взаимодействия геосфер в широком спектральном диапазоне частот, практически от нуля герц до килогерц.

В главе приводится описание созданных однокоординатных и двух координатных лазерных деформографов различной длины и ориентации, предназначенных для измерения вариаций микродеформаций верхнего слоя земной коры в диапазоне частот практически от 0 (условно) до 10 000 Гц с

точностью на уровне фоновых колебаний. Все лазерные деформографы созданы на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона, с использованием в качестве источника света частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера.

На основе равноплечего интерферометра Майкельсона в диссертации разработаны и созданы лазерные нанобарографы и лазерные измерители вариаций давления гидросферы. Экспериментально показано, что лазерный нанобарограф позволяет регистрировать вариации атмосферного давления в частотном диапазоне практически от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Для регистрации давления гидросферы созданы лазерные измерители вариаций давления гидросферы, которые позволяют проводить измерения с аналогичной точностью в указанном выше частотном диапазоне.

Таким образом создание и применение однотипной сверхширокополосной измерительной аппаратуры, способной одновременно работать в трех геосферах, позволяет безошибочно определять первоисточник колебаний и волн в системе «атмосфера-гидросфера-литосфера».

В завершении первой главы делается вывод о целесообразности и необходимости создания единых измерительных комплексов, состоящих из измерительных устройств, в основе которых лежит единый лазерно-интерференционный физический принцип измерений, которые объединены в единую информационно-измерительную сеть, использующую единую методику проводимых измерений и специально разработанный математический аппарат, что позволит обеспечить оперативный сбор информации и обработку полученных экспериментальных данных с последующей математической обработкой и интерпретацией полученных результатов.

Материалы и выводы первой главы обосновывают первое защищаемое положение.

**Во второй главе** приводится описание лазерно-интерференционных комплексов для одновременной регистрации колебаний и волн звукового и инфразвукового диапазонов в атмосфере, гидросфере и литосфере, которые были установлены в береговой зоне Японского и Охотского морей.

В Приморском крае лазерно-интерференционный комплекс был размещен на Морской экспериментальной станции (МЭС) ТОИ ДВО РАН на мысе Шульца бухта Витязь, Японское море. В него входили неравноплечие горизонтальные лазерные деформографы с длиной измерительного плеча 52.5 м с ориентацией север-юг, и 17.5 м с ориентацией запад восток, вертикальный лазерный деформограф, лазерные нанобарограф, лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, метеостанция, гидрологическая аппаратура, сейсмоакустические и гидроакустические излучатели и другие приборы. На юге о. Сахалин на Морской экспериментальной станции СКБ САМИ ДВО РАН мыс Свободный (Охотское море) был расположен второй лазерно-интерференционный измерительный комплекс. Комплекс состоял из 10.5 метрового неравноплечевого горизонтального лазерного деформографа с ориентацией Север-Юг, лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и метеостанции.

Использование пространственно разнесенных лазерно-интерференционных измерительных комплексов позволило получить большой объем экспериментальных данных по микродеформации земной коры и вариациям давления атмосферы и гидросферы.

Второе защищаемое положение раскрывается в материалах и выводах этой главы.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям, проводимым на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», в которых лазерно-интерференционный измерительный комплекс использовался для детектирования сигналов от низкочастотных гидроакустических и сейсмоакустических излучателей, которые перемещались по акватории бухты Витязь.

Исследования проводились в летний период 2004, 2009 и 2015 годов. Целью исследований являлось изучение закономерности распространения и преобразования гидроакустических колебаний на границе вода-дно, что в перспективе может быть использовано для мониторинга морского дна и донных отложений. В этих экспериментах в качестве источников сигнала применялись низкочастотные гидроакустические излучатели, а в роли приемных систем применялись лазерные деформографы различной длины и ориентации, а также лазерные измерители вариаций давления гидросферы. Проведенные эксперименты позволили определить диаграммы направленности лазерных деформографов и оценить количество энергии трансформируемой из гидроакустической волны в сейсмоакустические колебания дна. В результате, выполненные экспериментальные исследования показали, что для диагностики морского дна можно применять систему из излучателя с центральной частотой 33 Гц и берегового лазерного деформографа (приемника сигнала).

Изучение взаимодействия гидроакустических сигналов с частотами 32, 245, 321 Гц с ветровыми волнами, позволило определить, что морские ветровые волны не оказывают модулирующего воздействия на гидроакустические волны в этом диапазоне частот.

В 2007 и 2016 годах проводились экспериментальные исследования с применением низкочастотного сейсмоакустического излучателя и лазерно-интерференционных измерительных систем. Оценка энергии сейсмоакустических волн, зарегистрированных лазерными деформографами, и гидроакустических волн, зарегистрированных с помощью лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, показала, что на частоте излучаемого сигнала около 0.3% излученной энергии переходит из одной геосферы в другую на границе дно-вода.

Таким образом, было показано, что система из низкочастотных гидроакустических и сейсмоакустических излучателей в комбинации с

лазерно-интерференционными измерительными системами может быть использована для дистанционного зондирования дна морских акваторий.

Материалы и выводы третьей главы обосновывают третье защищаемое положение.

**В четвертой главе** исследуется трансформация энергии ветровых волн в инфрагравитационные колебания морского дна. Исследования производились в 2011 и 2012 годах на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Анализ экспериментальных данных, полученных с помощью лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы показал, что в бухте Витязь одновременно регистрируются как ветровое волнение самой бухты, так и ветровое волнение открытой части Японского моря. Было установлено, что по мере убывания глубины шельфовой зоны энергия волнового ветрового возмущения трансформируется в инфрагравитационные колебания морского дна.

Результат выделения колебаний земной коры с периодами от 25 до 50 с из широкого диапазона данных временного ряда, полученных с использованием неравноплечего 52.5 метрового горизонтального лазерного деформографа, позволил установить, что периоды создаваемых морским волнением инфрагравитационных волн не зависят от периодов гравитационных ветровых волн, а их амплитуды примерно одинаковы.

Таким образом, сопоставление данных, полученных в результате синхронизации измерений, выполняемых всеми приборами лазерно-интерференционного комплекса, позволило установить, что колебания давления гидросферы зачастую связаны с колебаниями давления атмосферы.

Это говорит о важности и необходимости учета вклада атмосферного давления при проведении измерений уровня микродеформаций верхнего слоя земной коры. В дальнейшем, вычитание вклада вариаций атмосферного давления в микродеформацию верхнего слоя земной коры из результатов измерений, полученных с использованием лазерного деформографа,



позволило выделить сфероидальные колебания Земли, которые обычно маскируются атмосферными процессами.

Четвертое и пятое защищаемые положения раскрываются в материалах и выводах четвертой главы.

**Пятая глава** диссертации посвящена деформационному методу определения степени цунамигенности землетрясений. Сущность метода заключается в выявлении деформационной аномалии на записях лазерных деформографов. Впервые деформационная аномалия была выявлена на записи прибора за 26 декабря 2004 года. Деформационная аномалия, выявленная с использованием лазерного деформографа с базой 52.5-метра, составила величину около 59.3 мкм и была зарегистрирована через 19 мин 54 с после начала события, при этом расстояние от эпицентра до лазерного деформографа составило примерно 5 500 км. Позднее, данный метод был применен при анализе данных в момент регистрации цунамигенных землетрясений, произошедших в различных регионах Тихого океана. Было показано, что, в сравнении с другими методами сейсмических измерений, лазерно-интерференционный метод измерения микродеформаций поверхности земной коры является наиболее эффективным и перспективным при его использовании в интересах служб предупреждения цунами.

В конце пятой главы приводится пример использования комплексного метода исследования геосферного явления, которое по своим характеристикам похоже на метеоцунами. На записях лазерного нанобарографа было выявлено резкое увеличение атмосферного давления, вызвавшее морские волны практически солитоноподобной формы, зарегистрированные лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, установленном на шельфе Японского моря вблизи мыса Шульца. Как было показано, через несколько часов после регистрации атмосферного возмущения лазерно-интерференционными измерительными устройствами были зарегистрированы полуторачасовые колебания на границах атмосфера-гидросфера-литосфера.

Таким образом, полный анализ информации, полученной с использованием лазерно-интерференционного измерительного комплекса, показал, что источник этих колебаний находится в атмосфере. Эти исследования подтвердили, что изменение атмосферного давления приводит к возмущению геосферного взаимодействия и способно явиться источником метеоцунами.

Материалы и выводы пятой главы обосновывают шестое защищаемое положение.

В **заключении** кратко приведены основные результаты диссертационной работы.

Список используемой литературы в полной мере отражает современное состояние мировой науки в областях, посвященных созданию безынерционной аппаратуры для измерения основных параметров геосфер, а также лазерно-интерференционным приборам, разработанным для измерения вариаций микродеформаций земной коры.

Несмотря на общую высокую оценку полученных в данной работе результатов, я хотел бы сделать **ряд замечаний**:

1. Во второй главе диссертационной работы приводится описание двух лазерно-интерференционных комплексов, расположенных на шельфах Японского и Охотского морей, а в последующих главах приводятся результаты экспериментальных исследований, полученных только на одном комплексе.

2. Применение комплексного лазерно-интерференционного метода определения первоисточника колебаний диапазона морских внутренних волн приводится на основании только одного экспериментального исследования.

3. В шестой главе описываются результаты применения деформационного метода определения степени цунамигенности землетрясений произошедших в трех регионах Индонезии, Чили и на

западном побережье Северной-Америки, но не рассматриваются цунамигенные землетрясения произошедшие вблизи Японии, которая расположена ближе к месту расположения лазерно-интерференционного комплекса.

### **Заключение**

Считаю, что диссертационная работа Станислава Григорьевича Долгих «Лазерно-интерференционный комплекс для исследований геосферных процессов переходных зон» является завершенным научно-квалификационным исследованием и содержит решения важной научно-практической задачи по созданию высокоточных лазерно-интерференционных измерительных комплексов для регистрации колебаний и волн в сверхнизкочастотном диапазоне.

Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science, а так же были представлены на всероссийских и международных конференциях.

Полученные результаты полностью соответствуют поставленной цели и задачам. Диссертация и автореферат имеют внутреннее единство и включают новые научные результаты и положения, выносимые на защиту.

Указанные выше замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа Станислава Григорьевича Долгих «Лазерно-интерференционный комплекс для исследований геосферных процессов переходных зон» соответствует всем критериям, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени доктора наук, а ее автор С.Г. Долгих достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Я, Кульчин Юрий Николаевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

**Официальный оппонент**

Научный руководитель  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института автоматики и процессов  
управления Дальневосточного отделения  
Российской академии наук,  
академик Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

690041, Владивосток, ул. Радио, д.5

тел.: 8 (423) 2310439

e-mail: [kulchin@iacp.dvo.ru](mailto:kulchin@iacp.dvo.ru)

Ю. Н.Кульчин

25 апреля 2022 года

Подпись Ю.Н.Кульчина заверяю:

заместитель директора ИАПУ ДВО РАН  
по научно-образовательной деятельности,  
ученый секретарь  
кандидат технических наук



С.Б.Змей