

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Локутова Артема Владимировича

«Динамика волн цунами в северо-западной части Тихого океана на основе инструментальных измерений и численного моделирования»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – *«физика атмосферы и гидросферы»*

Диссертационная работа Локутова А.В. посвящена исследованию физических особенностей трансформации волн цунами в северо-западной части Тихого океана и в его прибрежной зоне по данным инструментальных наблюдений исторических цунами 2000 – 2011 гг. с использованием для их обработки методов математического моделирования и современной сейсмической модели очага землетрясения.

Актуальность темы диссертационного исследования определяется тем обстоятельством, что изучение особенностей проявления цунами на шельфе и непосредственно у берега с учетом конкретных геофизических особенностей представляет собой важную часть науки о цунами и имеет при этом большое прикладное значение, прежде всего для совершенствования отечественной службы предупреждения о цунами.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации «21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Проведенные исследования поддерживались грантами РФФИ.

На защиту представлены следующие результаты и положения:

1. На основе современных сейсмических данных об очаге подводного землетрясения, адаптирована численная модель распространения цунами, адекватно описывающая направленность излучения источника и особенности формирования волнового поля в северо-западной части Тихого океана.

2. Волновая картина цунами в северо-западной части Тихого океана в значительной степени обусловлена фокусировкой при прохождении протяженных хребтов, а также влиянием волновой дисперсии.

3. Результирующее волновое поле в прибрежной зоне Дальневосточного региона определяется трансформацией сигнала цунами на внешней границе шельфа и резонансными эффектами в заливах и бухтах.

В целом, представленные на защиту положения являются обобщением следующих результатов, полученных автором диссертации:

1. расчетным путем с использованием современных методик моделирования процессов генерации и распространения волн цунами, а также современных данных о сейсмической природе очага цунами, обосновано положение о том, что пространственные масштабы и асимметрия источников цунами определяют направленность и частотный диапазон проявления цунами в северо-западной части Тихого океана;

2. расчетным путем показано, что эффект позднего добегания максимальной волны (задержка около 4 ч.) при Чилийском цунами 2010 г. в Северо-Курильск может быть объяснен задержкой волнового пакета при последовательных фокусировке и дифракции на Императорском хребте, Маркизских островах, архипелаге Лайн и др. в центральной части Тихого океана;
4. впервые проведен анализ проявления волновой дисперсии в записях ряда слабых цунами, а также Тохоку цунами, результаты которого позволили обосновать оригинальный способ расчета профилей начального возвышения дна по данным записей цунами в рамках приближенной осесимметричной модели источника и уравнения Пуассона;
6. впервые на основе численного эксперимента показано, что стохастизация и усиление сигнала цунами в записях прибрежных донных станций северо-западной части Тихого океана по сравнению с записями станций в открытом океане, обусловлены резонансным взаимодействием волнового пакета цунами и шельфа;
7. впервые определены резонансные периоды, оценена добротность и рассчитаны пространственные структуры собственных мод ряда бухт Курильских островов с различной геометрией и шириной, а также пространственно-временные характеристики собственных мод заливов Анива, Сахалинский и Терпения (о. Сахалин);
8. впервые для Самоанского (2009), Чилийского (2010) и Тохоку (2011) цунами рассчитаны спектральные характеристики записей, при этом выявлено, что на береговых станциях спектры определялись эффектами, обусловленные характером локальной топографии.

Обоснованность и достоверность защищаемых автором положений и результатов обеспечены:

- тщательностью подготовки данных инструментальных измерений, корректным применением математических методов анализа и моделирования случайных временных рядов при анализе и обработке данных, сопоставлением полученных результатов с имеющимися сведениями о проявлениях цунами;
- корректным использованием для решения задач моделирования цунами современных численных методов, вычислительных средств и технологий, а также современной модели сейсмического источника.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Все основные, выносимые на защиту, положения и результаты диссертационной работы являются **новыми**. В их ряду следует отметить новизну и практическую значимость утверждения о запаздывании максимальной волны для цунами, зарождающихся у берегов Южной-Америки, а также обнаружения эффекта усиления цунами в записях прибрежных донных станции за счет резонансного взаимодействия волнового пакета цунами и шельфа. Эти результаты должны учитываться в оперативной работе службы предупреждения о цунами при принятии решений.

Несомненную практическую ценность имеет также выдвинутое автором диссертации положение о том, что результирующее волновое поле в прибрежной

зоне Дальневосточного региона определяется трансформацией волны цунами на внешней границе шельфа и резонансными эффектами в заливах и бухтах, что должно обязательно учитываться при разработке систем информационной поддержки дежурного океанолога службы предупреждения о цунами.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Все основные результаты диссертационной работы представлены в статьях автора, опубликованных в изданиях перечня ВАК.

Структура диссертационной работы полностью отражает логику исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во **Введении** приводится общая характеристика работы, обосновывается её актуальность, научная новизна и практическое значение, формулируются цели и задачи диссертационного исследования.

В **первой главе** дается краткий обзор используемой в диссертационной работе методики анализа данных измерений уровня моря, численного моделирования распространения цунами, проводится обсуждение характера данных, получаемых различными регистраторами и их особенностей в зависимости от расположения мест проведения измерений.

В частности, моделирование процессов распространения цунами проводилось автором путем численного решения системы уравнений мелкой воды на основе явной конечно-разностной схемы. Процедура решения реализована с использованием технологии высокопроизводительных вычислений CUDA.

Оригинальным результатом данной главы, на мой взгляд, является способ расчета профилей начального возвышения дна по данным записей цунами в рамках приближенной осесимметричной модели источника и уравнения Пуассона.

Вторая глава диссертации посвящена анализу генерации и направленности энергии волнового поля на примере наиболее значительных цунами последнего десятилетия, проявления которых было заметным для побережья Дальнего Востока Российской Федерации (Самоа - 29.09.2009, Чили - 27.02.2010, Тохоку - 11.03.2011).

Автором проводится обсуждение особенностей проявления цунами. Анализ генерации и направленности энергии волнового поля проводится на основе численного моделирования. При проведении расчетов в качестве начальных условий используются современные сейсмические модели остаточных вертикальных смещений в очаговой зоне. На основе сравнения рассчитанных волнограмм с инструментальными записями на глубоководных станциях делается вывод об удовлетворительном качественном описании выбранными моделями вертикальных смещений в очаге подводного землетрясения.

Отмечается сравнительно небольшое отличие в моментах прихода волн по результатам наблюдений и моделирования. В качестве причины рассматривается

волновая дисперсия, которая обнаруживается при анализе спектрально-временных диаграмм, построенных автором по инструментальным наблюдениям.

Анализ генерации и направленности энергии волнового поля проводился на основе численного моделирования Самое цунами, Чилийского цунами и Тохоку цунами. Основной вывод по результатам исследований второй главы состоит в следующем. Пространственные масштабы и асимметрия источников цунами определяют направленность и частотный диапазон волнового поля.

В **третьей** главе рассматриваются особенности распространения цунами в открытом океане.

В **первой части главы 3** автор рассматривает влияние топографии дна на формирование волнового поля цунами в северо-западной части Тихого океана на примере Чилийского цунами (27.02.2010). В результате анализа данных инструментальных наблюдений и численного моделирования выделены эффекты задержки волн в определенных направлениях и формирование вторичных волновых пакетов. Проведенные расчеты позволили автору сделать вывод о том, что перечисленные эффекты обусловлены неоднородностями топографии дна. В частности, выявлена причина инструментально зафиксированного эффекта позднего добегаания максимальной волны (задержка около 4 ч.) при Чилийском цунами в Северо-Курильск: задержка волнового пакета при последовательных фокусировке и дифракции на Императорском хребте, Маркизских островах, архипелаге Лайн в центральной части Тихого океана.

В первой части главы обоснован имеющий практическое значение вывод о том, что задержка прихода максимальной волны к побережью Дальнего Востока Российской Федерации характерна для цунами, зарождающихся у берегов Южной-Америки.

Во **второй части главы 3** автором проведено исследование эффектов волновой дисперсии на примере мелкомасштабных цунами (Бонинское – 21.12.2010, Хонсю – 07.12.2012, Японское – 25.10.2013).

В результате исследования, которое проводилось методами спектрально-временного анализа, выявлен дисперсионный характер записей рассматриваемых мелкомасштабных цунами, а также обнаружено проявление дисперсионных эффектов Тохоку цунами в направлении короткой оси очага.

Для Бонинского цунами оценка профилей начального возвышения дна по данным записей цунами в рамках приближенной осесимметричной модели источника и радиально-симметричных волн цунами обнаружила удовлетворительное совпадение с моделью источника, построенного по сейсмическим данным. При этом автором дано обоснование применимости используемого способа оценки на основе сопоставления распределения максимумов на СВАН-диаграмме с теоретической дисперсионно-временной кривой: доказано, что в типичном для цунами интервале периодов от 1 мин до 30 мин вся энергия колебаний уровня была сосредоточена в окрестности теоретической кривой.

В заключительной **четвертой** главе автором проведен анализ особенностей проявления цунами в зоне шельфа и прилегающих акваториях северо-западной части Тихого океана.

В **первой части главы 4** на основе сравнения прибрежных записей Тохоку цунами с глубоководными записями делается вывод о существенной трансформации волнового поля при распространении из глубоководной части акватории на шельф. Физические условия и пространственный масштаб трансформации исследовались на основе численного моделирования с использованием детальной батиметрии Охотского моря и прилегающего к Курильским островам шельфа. В результате показано, что усложнение, стохастизация и усиление сигнала цунами в записях прибрежных донных станции по сравнению с записями глубоководных станций DART, обусловлены резонансным взаимодействием волнового пакета цунами и шельфа, которое начинает резко проявляться на его внешней границе в районе изобаты 100-200 м.

Во **второй части главы 4** приведены результаты исследований резонансных свойств заливов и бухт о.Сахалин, о.Шикотан, о.Симушир с точки зрения возможности усиления естественных длинноволновых колебаний при цунами. С этой целью рассчитаны резонансные периоды, оценена добротность и рассчитаны пространственные структуры собственных мод ряда бухт Курильских островов с различной геометрией и шириной входа (б. Крабовая, б. Церковная, б. Хромова, о. Шикотан, б. Броутона, о. Симушир), кроме того рассчитаны пространственно-временные характеристики собственных мод заливов Анива, Сахалинский и Терпения (о. Сахалин). Проведенный автором количественный и качественный анализ пространственной структуры собственных колебаний рассматриваемых акваторий позволил сделать вывод о возможной трансформации проходящих, характере их усиления и распространения. В частности, при рассмотрении спектральных оценок в бухтах Крабовая и Церковная установлено, что при цунами происходит значительное усиление колебаний на периодах, отвечающих резонансным частотам, и общее усиление (спектральная оценка цунами-сигнала не меньше спектра фонового сигнала). Анализ же пространственной структуры сейш в бухтах показал, что наибольшего усиления колебаний можно ожидать в зонах схождения пучности собственных мод.

В **третьей части главы 4** приведены результаты численного моделирования крупномасштабных резонансных колебаний в заливах О.Сахалин. Полученные результаты свидетельствуют о возможности возбуждения сильными цунами резонансных колебаний в заливах. Этот вывод имеет практическое значение для функционирования службы предупреждения о цунами.

В **Заключении** формулируются основные результаты диссертации. Наиболее значимые из них были упомянуты в ходе обсуждения содержания диссертационной работы.

Замечания

1. На стр.11-12 приводится способ расчета профилей начального возвышения дна по данным записей цунами в рамках приближенной осесимметричной модели источника и уравнения Пуассона. Способ основан на численном

обращении интегрального представления решения задачи Коши для потенциала скорости. К сожалению, алгоритм численного обращения интегрального представления решения не приводится. Остается также не вполне ясной процедура проведения расчетов профилей в случае нескольких записей цунами.

2. Эффективность предложенного способа расчета профилей начального возвышения дна демонстрируется в главе 3 на примере Бонинского цунами путем сравнения восстановленных профилей по записям и сейсмических профилей вдоль лучей распространения цунами – рис.41. При этом не приводится процедура вычисления лучей, а также на графиках правой части рис. 41 не приведены единицы измерений.
3. В тексте диссертации неоднократно производится визуальное сравнение расчетных и зарегистрированных инструментально записей цунами. Полезно было бы сравнить расчеты и данные регистрации более подробно и привести характеристики их расхождения: дисперсию ошибки, максимальную, минимальную ошибку и т.д.
4. В диссертации встречаются ошибки в оформлении текста:
 - не для всех используемых обозначений приведены их определения, в частности, остается только догадываться, что означает термин «теоретическая зависимость волновой дисперсии»;
 - ссылки на литературные источники даются в тексте в редакции [автор, год], в то время как в списке литературы используется сквозная нумерация;
 - в правой части рис. 41 на осях графиков не указаны единицы измерения;
 - в подписях к рисункам 50-51 отсутствуют пояснения относительно расположенного справа графика;
 - замечены опечатки на стр.61, 106, 107, 108

Перечисленные выше недостатки не снижают высокой оценки представленной к защите диссертации. Диссертационная работа Лоскутова А.В. «Динамика волн цунами в северо-западной части Тихого океана на основе инструментальных измерений и численного моделирования» по объему и сложности проведенных исследований соответствует **«Положению о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» от 21.04.2016 г. № 335** и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи исследования физических особенностей трансформации волн цунами в северо-западной части Тихого океана и в его прибрежной зоне, имеющей прикладное значение для совершенствования отечественной службы предупреждения о цунами.

Считаю, что в целом тема и содержание диссертации «Динамика волн цунами в северо-западной части Тихого океана на основе инструментальных измерений и численного моделирования» соответствуют специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы». Диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор Лоскутов Артем Владимирович заслуживает присуждения ему ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Официальный оппонент:
доктор технических наук, доцент,

22.08.2016

Камаев Дмитрий Альфредович,

заведующий лабораторией «Математических методов и компьютерного моделирования процессов в окружающей среде» Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Гайфун».

Адрес: 249038, г. Обнинск, Калужской обл., ул. Победы, д. 4
<http://www.rpatyphoon.ru/>
e-mail: kda@feerc.ru
раб. тел.: 8(48439)71655

Подпись официального оппонента,
д.т.н, зав.лаб. Камаева Д.А.
заверяю

Ученый секретарь ФГБУ «НПО «Гайфун»
к.ф.м.



Бурков А.И.