

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, проф. Кантаржи Измаила Григорьевича
на диссертационную работу *Зайцева Андрея Ивановича*
на тему «Моделирование нелинейных длинных волн типа цунами в рамках теории
мелкой воды и ее дисперсионных обобщений
с помощью вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических
наук
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации – 268 страниц, включая 174 рисунка и 8 таблиц.

Актуальность темы исследования. Волны цунами являются одним из катастрофических природных явлений, способных привести к значительным ущербам в береговой зоне моря. Основным способом прогнозирования распространения волн цунами и воздействия их на берега и сооружения являются численные методы. Поэтому развитие численных методов решения уравнений волн типа цунами и создание верифицированных программных комплексов для их практического применения является актуальным направлением исследований.

Целью диссертационной работы является моделирование распространения волн цунами и их последствий с помощью разработанного программного комплекса решения нелинейных уравнений гидродинамики длинных волн с получением и анализом достаточно точных характеристик природных процессов в водной среде.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. К теоретическим результатам диссертации относятся разработанные и реализованные вычислительные инструменты решения нелинейных уравнений гидродинамики длинных волн, подтвержденные натурными и лабораторными данными.

Разработана численная модель НАМИ-ДАНС_Р (NAMI-DANCE_Р) для учета атмосферных возмущений. Выполнены численные расчеты движения волн под действием атмосферных фронтов, в том числе для условий метеоцунами в Одессе (2014 г.)

Предложена методика расчета значений числа Рауза, характеризующего степень движения донных наносов, при вхождении длинной волны в бассейн сложной формы.

Получены оценки воздействия цунами на конструкции малого диаметра. Рассчитаны волновые характеристики при наличии защитных структур в прибрежной зоне (волнорезы, дамбы и защитные стенки) и жилой застройки на берегу.

Впервые получены оценки сравнительной цунами опасности для Черноморского побережья России, основанные на результатах численного моделирования прогностических событий с источниками, равномерно распределенными в бассейне Черного моря.

Разработана прибор, позволяющий организовать регистрацию измерений и передачу данных о волнах в режиме реального времени. Приведены данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса Свободный на юго-восточном побережье острова Сахалин. Они получены из анализа долговременных записей донного давления (на глубине 16 м) за октябрь 2011 по май 2012 года. Всего зарегистрировано около 200 волн за 70 дней наблюдений в безледный период. Приведены первые данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса Анива на южном побережье острова Сахалин за июнь – сентябрь 2009 года (глубина постановки донной станции 12 м). За время наблюдений зарегистрировано около 400 аномально больших волн, высота которых в два и более раза превышает значительную высоту волны.

Практическая значимость результатов работы состоит в возможности применения разработанных расчетных прогностических методов для проведения

надежных прогностических расчетов последствий морских природных катастроф, как в оперативных целях, так и в долгосрочных. Оценки силовых характеристик волновых потоков позволят лучше планировать защиту населенных пунктов и береговой инфраструктуры от морских природных катастроф и/или смягчить их последствия.

Разработанный вычислительный комплекс НАМИДАНС (NAMI-DANCE), внедрен в службу предупреждения цунами Малайзии и Турции, а также используется специалистами из ряда стран: Турция, Россия, Индия, Шри-Ланка, Малайзия. Результаты диссертации использованы в официальном нормативном документе: СВОД ПРАВИЛ СП.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», утвержденном Минстроем России 23.06.17.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертации представлены в 38 (тридцати восьми) работах, включая: 29 статей в журналах, включенных в список ВАК и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science); 7 статей в трудах международных конференций и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность вытекают из использования современного математического аппарата механики жидкости и вычислительной гидродинамики, а также анализа сопоставления получаемых решений с уже известными в литературе натурными и лабораторными данными. Хорошее согласие между результатами численных расчетов и надежными экспериментальными данными также свидетельствует об обоснованности полученных результатов. Представленные сопоставления результатов численных экспериментов и аналитической теории свидетельствуют о согласии и возможности применения предложенных методов в проблеме морских природных катастроф.

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 «Математические и численные модели описания длинных волн на воде»** дан анализ истории и современного состояния моделирования распространения длинных волн, в основном цунами. Рассматриваются вопросы вычислительной реализации моделей волн цунами. В качестве базовой модели рассматривается международный код TUNAMI, модификацией которого занимался диссертант. Основным для диссертанта является вычислительный комплекс НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE), модификацией которого диссертант занимался в рамках выполненного исследования.

Модификация вычислительного комплекса проводилась в следующих направлениях:

- использование системы параллельного программирования на основе MPI (Message Passing Interface), что позволяет сократить время счета в несколько раз,
- разработан новый интерфейс программы (рис. 1.2.5), который позволяет не только проводить расчеты волн цунами, но и обрабатывать полученные данные.

Тестовые расчеты проводились на 13 различных программах, включая НАМИ-ДАНС. Остальные модели в основном с открытым кодом. Вычислительный комплекс НАМИ-ДАНС показал хорошее согласие со скоростями течений в длинной волне, что особенно важно для определения силовой нагрузки.

Во **второй главе «Моделирование исторических и прогностических событий»** показано, как изучение исторических цунами позволяет понять физические механизмы распространения длинных волн и отработать технологию прогноза катастрофических событий.

На основе численного моделирования двух крупных цунами последних лет (Чилийское, 2010 г. и Японское, 2011 г.) и проявившихся на острове Сахалин изучаются экранирующие свойства Курильских островов на проникновение

цунами из Тихого океана в Охотское море. Проведено сравнение результатов расчётов с измерениями в пунктах острова Сахалин.

Изучена генерация морских волн глубоководными землетрясениями проведено на примере события 24 мая 2013 г. в Охотском море, когда очаг землетрясения располагался на глубине 600 км.

Дана оценка цунами опасности побережья Египта с помощью метода РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment – Вероятностная оценка опасности цунами), в основе которого лежит статистический анализ землетрясений, число которых достаточно велико, с последующим расчетом волн цунами от возможных землетрясений.

Описаны результаты исследования крупнейшего события в Индийском океана 26 декабря 2004 г. Автор принимал участие, как в экспедиционных исследованиях, так и в моделировании этого явления. Катастрофическое событие цунами в Индийском океане оказалось наиболее разрушительным за всю историю человечества: погибло более 200 тыс. человек.

Выполнены модельные расчеты волн цунами от гидродинамических очагов в Черном море, что позволяет изучить сравнительную защищенность различных участков побережья. На Российском побережье Черного моря только за последние 100 лет произошло 7 событий, то есть в среднем одно событие в 15 лет. Отсюда видно, что опасность цунами для Черноморского побережья России не может игнорироваться. В то же время объем количественной информации об исторических цунами крайне мал. Поэтому для предварительного прогноза высот цунами использовались результаты численного моделирования исторических событий (цунами 1939 и 1966 годов) и возможных прогностических событий, локализованных равномерно в бассейне Черного моря (55).

В третьей главе **«Карты наводнений и силовые характеристики воздействия волн цунами»** приведены результаты исследований воздействий волн цунами в береговой зоне. Исследуется распределение волн цунами в прибрежной зоне, параметры, необходимые для оценки, получаются с помощью программного комплекса НАМИ-ДАНС. Исследован эффект трения, который рассматривается переменным в зависимости от застройки берега. Различные

значения коэффициента трения принимаются для моря, суши и жилой зоны. С помощью модельных исследований показано, что вычислительный комплекс может быть использован для оценки эффективности защитных сооружений типа вдольбереговых волноломов от цунами.

Выполнено моделирование цунами в Мраморном море в районе порта Хайдрапаша (Hydrapasa) расположенного в районе мегаполиса Стамбул. На первой стадии исследования был проведен анализ цунами, потенциально опасных для порта, и определен наиболее критический сценарий развития цунами. На второй стадии проведено моделирование волн на вложенных областях с размерами сеток от 90 м до 10 м. в районе порта. На третьей стадии использовалась подробная топография порта и его районов в двух вложенных областях с разрешениями 3 м. и 1 м. соответственно, что позволило изучить заливание порта и эффективность работы портовых служб во время прохождения и после цунами. Акватория порта защищена двумя волноломами, расположенными вдоль берега внахлест. Перед моделированием ставится задача оценки эффективности работы волноломов. Таким образом, показаны возможности вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС для решения и подобных задач.

Приведены результаты расчетов карты затопления побережья для побережья г. Фетхие, Fethiye (Турция). Залив расположен в юго-западной части Турции, и имеет выход в восточную часть Средиземного моря. Представленное исследование крайне важно для планирования маршрутов эвакуации населения, установления безопасных зон, а также для повышения осведомленности населения перед фактическим событием цунами.

Представлены результаты исследования воздействия Японского цунами 2011 года на сооружения. Распределение максимальных значений числа Фруда исследовано для оценки уровней повреждения в зоне затопления в городе Камаиши (Япония). Отмечаются морфологические изменения морского дна и берегов под действием волн цунами. Характер движения донных осадков характеризуется числом Рауза (Rouse), зависящим от скорости в волнах. Представлен расчет числа Рауза, который включен в программный комплекс NAMI-DANCE.

В четвертой главе «Цунами оползневого и атмосферного происхождения» представлены результаты исследования длинных волн, специального происхождения.

Оползни возникают в результате землетрясений, даже слабых, и они уже могут вызывать заметные цунами. Сход лавины, содержащей около 300 млн. кубометров породы со склонов горы Фейруэзер (Аляска, 10 июля 1958 г.) в бухту Литуя привел к образованию цунами высотой 60 м, при этом максимальный заплеск в самой бухте достиг рекордной цифры в 524 м.

Описана модель генерации волн оползневого происхождения, используемая в расчетах. Она основана на мелководной двухслойной модели проф. Имамуры, в которой оползень предполагается жидким. Диссертантом выполнена модернизация численной схемы для учета дисперсионных свойств волн оползневого происхождения.

Обсуждаются цунами оползневого происхождения в Черном море. Выполнен расчет возможных оползневых цунами в Черном море в рамках двухслойной модели мелкой воды. Проведенные расчеты носят во многом модельный характер, однако, они подтверждают, что ряд локальных цунами в Черном море вполне мог быть вызван подводными оползнями.

Глава 5 «Инструментальные измерения морских явлений на о. Сахалин» посвящена вкладу диссертанта в изготовление и испытание новых образцов специальной морской техники и автоматизированных систем сбора телеметрической информации о состоянии моря и атмосферы.

Наблюдение за ледовой обстановкой с помощью РЛС позволило определить движение льда в юго-восточном направлении, что подтверждается генеральным направлением течений в данном регионе со средней скоростью 5 см/с. По данным натурных измерений средняя высота торосов от января к апрелю увеличивается от 0,5 до 1,3 метра. Максимальная высота торосов уже в январе составляет 1,5 метра, достигая в феврале-апреле у отдельных торосов 5,0 метров.

Представлена методика измерений гидрологических параметров в толще жидкости в сложных гидрологических условиях в ледный период на озере Туначай (о. Сахалин). Результаты измерений показывают, что в зимнее время практически

не происходит приливных движений внутри озера, что связано с недостаточными размерами протоки, соединяющей озеро с морем, к тому же часть протоки замерзает в зимнее время. С помощью численного моделирования получено распределение солёности, температуры и скоростей, и даны рекомендации по увеличению водообмена озера с морем.

Представлены расчеты волн цунами, возникших во время сильного землетрясения на юге о. Сахалин 2 августа 2007 г., подтвердившие локальный характер цунами на о. Сахалин, где оно и было наиболее заметно. Приведены данные инструментальной регистрации цунами на о. Сахалин (эти записи получены с участием диссертанта) и о. Хоккайдо. Рассчитанная высота волн в порту г. Холмск находится в согласии с наблюдаемой, также хорошее согласие получается для времен прихода волны цунами на о. Хоккайдо.

В заключении сформулированы выводы диссертационного исследования.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В диссертационной работе достаточно много сопоставлений результатов моделирования с данными измерений. Однако вопрос согласия предлагается решать визуально, сопоставления не сопровождаются оценкой статистических параметров.
2. Возможно, для волн типа цунами при сопоставлении моделирования и измерений важно выделить специальные характеристики, например, высота основной волны или высота первой волны и пр. И по этому параметру вести количественное сопоставление.
3. Оценка защищенности порта Хайдрапаша (контейнерного терминала Стамбула) от воздействия волн цунами определяется, прежде всего, для акватории возможностью вывода судов в открытое море и, для территории порта, защитой важных объектов в зоне затопления. Эти вопросы в диссертации рассмотрены эскизно.
4. Использование числа Рауза, как и любого другого из известных критериев начала движения наносов, не позволяет описывать морфодинамические изменения дна и берегов, а только оценивать возможность движения, неустойчивость или устойчивость наносов. При этом, разные критерии

начала движения по-разному описывают взвешенные, влекомые или смешанные наносы.

К редакционным замечаниям можно отнести следующие:

1. Ошибки в нумерации списка работ по теме диссертации - Ведение, стр.11-15.
2. На рис.1.2.4 графики не различимы, хотя по смыслу нижний график относится к использованию процессора INTEL.
3. Используются рисунки в мелком масштабе с большим количеством информации, которые трудно анализировать, например рис.3.3.2 или 3.3.3. Конечно, чтение электронного варианта диссертации позволяет увеличивать нужные места, но это не годится для печатного варианта.
4. В тексте диссертации встречаются описки.

Высказанные замечания не влияют на оценку диссертационной работы А.И. Зайцева.

Заключение

1. Диссертация *Зайцева Андрея Ивановича* соответствует паспорту научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.
2. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.
3. Диссертация, представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения моделирования и компьютерной реализации распространения длинных волн и их воздействия на берега и береговые объекты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.
4. Защищаемые положения отличаются актуальностью и научной новизной, а достоверность и обоснованность результатов исследований подтверждается большим объёмом проведённых натурных измерений и соответствием результатов диссертации результатам предшественников. В диссертации Зайцева А.И. на соискание учёной степени доктора физико-математических наук развиваются и совершенствуются расчетные модели прогнозирования волн цунами и воздействия волн цунами на сооружения и берега.

5. Диссертация *Зайцева Андрея Ивановича* «Моделирование нелинейных длинных волн типа цунами в рамках теории мелкой воды и ее дисперсионных обобщений с помощью вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС» соответствует критериям Положения о присуждении учёных степеней (пп. 9-14), а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора-физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,

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

И.Г. Кантаржи

«09» апреля 2018

Подпись Кантаржи Измаила Григорьевича заверяю:

Ученый секретарь НИУ МГСУ



А.Е. Беспалов

«09» апреля 2018

Контактные данные

Ф.И.О.: Кантаржи Измаил Григорьевич

Учёная степень: доктор технических наук

Учёное звание: профессор

Полное название 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, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Контактный телефон: +7 903 533 7830

E-Mail: kantardgi@yandex.ru