

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Андрея Ивановича Зайцева “Моделирование нелинейных длинных волн типа цунами в рамках теории мелкой воды и ее дисперсионных обобщений с помощью вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационное исследование Андрея Ивановича Зайцева посвящено разработке расчетных моделей морских природных катастроф и их последствий, верификации расчетных моделей на реальных данных (различные природные катастрофы) и применение созданного инструментария для долгосрочных прогнозов и выработки превентивных мер.

Структура диссертации включает введение, пять глав, заключение и список литературы. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены основные цели и направления исследований. На защиту выносятся десять положений.

В первой главе обсуждаются основные проблемы описания распространения длинных волн, главным образом цунами, и описывается авторская разработка диссертанта – программный комплекс НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE), в котором реализовано решение нелинейных уравнений теории мелкой воды с учетом вращения Земли и трения воды о дно. Численная методика построена на основе аппроксимации исходных уравнений методом конечных разностей на разнесенных по пространству структурированных сетках. Для аппроксимации исходных уравнений используется разностная схема типа Leapfrog («прыгающая лягушка»). Для сокращения времени счета вычислительные алгоритмы были распараллелены. В первой главе особое внимание уделено способу моделирования дисперсионных эффектов, необходимых для анализа волн с масштабом, сравнимым с глубиной бассейна. Проведено сравнение результатов моделирования по программному комплексу НАМИ-ДАНС двух тестовых задач о трансформации уединенной волны над постоянным дном и с подводной возвышенностью с расчетами по программе UNWAVE, решающей уравнения нелинейно-дисперсионной теории, и аналитическим решением линейной задачи. В конце первой главы приведены результаты сравнительного анализа

существующих 13 международных кодов расчета цунами, включая авторский НАМИ-ДАНС, который был выполнен в рамках международной рабочей группы.

Во второй главе приводятся результаты моделирования по программному комплексу НАМИ-ДАНС произошедших морских природных катастроф в рамках теории мелкой воды. Здесь представлены результаты численного моделирования двух крупных цунами последних лет: Чилийского (2010 г.) и Японского (2011 г.), волны от которого проявились на острове Сахалин. Основной упор сделан на анализе экранирующих свойств Курильских островов на проникновение цунами из Тихого океана в Охотское море. Численно изучена генерация морских волн глубоководными землетрясениями на примере события 24 мая 2013 г. в Охотском море. Дана оценка опасности цунами на побережье 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. В этой главе описаны также результаты исследования крупнейшего события в Индийском океане 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. Оно дало толчок развитию численного моделирования цунами, так как обеспечило большим количеством данных измерений и показало необходимость создания системы раннего оповещения о цунами в Индийском океане. В заключении приведены результаты модельных расчетов волн цунами от так называемых гидродинамических очагов в Черном море, что позволяет изучить сравнительную защищенность различных участков побережья.

Третья глава посвящена определению гидродинамических параметров волн цунами, необходимых для оценки воздействия цунами на конструкции малого диаметра. Подчеркивается важная роль числа Фруда в оценке силы сопротивления и гидродинамического взвешивания. Выполнены расчеты воздействия на прибрежные районы при наличии защитных структур (волнорезы, дамбы и защитные стенки) и жилой застройки на берегу, демонстрирующие эффект защиты побережья от волн цунами. Приведены результаты численного моделирования воздействия волн цунами

на порт Хайдрапаша (Стамбул, Турция). Показано, что волна цунами при существующих способах защиты порта затронет основные операции в порту и приведет к существенным разрушениям. Построены карты затопления побережья с высоким разрешением для залива Фетхие, расположенного в Турции на берегу Эгейского моря. Показано, что остров Совэлай, расположенный перед входом в залив Фетхие, частично гасит энергию цунами и защищает залив. Выделена зона на побережье с развитой инфраструктурой, которая наиболее опасна с точки зрения цунами, и для которой необходима специальная разработка путей эвакуации населения. Проведено численное исследование воздействия Японского цунами 2011 года на дамбу в заливе Камаиши. Для оценки воздействия цунами на дно используется число Рауза, характеризующее степень движения наносов. Выполнено численное исследование волновой динамики в бассейне, показавшее наличие областей, где движение наносов будет наибольшим. Отмечено, что использование числа Рауза в вычислительных комплексах решения уравнений мелкой воды позволяет без особых трудностей определить зоны интенсивного транспорта наносов.

Четвертая глава посвящена исследованию волн на воде, вызванных оползнями и движущимся атмосферным возмущением. В этой главе проводится развитие расчетной модели для моделирования оползневых цунами с учетом дисперсионных эффектов. Для этих целей автором выполнена доработка двухслойной численной модели в рамках программного комплекса NAMI-DANCE. С использованием программного инструментария проведено численное моделирование гипотетического оползневого цунами в районе дельты реки Нил, показавшее, что высота волн может составлять 12 м на ближайшем побережье. Проверена гипотеза оползневого происхождения волн цунами в районе г. Сочи. Получены непротиворечивые данные об амплитудах волн. Разработан блок программного комплекса НАМИ-ДАНС (NAMI DANCE) для учета атмосферных возмущений. Выполнены расчеты движения волн под действием атмосферных фронтов, перемещающихся с постоянной скоростью. В случае каналов постоянного поперечного сечения получено хорошее согласие результатов расчета с выводами аналитической теории. Выполнено моделирование события в районе Одессы. Рассчитанное распределение максимальных амплитуд показывает, что в районе Одессы и восточнее максимальные высоты волн могут

достигать 2 м. Результаты расчетов показывают возможность того, что данное событие могло быть создано движением фронта аномального атмосферного давления.

В пятой главе приводится методика обеспечения и обработки инструментальных наблюдений поверхностных волн в Охотском море, гидрологических параметров в озере лагунного типа, а также мониторинг льда с помощью РЛС. Исследования направлены на обеспечение безопасности работы прибрежной инфраструктуры. Для этих целей разработана архитектура прибора, позволяющего организовать регистрацию измерений и передачу данных о волнах в режиме реального времени. В качестве полигона испытаний использовался мыс Свободный. Приведены данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса Свободный на юго-восточном побережье острова Сахалин. Приведены первые данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса Анива на южном побережье острова Сахалин. 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 натуральных 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. 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 солености, 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. Приведены данные инструментальной регистрации цунами на о. Сахалин. Рассчитанная высота волн в порту г. Холмск находится в согласии с наблюдаемой, также хорошее согласие получается для времен прихода волны цунами на о. Хоккайдо.

Актуальность работы обосновывается необходимостью создания методов численного моделирования морских природных катастроф и их последствий в связи с

возрастающей ролью Мирового океана для экономики многих стран, которые интенсивно осваивают прибрежные территории. Это приводит к необходимости разработки превентивных мер, направленных на смягчение последствий природных катастроф и уменьшение риска для населения. Все это требует создания расчетно-теоретических моделей, позволяющих рассчитать возможные параметры катастроф, а также проводить непрерывный мониторинг окружающей среды.

Новыми научными результатами диссертационной работы являются:

1. Модификация вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE), позволяющая учесть дисперсионные эффекты при моделировании длинных волн. Основная идея здесь заключается в использовании численной дисперсии вместо физической, что позволяет сохранить быстродействие, характерное для решения бездисперсионных уравнений мелкой воды.
2. Результаты численного моделирования крупнейшего цунами в Индийском океане, произошедшего 26 декабря 2004 г., которые хорошо описали данные наблюдений в Индонезии.
3. Результаты численного моделирования Чилийского цунами 2010 года и Японского цунами 2011 года в рамках нелинейно-дисперсионной теории, подтвердившие наблюдаемые особенности этих цунами у побережья Сахалина (время прихода, период, номер волны максимальной амплитуды).
4. Результаты расчетов генерации слабого цунами при глубокофокусном (глубина фокуса более 600 км) землетрясении на примере землетрясения, произошедшего 24 мая 2013 года, с магнитудой 8.3 в Охотском море.
5. Получены оценки воздействия цунами на конструкции малого диаметра. Подчеркивается важная роль числа Фруда в оценке силы сопротивления и гидродинамического взвешивания. Результаты численных расчетов силового воздействия цунами при наличии защитных структур в прибрежной зоне (волнорезы, дамбы и защитные стенки) и жилой застройки на берегу, демонстрирующие эффект защиты побережья от волн цунами количественно.
6. Определены значения числа Рауза, характеризующего степень движения донных наносов, при вхождении длинной волны в бассейн сложной формы. Этот

подход позволил определить области, где будет значительное перемещение донных наносов.

7. Проведен вероятностный анализ возможных высот волн цунами в районе строительства АЭС «Эль-Дабба» (Египет), сооружаемой российскими специалистами. Прогностическая высота волн на период в 1000 лет составляет 1.8-2.5 м, а на период в 10000 лет – от 4.5 до 6.5 м.

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

9. Результаты численного моделирования гипотетического оползневое цунами в районе дельты реки Нил (юго-восточная часть Средиземного моря), показавшие, что высоты волн могут составлять 12 м на ближайшем побережье.

10. Результаты расчетов движения волн под действием перемещающихся атмосферных фронтов. В случае каналов постоянного поперечного сечения получено хорошее согласие результатов расчета с выводами аналитической теории. Получено согласие расчетов метеоцунами в Одессе (27 июня 2014 г.) с наблюдаемой высотой волн.

11. Результаты расчетов волн цунами, вызванных сильным землетрясением в южной части о. Сахалин 2 августа 2007 г., подтвердившие локальный характер цунами на о. Сахалин.

12. Данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса Свободный и мыса Анива (о. Сахалин) в 2009 и 2011-2012 гг., высота которых примерно соответствует оценкам на основании распределения Рэлея.

Практическая ценность Создан инструментарий для решения уравнений гидродинамики, верифицированный на данных по произошедших природным катастрофам и лабораторных результатах, который позволяет проводить надежные прогностические расчеты последствий морских природных катастроф как в оперативных целях, так и в долгосрочных. Получены оценки силовых характеристик волновых потоков, которые позволяют лучше планировать превентивные меры по защите населенных пунктов и береговой инфраструктуры от морских природных катастроф и/или смягчить их последствия. Созданный при участии автора

вычислительный комплекс НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE), внедрен в службу предупреждения цунами Малайзии и Турции, а также взят на вооружение специалистами из ряда стран: Турция, Россия, Индия, Шри-Ланка, Малайзия. Автор диссертации был инструктором на курсах, организованных UNESCO, по обучению моделированию цунами. Они проходили в Малайзии (Куала-Лумпур, 2016) и Бельгии (Оостенде, 2016). Результаты диссертации использованы в официальном документе: СВОД ПРАВИЛ СП.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», утвержденном Минстроем России 23.06.17 г. с последующим введением в действие с 2018 года.

Замечания. Серьезных замечаний по материалам, представленным в содержательных главах диссертации, нет. Тем не менее, диссертационная работа не лишена ряда недостатков, в частности:

1. Было бы лучше укрупнить положения, выносимые на защиту, и сократить их число, чтобы они в большей степени соответствовали паспорту специальности.
2. Есть замечания по оформлению диссертации и автореферата. В частности в автореферате указано, что диссертация состоит из трех глав, а приводится обзор из пяти глав.
3. Очень кратко представлена расчетная методика.
4. Неясен способ управления численной дисперсией.
5. Не представлены характеристики сеточных моделей, на которых проводились расчеты.
6. Не освещены вопросы построения сеточных моделей для геометрий со сложным рельефом.
7. Было бы желательно привести результаты расчетов на сходимость с целью выяснения порядка сходимости численного метода.
8. Было бы желательно провести сопоставление созданной расчетной методики с аналогичными методиками, в частности, с методиками, построенными на основе метода конечного объема и метода Годунова, которые широко освещены в литературе.

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают ценности и достоверности полученных результатов.

Заключение. Диссертация написана на высоком научном уровне и показывает, что автор имеет высокую математическую культуру и может самостоятельно проводить полномасштабное научное исследование от анализа проблемы и постановки математической задачи до разработки численного метода их решения, построения алгоритмов и реализации их в виде программ, проведения объемного вычислительного эксперимента, сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными.

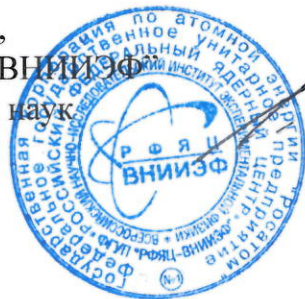
Анализ диссертации, автореферата и публикаций автора, соответствующих основному содержанию диссертации, позволяют сделать вывод, что работа Зайцева А.И. посвящена актуальному направлению. Диссертация представляет собой законченное самостоятельное исследование, в котором приведены научные результаты, позволяющие их квалифицировать как существенное развитие крупного научного и практического направления, связанного с созданием расчетных моделей морских природных катастроф и применением созданного инструментария для долгосрочных прогнозов и выработки превентивных мер уменьшения последствий катастроф. Диссертационное исследование соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Зайцев Андрей Иванович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник
доктор физико-математических наук

 Ю.Н. Дерюгин

18.04.2018

Подпись Ю.Н. Дерюгина заверяю,
ученый секретарь ФГУП-«РФЯЦ-ВНИИЭФ»
кандидат физико-математических наук



 В.В. Хижняков

607188, г. Саров, Нижегородской обл., пр. Мира, 37
Телефон 8 (83130) 2-90-29, факс 8(83130) 4-47-61
E-mail: deryugin@vniief.ru