

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Белоконь А.Ю. «Математическое моделирование распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – Океанология

Диссертация Белоконь Александры Юрьевны посвящена исследованию распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне. Исследование распространения волн цунами и их взаимодействия с береговыми склонами является несомненно актуальной и практически значимой задачей, поскольку позволяет определять наиболее опасные зоны побережья. Такая информация является необходимой для проектирования и строительства защитных сооружений и проведения мероприятий по уменьшению разрушительного воздействия волн цунами.

Экспериментальные исследования и натурные наблюдения в этой области затруднены и ограничены, поэтому одним из единственных средств их изучения остается численное моделирование. В диссертации в качестве численного метода выступает метод конечных разностей решения систем дифференциальных уравнений. Используемые математические модели - одномерные и двумерные уравнения теории длинных волн.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения. Во введении достаточно обоснованно раскрыта актуальность и степени разработанности, поставлена следующая цель: исследование закономерностей распространения нелинейных волн цунами в каналах, проливах, бухтах модельной и реальной геометрии. Для ее достижения диссертант решает следующие задачи: исследование влияния нелинейных эффектов на форму и амплитудные характеристики волны цунами при ее распространении в узких бухтах и каналах переменного поперечного сечения; анализ влияния нелинейности на высоту наката и глубину осушения берега при распространении волн цунами в бухтах с различной формой; определение зависимости амплитудных характеристик волн цунами вдоль Азово-Черноморского побережья от магнитуды подводных землетрясений и местоположения очагов генерации цунами; численное моделирование эволюции волн цунами, вызванных Ялтинским землетрясением 1927 года; исследование поверхностных волн в Балаклавской бухте, вызванных проникновением волн цунами, при разном расположении очага генерации.

В первом разделе приводится обзор общих характеристик волн цунами, причин их возникновения, распространения и наката на берег. Приводится анализ существующих подходов к моделированию волн в рамках теории длинных волн и аналитический обзор ее

применения для различных конфигураций волнения и каналов: приливные течения, внутренние волны в каналах, устьях рек, проливах. Делается вывод о недостаточной изученности распространения волн в узких каналах и бухтах в силу влияния многих параметров на амплитудные характеристики волн. Также делается вывод о возможности возникновения локальных зон усиления волнового поля в шельфовой зоне, в бухтах и заливах. В разделе приводится подробный обзор случаев волн цунами в Азово-Черноморском регионе, выделяется событие особого интереса - Ялтинское землетрясение 1927 года и зону интереса – Балаклавская бухта, в которой, вероятно, возникало локальное усиление волнового поля.

Второй раздел посвящен исследованию влияния нелинейности на распространение волн цунами в каналах и узких бухтах переменного поперечного сечения. С помощью численного моделирования анализируется эволюция таких волн в зависимости от изменения геометрии поперечного сечения каналов. В разделе приводится используемая математическая модель – уравнения теории длинных волн, проинтегрированные по площади поперечного сечения. Численный метод приведен в приложении А и представляет собой конечно-разностную полунеявную численную схему на одномерной расчетной сетке. Далее анализируются проявления нелинейных эффектов в трансформации формы волны, увеличении со временем крутизны ее переднего фронта и высоты наката на береговой склон. Исходя из результатов численного моделирования получены несколько закономерностей, отмечу из них следующие: расстояние, пройденное волной в канале до обрушения, сокращается с ростом параметра нелинейности и уменьшением параметра канала, характеризующего его форму; в каналах с крутыми береговыми склонами наблюдается слабо выраженная зависимость высоты наката волн на берег и глубины осушения от угла наклона берега, для пологих берегов происходит достаточно резкое возрастание высоты наката, которое усиливается с уменьшением параметра формы бассейна. Результаты были опубликованы автором и вошли в пункты научной новизны.

В третьем разделе исследуются изменения амплитудных характеристик одиночных волн, распространяющихся в бухтах с U-образной формой поперечного сечения: изучается влияние формы поперечного сечения бассейна на изменения высоты одиночной волны; оцениваются высоты наката волн на берег и глубины осушения дна в вершине бухт в зависимости от соотношения длины бухты к длине волны. Также исследуется распространение волны цунами в бухтах и заливах модельной и реальной геометрии. Для исследований используется длинноволновая модель, конечно-разностная дискретизация и двумерная расчетная сетка. Основные результаты раздела: в бухтах с широким входом волны распространяются с образованием локальных повышений и понижений уровня моря у берега и в средней части акватории; в бухтах с узким входом волна излучается внутрь

акватории в виде кольцевой волны без понижения уровня моря; проникновение волн в узкие бухты сопровождается значительным усилением амплитудных характеристик. Результаты были опубликованы автором и также вошли в пункты научной новизны.

Четвертый раздел посвящен исследованию формирования и распространения волн от очагов генерации цунами в Черном и Азовском морях. На основе численных экспериментов получены значения максимальных повышений уровня моря вдоль побережья Черного и Азовского морей при распространении волн цунами из зон локальных землетрясений. Путем численного моделирования выявлены наиболее цунамиопасные участки побережья, а также рассчитаны высоты наката волн на берег при цунами, вызванном Ялтинским землетрясением 1927 года. Основные выводы: после землетрясения спустя 3 ч. волновые движения охватывают всю акваторию Черного моря; высота наката волн цунами, на локальных участках побережья могла достигать 2 м; при проникновении цунами в Балаклавскую бухту в ней формируются колебания уровня моря с периодом 8 мин, внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5–6 раз по сравнению с высотой цунами на южной границе области. Результаты были опубликованы автором и вошли в пункты научной новизны.

Диссертация написана хорошим научным языком, оппоненту было приятно ее читать. Необходимо отметить, что обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, описанных в работе, не вызывает сомнений. Заключение, приводимые в диссертации, являются логически выверенными. Можно утверждать, что результаты диссертации достоверны и научно обоснованы, прошли широкую апробацию. Все основные результаты диссертации опубликованы в хороших изданиях и были представлены на профильных научных конференциях и семинарах. В качестве замечаний и вопросов к содержанию диссертации можно отметить следующие:

- 1) В диссертации мало внимания уделено верификации и валидации используемого численного метода. Вероятно, подразумевается, что он уже прошел верификацию и апробацию другими исследователями, однако, по моему мнению, неплохо было бы получить оценки точности его реализации для рассматриваемого в диссертации класса задач.
- 2) Основными результатами диссертации являются результаты численных экспериментов, поэтому желательно в расчетах приводить оценки сеточной сходимости результатов, дабы убедиться, что полученные данные слабо зависят от используемого сеточного разбиения (во всех направлениях). Также при решении нестационарных нелинейных задач численное решение может сильно зависеть от величины шага по времени, поэтому было бы не плохо убедиться в независимости полученных результатов от величины шага по времени.

- 3) В исследованиях распространения и деформации волн цунами приводятся численные решения с использованием линейного и нелинейного приближения теории длинных волн. Представляет интерес сравнение данных результатов с результатами, полученными по трехмерным методикам, основанным на уравнениях Навье-Стокса (Рейнольдса) – данный подход более свободен от предположений и эмпиризма и в настоящее время доступен как в зарубежных CFD-кодах (ANSYS Fluent, Star CCM+, Flow-3D), так и в отечественных (ЛОГОС, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), также существуют свободно-распространяемые коды (OpenFOAM).
- 4) Для эксперимента с расширением канала не приводится угол, с которым расширяется канал, и шкалы на рисунке 2.3 не несут информации о геометрических координатах точек расширения канала. Было бы полезно привести эти данные для тех исследователей, кто захотел бы повторить данный эксперимент, не имея прямого доступа к оригинальному источнику эксперимента.
- 5) Ряд малых недочетов:
- почему не проводились оценки для каналов треугольного и параболического сечения, возможно, стоит это отметить;
 - в абзаце перед рисунком 2.10 ссылаются на буквы «а, в», которых на этом рисунке нет;
 - возможно, в начале параграфа 2.3 следовало написать, что исследуемый тип волн – солитон и полусинусоида, поскольку это становится окончательно понятно только после рисунка 2.11;
 - рисунок 2.12 – автор ссылается на буквы «а-г», но эти буквы отсутствуют на рисунках;
 - рисунок 2.5 – в пояснении к нему отмечено «На пологом склоне (кривая 1) волна распространяется безотражательно» - нумерация кривых не касается графиков линейной нелинейной и аналитической волн, а так как подразумеваются склоны, то они нигде не пронумерованы, поэтому следует вместо «кривая 1», написать « $\alpha = 0.20^\circ$ ».

По моему мнению, отмеченные выше замечания и недостатки не являются критичными и не умаляют достоинств проделанной работы, а сама диссертация Белоконь А.Ю. заслуживает высокой положительной оценки. Также хочу отметить, что результаты, полученные в диссертации, могут послужить хорошей основой для валидации и кросс-верификации других численных методов.

Автореферат диссертации в полной мере раскрывает её содержание. Считаю, что диссертация Белоконь А.Ю. «Математическое моделирование распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему и соответствует пункту 7 «Положения о порядке присуждения учёных степеней». Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Белоконь Александра Юрьевна, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Начальник научно-исследовательской
группы РФЯЦ-ВНИИЭФ, к.ф.-м.н.
(83130) 2-75-67, kurulin@mail.ru

Вадим Викторович Курулин

Подпись Курулина В.В. заверяю,
учёный секретарь диссертационного
совета ДС 201.007.02, д.ф.-м.н.



Александр Александрович Соловьев

27.04.2022 г.

Сведения об организации: Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП "РФЯЦ - ВНИИЭФ"), 607188, Нижегородская область, г. Саров, пр. Мира, д. 37.