

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского
центра «Морской гидрофизический
институт РАН»,
член-корреспондент РАН



Коновалов С.К.

«10» марта 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Морской гидрофизический институт РАН»

Диссертация «Математическое моделирование распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – «океанология» выполнена в отделе вычислительных технологий и математического моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель Белоконь Александра Юрьевна работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в должности младшего научного сотрудника отдела вычислительных технологий и математического моделирования.

В 2012 г. соискатель окончила Донбасский государственный технический университет (ныне – Донбасский государственный технический институт) по специальности «радиофизика и электроника».

Белоконь А.Ю. окончила в 2015 г. очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано 04.03.2019 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки «Морской гидрофизический институт РАН».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Фомин Владимир Владимирович работает главным научным сотрудником и заведующим отделом вычислительных технологий и математического моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По результатам рассмотрения диссертации Белоконь А.Ю. «Математическое моделирование распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне» принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация Белоконь А.Ю. посвящена исследованию распространения волн цунами в прибрежной зоне с помощью численного моделирования.

Детальное изучение характера распространения волн цунами с последующим накатом на побережье и определение наиболее опасных участков прибрежной зоны представляет значительный интерес при планировании мероприятий по уменьшению разрушительного воздействия цунами и при проектировании и строительстве защитных сооружений.

В диссертационной работе проведен анализ проявления нелинейных эффектов при распространении волн цунами в узких каналах и бухтах переменного поперечного сечения с последующим накатом на берег. Получены зависимости максимальных заплесков волн цунами на берег от

крутизны волны, параметра нелинейности и берегового уклона в сужающихся бухтах.

Исследованы закономерности распространения и трансформации волн цунами в бухтах и заливах с широким и узким входами и на примере Феодосийского залива, Балаклавской и Геленджикской бухт, изучена специфика распространения волн цунами в прибрежных акваториях Черного моря.

Проведено исследование распространения волн цунами в Азово-Черноморском бассейне из гипотетических очагов генерации, которые расположены в сейсмически активных зонах, и выявлены наиболее подверженные воздействию цунами участки побережья. Получены оценки повышений уровня моря при прохождении волн цунами от возможных в этом регионе подводных землетрясений.

Для южной части Крымского побережья выполнено численное моделирование распространения и наката на берег волн цунами, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г. Для пунктов побережья установлены максимальные высоты заплеска.

Исследовано проникновение волн в акваторию Балаклавской бухты из гипотетических очагов цунами. Рассчитаны максимальные глубины затопления побережья и величины горизонтального заплеска в бухте.

Диссертация Белоконь А.Ю. «Математическое моделирование распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне» по объему выполненных исследований, новизне результатов, научному и практическому значению отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

Выбор тематики диссертационной работы и часть результатов, вошедших в нее, выполнялась совместно с профессором д. ф.-м. н.

С.Ф. Доценко. Другая часть исследований проведена совместно с д. ф.-м. н. В.В. Фоминым.

Соискателем совместно с научным руководителем определена актуальность исследования, поставлена цель и сформулированы основные задачи. Соискателем лично выполнен аналитический обзор имеющихся литературных данных об особенностях распространения и наката волн цунами на берег в узких бухтах и каналах и о событиях цунами в Азово-Черноморском регионе.

Автором работы выполнена численная реализация одномерной модели распространения волн цунами в узких каналах и бухтах с учетом движения линии уреза по сухому берегу. Соискателем проведено сопоставление полученных в работе зависимостей высот наката волн в каналах с наклонным дном с имеющимися аналитическими оценками.

Выявление закономерностей распространения волн цунами в бухтах и заливах Черного моря выполнено лично соискателем.

Анализ имеющейся информации о подводных землетрясениях в Азово-Черноморском регионе проводился соискателем самостоятельно. Выявлены наиболее уязвимые для волн цунами участки побережья Азово-Черноморского бассейна. Соискателем дана оценка изменения амплитуд волн при смещении очага генерации цунами из мелководной зоны в более глубоководную и при увеличении магнитуды землетрясения.

Предложена идея проведения численного эксперимента по моделированию эволюции и наката на берег цунами, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г., для локального участка вблизи южного побережья Крыма, который расположен наиболее близко к очагу землетрясения. Численная реализация модели с применением алгоритма затопления-осушения проводилась соискателем самостоятельно.

Выбор местоположения гипотетических очагов генерации цунами, которые являются потенциально опасными для акватории Балаклавской бухты, выполнен лично соискателем.

Анализ полученных результатов и их интерпретация проводились соискателем совместно с научным руководителем.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Численные оценки изменения уровня моря при распространении волн цунами в узких каналах и бухтах переменной глубины h и ширины b сопоставлялись с аналитическими оценками. Полученные в работе зависимости хорошо согласуются с оценками, которые являются следствием закона Грина: амплитуда волны пропорциональна $h^{-1/4}b^{-1/2}$, а амплитуда волновой скорости растет по закону $h^{-3/4}b^{-1/2}$.

Сравнение результатов, полученных в работе в рамках нелинейной модели длинных волн и с использованием гидродинамической модели SWASH, показало хорошее качественное и количественное соответствие величин заплесков при накате уединенных волн на пологий откос.

Численные оценки высот наката волн на берег в сужающихся бухтах с переменной формой поперечного сечения, полученные в настоящей работе, согласуются с аналитическими оценками из работ Диденкуловой И.И.

Энергетические спектры остаточных колебаний уровня моря в вершине Балаклавской бухты при проникновении в нее волн из гипотетических очагов цунами имеют хорошо выраженный пик в интервале периодов, соответствующих моде Гельмгольца сейшевых колебаний в бухте.

Научная новизна результатов проведенных исследований.

Получило дальнейшее развитие исследование распространения волн цунами в узких бухтах и каналах. Установлено, что в бухтах с уклоном дна, большим 0,4, высота наката волн может превышать высоту входящей в расчетную область волны в 2–3 раза, а в случае более пологих склонов (с уклоном дна, меньшим 0,4) высота наката может превысить высоту входящей волны в 8 и более раз. В каналах с треугольной формой поперечного сечения значения опускания уровня моря при откате могут превысить повышения уровня во время наката на берег. В каналах с параболической формой сечения высота наката и глубина отката совпадают. В каналах с

прямоугольной формой поперечного сечения высоты наката наименьшие, а глубина осушения дна незначительна.

Получены новые закономерности распространения волн цунами в бухтах и заливах с модельным и реальным рельефом дна с приложением к бухтам и заливам Черного моря (Феодосийский залив, Геленджикская и Балаклавская бухты). Показано, что в бухтах и заливах с широким входом волны распространяются с образованием локальных повышений и понижений уровня моря у берега и в средней части акватории. Подобная эволюция волн выявлена для Феодосийского залива, где локальные повышения уровня моря могут быть больше амплитуды волны на входе в 3 раза. В бухтах (заливах) с узким входом волна излучается внутрь акватории в виде кольцевой волны повышения. Подобный процесс распространения волн установлен в Геленджикской бухте, где амплитуда волны увеличивается до 1,5 раз. Проникновение волн в узкие бухты сопровождается значительным увеличением высот волн внутри бухты, по сравнению с высотами на входе. При вхождении волны в Балаклавскую бухту ее амплитуда увеличивается в 4–5 раз.

Получили дальнейшее развитие исследования цунами в Азово-Черноморском бассейне. Установлено, что в результате распространения волн из гипотетических очагов цунами, максимальные повышения уровня моря наблюдаются в районе Крымско-Кавказского побережья и Болгарии. Северо-западная часть Черного моря наименее подвержена воздействию волн цунами. При землетрясении с магнитудой 7,5 амплитуды колебаний уровня моря при подходе волн цунами могут усиливаться до 40 % по сравнению с колебаниями при землетрясении магнитудой 7,0.

Для южной части Крымского побережья, которое расположено наиболее близко к очагу Ялтинского землетрясения 12 сентября 1927 г., проведен расчет эволюции цунами с применением алгоритма затопления-осушения берега. Установлено, что высота наката волн на берег в некоторых

пунктах (Никита, Гурзуф) может достигать 2 м, а глубина осушения побережья – более –3 м.

Впервые проведено исследование проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту и наката волн на берег. Выявлено, что наибольшему затоплению подвержены берега, примыкающие к вершине бухты и к восточному берегу. Установлено, что цунами формируют в Балаклавской бухте сейшевые колебания уровня моря с периодом ~ 8 мин, соответствующие моде Гельмгольца. Максимальная величина горизонтального заплеска в бухте составила 60–90 м.

Практическая значимость результатов проведенных исследований.

Проведенные исследования расширяют современные представления о физических закономерностях эволюции волн цунами в прибрежных зонах со сложной геометрией, таких, как заливы, проливы и бухты. Полученные результаты имеют важное значение для совершенствования методов проведения цунамирайонирования побережья Азово-Черноморского региона, а также при разработке методических рекомендаций по проектированию зданий и сооружений для обеспечения их безопасности в цунамиопасных районах. Выявление наиболее уязвимых для цунами участков побережья имеет определяющее значение при проведении мероприятий по предотвращению негативных последствий от разрушительного воздействия цунами.

Ценность научных работ соискателя.

Ценность научных работ соискателя заключается в уточнении имеющихся и получении новых закономерностей распространения волн цунами в прибрежной зоне.

В работах автора, посвященных исследованию проявления нелинейных эффектов при накате волн цунами на берег в сужающихся бухтах, показано, при каких конфигурациях дна и боковых стенок бухт высоты заплесков могут экстремально возрастать.

Исследования автора, посвященные черноморским цунами, включают в себя не только изучение динамики волн цунами в акватории Черного моря в целом, но и ее детальное рассмотрение в некоторых отдельных бухтах и заливах.

Результаты работы расширяют представление о закономерностях распространения волн цунами в Феодосийском заливе, Геленджикской и Балаклавской бухтах. Автором получена новая информация о возможных высотах заплесков на берег при повторении события, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г. Особый интерес представляет подробный анализ проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту и оценки затопления ее побережья.

Специальность, которой соответствует диссертация.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.6.17 – «океанология», отрасль наук – физико-математические науки.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 29 научных работ, из них 12 статей в рецензируемых научных журналах, 5 статей в рецензируемых сборниках научных трудов, 12 тезисов докладов на Всероссийских и Международных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 10 работ в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях [1–10]. В их числе 5 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science [1–4, 6], 2 работы в изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS [7, 8], 2 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук [5, 9] и 1 работа [10] в издании, соответствующем п. 10 Постановления Правительства Российской

Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанными гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Статьи в рецензируемых журналах

1. **Bazykina A.Yu.** Application of a Channel Model for Describing Propagation of Tsunami-Like Single Waves in a Channel with Variable Cross-Section / A.Yu. Bazykina, S.F. Dotsenko // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2015. – Iss. 1. – P. 27–38. – DOI: 10.22449/1573-160X-2015-1-27-38. (Базыкина А.Ю. Применение канальной модели для описания распространения одиночных волн типа цунами в канале переменного поперечного сечения / А.Ю. Базыкина, С.Ф. Доценко // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 1. – С. 29–41. DOI: 10.22449/0233-7584-2015-1-29-41).

2. **Bazykina A.Yu.** Nonlinear effects at propagation of long surface waves in the channels with a variable cross-section / A.Yu. Bazykina, S.F. Dotsenko // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2015. – Iss. 4. – P. 3–12. – DOI: 10.22449/1573-160X-2015-4-3-12. (Базыкина А.Ю. Нелинейные эффекты при распространении длинных поверхностных волн в каналах переменного поперечного сечения / А.Ю. Базыкина, С.Ф. Доценко // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 4. – С. 3–13. – DOI: 10.22449/0233-7584-2015-4-3-13).

3. **Bazykina A.Yu.** Propagation of Tsunami-like Surface Long Waves in the Bays of a Variable Depth / A.Yu. Bazykina, S.F. Dotsenko // Physical oceanography, [e-journal]. – 2016. – Iss. 4. – P. 3–12. – DOI: 10.22449/1573-160X-2016-4-3-11. (Базыкина А.Ю. Распространение поверхностных длинных волн типа цунами в бухтах переменной глубины / А.Ю. Базыкина,

С.Ф. Доценко // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – № 4. – С. 3–12. – DOI: 10.22449/0233-7584-2016-4-3-12).

4. **Bazykina A.Yu.** The Geo-Information System Application for Display of the Tsunami Type Long Wave Propagation Modeling Results in the Black Sea Coastal Area / A.Yu. Bazykina, E.V. Zhuk, A.Kh. Khaliulin // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2017. – Iss. 3. – P. 74–81. – DOI: 10.22449/1573-160X-2017-3-69-76. (Базыкина А.Ю. Использование геоинформационной системы для отображения результатов моделирования распространения длинных волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря / А.Ю. Базыкина, Е.В. Жук, А.Х. Халиулин // Морской гидрофизический журнал. – 2017. – № 3. – С. 74–81. – DOI: 10.22449/0233-7584-2017-3-74-81).

5. **Базыкина А.Ю.** Характеристики наката одиночных волн на берег в бухтах с различной формой поперечного сечения / А.Ю. Базыкина, В.В. Фомин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2017. – № 4. – С. 30–38.

6. **Bazykina A.Yu.** Numerical Simulation of Tsunami in the Black Sea Caused by the Earthquake on September 12, 1927 / A.Yu. Bazykina, S.Yu. Mikhailichenko, V.V. Fomin // Physical Oceanography. – 2018. – V. 25, Iss. 4. – P. 295–304. – DOI: 10.22449/1573-160X-2018-4-295-304 (Базыкина А.Ю. Численное моделирование цунами в Черном море, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г. / А.Ю. Базыкина, С.Ю. Михайличенко, В.В. Фомин // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34, № 4. – С. 318–328. – DOI: 10.22449/0233-7584-2018-4-318-328).

7. **Bazykina A.Y.** Amplitude Characteristics Of Tsunamis Waves In The Azov-Black Sea Region / A.Y. Bazykina, V.V. Fomin // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. – 2019. – 12(4). – P. 21–31. DOI: 10.7868/S2073667319040038. (Базыкина А.Ю. Моделирование волн цунами в Азово-Черноморском регионе / А.Ю. Базыкина, В.В. Фомин //

Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 21–31. – DOI: 10.7868/S2073667319040038).

8. **Belokon A.Yu.** Simulation of Tsunami Wave Propagation in the Kerch Strait // A.Yu. Belokon, V.V. Fomin // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. – 2021. – 14(1). – P. 67–78. – DOI: 10.7868/S207366732101007X. (Белоконь А.Ю. Моделирование распространения волн цунами в Керченском проливе / А.Ю. Белоконь, В.В. Фомин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 67–78. – DOI: 10.7868/S207366732101007X).

9. **Белоконь А.Ю.** Оценки амплитудных характеристик наката волн цунами на различных участках Черноморского побережья / А.Ю. Белоконь // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2021. – № 1. – С. 34–46. – DOI: 10.22449/2413-5577-2021-1-34-46.

10. **Базыкина А.Ю.** Амплитудные и энергетические характеристики длинных волн в проливе Босфор / А.Ю. Базыкина, С.Ф. Доценко // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2015. – № 2. – С. 77–82.

Цитирования материалов и отдельных результатов других авторов в диссертации оформлены соответствующим образом. Результаты диссертационной работы в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации.

Диссертация «Математическое моделирование распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне» Белоконь Александры Юрьевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – «океанология».

Заключение принято на заседании Общественного научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН».

Присутствовало на заседании 23 члена Общеинститутского научного семинара. Результаты голосования: «за» – 23 человека, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек, протокол № 7 от 10 марта 2021 г.

Заместитель председателя
Общеинститутского научного семинара
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный исследовательский
центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
доктор физико-математических наук

Демышев Сергей Германович



Ученый секретарь
Общеинститутского научного семинара
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный исследовательский
центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь

Алексеев Дмитрий Владимирович

