На правах рукописи

Белоконь Александра Юрьевна

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН ЦУНАМИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

Специальность 1.6.17 – океанология

## ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Фомин Владимир Владимирович

#### Официальные оппоненты:

**Пелиновский Ефим Наумович** доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», главный научный сотрудник отдела нелинейных геофизических процессов

Курулин Вадим Викторович кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», начальник научно-исследовательской группы 0813/5

#### Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится 19 мая 2022 г. в 11 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.1.229.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: **299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте Института http://mhi-ras.ru/news/thesis\_defense\_202112151050.html

Автореферат разослан « »\_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.02 кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Цунами – гравитационные волны, вызванные крупномасштабными возмущениями, в первую очередь, землетрясениями, или явлениями, связанными с ними – оползнями, а также извержениями вулканов и резкими изменениями атмосферного давления (Мурти, 1981). В переводе с японского термин «цунами» означает «большая волна в гавани».

Прибрежная зона Мирового океана играет важнейшую роль В жизнедеятельности человека. Многообразие форм побережья послужило причиной береговой инфраструктуры. различной Проектирование развития новых И реконструкция эксплуатируемых береговых сооружений, ведение хозяйственной деятельности, разрастание рекреационных зон влекут за собой непрерывный рост населения, проживающего на побережье. Поэтому очень важно максимально изучить гидродинамические процессы в прибрежных районах со сложным рельефом.

Исследование распространения волн цунами и их взаимодействия с береговыми склонами является актуальной и практически значимой задачей. На характер распространения волн цунами оказывает влияние форма и рельеф дна бассейна. Когда волны цунами достигают мелководья, длина волны уменьшается, а высота растет, что сопровождается усилением нелинейных эффектов. Концентрация энергии и рост амплитуды волн на мелководье могут привести к образованию экстремально высоких заплесков. При проникновении волн в узкие бухты и каналы, устья рек, амплитудные характеристики цунами могут существенно отличаться от таковых при распространении на плоском откосе. Так, например, во время цунами 29 сентября 2009 г. на Самоа наблюдались аномальные усиления при накате волн на берег в узкой гавани Паго-Паго (Didenkulova, 2013).

В последнее время в связи с появлением новой информации о событиях цунами в Азово-Черноморском бассейне возрос интерес к исследованию этого опасного явления в данном регионе. И, хотя волны цунами здесь нельзя назвать катастрофичными, они могут нанести серьезный ущерб прибрежной инфраструктуре и экологии. Исторические свидетельства позволяют сделать вывод о том, что волны цунами во многих районах побережья Черного моря и в некоторых районах Азовского моря достигали 2 – 4 м (Никонов и др., 2018). Доказательством того, что исторические цунами могли носить губительный характер, являются обнаруженные на Болгарском побережье вблизи г. Каварна осадочные отложения, которые могли быть вызваны разрушительным цунами высотой 7 – 8 м (Ranguelov, 2003). Ярким примером внезапности и, как следствие, неблагоприятного воздействия цунами в данном регионе можно считать событие 27 июня 2014 г., когда неожиданно возникшая двухметровая волна затопила побережье вблизи Одессы, травмировав отдыхающих (Никонов и др., 2015).

Важнейшими задачами являются исследования характера воздействия волн цунами на отдельные участки побережья, определение наиболее опасных зон, расчет карт их распространения. Детальное изучение этих проблем необходимо для

проектирования и строительства защитных сооружений и проведения мероприятий по уменьшению разрушительного воздействия волн цунами.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является исследование закономерностей распространения нелинейных волн цунами в каналах, проливах, бухтах модельной и реальной геометрии. Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

1) Исследовать влияние нелинейных эффектов на форму и амплитудные характеристики волны цунами при ее распространении в узких бухтах и каналах переменного поперечного сечения. Оценить расстояние, которое проходит волна до обрушения. Результаты численного моделирования сопоставить с аналитическими оценками.

2) Проанализировать влияние нелинейности на высоту наката и глубину осушения берега при распространении волн цунами в бухтах с различной формой поперечного сечения. Исследовать особенности распространения волн цунами в бухтах и заливах Черного моря.

3) Установить зависимости амплитудных характеристик волн цунами вдоль Азово-Черноморского побережья от магнитуды подводных землетрясений и местоположения очагов генерации цунами.

4) Выполнить численное моделирование эволюции волн цунами, вызванных Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г. Проанализировать особенности распространение волн цунами в береговой зоне южной части Крымского побережья.

5) Исследовать структуру колебаний уровня моря в Балаклавской бухте, вызванных проникновением волн цунами, при разном расположении очага генерации.

**Объекты исследования** – Азово-Черноморский бассейн, бухты и заливы Черного моря.

Предмет исследования – волны цунами в прибрежной зоне.

**Методология и метод исследования** – численное моделирование с использованием метода конечных разностей решения систем дифференциальных уравнений в частных производных.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1) Получило дальнейшее развитие исследование распространения волн цунами в узких бухтах и каналах. Установлены зависимости максимальных заплесков волн цунами на берег от крутизны волны, параметра нелинейности и берегового уклона в сужающихся бухтах с разной формой поперечного сечения.

2) 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).

3) Для южной части Крымского побережья, которое расположено наиболее близко к очагу Ялтинского землетрясения 12 сентября 1927 г., впервые математически описана эволюции цунами с применением алгоритма затопленияосушения берега. 4) Впервые проведено исследование проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту и наката волн на берег.

Теоретическая и практическая значимость работы. Ценность научных работ заключается уточнении имеющихся получении соискателя В И 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. 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. Полученные результаты совершенствования важное значение методов проведения для имеют 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 негативных мероприятий предотвращению проведении ПО последствий ОТ разрушительного воздействия цунами.

#### Положения, выносимые на защиту:

1) Зависимости максимальных заплесков волн цунами на берег в сужающихся бухтах с разной формой поперечного сечения от крутизны волны, параметра нелинейности и берегового уклона.

2) Закономерности распространения волн цунами в бухтах и заливах Черного моря (Феодосийский залив, Геленджикская и Балаклавская бухты).

3) Особенности распространения волн цунами из вероятных очагов, расположенных в сейсмически активных зонах Азово-Черноморского бассейна. Пространственно-временные изменения амплитуд колебаний уровня моря при распространении волн цунами, вызванных землетрясением различной магнитуды.

4) Количественные оценки высот наката волн на берег для южной части Крымского побережья при распространении цунами, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г.

5) Расположение областей максимального затопления побережья Балаклавской бухты при проникновении в нее волн из гипотетических очагов цунами. Формирование в Балаклавской бухте сейшевых колебаний уровня моря с периодом ~ 8 мин, соответствующих моде Гельмгольца.

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.

Связь диссертационной работы с научными программами. Результаты, положенные в основу диссертационной работы, были получены соискателем при выполнении 2-х тем Плана исследований Национальной академии наук Украины (2012–2015 гг.), 2-х тем Плана исследований Федерального государственного бюджетного учреждении науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» (2015–2020 гг.) и проекта Федеральной целевой программы (2019 г.).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано в соавторстве 29 научных работ, из них 12 статей в рецензируемых научных журналах [1–12], 5 статей в рецензируемых сборниках научных трудов [13–17], 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».

Личный вклад автора. 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. Во всех работах соискатель принимала участие в постановке задачи,

выполняла большинство численных расчетов, участвовала в обсуждении и интерпретации полученных результатов.

Автор диссертации выражает искреннюю признательность д. ф.-м. н., профессору С.Ф. Доценко за помощь в выборе тематики исследования и кропотливое курирование работы, выражает искреннюю благодарность д. ф.-м. н. В.В. Фомину за внимание к исследованию, руководство и поддержку на разных этапах выполнения работы. Соискатель признательна д. ф.-м. н. Н.Б. Шапиро за поддержку работы и конструктивные замечания. Автор также благодарит д. ф.-м. н. профессора В.В. Кныша, к. ф.-м. н. В.Ф. Санникова, д. г. н., профессора Е.И. Игнатова за ценные советы при подготовке работы. Соискатель выражает признательность к. ф.-м. н. Д.В. Алексееву за содействие и поддержку. Соискатель благодарит всех соавторов за плодотворное сотрудничество и признательна коллективу отдела вычислительных моделирования математического Морского технологий И гидрофизического института РАН за создание творческой атмосферы и поддержку.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из Введения, четырех Разделов, Заключения, Списка литературы из 178 наименований и четырех Приложений. Объем диссертации составляет 163 страницы. Текст исследования иллюстрирован 60 рисунками.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, методы исследования, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту. Приводится информация о теоретической и практической значимости работы, связь с научными программами, сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В Разделе 1 рассматриваются общие характеристики волн цунами. В *подразделе 1.1* дается информация о причинах возникновения волн цунами и их проявлении в прибрежной зоне. В *подразделе 1.2* приведен обзор литературных источников, посвященных аналитическим решениям наката волн цунами на плоский откос (Carrier et al., 1958; Кайстренко и др., 1985; Доценко и др., 2013; Железняк и др., 1985; Kanoglu et al., 1998; Pedersen et al., 1983; Synolakis et al., 1987; Li et al., 2001). Однако наличие боковых границ может привести к концентрации волновой энергии и, как следствие, образованию значительных заплесков. Аналитические зависимости для амплитудных характеристик при распространении и накате волн на берег в узких бухтах и каналах получены в (Диденкулов и др., 2015; Диденкулова и др., 2012; Didenkulova et al., 2011b; Friedrichs et al., 1994; Garayshin et al., 2016; Rybkin et al., 2014). Однако эти аналитические решения не всегда могут дать точное описание изменения оценок амплитуд волн в случае сложной геометрии бассейна. Вопрос об особенностях распространения волн в узких каналах и бухтах остается

недостаточно изученным в силу влияния многих факторов на амплитудные характеристики волн.

В подразделе 1.3 обсуждаются проявления волн цунами в Азово-Черноморском регионе. Первые исследования черноморских цунами были проведены в работах (Григораш, 1959; Григораш, 1972; Григораш и др., 1969; Григораш и др., 1972). Они посвящены цунами XX ст., вызванным двумя Ялтинскими землетрясениями (1927 г.), Турецким (1939 г.) и Анапским землетрясениями (1966 г.). Болгарскими учеными выполнен ряд работ по древним катастрофическим цунами, которые произошли вблизи побережья Болгарии (Ranguelov et al., 1983). Первая попытка создания каталога черноморских цунами, который состоял из 9 событий, была предпринята в публикации (Доценко, 1994). Поиск новой информации довел количество случаев в каталоге до двадцати двух с учетом Азовского моря (Никонов, 1997). В 2011 г. каталог цунами в Черном и Азовском морях увеличился до 26 событий (Papadopoulos et al., 2011). В 2018 г. был создан каталог исторических цунами, который включает в себя 50 событий, произошедших в Азово-Черноморском регионе за последние 3000 лет (Никонов и др., 2018). Модельные расчеты черноморских цунами проводились в работах (Доценко и др., 2009; 2010; 2012; 2013; Зайцев и др., 2002; 2011; Пелиновский и др., 2011; Мазова и др., 2013; Лобковский и др., 2014, 2018; Yalciner et al., 2004; Khakizyanov et al., 2015).

Несмотря на то, что каталог цунами в Черном и Азовском морях постоянно пополняется новыми сведениями, информации об этом явлении в данном регионе недостаточно. Поэтому возникает необходимость в проведении детальных численных экспериментов по определению возможных высот волн при распространении черноморских цунами. Особенно актуальными являются задачи по исследованию локальных характеристик цунами в заливах, бухтах, проливах и других наиболее подверженных этому опасному явлению районах прибрежной зоны Черного моря.

В Разделе 2 выполнен ряд численных экспериментов по исследованию проявления нелинейных эффектов и влияния крутизны переднего склона волны на характеристики распространения и наката волн цунами в узких бухтах и каналах с различной формой поперечного сечения. В *подразделе 2.1* приведена математическая постановка задачи и метод решения. Рассматривается канал, дно которого описывается функцией  $z(x, y, t) = -H(x, t) + \alpha |y|^m$ , где  $H(x, t) = h(x) + \zeta(x, t) -$  полная глубина на продольной оси канала, h(x) – невозмущенная глубина вдоль оси канала,  $\alpha$  – константа (Петрухин и др., 2011). Параметр  $m \in (0, +\infty)$  характеризует форму поперечного сечения канала: если m = 1, то поперечное сечение является треугольным, при m = 2 – параболическим, а при  $m \rightarrow +\infty$  форма поперечного сечения стремится к прямоугольной. Уравнения движения жидкости в таких каналах получаются интегрированием уравнений теории длинных волн по площади поперечного сечения (Пелиновский и др., 1993; Петрухин и др., 2011)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + g\frac{\partial H}{\partial x} = g\frac{dh}{dx}, \quad \frac{\partial H}{\partial t} + u\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{mH}{m+1}\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где x – пространственная координата, t – время, g – ускорение свободного падения, u = u(x, t) – осредненная по поперечному сечению канала горизонтальная скорость,  $\zeta = \zeta(x, t)$  – осредненное вдоль поперечного сечения канала смещение свободной поверхности жидкости. На жидкой границе x = 0 задаются начальные условия двух типов. Первый тип – одиночная волна в форме полусинусоиды

$$\zeta = a_0 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \left(x = 0, \ 0 \le t \le T\right), \tag{2}$$

где  $a_0$  – начальная высота волны,  $T = \lambda/C$  – время прохождения волной сечения  $x = 0, \lambda$  – длина волны,  $C = C(0) = \sqrt{gh_0}$  – фазовая скорость волны в сечении x = 0.

Второй тип – одиночная волна в форме солитона

$$\zeta = a_0 \operatorname{sech}^2 \left( \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3a_0}{h_0}} \frac{(\lambda - 2Ct)}{h_0} \right) \, (x = 0, 0 \le t \le T) \,, \tag{3}$$

где  $\lambda = 4h_0 \sqrt{h_0/(3a_0)}$  arch  $\sqrt{20}$  – начальная длина одиночной волны, определяемая как ширина смещения свободной поверхности жидкости на высоте  $a_0/20$ .

С момента полного проникновения волны в канал (при t = T) в сечении x = 0 происходит замена условия генерации волны (2) или (3) на условие свободного выхода волн

$$\frac{\partial u}{\partial t} - C(0)\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x = 0, \ t \ge T).$$
(4)

В подразделе 2.2 в рамках задачи (1)–(4) исследовались распределения амплитуд полей максимальных высот волн и горизонтальных скоростей в каналах переменного поперечного сечения. Показано, что усиление волн связано с уменьшением ширины канала, его глубины и площади поперечного сечения. При этом, расстояние, которое проходит волна в канале до обрушения, сокращается с увеличением начальной амплитуды волны, уменьшением ее длины и глубины канала, но увеличивается под влиянием донного трения. Наибольшего расстояние до обрушения волна проходит в канале с прямоугольным поперечным сечением, а наименьшее – в канале с треугольной формой поперечного сечения.

В подразделе 2.3 решалась задача о распространении и накате волн цунами в модельной бухте глубиной h(x) и шириной b(x), состоящей из участка постоянной глубины длиной L, соединенного с наклонным сужающимся участком длиной  $L_s$  с уклоном дна tg  $\alpha$  (рис. 1). Начально-краевая задача (1)–(4) решалась методом конечных разностей с помощью явно-неявной схемы первого порядка аппроксимации по времени. Шаги по пространству и времени выбирались исходя из условия устойчивости Куранта. Процесс затопления-осушения береговой зоны моделировался с применением алгоритма, изложенного в (Kowalik, 2001).



Рисунок 1 – Геометрия бассейна: *а* – изменение глубины вдоль оси бухты; *б* – форма поперечного сечения

Как показали результаты моделирования, при распространении в бухте симметричного импульса вида (2) и солитона (3) нелинейные эффекты на участке постоянной глубины проявляются в постепенной деформации их профиля, а именно в увеличении крутизны в области переднего склона. Причем в солитоне это нарастание крутизны профиля происходит более медленно по сравнению с симметричным импульсом, что согласуется с результатами работы (Диденкулов и др., 2014).

При вхождении волны в сужающуюся часть бухты и набегании на наклонный берег в вершине линия уреза воды движется вверх по берегу, достигая максимального подъема. Затем происходит движение линии уреза вниз, что сопровождается осушением берега и формированием знакопеременной волны. На рис. 2 показаны вертикальные колебания линии уреза в вершине бухты с различной формой поперечного сечения. При одной и той же начальной глубине  $h_0$  амплитуда колебаний линии уреза оказывается наибольшей в бухте с треугольной формой поперечного сечения.



0,6 м, L = 100 м, tg  $\alpha = 0,176$ 

На рис. 3 приведены аналитические зависимости высоты наката волн на берег от крутизны переднего склона волны, рассчитанные по формуле (3.200) из

(Пелиновский, 1996) и оценки высот наката волн, полученные на основе численной модели. Здесь  $R = R_{\max}(s)/R_{\max}(s_0)$ , где  $R_{\max}(s)$  – максимальная высота наката волны с деформированным профилем, которая подошла к наклонному участку бухты с крутым передним склоном,  $R_{\max}(s_0)$  – высота наката симметричного импульса; s – максимальная крутизна деформированной волны с крутым передним склоном,  $s_0$  – максимальная крутизна симметричного импульса. Из рис. 3 следует, что высота наката растет с увеличением крутизны переднего склона волны.



Рисунок 3 – Связь максимальных высот наката волн с крутизной переднего склона волны в бухтах с различной формой поперечного сечения.  $a_0 = 0,02$  м,  $h_0 = 0,6$  м, tg  $\alpha = 0,176$ 

Видно, что в бухтах с треугольной и параболической формой поперечного наблюдается превышение значений, найденных сечения аналитически, над численными расчетами. В случае прямоугольного сечения расчеты показывают Согласно численным хорошее соответствие. оценкам, высота наката деформированных волн может превысить высоту наката недеформированных волн до 1,8 раз в бухтах с прямоугольной формой сечения, до 3 и более раз – в бухтах с треугольной формой сечения.

**Раздел 3** посвящен исследованию закономерностей распространения волн цунами в бухтах и заливах модельной и реальной геометрии различного типа в рамках двумерных задач.

В подразделе 3.1. дана математическая постановка задачи и метод решения. Процесс распространения волн цунами в бухтах и заливах описывается с помощью нелинейных уравнений длинных волн, которые оперируют осредненными по глубине проекциями горизонтальных скоростей на оси x и y и смещением свободной поверхности жидкости. На открытой границе задается одиночная волна в форме полусинусоиды. Рассмотрены задачи с условием отражения волн от боковых границ бассейна и с накатом волн на боковые границы. В задачах с отражением задавалась твердая стенка на глубине 4 м. Начально-краевая задача решалась методом конечных разностей с помощью явно-неявной схемы первого порядка аппроксимации по времени (Вольцингер и др., 1968; Kowalik, 2001). В задачах с накатом волн на берег

использовался алгоритм затопления-осушения, предложенный в (Kowalik et al., 1993; Sielecki et al., 1970).

В *подразделе* 3.2. исследуется процесс распространения и наката волн цунами в сужающихся бухтах с U-образной формой поперечного сечения. Проанализированы изменения высоты уровня вдоль оси бухт с треугольной, параболической и близкой к прямоугольной формами поперечного сечения при проникновении в них волн. Полученные в рамках одномерной и двумерной численных моделей результаты сопоставлялись с аналитическими оценками, рассчитанными по формуле (10) из (Didenkulova et al., 2011).

Для одномерного случая выявлено хорошее соответствие между численным решением и аналитической зависимостью. В двумерном случае на волну существенное влияние оказывает форма поперечного сечения бассейна. Фронт проникающей волны приобретает изогнутую форму вследствие того, что ее фазовая скорость максимальна вдоль оси бухты и уменьшается с приближением к боковым границам. По мере сужения бассейна и уменьшения его глубины высота волны возрастает. Вместе с тем, по мере своего распространения волна частично отражается от боковых границ бассейна, что приводит к некоторому уменьшению уровня моря, однако значительная часть энергии волны достигает вершины бухты.

Бухта с треугольной формой поперечного сечения имеет наиболее пологие берега, поэтому распространение в ней волн сопровождается увеличением уровня на боковых границах и его уменьшением вдоль оси бухты за счет усиления заплеска волн на берег. В случае, когда форма поперечного сечения бухты близка к прямоугольной, рост амплитудных характеристик волны происходит медленнее по сравнению с рассмотренными выше случаями.

Установлено, что наибольшие заплески достигаются в бухте с треугольной формой поперечного сечения (m = 1). При m = 5 существенных заплесков на береговые склоны не происходит, так как такая бухта имеет наиболее крутые берега. Задачу можно упростить, заменив условие наката волн на берег на условие непротекания.

В подразделе 3.3 исследовалось влияние ширины открытой границы бухты на характер распространения волн цунами. Рассматривалась мелководная бухта, ограниченная полукруглой береговой линией (рис. 4). Минимальная глубина вдоль побережья бухты принималась равной 4 м. Исследовался процесс проникновения в бухту через открытую границу плоской одиночной волны цунами высотой  $a_0 = 1$  м и длиной 10 км.



Рисунок 4 – Рельеф дна и структура волнового поля в различные моменты времени при распространении одиночной волны в бухте

Анализ результатов численных экспериментов показал, что при входе волны в бухту происходит изгиб ее фронта. По мере распространения волны в бухте возникают два возвышения уровня в мелководной области вдоль береговой черты. Вблизи волн повышения образуются четко прослеживаемые впадины, при отражении волны от берега ее высота значительно возрастает. Здесь располагается первая зона усиления волны (I), высота которой возрастает в 2 раза. Волна, отразившись от берега, формирует локальный подъем уровня моря в средней части, концентрируя в ней основную энергию; здесь расположена вторая зона усиления волн в бухте (II). При сужении входа в акваторию бухты проникновение в нее волны будет происходить в виде излучения кольцевых волн, при этом понижения уровня моря не возникает.

В *подразделе* 3.4. исследовалось распространение волн цунами в реальных заливах и бухтах различной конфигурации (рис. 5). Примером бухты с сильно ограниченным водообменом с морем является Балаклавская бухта. В левом столбце рис. 5 показаны возмущения уровня моря в бухте в характерные моменты времени, вызванные проникновением волны. Волна усиливается в наиболее изогнутой узкой

части бухты, частично отражается, а частично проходит в северную мелководную часть. При достижении волной вершины бухты ее высота увеличивается в 2 раза. Изза узости и изогнутости бухты в ее акватории происходят довольно продолжительные колебания с излучением волновой энергии в открытое море.



Рисунок 5 – Распространение нелинейной длинной волны в черноморских бухтах и заливе: левый столбец – Балаклавская бухта; средний столбец – Феодосийский залив; правый столбец – Геленджикская бухта

В Феодосийском заливе эволюция волн цунами подобна эволюции в модельной бухте с широким входом: с образованием локальных максимумов вблизи берега и в средней части залива (рис. 5, средний столбец). При этом локальные повышения уровня моря внутри залива превышают амплитуду волны на входе в 3 раза.

Примером широкой бухты с узким входом является Геленджикская бухта (рис. 5, правый столбец). Волна проникает в бухту через узкий вход в широкую часть акватории, где ее амплитуда уменьшается. Усиление амплитуды волны в 1,5 раз происходит при ее отражении от берега, также в узкой части бухты. Волновые возмущения в Геленджикской бухте менее интенсивны по сравнению с возмущениями, формируемыми цунами в Балаклавской бухте и Феодосийском заливе.

**Раздел 4** посвящен исследованию формирования и распространения волн цунами в Черном и Азовском морях от очагов генерации, которые соответствуют уже имевшим место цунамигенным событиям.

В подразделе 4.1 описывается математическая постановка задачи и метод решения. Моделирование генерации цунами осуществлялось заданием начального смещения уровня моря в эллиптической области с центром в точке  $(x_0, y_0)$  при нулевом поле скорости в виде

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2(\pi r/2) \ (r \le 1), \ \zeta_0 = 0 \ (r > 1), \tag{5}$$

где  $r = 2\sqrt{(x_1/L)^2 + (y_1/W)^2}$ ; *L* и *W* – большая и малая оси эллипса;  $x_1 = (x - x_0)\cos\alpha + (y - y_0)\sin\alpha$ ;  $y_1 = (y - y_0)\cos\alpha - (x - x_0)\sin\alpha$ ; *x*, *y* – зональная и меридиональная координаты;  $\alpha$  – угол наклона большой оси эллипса к оси *x*.

Значения параметров *L* и *W* определялись в зависимости от магнитуды землетрясения *M* по эмпирическим формулам (Уломов и др., 1993)

lg L = 0,6M - 2,5, lg W = 0,15M + 0,42, lg  $a_0 = 0,8M - 5,6$  ( $M \ge 6,5$ ). (6) Численное моделирование цунами выполнялось на основе нелинейных уравнений длинных волн вида (Liu et al., 1995)

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{UV}{H} \right) = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gk^2}{H^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{UV}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V^2}{H} \right) = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gk^2}{H^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \end{cases}$$
(7)

где *t* – время; U(x, y, t) и V(x, y, t) – проекции вектора полного потока жидкости на оси *x* и *y* соответственно;  $\zeta(x, y, t)$  – смещение свободной поверхности жидкости от горизонтального положения;  $H = h(x, y) + \zeta(x, y, t)$  – полная (динамическая) глубина жидкости; h(x, y) – глубина бассейна при невозмущенном состоянии жидкости; g – ускорение свободного падения; k = 0,013 с/м<sup>1/3</sup> – параметр шероховатости Маннинга.

В *подразделе 4.2* рассматриваются цунами в Азово-Черноморском регионе, вызванные сейсмическими источниками. Согласно «Historical Tsunami Database for the World Ocean» [http://tsun.sscc.ru/nh/tsun\_descr.html], за 3000 лет произошло 32 цунамигенных подводных землетрясения.

Принимая во внимание местоположения очагов генерации цунами, было выделено 10 сейсмически активных зон, для которых построены модельные эллиптические очаги (рис. 6).

Расчеты проводились на сетке с пространственным разрешением 500 м и шагом по времени 1 с. Минимальная глубина бассейна составляла 4 м. На этой глубине задавалась твердая стенка, на которой ставилось условие непротекания.

Распределение максимумов высот волн цунами вдоль побережья Азово-Черноморского бассейна показано на рис. 7. Как видно, повышения уровня моря вдоль побережья, вызванные землетрясениями магнитудой 7, составляют десятки сантиметров и в некоторых зонах превышают 1 м. Наиболее подвержены цунами участки Крымско-Кавказского побережья и Болгарии. Северо-западная часть Черного моря наименее подвержена воздействию волн цунами, вызванных подводными землетрясениями.



Рисунок 6 – Расчетные эллиптические очаги генерации цунами в Азово-Черноморском бассейне



Рисунок 7 – Распределение максимальных возвышений уровня моря при распространении волн из очагов *1* – *10* 

Анализ проведенных расчетов показал, что в случае сдвига очага генерации цунами из зоны с глубиной бассейна H = 1000 м в зону с H = 1500 м, происходит усиление волновых колебаний до 20 %. При землетрясении с магнитудой 7,5 повышения уровня моря при подходе волн цунами могут усиливаться до 40% по сравнению с колебаниями уровня, вызванными землетрясением с магнитудой 7,0.

В *подразделе 4.3* проведено численное моделирование цунами у берегов Крыма, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г. Землетрясение имело магнитуду 6,5 по данным (Доценко, 1994; Oaie et al., 2016) и 6,8 ± 0,1 по данным (Никонов, 2002; Papadopoulos et al., 2011; Yalciner et al., 2004). По данным мареографов Крымского и Кавказского побережий, наибольшие подъемы уровня моря составили 0,5 м (Доценко, 1994), однако, по наблюдениям очевидцев, во многих прибрежных пунктах Крыма подъемы уровня моря были более значительными

(Никонов, 2002; Шнюков и др., 1994). При t = 0 (рис. 8) начальное смещение уровня моря определялось по формуле (5) для M = 7. Вначале был проведен численный эксперимент для всего Черного моря на сетке с шагом 500 м. Он показал, что наиболее интенсивные волны формируются на участке побережья, который расположен наиболее близко к очагу – южной части Крымского побережья. Далее был проведен более детальный численный эксперимент по расчету цунами на сетке с шагом 50 м для расчетной области, примыкающей к южному берегу Крыма. При этом учитывался накат волн на берег с помощью алгоритма (Kowalik et al., 1993). На жидких границах расчетной области ставилось условие свободного прохождения. Для построения поля глубин применялись крупномасштабные навигационные карты Азово-Черноморского бассейна. Рельеф суши строился на основе данных массива Digital Terrain Elevation Data Level-1 с пространственным 3" шагом (https://eros.usgs.gov/).

Результаты расчетов эволюции волн цунами от эллиптического очага показаны на рис. 8. Видно, что при опускании начального возвышения формируется кольцевая волна, в которой зоны максимумов возвышений вытянуты вдоль большей оси эллипса. На мелководье высоты волн увеличиваются и их передний склон становится более крутым вследствие уменьшения глубины бассейна в направлении берега.



Рисунок 8 – Эволюция волнового поля при распространении волн цунами из очага, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г.

Далее начинается процесс наката волн на берег, который состоит в попеременном движении уровня моря вверх по берегу и опускании. При этом происходит либо затопление, либо осушение побережья. Время добегания первой волны до ближайшего участка побережья составляет ~ 5 мин.

На рис. 9 показаны максимальные подъемы и опускания уровня моря при накате волн на берег для ряда пунктов Южного берега Крыма. Как видно, подъемы уровня могут достигать 2 м, а в некоторых пунктах (Никита, Гурзуф) понижения уровня по абсолютной величине превышают высоту наката.



Рисунок 9 – Максимальные повышения и понижения уровня моря при накате на берег волн цунами, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г.

В подразделе 4.4 приводятся результаты численного моделирования проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту. Моделировалось 3 случая возникновения цунами в Черном море с магнитудой 7: очаг 1 был расположен непосредственно напротив Балаклавской бухты, очаг 2 был подобен тому, который вызвал Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г., очаг 3 – дальний очаг, расположенный вблизи Варны. Очаги имели эллиптическую форму и были ориентированы вдоль изобаты 1500 м. На жидкой границе расчетной области (y = 0) в качестве граничных условий задавались зависимости от времени колебаний уровня моря, полученные по модели цунами для всего Черного моря (7). Для ближних очагов цунами (очаги 1 и 2) максимальные отклонения уровня моря на жидкой границе составили ± 0,3 м; для дальнего очага цунами (очаг 3) – ± 0,05 м.

Для каждого очага расчеты цунами в Балаклавской бухте выполнялись по модели SWASH (Zijlema, Stelling, 2011) на период времени 3 ч с шагом 5 м по пространству и шагом 0,01с по времени.

Как показали расчеты, на входе в бухту амплитуды волн возрастают в 1,5 – 2 раза по сравнению с амплитудами на южной границе области. При достижении цунами вершины бухты амплитуды колебаний увеличиваются еще примерно в 2 раза (до 1,4 – 1,5 м для первого и второго очага и до 0,33 м для третьего очага), по

сравнению с амплитудами на входе в бухту. Таким образом, внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5 – 6 раз по сравнению с высотой цунами на южной границе области. Выраженный колебательный характер полученных мареограмм дает основание предполагать, что цунами возбуждают в Балаклавской бухте сейшевые колебания. Для оценки периодов сейшевых колебаний мареограммы подвергались спектральному анализу (использовались скрипты, разработанные Gert Klopman, Delft Hydraulics, 1995 (Winde, 2012)).

Энергетические спектры колебаний уровня моря в вершине Балаклавской бухты для трех очагов цунами показаны на рис. 10. Видно, что все спектры имеют хорошо выраженный пик в интервале периодов 8 – 9 мин. В работе (Фомин и др., 2017) на основе анализа энергетических зависимостей получены следующие периоды первых четырех мод сейшевых колебаний:  $T_0 = 8,2$  мин;  $T_1 = 2,5$  мин;  $T_2 = 1,9$  мин;  $T_3 = 1,3$  мин. Таким образом, во всех трех случаях при проникновении волн цунами в Балаклавскую бухту в ней генерируется низшая мода сейшевых колебаний  $T_0$  (так называемая мода Гельмгольца). Также видно, что на интервале периодов 2 – 4 мин имеются незначительные флуктуации энергии, вызванные возбуждением более высоких мод собственных колебаний.



Рисунок 10 – Энергетический спектр колебаний уровня моря в вершине Балаклавской бухты для очагов цунами *1* – *3* (*T* – период колебаний)

Проведенные расчеты показали, что при проникновении в Балаклавскую бухту волна цунами частично отражается от твердых границ южной части бухты, а частично проходит через коленообразную узость в центральную и северную часть бухты. Здесь происходит концентрация волновой энергии и формируются сейшеобразные колебания уровня воды, приводящие к затоплению пологих участков береговой полосы бухты.

На рис. 11 для каждого из трех очагов цунами даны карты максимально возможных границ зоны затопления и глубины потока на прилегающем морском побережье и береговой полосе Балаклавской бухты. Анализ карт показывает, что наибольшему затоплению подвержены берега, примыкающие к вершине бухты и к восточному берегу. Это обусловлено тем, что эти участки береговой полосы являются относительно пологими и низменными по сравнению с другими участками, более берега и крутые откосы. Согласно результатам имеющими высокие моделирования, максимальная глубина затопления прибрежных районов суши в достигает 1,0-1,8М. Максимальная период действия цунами величина горизонтального заплеска в бухте составляет 60 – 90 м



Рисунок 11 – Максимально возможные для очагов *1 – 3* подъемы уровня моря и глубины потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты. Черная кривая – изобата 0 м

#### В Заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Диссертация содержит 4 приложения. В *приложении А* дано описание конечноразностной схемы вычисления наката волн на берег (одномерная задача). Конечноразностная схема вычисления наката волн на берег (двумерная задача) представлена в *приложении Б*. В *приложении В* приводится конечно-разностный метод решения уравнений нелинейной модели длинных волн. *Приложение Г* содержит описание гидродинамической модели цунами в Балаклавской бухте.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию особенностей распространения волн цунами в прибрежной зоне на основе численного моделирования. Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Выполнено численное моделирование распространения волн цунами в узких бухтах и каналах переменного поперечного сечения. Установлено, что увеличение начальной амплитуды волны  $a_0$  и уменьшение ее длины приводит к увеличению высоты вертикального наката и глубины осушения. В бухтах с крутыми береговыми склонами (tg  $\alpha \ge 0,4$ ) высота наката волн может превышать  $a_0$  в 2–3 раза, а в случае более пологих склонов (tg  $\alpha < 0,4$ ) высота наката может возрастать в 8 и более раз. Расстояние, которое волна проходит от входа в бухту до точки обрушения, сокращается с ростом  $a_0$ , уменьшением длины волны и глубины бухты, но увеличивается под влиянием донного трения. Это расстояние наибольшее в бухте прямоугольного сечения и наименьшее – в бухте треугольного сечения. В бухтах с треугольной формой глубина отката от берега может превышать по модулю высоту наката на берег. В бухтах с параболической формой сечения высота наката и глубина отката равны по модулю. В бухтах с прямоугольной формой поперечного сечения высота наката и глубина отката равны по модулю. В бухтах с прямоугольной формой поперечного сечения высота наката и глубина отката равны по модулю. В бухтах с прямоугольной формой поперечного сечения высота наката на ката наименьшие.

2. На основе численного моделирования исследованы 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 характерна 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 без понижения уровня моря. Подобный процесс распространения волн характерен для Геленджикской бухты, где амплитуда волны усиливается до 1,5 раз. Проникновение волн в узкие бухты сопровождается значительным усилением амплитудных характеристик. При вхождении волны в Балаклавскую бухту ее амплитуда увеличивается в 4-5 раз.

3. Проведено исследование распространения волн цунами из гипотетических очагов генерации цунами в Азово-Черноморском бассейне, которые расположены в сейсмически опасных зонах без учета наката волн на берег. Установлено, что наиболее подверженными воздействию цунами являются ближайшие к очагам участки побережья. Повышения уровня моря вдоль побережья при прохождении волн цунами, вызванных землетрясениями магнитудой 7, составляют десятки сантиметров и в некоторых зонах превышают 1 м. 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.

4. Выполнено численное моделирование распространения и наката волн цунами на берег, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г. Для южной части Крымского побережья, как для наиболее подверженного этому событию, проведен детальный расчет эволюции цунами. Результаты моделирования показали, что высота наката волн на берег в некоторых пунктах (Никита, Гурзуф) может достигать 2 м, а граница осушения береговой зоны достигает изобаты 3 м.

5. Проведено численное моделирование с высоким пространственным разрешением проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту. Выявлено, что в результате распространения волн в бухте формируются сейшевые колебания уровня моря с периодом ~ 8 мин, соответствующие моде Гельмгольца. Внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5 – 6 раз по сравнению с высотой цунами на южной границе области. Колебания уровня моря максимальны в вершине бухты, где их амплитуда достигает 1,4–1,5 м. Наибольшему затоплению подвержены северный и восточный берега Балаклавской бухты. Максимальная глубина потока прибрежных районов суши в период действия цунами достигает 1,0–1,8 м. Величина горизонтального заплеска на побережье бухты составляет 60–90 м.

### ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

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.

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 Ocean-ography, [e-journal]. – 2015. – Iss. 4. – P. 3–12. – DOI: 10.22449/1573-160X-2015-4-3-12.

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.

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.

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.

7. **Bazykina A.Y.** Amplitude Characteristics Of Tsunamis Waves In The Azov-Black Sea Region / A.Y. Bazykina, V.V. Fomin // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidro-fizika. – 2019. – 12(4). – P. 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.

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.

11. **Базыкина, А.Ю.** Влияние нелинейности и донного трения на длинные волны в каналах переменного / А.Ю. Базыкина, С.Ф. Доценко // Процессы в геосредах. – 2016. – №2. – С. 97–103.

12. **Базыкина, А.Ю.** Распространение одиночной длинной волны в бухтах с U-образной формой поперечного сечения / А.Ю. Базыкина, В.В. Фомин // Процессы в геосредах. – 2017. – № 2 (11). – С. 477–484.

13. Доценко, С.Ф. Численное моделирование распространения длинных волн в проливе Босфор / С.Ф. Доценко, **А.Ю. Базыкина** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2013. – Вып. 27. – С. 184–188.

14. Базыкина, А.Ю. Численное моделирование распространения поверхностных длинных волн в бухтах и заливах / А.Ю. Базыкина, С.Ф. Доценко // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2016. – №4. – С. 10–14.

15. Доценко, С.Ф. Особенности распространения волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря / С.Ф. Доценко, А.Ю. Базыкина, А.В. Ингеров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2017. – Вып. 2. – С. 11–19.

16. Gurov, K. Numerical simulation of propagation of tsunami waves in the Black Sea caused by the earthquake on 12 September, 1927 / K. Gurov, A. Bazykina, S. Mikhailichenko, V. Fomin // Surveying Geology & Mining Ecology Management. – 2018. – T. 18,  $N_{2}$  3.1. – P. 531–538. – DOI: 10.5593/sgem2018/3.1/S12.069.

17. Базыкина, А.Ю. Анализ распространения волн цунами в Азово-Черноморском бассейне / А.Ю. Базыкина, В.В. Фомин // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Выпуск 3 – Ростовн/Д: Изд-во ЮНЦ РАН. – 2018. – С. 11–16.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Белоконь Александры Юрьевны

Подписано к печати 17 февраля 2022 г. Объем 0,9 п.л.

Заказ № 452

Формат бумаги 60×84 1/16 Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии «КУПОЛ» 299053 г. Севастополь, ул. Муссонная, 46 Тел.: +7 978 784 66 32 kupol.sevastopol@mail.ru