

МАНИЛЮК ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СЕЙШЕВЫЕ И СГОННО-НАГОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ
В ЧЕРНОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ**

Специальность 1.6.17 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

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:

Мазова Раиса Хаимовна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева», профессор кафедры прикладной математики.

Показеев Константин Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры физики моря и вод суши.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный научный центр «Карельский научный центр Российской Академии наук»

Защита состоится **19 мая 2022 г. в 14 ч** 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/assets/files/Manilyuk_thesis.pdf

Автореферат разослан «____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.02

кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Сейшевые и сгонно-нагонные колебания уровня – одни из наиболее опасных явлений у побережья Черного и Азовского морей, вызывающих подтопление прибрежной зоны и создающих серьезные проблемы для судов, находящихся на якорных стоянках. Наибольшие амплитуды сейш в Черном и Азовском морях достигают 35–55 см (Фомичева, 1975; Волкова, 1978), а нагонов в Азовском море – от 3,5 до 5,8 м и в Черном море – до 1 м (Проект «Моря СССР»... Т. IV, V, 1991). Сейши в бухтах являются причиной такого опасного явления, как тягун (Рабинович, 1993), приводящего к разрыву швартовых и столкновению судов, затрудняющему погрузочно-разгрузочные операции. Смежные бухты взаимодействуют друг с другом за счет связи через их входы. Это расширяет модовый состав сейш в системах таких бухт и увеличивает риск возникновения опасных для судов и береговой инфраструктуры колебаний уровня и течений.

Прогнозы сгонно-нагонных колебаний и тягуна могут значительно обезопасить работу морских портов. Установление особенностей сейшевых и сгонно-нагонных колебаний уровня моря, их возможного проявления – актуальная задача и с практической, и с научной точек зрения.

Математическое моделирование в настоящее время является основным методом исследования сейшевых колебаний. Развитие получили два подхода к моделированию сейш. Первый (Марамзин, 1980; Архипкин и др., 1989; Рабинович и др., 1990; Иванов и др., 1992; Чехов и др., 2015) базируется на решении задачи на собственные значения. Он дает возможность найти периоды сейш и соответствующие им распределения безразмерных нормированных относительно максимума амплитуд волн, определяющихся исключительно геометрическими параметрами бассейна, независимо от причин их вызывающих. Второй подход (Блатов и др., 1984; Коновалов и др., 1995; Доценко и др., 2007; Матишов и др., 2009; Железняк и др., 2014) заключается в моделировании ситуации, когда на начальном этапе жидкость в бассейне выводится из состояния равновесия действием какой-либо возмущающей силы. Анализ колебаний воды после прекращения действия возмущения позволяет выделить периоды сейш и изучить их пространственную структуру. Сейшевые колебания в настоящей работе исследуются с помощью обоих указанных подходов.

Исследование сгонно-нагонных колебаний в Азово-Черноморском бассейне ведется интенсивно в течение многих лет. Для этого используются различные численные модели. В качестве возмущающей силы рассматривается либо длительное воздействие ветра (Филиппов, 2012; Фомин и др., 2006, 2015; Иванов и др., 2008; Черкесов и др., 2017; Сабурин и др., 2017). Либо совместное действие атмосферного барического возмущения и связанного с ним поля ветра при прохождении циклонов над акваторией морей (Еремеев и др., 1996; Иванов и др. 1999; Коновалов и др. 1999; Букатов и др., 2009, Попов и др., 2017). В данной работе при моделировании сгонно-нагонных колебаний в качестве возмущений выбраны движущиеся атмосферные циклоны, типичные для Азово-Черноморского региона.

Объекты исследования – Азовское, Черное моря и система севастопольских бухт.

Предмет исследования – сейшевые и сгонно-нагонные колебания.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является исследование в Черном и Азовском морях характеристик сейшевых и сгонно-нагонных колебаний на основе математического моделирования. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать численную математическую модель, основанную на методе конечных элементов, предназначенную для расчета собственных периодов и соответствующих им собственных функций в задаче о собственных длинноволновых колебаниях жидкости в ограниченном бассейне переменной глубины с произвольной формой береговой черты.

2. Изучить характеристики собственных колебаний в Черном и Азовском морях, опираясь на разработанную численную модель. Уточнить значения собственных периодов данных морей на основе результатов модельных расчетов и данных натурных наблюдений. Получить оценки вклада отдельных мод сейш в формирование волновой картины в пунктах, расположенных на побережьях Черного и Азовского морей.

3. В рамках двумерной конечно-разностной модели (Коновалов и др., 1995, Еремеев и др., 1996) определить условия генерации отдельных мод сейш Азовского моря в зависимости от скорости и направления смещения типичных для данного региона циклонов.

4. На основе конечно-элементной модели *ADCIRC (Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries)* (Luettich et al., 2004) изучить резонансные колебания в системе севастопольских бухт, генерируемые различными типами длинноволновых возмущений, приходящих из открытого моря. Установить резонансные периоды системы севастопольских бухт, значения параметров возмущений, приводящих к наиболее интенсивным резонансным колебаниям в севастопольских бухтах. На примере Севастопольской и Карантинной бухт исследовать влияние бухт системы друг на друга.

5. С использованием двумерной конечно-разностной модели (Коновалов и др., 1995, Еремеев и др., 1996) установить зависимости величин амплитуд сгонно-нагонных колебаний в Черном и Азовском морях от направления смещения циклонов, типичных для данного региона. Выделить направления, при которых генерируются сгонно-нагонные колебания наибольших амплитуд. Исследовать влияние скорости смещения циклонов на величину сгонно-нагонных колебаний в Азовском море. Определить интервалы скоростей, приводящие к наибольшим сгонам и нагонам.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Впервые на основе авторской численной модели, предназначенной для решения задачи на собственные значения, с использованием неструктурированной сетки треугольных конечных элементов, аппроксимирующей реальный профиль береговой черты, в узлах которой задавалась реальная батиметрия, определены периоды мод собственных колебаний уровня Азовского моря и их пространственная структура, получены оценки вклада, вносимого отдельными модами в формирование волновой картины в пунктах побережья.

2. Установлена связь модового состава сейш Азовского моря, возникающих после прохождения над ним типичных для Азово-Черноморского региона циклонов, с параметрами данных циклонов.

3. Впервые проведено исследование сейшевых колебаний в системе севастопольских бухт, вызываемых длинными волнами, приходящими из открытого моря.

Выделены резонансные периоды бухт системы. Установлено, что количество генерируемых мод сейш определяется диапазоном периодов возмущающих воздействий. Модовый состав сейш в бухтах, объединенных в систему, расширяется за счет связи через их входы. При этом интенсивность собственных мод Севастопольской бухты, проникающих в Карантинную бухту, может превосходить интенсивность собственных мод Карантинной бухты.

4. Определены зависимости амплитуд сгонно-нагонных колебаний в Черном и Азовском морях от параметров циклонов, типичных для этих морей. Для пунктов, расположенных на побережьях Крыма и северо-западной части Черного моря, а также по всему периметру Азовского моря, установлены условия генерации сгонно-нагонных колебаний максимальных амплитуд.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанная численная конечно-элементная модель для задачи на собственные значения может быть использована для расчета собственных периодов и пространственной структуры собственных колебаний во внутренних морях Мирового океана, озерах и водохранилищах. На основе совместного анализа значений собственных периодов, рассчитанных с помощью этой численной модели, с данными натурных наблюдений за уровнем определены периоды сейшевых колебаний Азовского моря и уточнены значения периодов сейш Черного моря.

Результаты моделирования прохождения циклонов над Азово-Черноморским регионом позволяют выявить основные типы возможных сгонно-нагонных колебаний уровня, выделить направления и скорости движения циклонов, которые могут приводить к возникновению сгонно-нагонных колебаний наибольших амплитуд.

Численная модель *ADCIRC*, адаптированная в работе к севастопольскому региону, позволяет проводить расчеты параметров колебаний в системе севастопольских бухт, получать оценки взаимного влияния колебаний воды в бухтах системы и может служить основой для прогнозирования условий возникновения тягуна. С ее помощью в работе определены значения резонансных периодов севастопольских бухт и установлены условия возникновения в севастопольских бухтах определенных мод сейшевых колебаний, в том числе и высокочастотных, являющихся причиной такого опасного явления, как тягун.

Результаты, полученные в настоящей работе, углубляют понимание физических механизмов формирования различных типов колебаний уровня Черного и Азовского морей и в будущем могут быть основой системы, предназначенной для прогнозирования опасных явлений и планирования мероприятий по минимизации последствий аварийных ситуаций в Азово-Черноморском регионе. Также они применимы при исследовании сейшевых и сгонно-нагонных колебаний в других внутренних морях Мирового океана.

Положения, выносимые на защиту.

1. Численная двумерная конечно-элементная гидродинамическая модель для расчета параметров собственных колебаний в ограниченных бассейнах произвольной формы и глубины. Полученные с ее помощью собственные периоды Черного и Азовского морей и соответствующие им собственные функции, определяющие пространственную структуру сейшевых колебаний уровня данных морей.

2. Зависимость модового состава сейш Азовского моря от параметров, вызывающих их атмосферных циклонов, типичных для Азово-Черноморского региона.

3. Резонансные периоды севастопольских бухт. Зависимости амплитуд и модового состава сейш в системе связанных бухт от параметров генерирующих их длинноволновых возмущений, приходящих из открытого моря, на примере Севастопольской и Карантинной бухт. Оценка влияния связи между бухтами через входы на параметры сейшевых колебаний в системе бухт.

4. Закономерности, устанавливающие связь параметров сгонно-нагонных колебаний в Черном и Азовском морях от направления и скорости смещения типичных для Азово-Черноморского региона циклонов.

Методы исследований. Аналитические решения уравнений математической физики; численные решения уравнений математической физики; вычислительный эксперимент; анализ результатов численного моделирования.

Степень достоверности и апробация полученных результатов. Для расчета параметров собственных колебаний в Черном и Азовском морях использована авторская конечно-элементная модель, показавшая хорошее соответствие полученных с ее помощью значений собственных периодов, со значениями, установленными на основе натурных наблюдений на гидрометеопостах Азово-Черноморского региона и результатами других авторов. Резонансные свойства севастопольских бухт исследованы с помощью конечно-элементной модели *ADCIRC*, широко используемой в мире при моделировании штормовых нагонов, приливов и прибрежной циркуляции. Она поддерживается академическими, правительственными и корпоративными партнерами. Сгонно-нагонные колебания в Черном и Азовском морях изучались на основе конечно-разностной модели, разработанной в отделе теории волн Морского гидрофизического института (МГИ). Данная модель является верифицированным инструментом, способным достоверно воспроизводить отклик моря на прохождение барических образований типа циклона.

Достоверность научных положений и выводов апробировалась на 15 международных и всероссийских научных конференциях. Материалы диссертации в качестве апробации заслушивались на семинарах отдела теории волн и направления оперативной океанографии ФГБУН ФИЦ МГИ РАН, лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

Личный вклад автора. Постановка задач и выбор тематики диссертационного исследования осуществлялись совместно с научным руководителем д. ф.-м. н. Фоминым В.В. и чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. Черкесовым Л.В. Аналитический обзор предшествующих исследований по теме диссертации проводился соискателем самостоятельно. Обсуждение результатов отдельных этапов исследования и формулировка выводов осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций.

Соискателем лично была разработана численная конечно-элементная гидродинамическая модель, предназначенная для расчета периодов и пространственной структуры собственных колебаний жидкости в замкнутых бассейнах (Манилюк и др., 1994). Соискателем предложена идея применить разработанную модель для исследования сейшевых колебаний в Азово-Черноморском регионе. Им были проведены расчеты параметров собственных колебаний в них, выполнен анализ полученных результатов и сопоставление их с данными натурных наблюдений (Иванов и др., 1994; Иванов и др., 1996).

Для Азовского и Черного морей соискателем было предложено провести исследования зависимости пространственного распределения величин сгонно-

нагонных колебаний уровня от параметров вызывающих их циклонов. Им была спланирована и проведена серия численных экспериментов, на основе анализа результатов которых были установлены условия возникновения сгонно-нагонных колебаний наибольших амплитуд и генерации определенных мод сейш (Иванов и др., 1999a; Иванов и др., 1999b; Еремеев и др., 2000).

Соискателем предложена идея проведения исследования резонансных колебаний в системе связанных бухт, вызываемых различными видами волновых возмущений, приходящих из открытого моря. В качестве объекта исследования выбрана система севастопольских бухт, являющаяся до сих пор мало изученной. Проведено планирование численных экспериментов и анализ результатов расчетов, установлены параметры и особенности сейшевых колебаний в системе севастопольских бухт (Манилюк, 2018; Манилюк и др., 2019; Манилюк и др., 2020).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 29 научных работах, из них 15 статей в рецензируемых журналах, 14 статей в рецензируемых сборниках научных трудов и тезисов докладов на Всероссийских и Международных конференциях. Требованиям ВАК при Минобрнауки Российской Федерации удовлетворяют 15 работ в рецензируемых российских и украинских научных изданиях. В их числе 6 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science, 9 работ – в наукометрическую базу SCOPUS.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, одного приложения и списка литературы, включающего 143 наименования. Работа изложена на 168 страницах текста, содержит 41 рисунок и 14 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д. ф.-м. н. Фомину В.В. за руководство работой. Автор сердечно признателен чл.-корр. НАНУ, д. ф.-м. н., профессору Черкесову Л.В. за руководство в становлении меня как ученого и за соавторство в большей части научных работ. Автор искренне благодарен чл.-корр. РАН, д. ф.-м. н. Коротаеву Г.К., д. ф.-м. н. Шапиро Н.Б., д. ф.-м. н. Кнышу В.В., д. ф.-м. н. Дулову В.А., д. г. н. Белокопытову В.Н., к. ф.-м. н. Санникову В.Ф. за обсуждение результатов, представленных в работе, и критические конструктивные замечания, позволившие ее улучшить. Автор благодарен зав. отделом теории волн д. ф.-м. н. Демышеву С.Г. и сотрудникам этого отдела за поддержку при написании работы. Отдельная благодарность к. ф.-м. н. Алексееву Д.В. за обсуждение работы и дельные советы по ее улучшению.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, включающая актуальность и степень разработанности темы, цель исследования, поставленные задачи, новизну работы, ее практическую значимость, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, личный вклад автора.

В **Разделе 1** дано описание современного состояния вопроса и используемых в работе математических моделей. В **подразделе 1.1** приведен обзор публикаций, посвященных исследованиям сейшевых, а в **подразделе 1.2** – сгонно-нагонных колебаний в Черном и Азовском морях. В **пункте 1.1.3** рассматриваются материалы по сейшам в Севастопольской и Карантинной бухтах. В **подразделе 1.3** описываются используемые в работе математические численные модели: конечно-элементная мо-

дель для задачи о собственных колебаниях жидкости в ограниченном бассейне (Манилюк и др., 1994), конечноразностная модель для расчета параметров сгонно-нагонных колебаний, вызываемых движущимися над морем циклонами (Коновалов и др., 1995, Еремеев и др., 1996), конечно-элементная модель ADCIRC (Luettich et al., 2004) для моделирования длинноволновых процессов в прибрежной зоне.

В **Разделе 2** в рамках линейной теории длинных волн без учета вращения Земли с использованием авторской численной модели (Манилюк и др., 1994) исследуются собственные колебания уровня в Черном и Азовском морях (сейши) и их возможный вклад в формирование волнового режима в прибрежных районах моря. Проводится сопоставление с данными натурных наблюдений и с результатами, полученными другими исследователями.

В **подразделе 2.2** рассматриваются собственные колебания уровня Черного моря. На Рисунке 1 представлены значения периодов старших мод сейшевых колебаний Черного моря. Как видно из этого рисунка, значения собственных периодов моря, рассчитанные на основе разработанной модели, хорошо согласуются с данными натурных наблюдений, что свидетельствует об ее работоспособности. Также в этом разделе представлена пространственная структура колебаний уровня для первых восьми собственных мод Черного моря, проведен ее анализ и сделано сопоставление результатов расчетов с результатами других авторов. Установлено, что собственные колебания уровня моря имеют преимущественно продольную структуру.

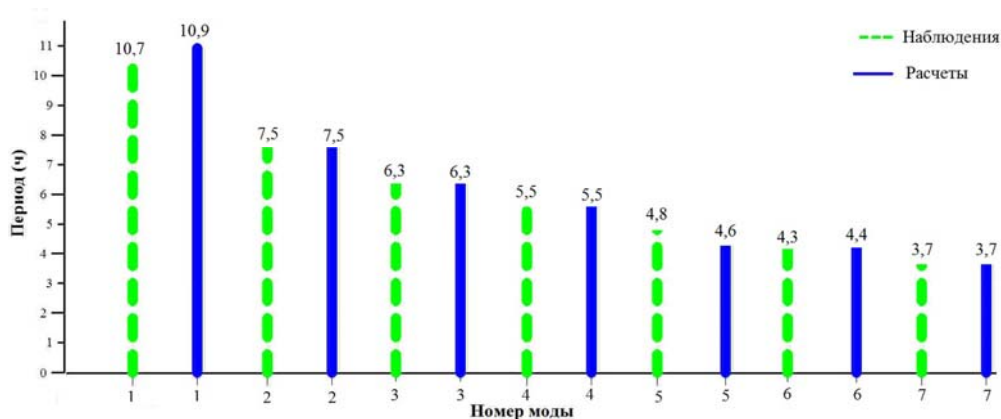


Рисунок 1— Значения периодов сейш Черного моря, полученные на основе численного моделирования, выполненного в настоящей работе, и натурных наблюдений (Герман, 1970; Фомичева, 1975; Медведев и др., 2016)

В **пункте 2.2.2** исследуется вклад отдельных мод собственных колебаний в формирование волновой картины в прибрежных пунктах Черного моря. Относительные амплитуды первых восьми мод собственных колебаний (в процентах от максимума отклонения свободной поверхности $\zeta_{\max}$) для основных населенных пунктов, расположенных по всему периметру побережья моря, приведены в Таблице 1. Как видно из этой таблицы, сейшевые колебания наиболее выражены в северо-западной мелководной части моря, где максимальные амплитуды сейш более чем на порядок превосходят соответствующие максимумы в других районах моря. Отметим такие пункты, как Одесса, Вилково, в которых с высокой интенсивностью проявляются практически все рассмотренные в настоящей работе моды сейш. Побережье Крыма мало подвержено воздействию сейшевых колебаний. Лишь мода с периодом 3,3 часа имеет достаточно высокую интенсивность на всей протяженности западной

части побережья. В Евпатории амплитуда этой волны достигает 25% от $\zeta_{\max}$, в Севастополе – 20%.

Таблица 1 – Относительные амплитуды сейш Черного моря в процентах от максимума для моря в целом (Иванов и др., 1996).

Пункт	Номер моды							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Варна	3,5	0,5	12	19	10	5	2,5	13,5
Констанца	3,5	0,5	13	21	11	5,5	2,5	18
Вилково	25,5	14,5	78	62	90	2,5	74,5	2,5
Одесса	80	26,5	26	16,5	9,5	45,5	87,5	2
Евпатория	4	3	7	8	9,5	6	4,5	23,5
Севастополь	2,5	2,5	3,5	6	5	0	0,5	20
Новороссийск	5,5	0,5	10	7	2	0,5	0	1
Сочи	6	0,5	13,5	11	4	1	0,5	1
Сухуми	6,5	0,5	16	11	6	1	1	2,5
Батуми	6	0,5	15	12,5	5	1	0,5	1
Трабзон	6,5	0,5	15,5	13,5	6	1	1	2,5
Зонгулдак	3,5	0	9,5	15	7,5	3,5	2	6

Подраздел 2.3 посвящен исследованию собственных колебаний уровня Азовского моря. Рассчитанные по численной модели значения периодов и пространственная структура собственных колебаний уровня приведены в **пункте 2.3.1**. Получены следующие значения собственных периодов моря: 27,9; 16,3; 12,5; 10,9; 8,7; 7,4; 6,5; 6,1; 5,9; 5,5 ч. На Рисунке 2 проведено сопоставление значений периодов старших мод сейшевых колебаний, рассчитанных с помощью математической модели, со значениями, установленными на основе данных натуральных наблюдений.

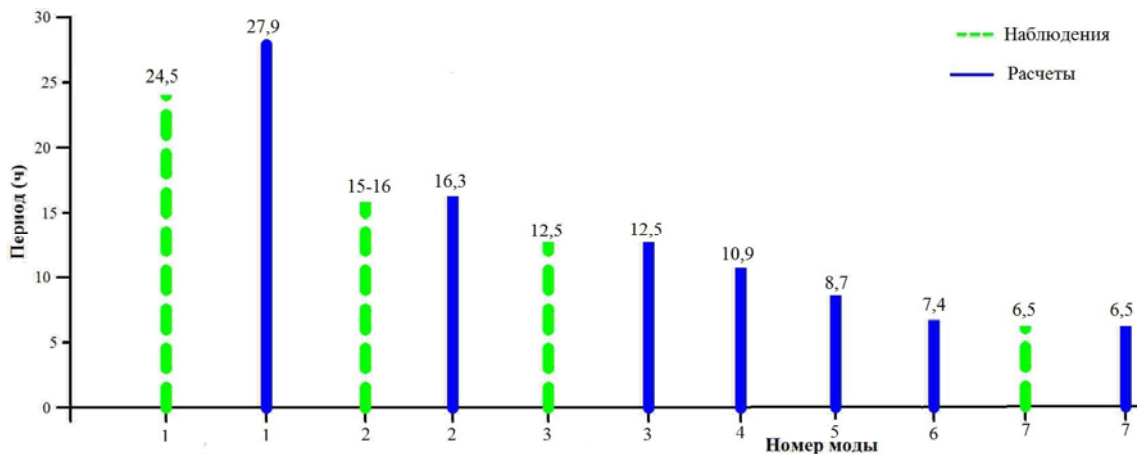


Рисунок 2 – Периоды сейш Азовского моря, полученные на основе численного моделирования, выполненного в настоящей работе, и натуральных наблюдений (Курчатов, 1925; Герман, 1970; Волкова, 1978)

Как видно из этого рисунка, значения периодов собственных колебаний Азовского моря, рассчитанные по разработанной в **пункте 1.3.2.** математической модели, хорошо согласуются с данными натурных наблюдений. Но есть и расхождения. В результате наблюдений пока не выявлены периоды со значениями 10,9; 8,7; 7,4 ч, что, видимо, связано с отсутствием данных соответствующих наблюдений. Установленный в настоящей работе период первой моды сейш составляет 27,9 ч. Из-за влияния вращения Земли он несколько превышает значения, полученные на основе анализа данных наблюдений. В работе проведена корректировка значения данного периода с помощью результатов, полученных в (Rao, 1965) для прямоугольного бассейна, где соотношение длины к ширине составляет 2×1 . Откорректированное за счет учета вращения Земли значение периода первой собственной моды Азовского моря равно 25 ч, что хорошо согласуется с данными натурных наблюдений (Курча-тов, 1925; Герман, 1970). Вращение Земли также будет оказывать влияние на пространственную структуру данной моды и сейши в классическом смысле со стационарной узловой линией не будет. Вместо нее будет иметь место амфидромическая система с вращением против часовой стрелки. Также в этом пункте приводится детальный анализ пространственной структуры первых шести собственных мод Азовского моря и сопоставление результатов расчетов с данными натурных наблюдений. В **пункте 2.3.2** получены оценки вклада отдельных мод собственных колебаний в формирование волновой картины в прибрежных пунктах Азовского моря. Проведенный анализ показал, что наибольшему воздействию сейш подвергаются пункты, расположенные в Таганрогском заливе: Таганрог, Мариуполь, Ейск. Для Таганрога характерно осязаемое проявление практически всех рассмотренных в настоящей работе мод сейшевых колебаний. Это связано с тем, что он расположен в северо-восточной оконечности Таганрогского залива, где интенсивность сейшевых колебаний для большинства мод максимальная.

В **Разделе 3** рассматриваются сгонно-нагонные колебания в Черном и Азовском морях, вызываемые прохождением над ними типичных для данного региона циклонов. Установлены зависимости амплитуд колебаний уровня от параметров циклонов. Исследование проведено с помощью конечно-разностной модели (Коновалов и др., 1995, Еремеев и др., 1996), основанной на линеаризованной системе уравнений длинных волн с учетом вращения Земли, проинтегрированных по вертикали. Циклон аппроксимируется круговой областью пониженного давления, перемещающейся равномерно и прямолинейно с постоянной скоростью. Учитываются тангенциальные напряжения ветра и придонное трение.

Подраздел 3.2 посвящен моделированию сгонно-нагонных колебаний в Черном море. На Рисунке 3а показаны рассмотренные направления движения циклонов. Расчеты проведены с учетом реальной батиметрии на равномерной сетке размерностью 233×124 точек (шаг по пространственным переменным – 5 км), шаг по времени 4 мин. Во всех расчетах принималось, что радиус циклона R равен 300 км, перепад давления между центром и периферией (p_0) составляет 10 гПа, циклон перемещается со скоростью 10 м/с. Такие значения параметров часто отмечаются у реальных циклонов, проходящих над Черным морем. В **пункте 3.2.2** исследуется зависимость величин сгонно-нагонных колебаний в Черном море от направления смещения циклонов. Для пунктов Констанца, Вилково, Ильичевск, Одесса, Очаков, Хорлы, Черноморское, Евпатория, Севастополь, Ялта, Феодосия, расположенных на северо-

западном и Крымском побережьях моря, построены зависимости максимальных значений сгонов и нагонов для всех направлений перемещения циклонов, показанных на Рисунке 3а. Проведен подробный анализ зависимости амплитуд сгонно-нагонных колебаний от направления движения циклона. Установлено, что наибольшие нагоны в северо-западной части Черного моря вызываются циклонами, движущимися с юго-запада и юга, а наибольшие сгоны – приходящими с северо-запада и севера. Самые интенсивные сгонно-нагонные колебания уровня Черного моря возникают в пунктах, расположенных в мелководной северо-западной части моря: Хорлах, Одессе, Очакове (Рисунок 3 б). Прохождение циклонов даже средней интенсивности (перепад давления между центром и периферией 10 гПа) может вызывать в этих пунктах значительные, более 50 см и сгоны, и нагоны. Наименее подвержены влиянию штормовых нагонов такие пункты, как Ялта и Севастополь. Анализ результатов расчетов позволил выделить направления смещения циклонов, при которых нагон будет превышать сгон у всех рассмотренных пунктов побережья. Такими направлениями являются (Рисунок 3 а): 4 (с запада на восток) и 8 (с юго-запада на северо-восток).

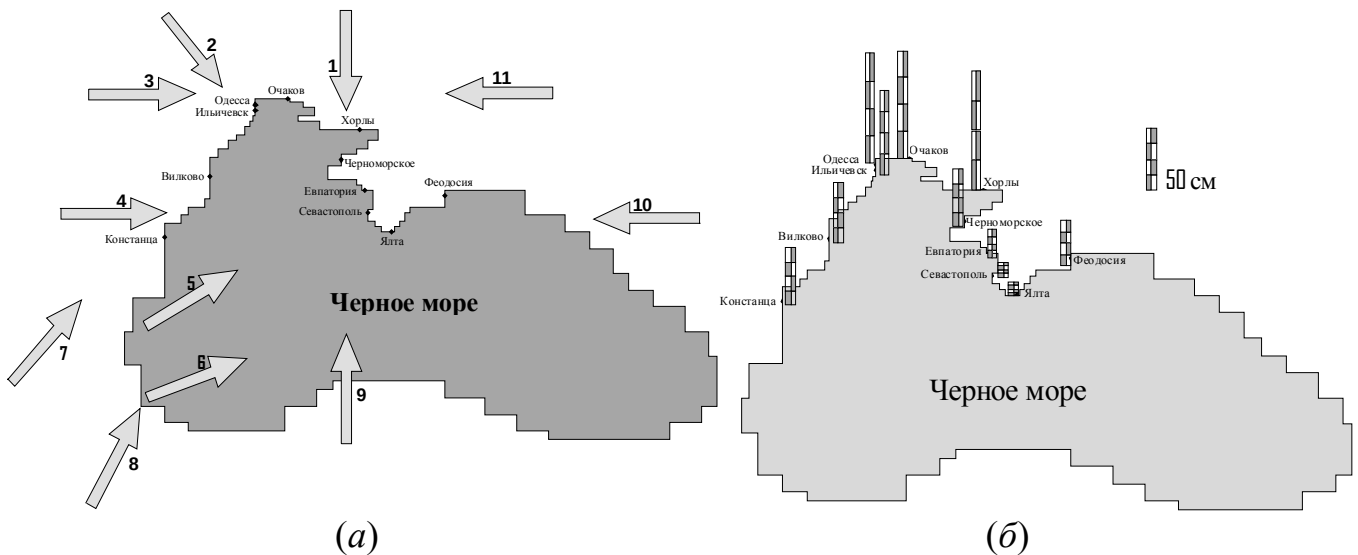


Рисунок 3 – Расчетная область численной модели и направления смещения циклонов – (а), максимумы отклонений уровня, вызываемых движущимися циклонами, в пунктах побережья Черного моря (по результатам численных экспериментов) – (б)

В пункте 3.2.3 на основе математического моделирования установлены характерные типы сгонно-нагонных колебаний в северной и северо-западной частях Черного моря. Показано, что в зависимости от географического положения конкретного пункта побережья, рельефа дна и береговой черты они могут существенно различаться. Выделены основные региональные виды сгонно-нагонных колебаний в зависимости от расположения пункта на побережье (Рисунок. 4).

Район Феодосии. Для него характерно значительное преобладание нагона над сгоном и быстрое затухание сгонно-нагонных колебаний. Это проиллюстрировано Рисунком 4 а, на котором показаны колебания уровня моря, вызванные прохождением циклона по направлению 1. Исключение составляет случай смещения циклона по направлению 3, когда сгон значительно превосходит нагон.

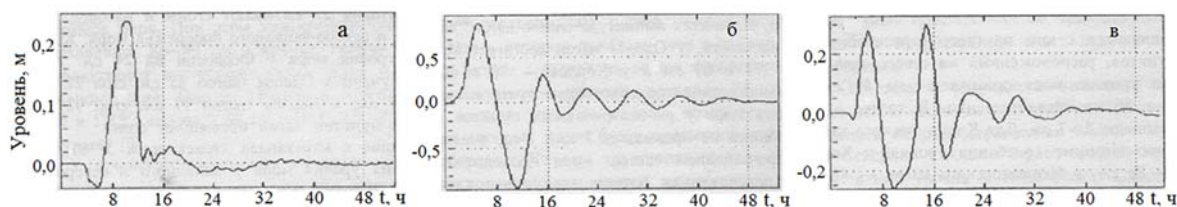


Рис. 4 – Рассчитанный ход уровня Черного моря при прохождении циклона у пунктов: (а)– Феодосия (направление 1), (б) – Хорлы (направление 1), (в) – Черноморское (направление 2)

Район Хорлов. Ход уровня моря здесь характеризуется обычно наличием хорошо выраженных сгонов и нагонов, имеющих близкие значения амплитуд, и медленным затуханием колебаний. Для примера на Рисунке 4 б показаны отклонения свободной поверхности моря при движении циклона по направлению 1.

Район Черноморского. Особенностью данного района является неоднократное повторение больших подъемов и спадов уровня за время прохождения циклона. При этом максимальные значения амплитуды колебаний могут наблюдаться в моменты времени, когда циклон заканчивает свое прохождение над морем. Это иллюстрирует Рисунок 4 в, на котором показаны изменения уровня у Черноморского при движении циклона по направлению 2.

Район Очакова. Для него характерны значительные вариации формы кривой хода уровня в зависимости от направления движения циклона. Так, при направлениях 1, 2 получается кривые с двумя хорошо выраженными сгонами и нагонами. Аналогичные колебания уровня моря имеют место у Хорлов (Рисунок 4 б). При прохождении циклона по направлению 8 генерируются колебания близкие по форме тем, которые имеют место у Черноморского, но затухающие медленнее. Если циклон смещается по направлению 9, то отмечается только нагон с последующим медленным затуханием колебаний.

Район Одессы. У Одессы изменения уровня в основном соответствуют наблюдавшимся у Хорлов: с хорошо выраженными сгоном и нагоном. Но если циклон смещается по направлению 9, то имеет место только сгон с последующим медленным затуханием колебаний.

Подраздел 3.3 посвящен исследованию сгонно-нагонных и сейшевых колебаний в Азовском море, вызванных прохождением циклонов. В пункте 3.3.2 исследуется влияние направления (Рисунок 5) и скорости смещения циклонов на амплитуды сгонно-нагонных колебаний уровня моря. Расчеты проведены на разностной сетке размерностью 55×40 точек (шаг по пространственным переменным 6,5 км), шаг по времени 4 мин. Во внутренних узлах сетки задавались реальные значения глубины моря. В граничных точках бассейна глубина принята равной 2 м. Во всех расчетах принималось, что радиус циклона r_c равен 600 км, перепад давления между центром и периферией (p_0) полагался равным 5; 10 гПа, а скорость перемещения циклонов – 5; 10; 15 м/с. Для анализа изменений уровня, вызываемых движущимися циклонами, выбраны пункты, расположенные по всему периметру побережья моря: Мысовое, Темрюк, Приморско-Ахтарск, Должанская, Ейск, Таганрог, Ново-Азовск, Мариуполь, Бердянск, Геническ (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Расчетная область численной модели и рассмотренные в работе направления смещения циклонов

В подпункте 3.3.2.2 показано, что амплитуда сгонно-нагонных колебаний уровня в Азовском море зависит от скорости смещения циклонов. В мелководных районах моря, где глубины составляют 2–3 м (Таганрог, Ново-Азовск, Ейск, Геничеськ) и скорость распространения свободных длинных волн c_w близка к 5 м/с, наибольшие величины сгонно-нагонных колебаний отмечаются при прохождении северного и северо-западного циклонов со скоростью 5 м/с. В более глубоководных районах (Бердянск, Приморско-Ахтарск, Должанская, Темрюк), где глубины составляют 7–9 м, а $c_w = 8–9,5$ м/с наибольшие колебания уровня отмечаются при скоростях движения источника возмущений 10–15 м/с. Таким образом, можно заключить, что возможны случаи, когда циклоны движутся над Азовским морем со скоростью близкой к c_w . Это создает условия для возникновения резонанса Праудмена и в результате может приводить к увеличению амплитуд генерируемых длинных волн, как это, например, показано в работе (Коновалов и др., 1995). Влияние резонанса Праудмена на величину сгонно-нагонных колебаний в Азовском море исследуется в (Иванов и др., 2019, Черкесов и др., 2017), где изучается влияние скорости движения барического атмосферного фронта в поле стационарного ветра восточного направления. Установлено, что резонанс Праудмена дает возрастание амплитуды сгонно-нагонных колебаний на величину около 15%. Таким образом, отношению скорости перемещения циклона к скорости распространения свободных длинных волн принадлежит важная, но не решающая роль при формировании значительных сгонно-нагонных колебаний уровня в Азовском море.

Наряду со скоростью смещения циклонов и глубиной моря, направление движения циклонов существенно влияет на амплитуду сгонно-нагонных колебаний, т.к. оно определяет направление преобладающих ветров. Наибольшую опасность для пунктов, расположенных в Таганрогском заливе, представляют северные и северо-западные циклоны. Так, при прохождении над морем северо-западных циклонов со скоростью 5 м/с в этих пунктах имеют место сильные сгоны и нагоны. Даже слабые циклоны, у которых $p_0 = 5$ гПа, вызывают в Таганроге сгон равный 66 см и нагон – 47 см. Если же циклон имеет среднюю глубину ($p_0 = 10$ гПа), то величина сгонно-нагонных колебаний становится еще внушительней. Так в Таганроге сгон составляет

160 см, а нагон – 110 см. Отсюда можно заключить, что северо-западные циклоны даже средней интенсивности, перемещающиеся со скоростью 5 м/с, представляют серьезную опасность для пунктов, расположенных в Таганрогском заливе, так как могут быть причиной катастрофических сгонов и нагонов. На северо-западном побережье моря (Геничеськ) все три рассмотренных типа циклонов вызывают большой сгон, особенно, если они перемещаются со скоростью 5–10 м/с. Сгонно-нагонные колебания наибольшей амплитуды вызываются северным циклоном и достигают 120 см – сгон, 110 см – нагон (когда $p_0 = 10$ гПа). Для северо-восточного побережья (Мариуполь) наиболее опасны северные циклоны со скоростями 5–15 м/с и северо-западные – со скоростями 5–10 м/с. При этом величины сгонов преобладают над величинами нагонов для всех рассмотренных направлений и скоростей движения циклонов. Наибольшее воздействие на динамику вод у восточного побережья (Приморско-Ахтарск) оказывают южные и северные циклоны, перемещающиеся со скоростями 10–15 м/с. При этом могут возникать сгонно-нагонные колебания с амплитудами более полуметра, если $p_0 = 10$ гПа. На южном побережье (Темрюк) наибольшие нагоны могут быть вызваны южными или северо-западными циклонами, а сгоны – южными или северными циклонами. При этом южные циклоны, перемещающиеся со скоростью 10–15 м/с, представляют наибольшую опасность для данного пункта. Они могут вызывать сгонно-нагонные колебания с амплитудой около одного метра, когда $p_0 = 10$ гПа. Наибольшее воздействие на северное побережье (Бердянск) оказывают южные и северо-западные циклоны, вызывающие интенсивные сгоны и нагоны, слабо зависящие от скорости движения циклона.

В подразделе 3.4 исследуются колебания уровня Азовского моря, имеющие место после прекращения действия на его поверхность циклонического образования (сейши). Установлено, что рассмотренные в работе типы циклонических возмущений приводят к возникновению сейшевых колебаний в Азовском море со следующими периодами: 27 ч, 16,3 ч, 14,5 ч., 7,2 ч. Причиной, приводящей к возникновению сейши с периодом, равным 27 ч, может служить прохождение над морем медленных циклонов (со скоростью 5 м/с) любого из рассмотренных в работе типов. Наиболее эффективными являются воздействия южного и северо-западного циклонов. Мода с периодом 27 ч имеет одну узловую линию и наиболее интенсивно в Таганроге. Из-за влияния вращения Земли узловая линия данной моды вращается против часовой стрелки. Сейши с периодами 14–16 ч отмечаются после прохождения над морем циклонов всех рассмотренных здесь типов, но интенсивность этих колебаний существенно зависит от скорости смещения циклонов. Колебания с данными периодами наиболее интенсивны при смещении южных циклонов со скоростями 10–15 м/с, а в случае северного циклона – для всего рассмотренного интервала изменения скоростей, для северо-западного циклона – лишь при скорости 10 м/с. Анализ расчетов показал, что перемещение над морем северо-западного циклона со скоростью 15 м/с приводит к возникновению сейши с периодом 7,2 ч. При этом в Мысовом, Темрюке, Бердянске главный максимум в энергетическом спектре отмечается на данном периоде. Также в результате прохождения над акваторией Азовского моря циклонов при определенных значениях параметров могут генерироваться одновременно несколько мод собственных колебаний, интерференция которых будет дополнительно усложнять картину явления.

В Разделе 4 рассматриваются сейшевые колебания уровня моря в системе связанных бухт, вызываемые различными типами возмущений. Для моделирования ис-

пользуется конечно-элементная модель *ADCIRC* (Luettich et al., 2004). **Подраздел 4.1** посвящен исследованию отклика двух смежных бухт на начальное возмущение, вызванное подвижкой дна моря. В **пункте 4.1.1** приводится описание численных экспериментов. Расчеты проводились для двух смежных бухт прямоугольной формы и постоянной глубины. Большая бухта (бухта *A*) имела характерные размеры и среднюю глубину Севастопольской бухты (длина 7 км, ширина 1 км, глубина 11,7 м), меньшая бухта (бухта *B*) – Карантинной бухты (длина 2,4 км, ширина 370 м, глубина 11,8 м). Область начального возмущения имела эллиптическую форму и была ориентирована параллельно берегу. Ее продольный размер не менялся и составлял 30 км. Ширина области возмущения варьировалась от 10 до 16 км. На твердых границах расчетной области ставилось условие непротекания. На жидкой границе задавалось условие свободного прохождения. Было выполнено четыре серии численных экспериментов. В первой серии расчетная область включала в себя обе бухты, во второй – только бухту *A*, в третьей – только бухту *B*, в четвертой – только область прибрежного шельфа без бухт. В каждой серии экспериментов ширина области составляла 10, 14 и 16 км. В **пункте 4.1.2** исследовалось влияние поперечных размеров области возмущения на параметры генерируемых в бухтах и прибрежной зоне сейш. Установлено, что в результате воздействия возмущения в прибрежной зоне генерируется два типа колебаний воды. Первый тип возникает в результате отражения набегающей волны от вертикальной стенки и имеет период 20 мин. Данная волна достаточно интенсивно проявляется в области открытого моря, а также в обеих бухтах. Второй тип колебаний представляет собой сейши, возникающие на собственных периодах бухт. Для Севастопольской бухты это моды с периодами: 45, 15; 9; 6,4 мин, а для Карантинной: 12 и 4 мин. Указанные значения периодов хорошо согласуются с аналитическими оценками, полученными для прямоугольного бассейна постоянной глубины. Установлено, что с ростом ширины области возмущения увеличивается количество генерируемых в бухтах мод сейш. Увеличение происходит за счет генерации высокочастотных мод. Так при расширении области возмущения от 10 до 16 км в Севастопольской бухте дополнительно генерируется мода с периодом 6,4 мин, а в Карантинной – 4 мин. Кроме этого в Севастопольской бухте увеличение ширины области возмущения приводит к интенсификации моды Гельмгольца с периодом 45 мин. В то же время в Карантинной бухте мода Гельмгольца ослабевает, и в ней начинают преобладать шельфовая сейша с периодом 20 мин и собственная мода бухты с периодом 4 мин. Установлено, что возмущение с шириной 12 км представляет потенциальную опасность для Карантинной бухты, т.к. генерирует волну с периодом, равным 11,66 мин, совпадающим с собственным периодом бухты. Это приводит к резонансному усилению амплитуды набегающей волны в 2,5 раза. При этом интенсивные колебания медленно затухают и экстремальные амплитуды повторяются многократно (Рисунок 6).

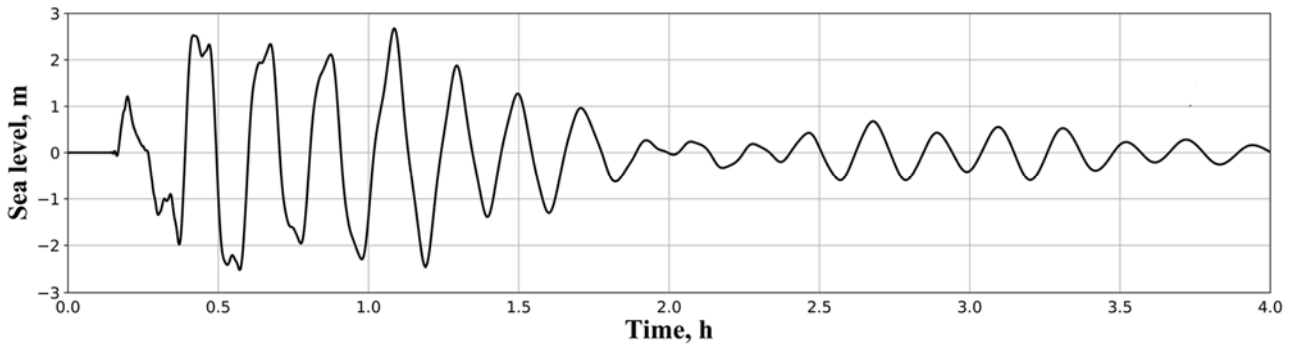


Рисунок 6 – Модельная мареограмма уровня моря в вершине Карантинной бухты (ширина области возмущения 12 км, период волны $\tau = 1,66$ мин)

Подраздел 4.2 посвящен исследованию сейшевых колебаний в системе сева-стопольских бухт (Рисунок 7).

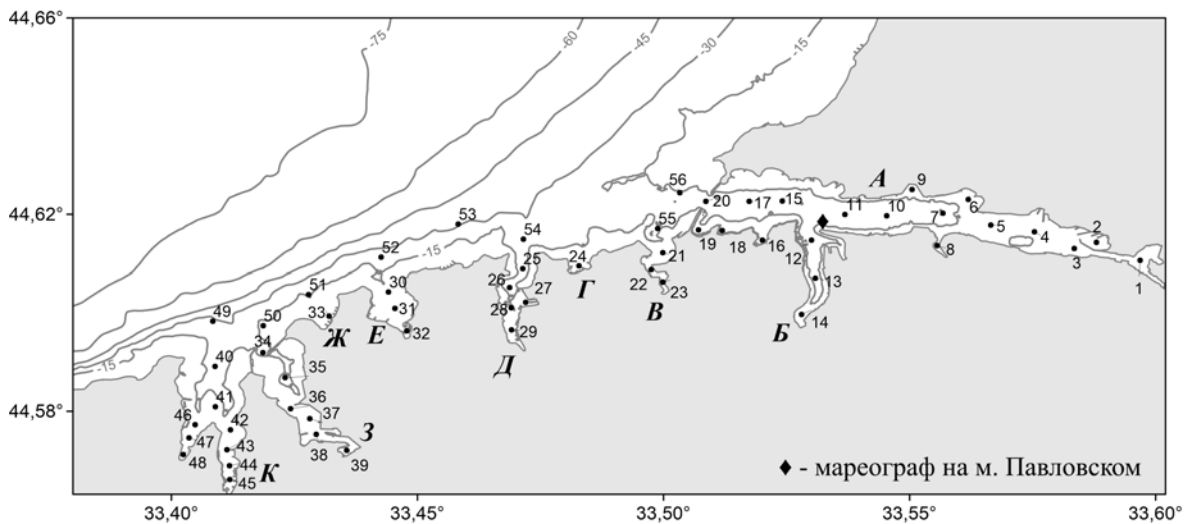


Рисунок 7 – Конфигурация и рельеф дна системы севастопольских бухт: А – Севастопольская бухта; Б – Южная бухта; В – Карантинная бухта; Г – Песочная бухта; Д – Стрелецкая бухта; Е – Круглая бухта; Ж – бухта Абрамова; З – Камышовая бухта; К – Казачья бухта. Серые линии – изобаты (м). Цифрами отмечены точки, в которых выводились результаты численного моделирования

В **пункте 4.2.1** получены оценки периодов собственных колебаний уровня севастопольских бухт с помощью аналитических моделей для прямоугольных бассейнов постоянной глубины и с параболическим профилем дна. Данные значения периодов используются при сравнительном анализе результатов моделирования для бухт с реальными батиметрией и береговой чертой. В **пункте 4.2.2** приводятся параметры численной модели *ADCIRC* и описание численных экспериментов. Численное моделирование проводилось для трех интервалов периодов возмущений: $\Delta T_1 = 30\text{--}52$ мин, $\Delta T_2 = 8\text{--}30$ мин, $\Delta T_3 = 1\text{--}15$ мин, перекрывающих диапазон собственных периодов Севастопольских бухт и содержащих высокочастотные моды сейш Черного моря, возмущения, вызванные перемещением циклонов над акваторией моря, волны цунами, инфрагравитационные волны и возмущения, вызванные колебаниями атмосферного давления.

Расчеты выполнялись в два этапа. На первом этапе использовались нулевые начальные условия. При $t > 0$ на открытой границе расчетной области задавались возмущения вида:

$$\eta = \frac{a_0}{N} \sum_{n=1}^N \sin(\omega_n t), \quad (1)$$

где $a_0 = 10$ см – амплитуда колебаний; N – количество гармоник в ряде; n – номер гармоники; $\omega_n = 2\pi/T_n$ – частота колебаний; T_n – период колебаний; количество гармоник N определяется шагом дискретности по времени между соседними периодами (в расчетах использовался шаг $t_d = 10$ с), а также значениями минимального и максимального периодов возмущений. $N = (T_{\max} - T_{\min})/t_d + 1$. Расчеты продолжались на протяжении 3 ч модельного времени. На втором этапе граничное условие (1) заменялось условием свободного прохождения (Шевченко и др., 2010). В качестве начальных данных задавались поля U , V и η при $t = 3$ ч. Длительность второго этапа расчетов составляла 4 ч модельного времени. В пункте 4.2.3 проводится анализ результатов численного моделирования и установлены периоды сейшевых колебаний, вызываемых возмущениями с периодами в интервале 1–52 мин во всех крупных бухтах, входящих в систему севастопольских бухт (Рисунок 7). Установлено, что модовый состав сейшевых колебаний, генерируемых в севастопольских бухтах, существенно зависит от периодов возмущений. В низкочастотном ($\Delta T_1 = 30$ –52 мин) и среднечастотном ($\Delta T_2 = 8$ –30 мин) диапазонах периодов возмущений в Севастопольской и Южной бухтах доминирует колебание с периодом 48 мин, соответствующее моде Гельмгольца Севастопольской бухты. При этом данная мода сейш выделяется во всех рассмотренных здесь севастопольских бухтах, и является одной из наиболее энергонесущих. Во всех вытянутых (длина превышает ширину) бухтах системы также генерируются их собственные моды Гельмгольца: Карантинная бухта – период 11,4 мин; Камышовая – около 21 мин; Казачья – около 22 мин. В высокочастотном диапазоне периодов возмущений ($\Delta T_3 = 8$ –15 мин) спектр генерируемых сейш расширяется, и в энергию колебаний начинают вносить заметный вклад вторые и третьи моды собственных колебаний бухт. Важной особенностью системы севастопольских бухт является то, что во многих бухтах системы проявляются собственные моды соседних с ними бухт. Например, мода Гельмгольца Карантинной бухты (период 11,4 мин) присутствует в спектре колебаний Севастопольской, Стрелецкой и даже Казачьей бухт. Собственная мода Севастопольской бухты с периодом около 6,5 мин проявляется в Карантинной бухте, а мода Карантинной бухты с периодом около 4 мин – в Севастопольской.

В пункте 4.2.4 рассмотрены особенности сейшевых колебаний в связанных бухтах (на примере Севастопольской и Карантинной бухт). Параметры модели и методика численных экспериментов описаны в пункте 4.2.2. Численное моделирование проводилось для интервалов периодов возмущений, лежащих в диапазоне 1–52 мин.

Севастопольская бухта. На Рисунке 8 представлены мареограммы и энергетические спектры для вершины Севастопольской бухты. Как видно из этого рисунка, колебания уровня, генерируемые в бухте на интервале ΔT_1 , имеют наибольшую энергию и медленнее затухают. В этих колебаниях четко прослеживается период 48

мин, соответствующий моде Гельмгольца Севастопольской бухты. Высокочастотные моды не генерируются. На интервале ΔT_2 (Рисунки 8 в, г) энергия генерируемых в Севастопольской бухте колебаний на порядок меньше, чем на интервале ΔT_1 . В бухте доминирует мода Гельмгольца (период 48 мин), на которую накладываются быстро затухающие (в течение 1,5 ч (Рисунок 8 в)) высокочастотные моды. Среди них наиболее интенсивны собственные моды с периодами: 16; 22 мин. Также по всей акватории Севастопольской бухты регистрируется колебание с периодом 11,4 мин, соответствующее моде Гельмгольца Карантинной бухты. На интервале ΔT_3 (Рисунки 8 д, е) максимальная энергия генерируемых в Севастопольской бухте колебаний в 5–10 раз меньше, чем на интервале ΔT_2 . Колебания достаточно быстро затухают и имеют характер биений.

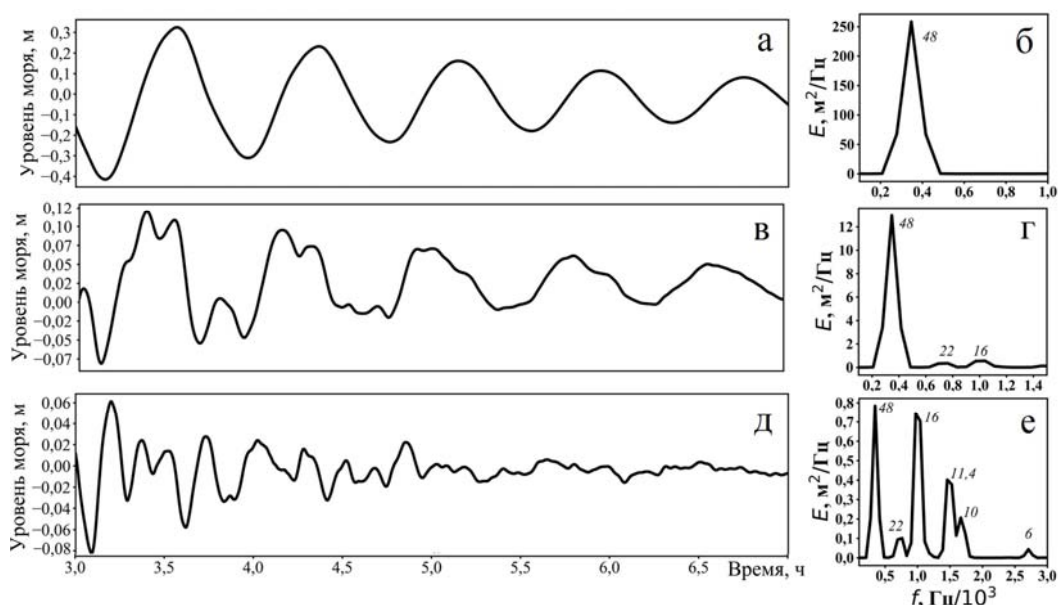


Рисунок 8 – Модельные мареограммы и энергетические спектры для вершины Севастопольской бухты. Показаны периоды (в минутах) для основных пиков.

(а), (б) – интервал ΔT_1 ; (в), (г) – интервал ΔT_2 ; (д), (е) – интервал ΔT_3

Мода с периодом 16 мин преобладает практически по всей акватории бухты. Также выделяются (Рисунок 8 е) другие моды с периодами: 48; 22; 10 и 6 мин, являющиеся собственными модами Севастопольской бухты. Наибольшую энергию из них имеют колебания с периодами 48 мин и 6 мин. Кроме собственных мод Севастопольской бухты в ней также хорошо прослеживается мода Гельмгольца Карантинной бухты с периодом 11,4 мин. В вершине Севастопольской бухты энергия этой моды составляет 64% от максимума. Сравнительный анализ результатов моделирования показывает, что наибольшие амплитуды колебаний уровня соответствуют интервалу ΔT_1 , а наименьшие – интервалу ΔT_3 . При этом максимальные размахи колебаний уровня отличаются более чем в 2 раза. Главной особенностью Севастопольской бухты является то, что для всех рассмотренных периодов возмущений в ней генерируется мода Гельмгольца. Она преобладает над остальными модами в интервалах ΔT_1 и ΔT_2 . Это можно объяснить тем, что Севастопольская бухта достаточно узкая и длинная и имеет зауженный вход.

Карантинная бухта. На Рисунке 9 приведены модельные мареограммы и энергетические спектры для вершины Карантинной бухты для интервалов ΔT_1 , ΔT_2 ,

ΔT_3 , Анализ мареограмм показывает, что на интервале ΔT_1 колебания носят периодический характер, а на интервалах ΔT_2 , ΔT_3 – характер биений. Наибольшие размахи изменений уровня близки друг к другу на всех рассмотренных интервалах периодов возмущений и составляют в вершине бухты 10–12 см. Сейши долго не затухают: колебания происходят более 6 часов. На интервале ΔT_1 – доминирует колебание с периодом 48 мин, соответствующее моде Гельмгольца Севастопольской бухты. Также выделяются два локальных максимума на периодах 11,4 мин (мода Гельмгольца Карантинной бухты) и 16 мин (собственная мода Севастопольской бухты). Если период возмущений лежит в интервале ΔT_2 , то на всей акватории бухты наиболее выражена мода с периодом 11,4 мин. Данная мода преобладает над всеми остальными модами по всей акватории бухты, за исключением области, примыкающей ко входу в бухту, где доминирует мода Гельмгольца Севастопольской бухты. Кроме указанных мод в Карантинной бухте также выделяются моды с периодами: 22; 16; 10; 6 мин (Рисунок 9 г), соответствующие собственным модам Севастопольской бухты.

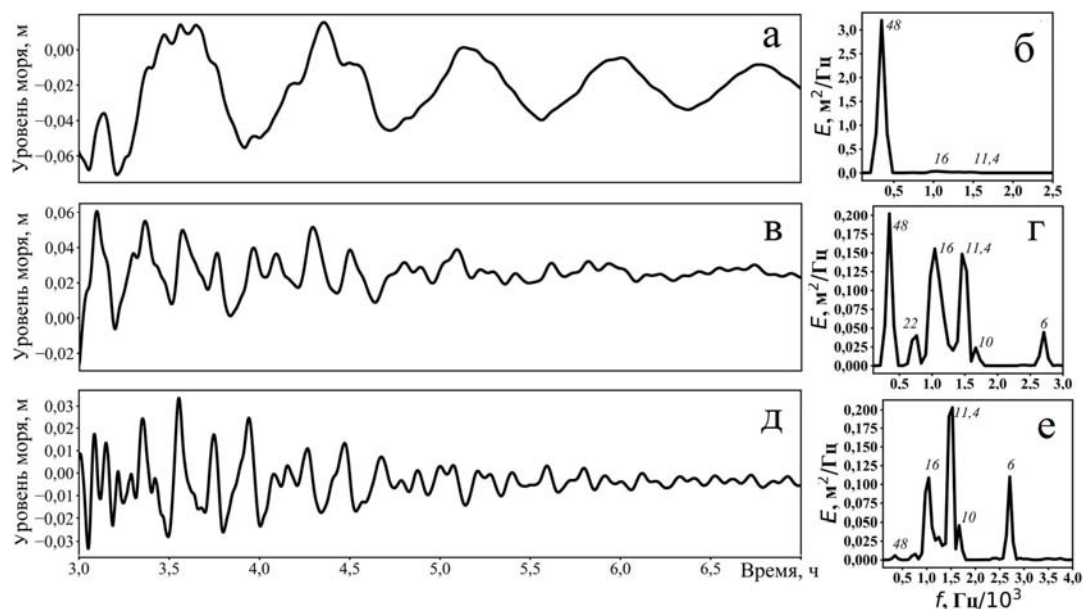


Рисунок 9 – Модельные мареограммы и энергетические спектры для вершины Карантинной бухты. Показаны периоды (в минутах) для основных пиков. (а), (б) – интервал ΔT_1 ; (в), (г) – интервал ΔT_2 ; (д), (е) – интервал ΔT_3

Особенностью интервала ΔT_3 является то, что на нем в бухте доминирует мода Гельмгольца Карантинной бухты с периодом 11,4 мин. Также в области, примыкающей к вершине бухты, выделяется пик на периоде 4,8 мин, соответствующем первой собственной моде Карантинной бухты. Кроме указанных мод в Карантинной бухте имеют место колебания с периодами: 48; 16; 10; 6 мин, которые являются собственными модами Севастопольской бухты. Следует отметить, что эффект проявления в бухтах собственных мод колебаний соседних бухт известен. Например, в бухте Сьютаделья (*Ciutadella*), расположенной на о. Менорка (Балеарские острова), наблюдается достаточно интенсивная мода Гельмгольца соседней бухты Платха Гран (*Platja Gran*) с периодом 5,5 мин (*Rabinovich*, 2009). А в бухте Платха Гран выделяется мода Гельмгольца бухты Сьютаделья (период 10,5 мин). В работе предложен следующий механизм генерации сейш в системе смежных бухт. Данную систему

можно интерпретировать как систему связанных линейных осцилляторов. Связь между осцилляторами осуществляется через входы в бухты за счет воды их соединяющей. Связь не приводит к появлению новых собственных частот в системе, а лишь незначительно сдвигает их значения. Каждой смещенной собственной частоте будет соответствовать собственная функция, общая для всех входящих в систему осцилляторов. Таким образом, колебания, возбуждающиеся на собственной частоте одной бухты за счет связи очень быстро передаются в соседнюю. Данный вид колебаний в литературе принято называть «чужими» (Liu et al., 2003) для бухты, для которой они не являются собственными. Как показывают результаты настоящей работы, такие «чужие» колебания могут быть достаточно интенсивными. В частности, мода Гельмгольца Севастопольской бухты с большой интенсивностью проявляется в Карантинной бухте, а мода Гельмгольца Карантинной бухты – в Севастопольской бухте.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

В настоящей работе с помощью различных типов численных математических моделей проведено исследование в Азовском и Черном морях сгонно-нагонных колебаний, вызываемых прохождением типичных для данного региона циклонов, а также сейш в широких временных и пространственных масштабах. Для верификации результатов численного моделирования использованы данные натурных наблюдений.

Основными результатами работы являются следующие.

1. Разработана авторская версия двумерной численной гидродинамической математической модели для задачи о собственных колебаниях жидкости в ограниченном бассейне с произвольным профилем береговой черты и батиметрией. Модель может быть использована для расчета параметров сейшевых колебаний во внутренних морях, что основывается на хорошем согласии результатов расчетов с данными натурных наблюдений для Черного и Азовского морей

2. С помощью разработанной численной модели рассчитаны периоды собственных колебаний бассейна Черного моря: 10,9; 7,5; 6,3; 5,5; 4,6; 4,4; 3,7; 3,3; 3,1, 2,9 ч и соответствующие им собственные функции, определяющие пространственную структуру собственных колебаний уровня моря. Установлено, что собственные колебания наиболее интенсивны в пунктах, расположенных на северо-западном побережье моря: Вилково, Одессе, Южном и в Каркинитском заливе. По результатам анализа данных натурных наблюдений и численного моделирования можно считать доказанным существование в Черном море сейшевых колебаний со следующими значениями периодов: 10,7; 7,5; 6,3; 5,5; 4,6; 3,7; 3,3; 3,1 ч.

3. Впервые с учетом реальной батиметрии и профиля береговой черты проведен расчет периодов собственных колебаний бассейна Азовского моря: 27,9; 16,3; 12,5; 10,9; 8,7; 8,2; 7,4; 6,5; 6,1; 5,9; 5,5 ч и соответствующих им собственных функций. Установлено, что в Азовском море наибольшему воздействию сейш подвергаются пункты, расположенные в Таганрогском заливе: Таганрог, Мариуполь, Ейск. На основе анализа результатов математического моделирования и данных натурных наблюдений можно считать доказанным существование в Азовском море сейшевых колебаний со следующими периодами: 24,5–27; 15–16; 12,5; 10,9; 8,7; 6–7 ч.

4. Впервые проведено комплексное исследование сгонно-нагонных колебаний уровня в Черном море, вызываемых прохождением всех типов циклонов средней интенсивности (перепад давления между центром и периферией 10 гПа), характерных

для данного региона. Особое внимание уделено анализу колебаний уровня в пунктах, расположенных на северо-западном и крымском побережьях моря. Анализ результатов численных экспериментов показал, что прохождение циклонов даже средней интенсивности (перепад давления между центром и периферией 10 гПа) может вызывать у пунктов северо-западного побережья значительные, более 50 см сгоны и нагоны. Наибольшей амплитуды сгонно-нагонные колебания уровня моря достигают в Хорлах (91 см – нагон, 95 см – сгон), Очакове (69 см – нагон, 86 – сгон), Одессе (82 см – нагон, 66 см – сгон). Наименее подвержены влиянию штормовых нагонов пункты, расположенные на крымском побережье: Ялта (максимальный нагон составляет 11 см, максимальный сгон – 5 см) и Севастополь (14 и 6 см соответственно). В подавляющем большинстве рассмотренных пунктов нагон превышает сгон. При перемещении циклонов с юга на север у северо-западного побережья моря наблюдаются максимальные сгоны, а у крымского побережья – максимальные нагоны. Выделены основные типы региональных сгонно-нагонных колебаний для северо-западной части моря и побережья Крыма.

5. Для пунктов, расположенных по всей протяженности побережья Азовского моря, определены направления и скорости перемещения над морем атмосферных циклонов, приводящие к наиболее интенсивным сейшевым и сгонно-нагонным колебаниям уровня. Причиной наибольших сгонно-нагонных колебаний для северо-западного побережья (Геничеськ) являются все рассмотренные в настоящей работе типы циклонов (южные, северные, северо-западные), перемещающиеся со скоростями 5–10 м/с. Для северного побережья (Бердянск) – южные и северо-западные циклоны со скоростями 10–15 м/с; для северо-восточного побережья (Мариуполь) – северные со скоростями 5–15 м/с и северо-западные со скоростями 5–10 м/с; для восточного побережья (Приморско-Ахтарск) – южные и северные циклоны со скоростями 10–15 м/с; для южного побережья (Темрюк) – южные со скоростями 10–15 м/с; для юго-западного побережья (Мысовое) – северные и северо-западные циклоны со скоростями 5–15 м/с. Для Таганрогского залива (Таганрог) наибольшую опасность представляют медленные (смещаются со скоростью 5 м/с) северные и северо-западные циклоны. Установлено, что сейша с околосуточным периодом возникает после перемещения над морем медленных (скорость 5 м/с) южных и северо-западных циклонов. Сейшевые колебания с периодами 14–16 ч наиболее интенсивны, когда над морем прошел южный циклон со скоростью 10–15 м/с, северный циклон – со скоростью 5–15 м/с или северо-западный циклон – со скоростью 10 м/с. Мода с периодом 7,2 ч генерируется в результате воздействия быстрых (скорость 15 м/с) северо-западных циклонов.

6. Впервые проведено математическое моделирование сейшевых колебаний уровня моря в системе севастопольских бухт, вызываемых различными типами возмущений. Выделены резонансные периоды бухт системы. Установлено, что начальные возмущения уровня моря, порождаемые подвижками дна с характерными для Черного моря размерами, могут быть причиной катастрофических сейш в Карантинной бухте, когда их период близок к периоду моды Гельмгольца данной бухты. На примере Севастопольской и Карантинной бухт проведено исследование генерации сейшевых колебаний и взаимодействия связанных бухт. Установлено, что возмущениями, приходящими из открытого моря, в бухтах генерируются следующие собственные наиболее энергонесущие моды: в Севастопольской бухте с периодами 48; 22; 16; 10; 6 мин, а в Карантинной бухте – 11,4; 4,8 мин. Количество генерируе-

мых мод сейш определяется периодом возмущений. Связь через входы в бухты за счет объема воды, их соединяющей, приводит к расширению модового состава сейш в смежных бухтах. При этом интенсивность собственных мод Севастопольской бухты (в частности, с периодами 48; 10 мин), проникающих в Карантинную бухту, может превосходить интенсивность собственных мод Карантинной бухты. Сейши с наибольшими амплитудами в обеих бухтах вызываются возмущениями, периоды которых лежат в интервале от 30–52 мин.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. **Manilyuk Yu.V.**, Lazorenko D.I., Fomin V.V. Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays // Physical oceanography, [e-journal]. – 2020. – Vol.27, Iss.3. – P.242–256. – doi:10.22449/1573-160X-2020-3-242-256.

2. **Manilyuk Yu.V.**, Lazorenko D.I., Fomin V.V. Resonance Oscillations in the System of Adjacent Bays // Physical oceanography, [e-journal]. – 2019. – Vol. 26, Iss. 5. – P. 374–386. – doi:10.22449/1573-160X-2019-5-374-386.

3. **Манилюк Ю.В.**, Санников В.Ф. Исследование сейшевых колебаний в бухте переменной глубины // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2019. – Вып. 2. – С. 4–12. – doi: 10.22449/2413-5577-2019-2-4-12.

4. **Манилюк Ю.В.** Сейши и тягун в Севастопольской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2018. – Вып. 3. – С. 4–12. – doi: 10.22449/2413-5577-2018-3-4-12.

5. Ivanov V.A., **Manilyuk Y.V.**, Sannikov V.F. Seiches in a basin with an open entrance // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018. – Vol.59, Iss.4. – P. 594–600. – doi: 10.1134/S0021894418040041.

6. **Manilyuk Yu.V.**, Cherkesov L.V. Investigation of Seiche Oscillations in a Free Entrance Bay // Physical oceanography, [e-journal]. – 2017. – Iss. 4. –P. 16–25. – doi: 10.22449/1573-160X-2017-4-16-25.

7. **Manilyuk Yu.V.**, Cherkesov L.V. Investigation of Free Liquid Oscillations in a Bounded Basin Representing an Approximate Model of the Sea of Azov // Physical oceanography, [e-journal]. – 2016. – Iss. 2. – P. 14–23. – doi: 10.22449/1573-160X-2016-2-14-23.

8. Ereemeev V.N., Konovalov A.V., **Manilyuk Yu.V.**, Cherkesov L.V. Modeling of long waves in the Sea of Azov generated by cyclone propagation // Oceanology. – 2000. – Vol. 40, Iss. 5. – P. 616–623.

9. Коновалов А.В., **Манилюк Ю.В.**, Черкесов Л.В. Моделирование сгонно-нагонных колебаний в Азовском море // Доповіді Національної Академії Наук України. – 1999. – № 12. – С. 118–124.

10. Иванов В.А., Коновалов А.В., **Манилюк Ю.В.**, Черкесов Л.В. Исследование сгонно-нагонных колебаний в Черном море // Доповіді Національної Академії Наук України. – 1999. – № 5. – С. 137–141.

11. Ivanov V.A., Konovalov A.V., **Manilyuk Yu.V.**, Cherkesov L.V. Mathematical modeling of storm surges in the Black Sea // Russian Meteorology and Hydrology. – 1999. – Iss. 11. – P. 33–39.
12. **Manilyuk Yu.V.**, Cherkesov L.V. The influence of the gulf's geometry on seiche oscillations in an enclosed basin // Physical Oceanography. – 1997. – Vol. 8, Iss. 4. – P. 217–227.
13. Ivanov V.A., **Manilyuk Yu.V.**, Cherkesov L.V. Seiches in the Black Sea // Russian Meteorology and Hydrology. – 1996. – Vol. 1, Iss. 11. – P. 45–50.
14. **Manilyuk Yu.V.**, Cherkesov L.V. Simulation of seiche oscillations in the Sea of Azov, using the finite element technique // Physical Oceanography. – 1995. – Vol. 6, Iss. 5. – P. 325–329.
15. Ivanov V.A., **Manilyuk Yu.V.**, Cherkesov L.V. The Sea Of Azov Seiches // Russian Meteorology and Hydrology. – 1994. – Iss. 6. – P. 53–57.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Манилюка Юрия Владимировича

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

Заказ № 453

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