

На правах рукописи



Долгушев Тимофей Владимирович

**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВЕННОГО  
РЕЖИМА АКВАТОРИИ НА УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОРТОВЫХ  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная  
гидрология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Кантаржи Измаил Григорьевич**

**Официальные  
оппоненты:** **Шахин Виктор Миронович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Общество с ограниченной ответственностью «Гидротехника», заместитель директора

**Чубаренко Борис Валентинович** – кандидат физико – математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им П.П. Ширшова Российской академии наук, Атлантическое отделение, лаборатория прибрежных систем, заведующий лабораторией

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»)

Защита состоится «16» апреля 2024 г. в 15:30 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ауд. № 9 «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Бестужева Александра  
Станиславовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Стратегия развития Арктической зоны РФ направлена на активное освоение этого региона и включает в себя строительство и развитие транспортной инфраструктуры Северного морского пути (СМП), связанной с запланированным ростом объёма морских грузоперевозок. Активная работа мирового научного сообщества в вопросе изучения наблюдаемых изменений в глобальной климатической системе (ГКС) Земли позволила получить достоверные данные о природе этого явления. Значительное развитие математического аппарата и компьютеризации науки позволило прогнозировать климат планеты с помощью численных моделей, верифицированных данными натурных измерений.

Данные наблюдений показывают, что Арктический регион является наиболее чувствительным к климатическим изменениям, а скорость роста приповерхностной температуры воздуха в этом регионе в 2.8 раза превышает среднепланетарный уровень. Климатические изменения затрагивают множество факторов, учитываемых при проектировании портовых гидротехнических сооружений (ПГТС). В настоящее время в теории и практике отечественного портового строительства присутствуют противоречия:

- В теории – между повышением интереса научной общественности к различным проявлениям изменений климата в Арктическом и Дальневосточном регионах и отсутствием системных научных исследований изменения условий работы ПГТС в этом регионе;

- В практике – между востребованностью эффективной и безопасной эксплуатации ПГТС и отсутствием научно-обоснованных методик учёта изменений климата при их проектировании.

В связи с климатическими изменениями прогнозируется, что ПГТС в течение своего жизненного цикла могут эксплуатироваться в условиях таких нагрузок, которые приведут к снижению надёжности и безопасности и повышению вероятности возникновения аварийной ситуации. Исследование влияния климатических изменений на ПГТС и разработка методик определения отметок верха морских ПГТС с учётом климатических изменений позволит повысить надёжность морской транспортной инфраструктуры РФ и является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиям изменчивости климатической системы Земли, Арктического региона, ветро-волнового и уровня режимов океана, взаимодействия системы сооружение-океан, а также устойчивости портовой инфраструктуры к сбоям в работе посвящены работы широкого круга авторов. К ним можно отнести работы Мохова И.И., Семенова С.М., Гулёва С.К., Котлякова В.М., Катцова В.М., Дианского Н.А., Школьника И.М., Добролюбова С.А., Архипкина В.С., Мысленкова С.А., Кантаржи И.Г., Кабатченко И.М., Абузярова З.К., Завьялова В.К., Чижиумова С.Д., Ефимова В.В., Пака А.П., Глаговского В.Б., Векслера А.Б., Климовича В.И., Oppenheimer M., Xiaolan L.

Wang, Austin Becker, Mercè Casas-Prat, Jasper Verschuur, Mark Hemer, Michael Simpson, Michael Winton, David F. Archer, Jentsje Wouter van der Meer, William Allsop, Tom Bruce и др.

Однако работы, отражающие влияние климатических изменений на инфраструктуру СМП, встречаются редко. Применение в диссертационном исследовании расчётов и физического моделирования ПГТС в совокупности с результатами математического моделирования регионального климата, полученными отечественными и иностранными климатологами, а также анализ нормативно – технической документации в области портового строительства в РФ призваны развить имеющиеся методики проектирования ПГТС с учётом климатических изменений.

**Объектом диссертационного исследования** являются условия эксплуатации морских портовых гидротехнических сооружений.

**Предметом диссертационного исследования** является влияние климатических изменений уровня режима акватории на условия эксплуатации морских портовых гидротехнических сооружений.

**Целью диссертационного исследования** является определение влияния прогнозных климатических изменений уровня режима акватории на условия эксплуатации ПГТС и разработка практических рекомендаций по учёту таких изменений при проектировании.

**Научная гипотеза диссертационного исследования** заключается в том, что определение параметров расчётной волны и отметок кордона, гребня и парапета при проектировании морских ПГТС с учётом прогнозируемых климатических изменений уровня режима акватории, а также учёт смещения границ волновых зон и качественного и количественного изменения нагрузки на сооружение, позволит повысить эксплуатационную надёжность и безопасность ПГТС.

**Задачи диссертационного исследования:**

1. Выполнить аналитический обзор морского портового строительства в РФ, рассмотреть классификации ПГТС и условия их эксплуатации;
2. Провести анализ современного состояния существующих методик расчёта отметок верха, отсчётных уровней и проектных глубин при проектировании ПГТС;
3. Провести анализ и количественную оценку данных климатического моделирования прогнозных изменений уровня режима акваторий портов в Арктическом и Дальневосточном регионах РФ для различных сценариев социально – экономического развития;
4. Разработать методику оценки относительного изменения параметров расчётной волны в мелководной зоне акватории с учётом климатических изменений уровня режима акватории;

5. Уточнить методику расчёта верхней отметки для морских ПГТС с учётом климатических изменений уровня режима акватории;
6. Разработать методику проведения физического моделирования ПГТС с целью определения удельных расходов переливов и заплесков при воздействии расчётных волн;
7. Выполнить физическое моделирование и расчёты волнового давления и удельных расходов перелива и заплеска для ПГТС в проектных условиях, и с учётом прогнозного повышения уровня режима акватории;
8. Определить границы использования разработанных методик и дать рекомендации по их применению в практике отечественного портового строительства;
9. Оценить влияние отсутствия учёта при проектировании прогнозных климатических изменений уровня режима акватории на вероятность аварии на морских ПГТС.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

- Выявлены факторы изменяющейся ГКС, оказывающие значимое воздействие на эксплуатацию объектов портовой инфраструктуры, описано их влияние и потенциальные последствия;
- Выполнена оценка климатических изменений уровня режима для портов в Арктическом и Дальневосточном регионах РФ;
- Показано влияние климатических изменений уровня режима на положение границ волновых зон и изменение параметров расчётного волнения в мелководной зоне акватории;
- Уточнены и апробированы методики определения отметок верха ПГТС с учётом климатических изменений в регионе строительства;
- Разработана и апробирована методика проведения физического моделирования морских ПГТС с целью определения удельных расходов заплесков и переливов от воздействия расчётного волнения;
- Выполненные расчёты и физические экспериментальные исследования, показали, что отсутствие учёта влияния климатических изменений уровня режима акватории ПГТС может привести к восприятию сооружением нагрузок, не учтённых в проекте, в результате чего снизится устойчивость сооружения на опрокидывание и сдвиг, а также вырастут нормальные контактные напряжения;
- Показано влияние отсутствия учёта при проектировании климатических изменений уровня режима акватории на увеличение вероятности возникновения аварии на морских ПГТС.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Выполнен анализ современных исследований в области климатического моделирования, прогнозных глобальных и региональных изменений климата, методик проектирования ПГТС, метеорологического и климатического обеспечения строительного проектирования, по результатам которого выявлены перспективы совершенствования имеющихся методик. Доказана связь прогнозных изменений климатической системы с эксплуатационными условиями ПГТС и значимость учёта этих изменений. Предложена уточнённая методика определения верхних отметок с учётом прогнозных климатических изменений, позволяющая добиться обеспечения требуемого уровня надёжности и безаварийности ПГТС на протяжении всего жизненного цикла. По результатам проведенных расчётов и физических экспериментов показана восприимчивость ПГТС к изменению уровня режима акватории. Доказано негативное влияние отсутствия учёта климатических изменений уровня режима акватории на вероятность аварии на морских ПГТС.

**Методология и методы исследования.** В диссертационной работе исследование условий эксплуатации ПГТС осуществляется на основе общенаучных подходов и принципов, благодаря которым обеспечивается рассмотрение ПГТС в совокупности их исторического развития как объектов, находящихся в сложной взаимосвязи с внешней средой и являющихся согласованным единением множества элементов и частей, из которых в исследовании рассматриваются только наиболее значимые.

Рассмотрение ПГТС и воздушно-водной среды как системы в их совокупности и развитии позволяет обеспечить реализацию междисциплинарного подхода к исследованию, в результате которого рассматривается влияние локальных проявлений изменения характеристик климатической системы (изучению которых посвящены науки о земле, в том числе климатология, метеорология, океанология и др.) на условия эксплуатации ПГТС (изучению которых посвящён раздел гидротехническое строительство технических наук). Конкретно-научный (отраслевой) уровень методологии исследования обеспечивают физическое моделирование на основе теории планирования эксперимента, моделирование волнового режима с помощью нормативной методики, а также вероятностный и сценарный подходы.

Благодаря описанным выше подходам, принципам и методикам обеспечивается получение достоверных результатов, согласованных между собой и с требованиями нормативно-технической документации.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Методика оценки относительного изменения расчётных параметров элементов волн в мелководной зоне акватории в условиях трансформации и рефракции при учёте климатических изменений уровня режима акватории;

2. Методика проведения физического моделирования (эксперимента) морского ПГТС типа вертикальная стенка в гидроволновом лотке с целью определения удельного расхода переливов и заплесков при воздействии расчётного волнения;

3. Результаты расчётов и физического моделирования, обосновывающие значимость влияния климатических изменений уровня режима акватории на эксплуатационные условия ПГТС;

4. Уточнение методики определения отметок верха морских ПГТС с учётом прогнозируемых климатических изменений уровня режима акватории;

5. Результаты расчётов, доказывающие увеличение вероятности аварии на ПГТС при проектировании сооружений без учёта прогнозных климатических изменений уровня режима акватории.

**Личный вклад соискателя** заключается в выполнении аналитического обзора глобальных и региональных климатических изменений; в оценке влияния наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений на условия эксплуатации ПГТС; разработке методики оценки изменения расчётных параметров элементов волн в мелководной зоне акватории при учёте климатических изменений уровня режима; постановке задачи, разработке методики, постановке и проведении физических экспериментальных исследований и расчётов; анализе результатов расчётов и физического моделирования; разработке методик по определению отметок верха ПГТС с учётом прогнозных климатических изменений; проведении расчётов вероятности аварии на ПГТС при отсутствии учёта прогнозных климатических изменений уровня режима акватории.

**Степень достоверности полученных результатов** диссертационной работы подтверждается применением в работе методик, установленных действующей нормативно-технической документацией; использованием при физическом моделировании основополагающих принципов проведения технического эксперимента и теории подобия; хорошей сходимостью результатов расчётов и физического моделирования; применением в работе результатов моделирования климатической системы, полученных с использованием наиболее совершенных современных климатических моделей.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах: IV, V, VI Всероссийские научно-практические семинары «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» в 2021, 2022, 2023 гг., г. Москва; Всероссийские научные конференции «Моря России» в 2021, 2022, 2023 гг., г. Севастополь; XXV, XXVI Международные научные конференции «Construction the Formation of Living Environment» (FORM) в 2022 и 2023 гг., г. Москва; Международный научно-практический симпозиум «Будущее строительной

отрасли: Вызовы и перспективы развития» 2023 г., г. Москва; Научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии» 2023 г., г. Санкт-Петербург; Всероссийская конференция с международным участием «XXIX Береговая конференция: натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» 2022 г., г. Калининград; Всероссийская научно-практическая конференция «Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли» 2022 г., г. Москва; Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021 г., г. Белгород.

Результаты диссертационного исследования были внедрены в практику проектирования портовых ограждающих и причальных гидротехнических сооружений ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» на объекте «Морская составляющая объекта “Криница”» и были использованы при выполнении НИР «Математическое моделирование волновых и литодинамических процессов, с проведением физического моделирования волнового воздействия на гидротехнические сооружения объекта: «Угольный морской терминал «порт Эльга» в районе мыса Манорский», НИУ МГСУ, 2023.

#### **Публикации по тематике диссертационного исследования.**

Результаты диссертационной работы были опубликованы в 14 печатных работах. Основные научные результаты диссертации содержатся в 2 публикациях в изданиях, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в 2 публикациях в изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования Scopus, а также в 10 статьях, опубликованных в других научных журналах и изданиях и в 2 программах для электронных вычислительных машин.

Исследовательская работа автора в рамках обучения в аспирантуре НИУ МГСУ была отмечена стипендией Правительства Российской Федерации (по специальностям или направлениям подготовки, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики) в 2020 году, грантом НИУ МГСУ для аспирантов на проведение физических экспериментов в 2023 году, а также автор работы стал победителем Всероссийского инженерного конкурса 22/23 за лучшую выпускную квалификационную работу аспиранта по отраслевой площадке Минстроя РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Общий объём работы – 317 страниц, основной текст работы изложен на 297 страницах и в 4 приложениях, содержит 18 таблиц, 163 рисунка, список литературы из 339 наименований, в том числе 100 иностранных.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, показана степень разработанности темы исследования, показана научная новизна и достоверность результатов, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, сведения о методах исследования и апробации результатов исследования.

**В первой главе** рассматривается применение гидротехнических сооружений в портовом строительстве и характерные особенности проектов в Арктической зоне РФ. В **разделе 1.1** выполнен обзор состояния и перспектив развития строительных проектов в Арктической зоне РФ. В **разделе 1.2** выполнен аналитический обзор опыта реализации проектов портовых гидротехнических сооружений в Арктическом регионе РФ. Установлено, что при проектировании портов в Арктическом регионе РФ в XX веке сложилась практика компоновки причальных и оградительных сооружений или с совмещением этих функций в причалах – молах, или без оградительных сооружений, при расположении акватории порта в благоприятных условиях естественной защищённости от волнения и ледовых полей при преимущественно пирсовой компоновке причального фронта и реже – при фронтальной.

Обзор нормативной документации, выполненный в **разделе 1.3**, позволил сделать вывод о необходимости учёта климатических изменений при проектировании ПГТС с целью выполнения требований по обеспечению надежности и безопасности сооружений на всех стадиях жизненного цикла. На основании проведённого аналитического обзора морского портового строительства в РФ и рассмотрения в **разделе 1.4** классификаций и условий эксплуатации ПГТС принято решение проводить оценку влияния климатических изменений уровня режима акватории на ПГТС вертикального профиля, которые включают оградительные сооружения с причальным фронтом на тыловой стороне.

**Во второй главе** рассматриваются причины изменений климата, последствия для ПГТС и связанные с ними адаптационные мероприятия. В **разделе 2.1** рассмотрены причины климатических изменений, включающие в себя естественную и антропогенную составляющие, а также ряд обратных связей климатической системы. В **разделе 2.2** рассмотрены потенциальные последствия климатических изменений, оказываемое ими воздействие и влияние на эксплуатацию ПГТС. В **разделе 2.3** рассмотрено влияние климатических изменений на глобальный средний уровень моря (ГСУМ) в период с середины эоцена ( $\approx 40$  млн. лет назад) до настоящего времени. Проведённый аналитический обзор позволил определить основные факторы, которые будут иметь влияние на ГСУМ при климатических изменениях ближайшего

века, а именно стерические (рост теплосодержания океана) и эвстатические (увеличение объёма воды).

В разделе 2.4 рассмотрены особенности глобального моделирования климатической системы Земли. Проведённый аналитический обзор показал, что прогнозы академика РАН М.И. Будыко (1972 год) и прогнозный сценарий В Hansen (1988 год) хорошо согласуются с данными наблюдений до настоящего времени, а наблюдаемые уровни концентраций CO<sub>2</sub> соответствуют сценариям социально – экономического развития населения Земли RCP6.0 – RCP8.5, используемым в докладах межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Установлено, что наблюдается наличие устойчивого тренда к повышению ГСУМ, который имеет не линейный характер, а ускоряется во времени и наиболее близок к квадратичной зависимости. В модельных прогнозах присутствует некоторая неопределённость, наибольший вклад в которую вносит недостаточная изученность динамики таяния ледникового покрова в Антарктике и Гренландии, наблюдаемые потери которого соответствуют верхнему уровню диапазона прогнозов уровня моря. Совершенствование глобальных климатических моделей, развитие вычислительных мощностей и, как следствие, повышение точности моделирования показало увеличение предельного прогнозного повышения уровня моря (Рисунок 1).

В разделе 2.5 проведены исследования прогнозных климатических изменений уровня режима акваторий портов в Арктическом и Дальневосточном регионах РФ в соответствии с результатами Шестого оценочного доклада МГЭИК в период на 2030 по 2130 гг., которые показали, что для портов, расположенных на побережьях окраинных морей Арктического и Дальневосточного бассейнов, региональный рост уровня моря превышает рост ГСУМ (Рисунок 2). В работе рассмотрено 16 участков, включающих более 20 портов, в числе которых для 12 портов, на которые приходится более половины грузооборота в Арктическом и Дальневосточном регионах, прогнозируемое повышение уровня моря при 50 процентиле сценария SSP5-8.5 превысит рост ГСУМ и составит свыше 100 см к концу жизненного цикла ПГТС. При этом наибольший рост уровня акватории прогнозируется для портов Певек (128.4 см), Тикси (128.8 см) и Индига (124.7 см).

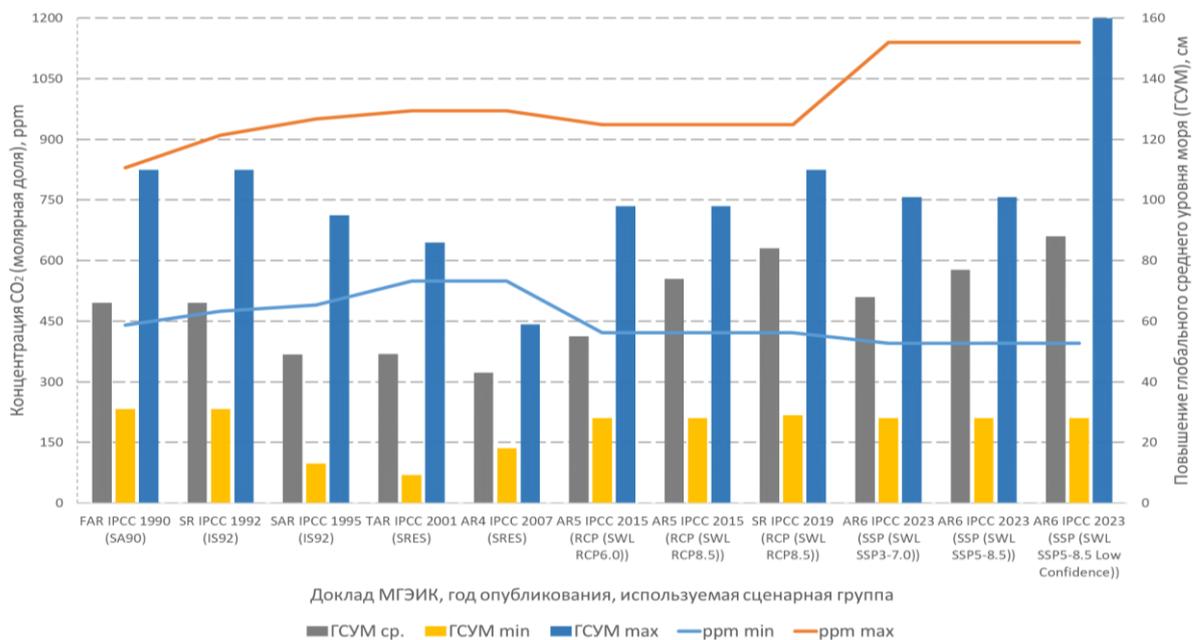


Рисунок 1 - Сравнение диапазонов концентраций CO<sub>2</sub> и повышения ГСУМ, приведённых в различных оценочных докладах МГЭИК.

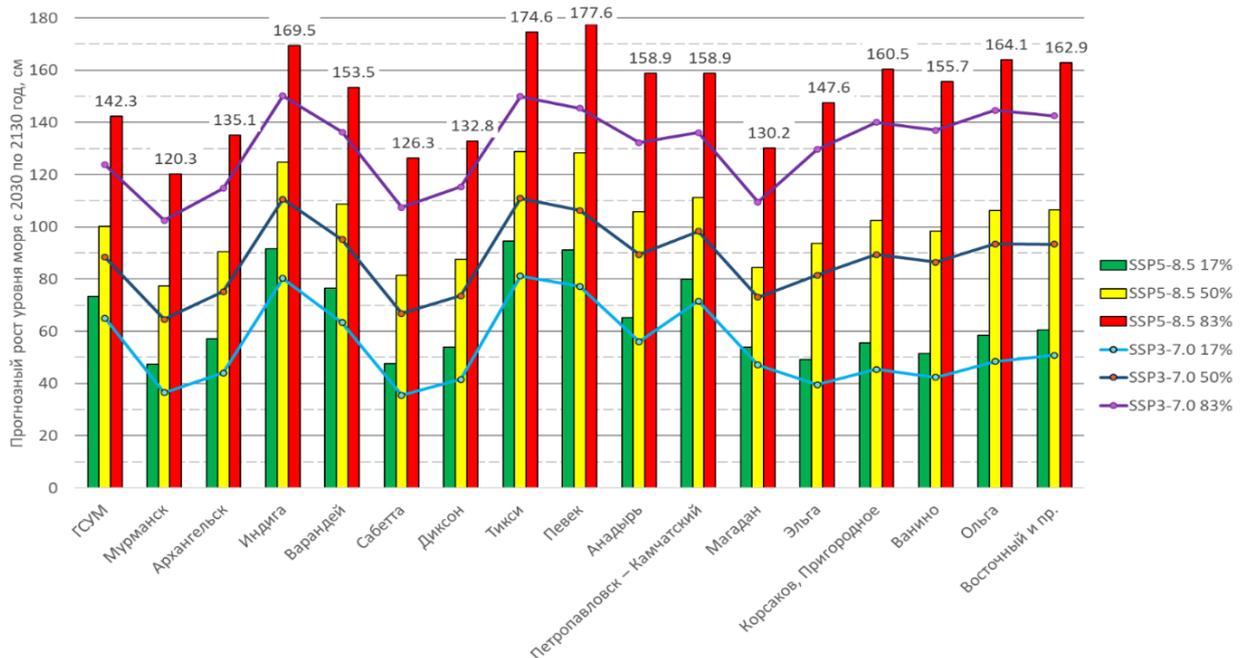


Рисунок 2 - Прогнозный рост уровня моря по сценариям SSP3-7.0 и SSP5-8.5 за период с 2030 по 2130 год для портов на трассе СМП. В легенде после наименования сценария указывается процентиль используемых результатов.

В разделе 2.6 рассмотрены утверждённые Правительством РФ план адаптации к климатическим изменениям на территории РФ, содержащий описание характерных климатических рисков и новых возможностей развития, и план развития Севморпути, содержащий программу строительства объектов портовой инфраструктуры вдоль всего маршрута СМП и целевые показатели объёмов грузоперевозок. Проведён анализ изменения объёма грузооборота по СМП с 1933 по 2022 гг. и установленных правительством РФ целевых показателей грузоперевозок, которые к 2035 году должны превысить уровень 2020-2022 годов

примерно в 6.5 раз и достигнуть 220 млн тонн в год. Рассмотрение национальных планов позволило сделать вывод о целесообразности разработки мероприятий по снижению уровня риска для объектов транспортной инфраструктуры путём разработки методик, позволяющих проектировать ПГТС таким образом, чтобы изменения уровня режима акватории не отражались негативно на их надёжности и безопасности.

В третьей главе показано, что несмотря на широкое распространение методов математического моделирования параметров ветровых волн, отсутствие учёта долгосрочных климатических изменений уровня режима может привести к занижению параметров расчётной волны в прибрежной зоне и, как следствие, снизить надёжность и безопасность проектируемых сооружений. В разделе 3.1 рассмотрена классификация волн на воде и обосновано решение рассматривать в работе ветровые волны в рамках теории линейных диспергирующих волн; проведён анализ физических основ определения характеристик волнения и нормативной методики, представленной в СП 38.13330. В разделе 3.2 выполнена оценка влияния климатических изменений уровня режима акватории на расчётные характеристики волнения в зоне строительства ПГТС. В разделе 3.2.1 получен вывод о влиянии климатических изменений уровня режима акватории на границы расположения волновых зон (Рисунок 3).

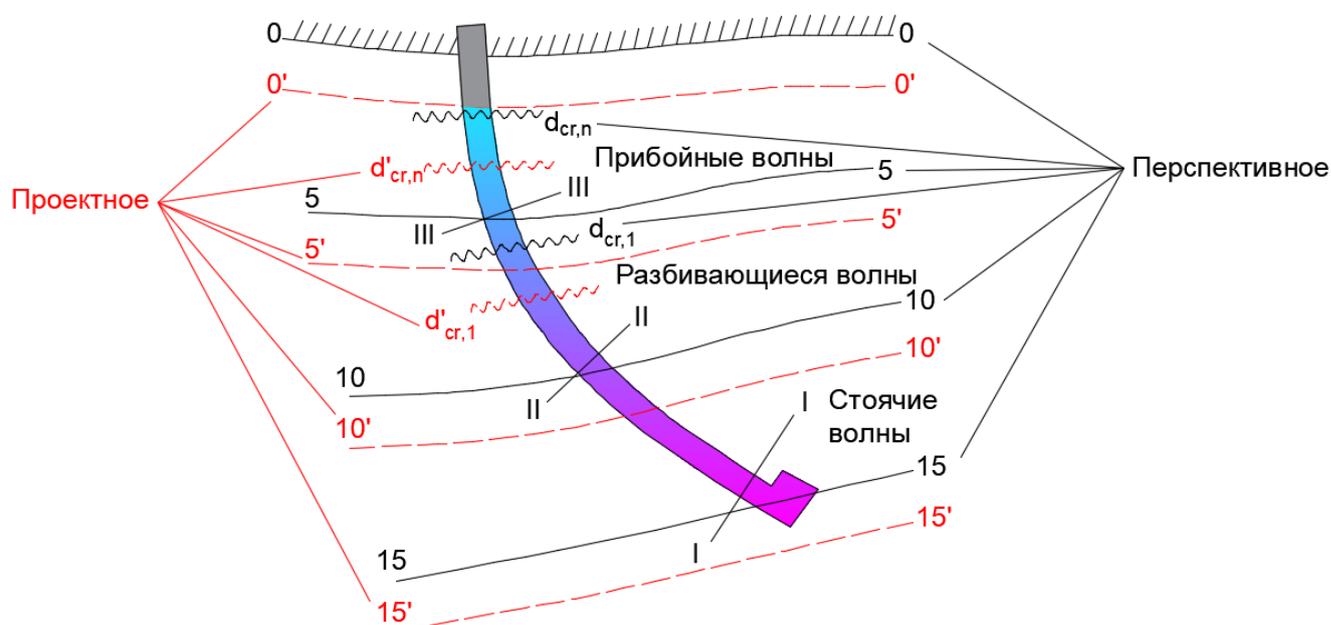


Рисунок 3 - Зоны воздействия волн на сооружения с учётом повышения уровня режима акватории.

Изменение границ волновых зон при повышении уровня режима акватории окажет влияние на условия эксплуатации ПГТС, так как для каждого конкретного рассматриваемого участка ПГТС изменится тип волновой нагрузки, что требует учёта при проектировании.

В разделах 3.2.2 – 3.2.5 определены граничные условия при моделировании условий волнообразования и проведена оценка влияния климатических изменений уровня режима

акватории на условия трансформации (Рисунок 4) и рефракции волн при различных уклонах дна и изменении потерь волновой энергии (обобщённый коэффициент потерь) (Рисунок 5).

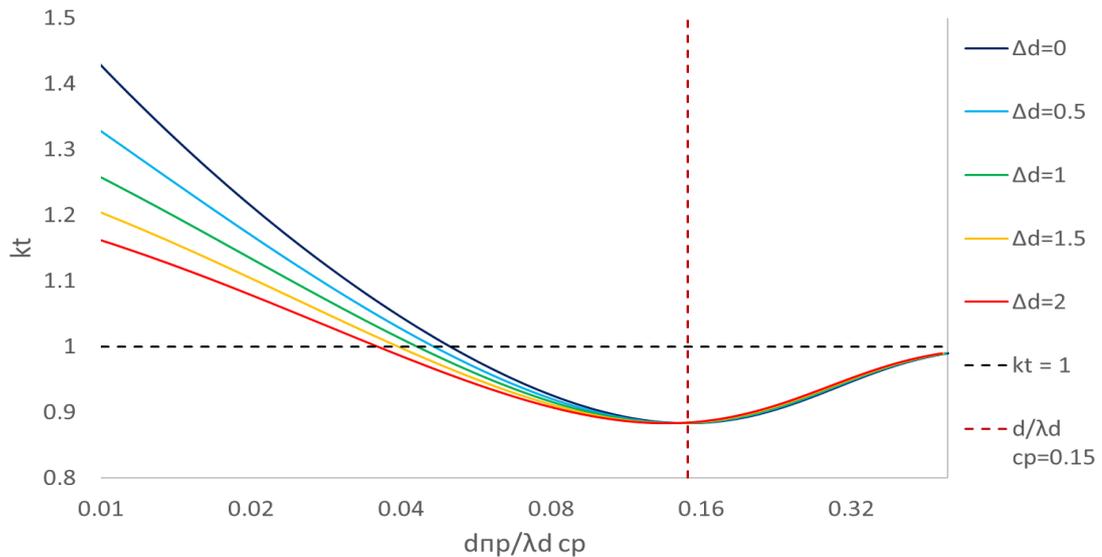


Рисунок 4 - Изменение зависимости коэффициента трансформации ( $k_t$ ) от отношения  $\frac{d_{пр}}{\lambda_d}$  ( $d_{пр}$  – проектная глубина (исходная глубина без учета климатического изменения уровня акватории),  $\lambda_d$  – средняя длина волны на глубокой воде) при повышении уровня моря для заданной рассматриваемой точки.

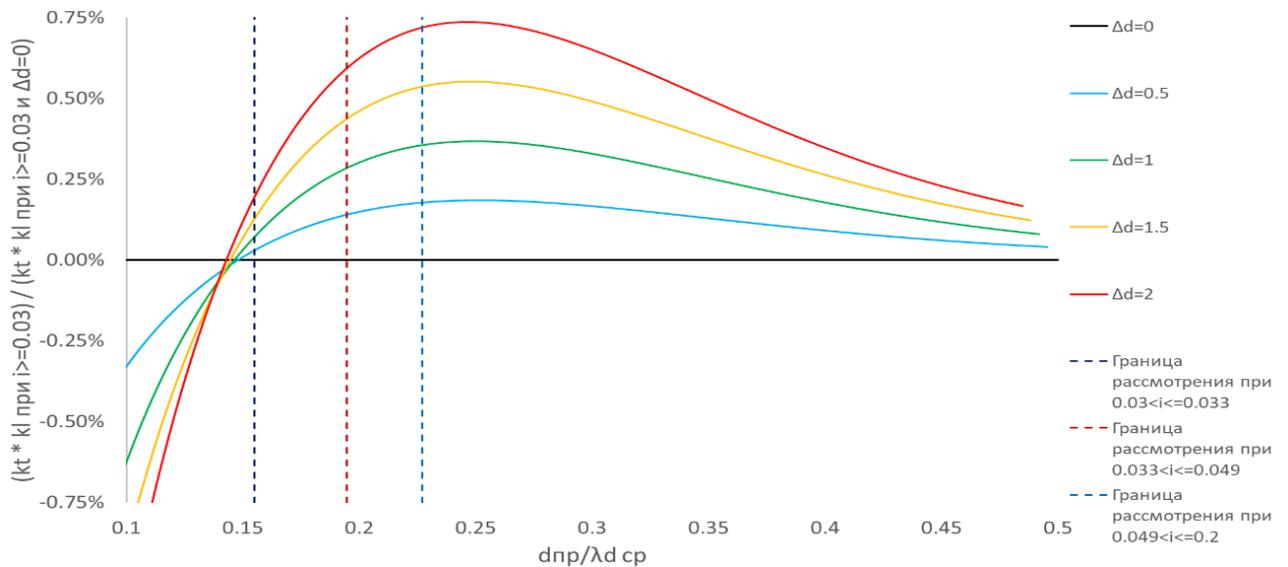


Рисунок 5 - Изменение зависимости произведения обобщённого к-та потерь ( $k_l$ ) и к-та трансформации ( $k_t$ ) от отношения  $\frac{d_{пр}}{\lambda_d} \in [0.1; 0.5]$  при повышении уровня моря для заданной рассматриваемой точки и уклоне дна  $i \geq 0.03$ .

Выявлены устойчивые зависимости величины изменения высоты волн от исходных характеристик при моделировании волнения. Изменение высоты расчётного волнения тем больше: чем ближе располагается сооружение к глубине первого обрушения волн; чем меньше скорость ветра (следовательно, меньше высота волн в глубоководной зоне); чем меньше уклон дна. Количественная оценка показала, что для сооружений I и II классов капитальности повышение высот волн у сооружения к концу расчётного срока эксплуатации в 100 лет, при

$d > d_{cr}$ ,  $i \in [0.001; 0.2]$  и  $V_w \in [5; 50]$  для повышения уровня моря  $\Delta d = 2$  м составит от  $\approx 0.7\%$  до  $\approx 24.0\%$  и для  $\Delta d = 0.25$  м от  $\approx 0.11\%$  до  $\approx 10.0\%$ . Установлено, что изменение высоты трансформируемой волны в мелководной зоне при повышении уровня режима акватории (см. Рисунок 6) хорошо описывается степенной функцией вида (1):

$$y = \frac{a}{x^b} \quad (1)$$

где  $a \approx \in (0.3; 5.4)$ , а  $b \approx \in (0.90; 0.97)$  (на основании рассмотрения результатов при  $i \in [0.001; 0.2]$ ,  $\Delta d \in [0.25; 2.00]$  и  $V_w \in [5; 50]$ ).

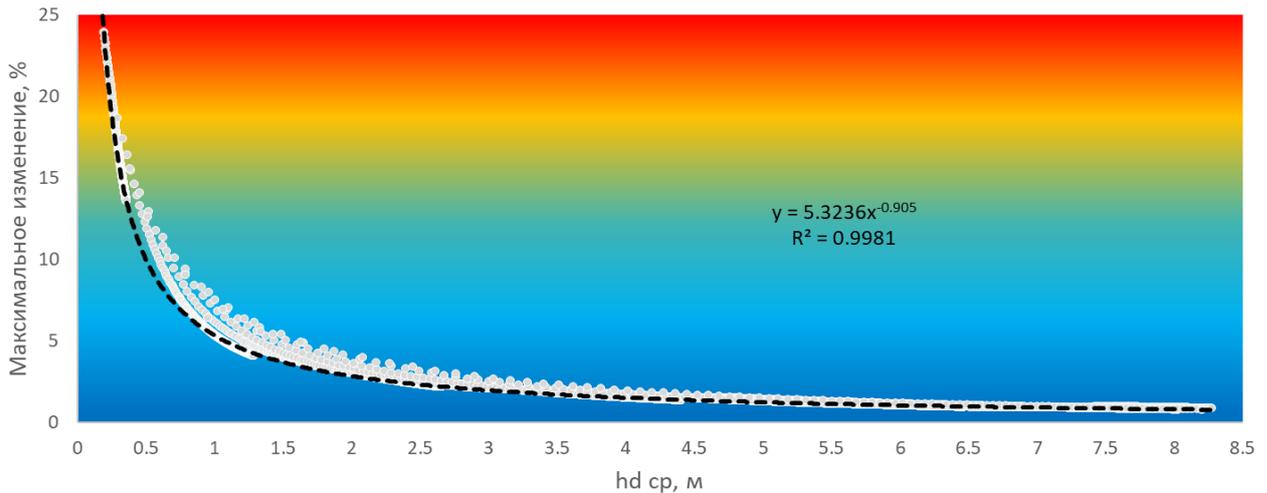


Рисунок 6 - Зависимость максимального изменения высоты волны при трансформации в мелководной зоне от  $\overline{h_d}$  при  $i \leq 0.02$  и  $\Delta d = 2.0$  м.

Получена качественная оценка совместного изменения высот волн при трансформации и рефракции в мелководной зоне, которая показала, что учёт рефракции (к-т рефракции  $k_r$ ) приводит к дополнительному повышению высоты волны во всех случаях, кроме  $(k_l + \Delta k_l) \cdot (k_t + \Delta k_t) \cdot (k_r + \Delta k_r) / k_l \cdot k_t \cdot k_r < 1$ , который возможен при  $k_r > 1$  на момент проектирования ПГТС. Было доказано, что при нормальном подходе волн к прямолинейному или вогнутому рельефу рост волн может достигать 24% при повышении уровня моря на 2 метра, что соответствует 95% квантилю при сценарии SSP5-8.5 для района порта Тикси.

**В четвёртой главе** исследовано влияние климатических изменений уровня режима акватории на отсчётные уровни, навигационные глубины, заплеск и незатопляемость ПГТС. В **разделе 4.1** произведена оценка влияния климатических изменений уровня режима акватории на отсчётный (средний многолетний) уровень морского порта. Рассмотрена действующая нормативная методика, базирующаяся на распределении Пирсона III типа с использованием биномиального распределения по таблицам Фостера – Рыбкина и гамма – распределения. Данная методика базируется на стационарности ряда наблюдений, в связи с этим уровень режим порта определяется без учёта прогнозного повышения уровня моря, что на промежутке времени равном жизненному циклу ПГТС приведёт к занижению отсчётного уровня

требуемой обеспеченности (Рисунок 7), и для обеспечения надёжности и безопасности ПГТС требуется введение учёта нестационарности данных наблюдений в практику проектирования.

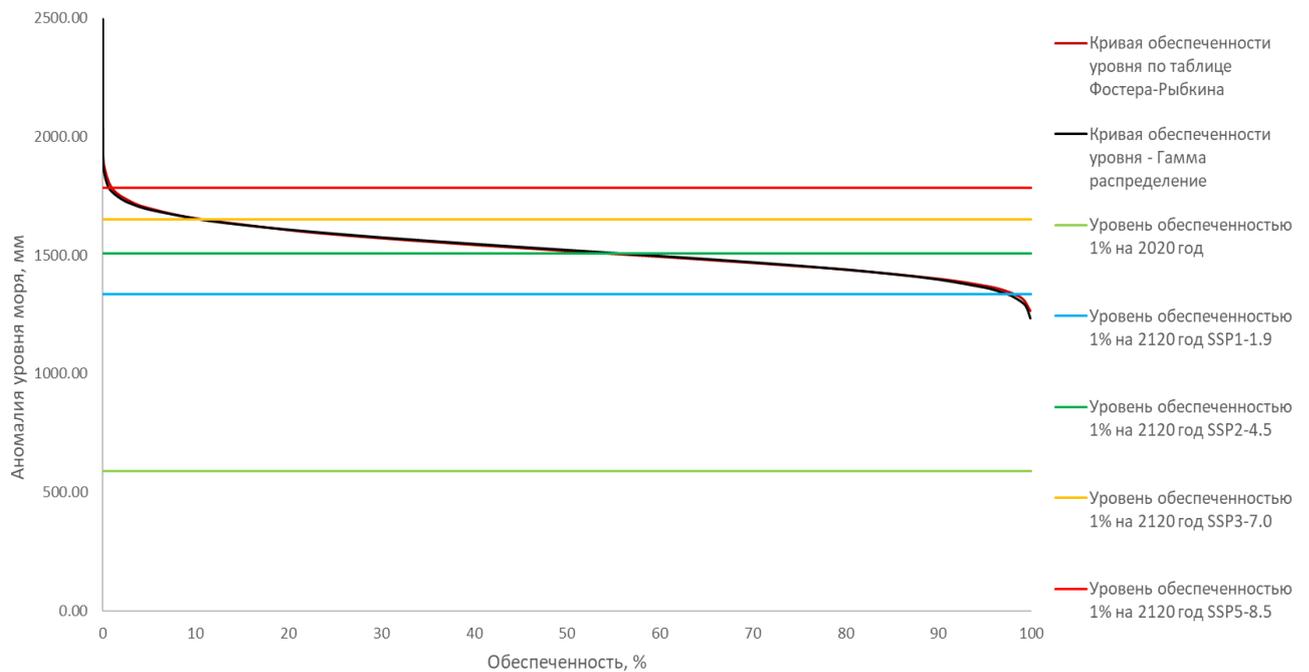


Рисунок 7 - Кривая обеспеченности среднего уровня моря, в точке ( $68^{\circ}$  N;  $47^{\circ}$  E) с поправкой на повышение уровня моря в соответствии со сценарием SSP5-8.5.

В разделе 4.2 проведён анализ зарубежной методики EurOtop определения удельного расхода заплесков и переливов для морских ПГТС, который позволил в разделе 4.3 количественно и качественно оценить зависимость удельного расхода перелива для расчётного сооружения от величины прогнозного климатического повышения уровня режима акватории (Рисунок 8) и установить, что рост уровня моря приводит к многократному росту удельного расхода заплеска.

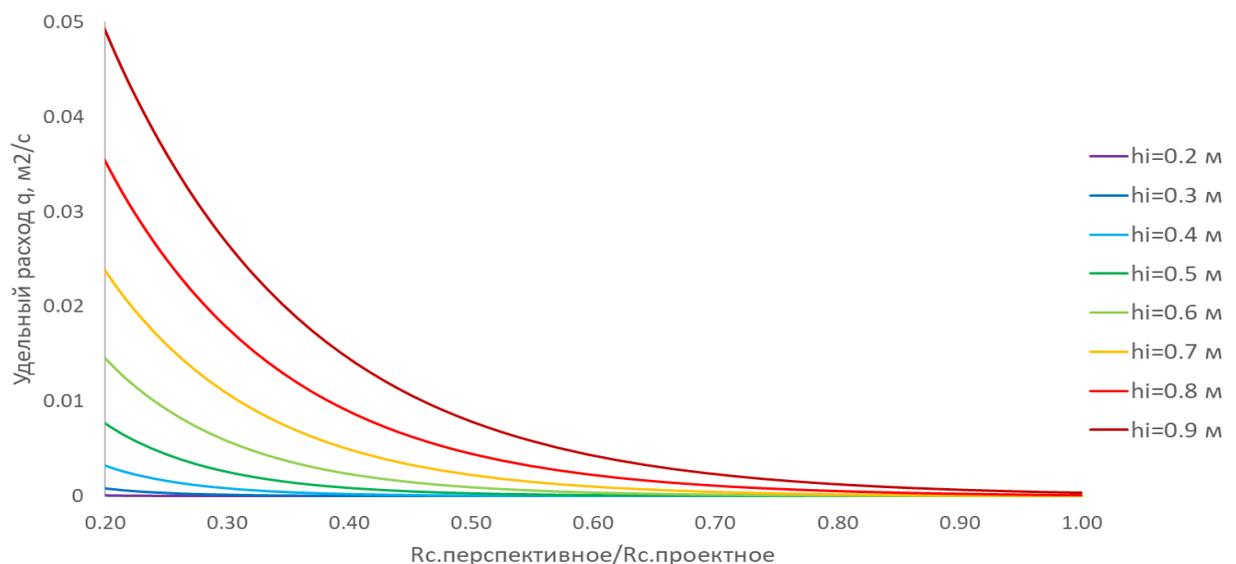


Рисунок 8 - Зависимость удельного расхода перелива от отношения перспективного возвышения кордона ( $R_c$ . перспективное) к проектному ( $R_c$ . проектное) для различных высот волн ( $h_i$ ).

Произведённый в разделе 4.4 анализ существующих методик определения отметок гребня для морских ПГТС позволил предложить методику для определения отметки кордона причального сооружения (2), верха парапета оградительного сооружения вертикального профиля (3) и оградительных сооружений откосного и смешанного профилей (4) при учёте климатических изменений уровня режима акватории.

$$H_{\text{кордона}} = \left| \frac{h_{\text{dif}}}{2} + \frac{k \cdot h_{\text{dif}}^2}{8} \text{cth}(k \cdot d) \right| + a + \Delta H_{\text{перспективное}} \quad (2)$$

$$H_{\text{парапета}} = h_{1\%} + \frac{\pi \cdot h_{1\%}^2}{\bar{\lambda}_s} \text{cth}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\bar{\lambda}_s}\right) + 0.2h_{1\%} + \Delta H_{\text{перспективное}} \quad (3)$$

$$H_{\text{гребня}} = h_{\text{run}1\%} + a_3 + \Delta H_{\text{перспективное}} \quad (4)$$

$h_{\text{dif}}$  – высота дифрагированных волн;  $k$  – волновое число;  $d$  – глубина у фронтальной части сооружения;  $a$  – запас по высоте, равный 0.25 – 0.5 м;  $\Delta H_{\text{перспективное}}$  – перспективное (прогнозное) повышение уровня режима акватории;  $h_{1\%}$  – средняя высота волны 1% обеспеченности в мелководной зоне;  $\bar{\lambda}_s$  – средняя длина волны в мелководной зоне;  $h_{\text{run}1\%}$  – высота наката волн на откос ПГТС;  $a_3$  – запас высоты сооружения, назначаемый равным  $0.1h_{1\%}$  при гребне из наброски камня или фасонных блоков, и  $0.2h_{1\%}$  при наличии на гребне бетонной надстройки, но не менее 0.5 м.

В разделе 4.5 приведены сведения о подготовке и проведении физических экспериментов, расчётов и сопоставлении полученных результатов. Проведённые модельные физические эксперименты (Рисунок 9 – Рисунок 13) по определению волнового давления на сооружение (56 реализаций) позволили установить хорошую сходимость результатов расчётов и физических экспериментов для стоячих волн и удовлетворительную сходимость результатов для разбивающихся волн. Был сделан вывод о достоверности полученных результатов и достаточной точности реализации модели и волн в гидроволновом лотке.



Рисунок 9 - Модель сооружения с бермой (вид сбоку по направлению от волнопродуктора), измерительное оборудование и компьютер с установленным ПО для сбора и визуализации данных, получаемых с датчиков давления Keller PR-41X.

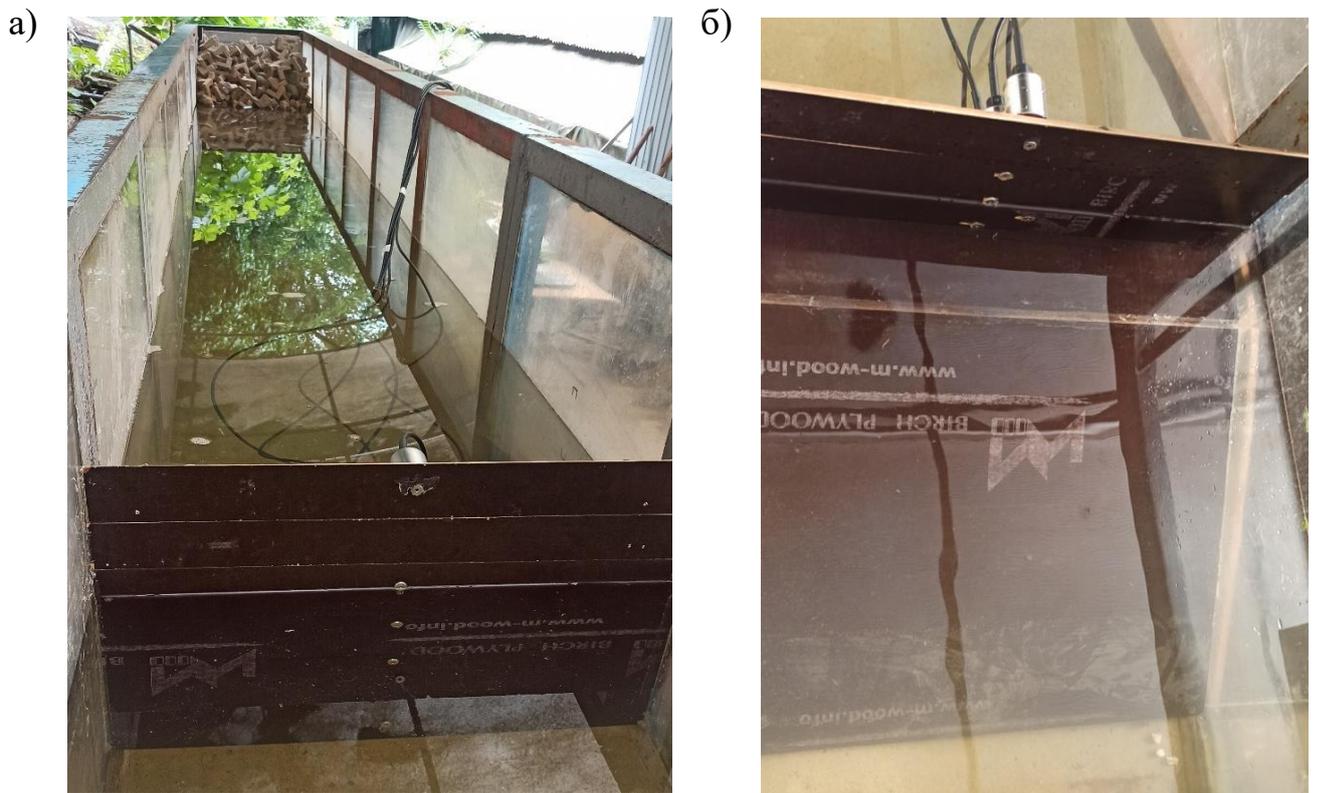


Рисунок 10 - Фотографии моделей сооружения и измерительного оборудования: а) модель без бермы с уровнем +0.0 см; б) модель с бермой и уровнем +0.0 см.



Рисунок 11 - Стоячая волна в момент перелива через модель вертикального ПГТС ( $R_c = 2.7$  м, уровень +0.0 см) при  $\frac{R_c}{h_i} \cong 0.426$ .



Рисунок 12 - Реализованная модель с ёмкостью из пластика с герметичной крышкой.

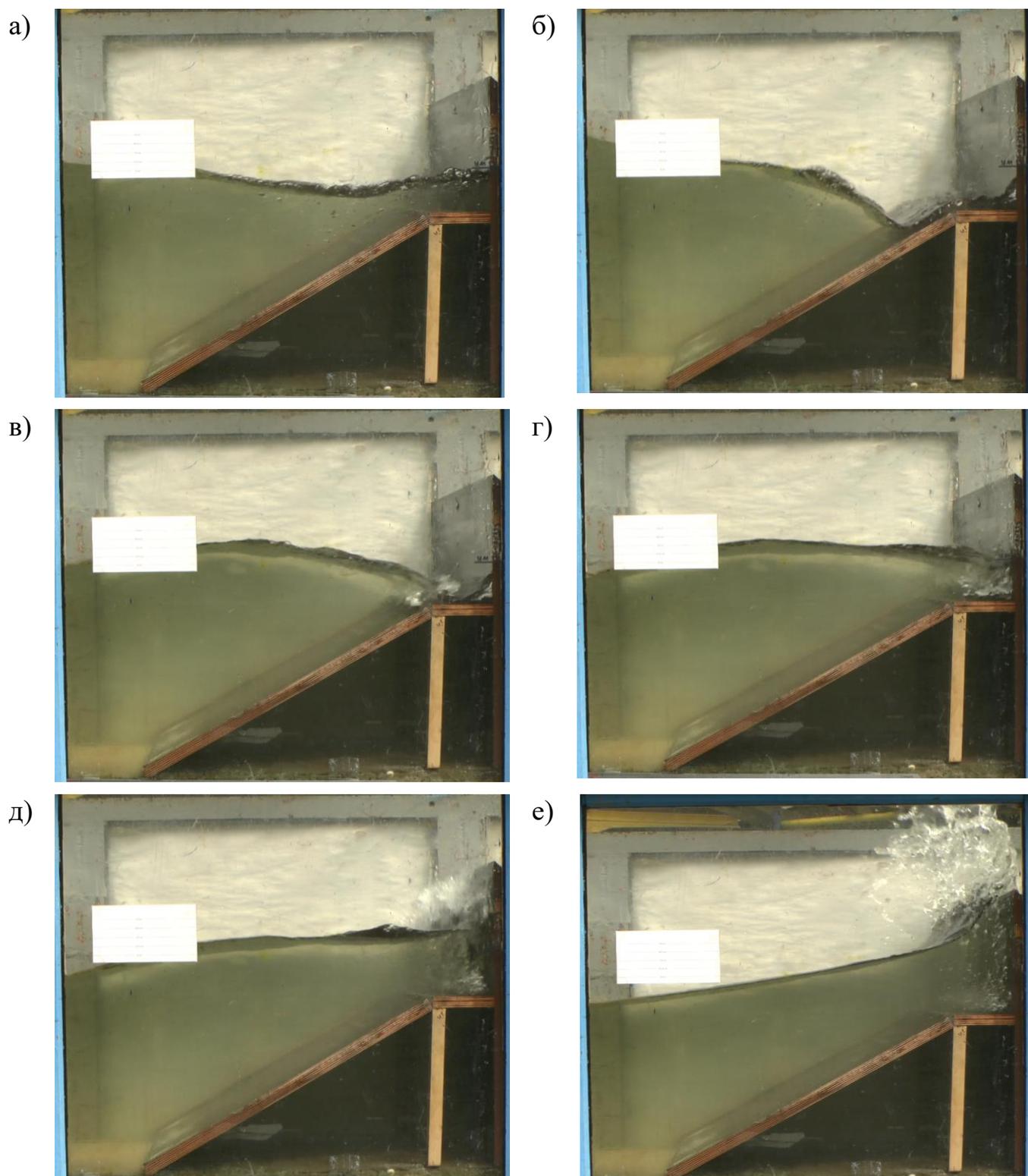


Рисунок 13 - Последовательность процесса обрушения разбивающейся волны на модель ПГТС с бермой.

Проведение серий физических экспериментов по определению удельных расходов переливов и заплесков (81 реализация) в совокупности с результатами расчётов позволили доказать негативное влияние климатических изменений уровня режима акватории на условия эксплуатации ПГТС, выражающееся в увеличении удельного расхода переливов и заплесков при воздействии стоячих и разбивающихся волн (Рисунок 14).

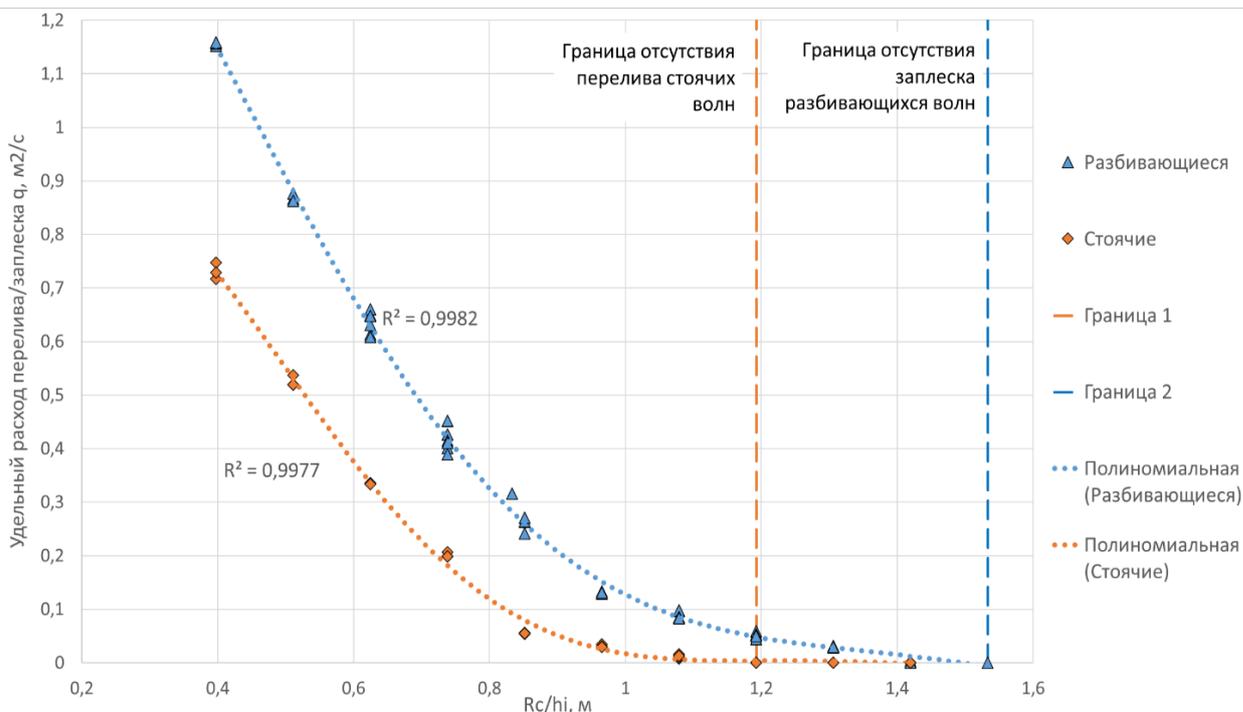


Рисунок 14 - Сопоставление расчётов и результатов физического моделирования удельного расхода заплеска через ПГТС.

Проведённый в **разделе 4.6** анализ нормативной документации в области оценки безопасности и риска аварии на ПГТС позволил установить соответствие между показателем  $a_1$  (опасность превышения природных нагрузок и воздействий) и прогнозными климатическими изменениями уровня режима акватории. Моделирование изменения показателя  $a_1$  при различных вариантах показателей опасности и уязвимости позволило построить кривые обеспеченности коэффициента риска  $D_a$  (Рисунок 15), напрямую связанного с риском аварии на ПГТС, и установить значительное увеличение коэффициента риска при изменении показателя  $a_1$ .

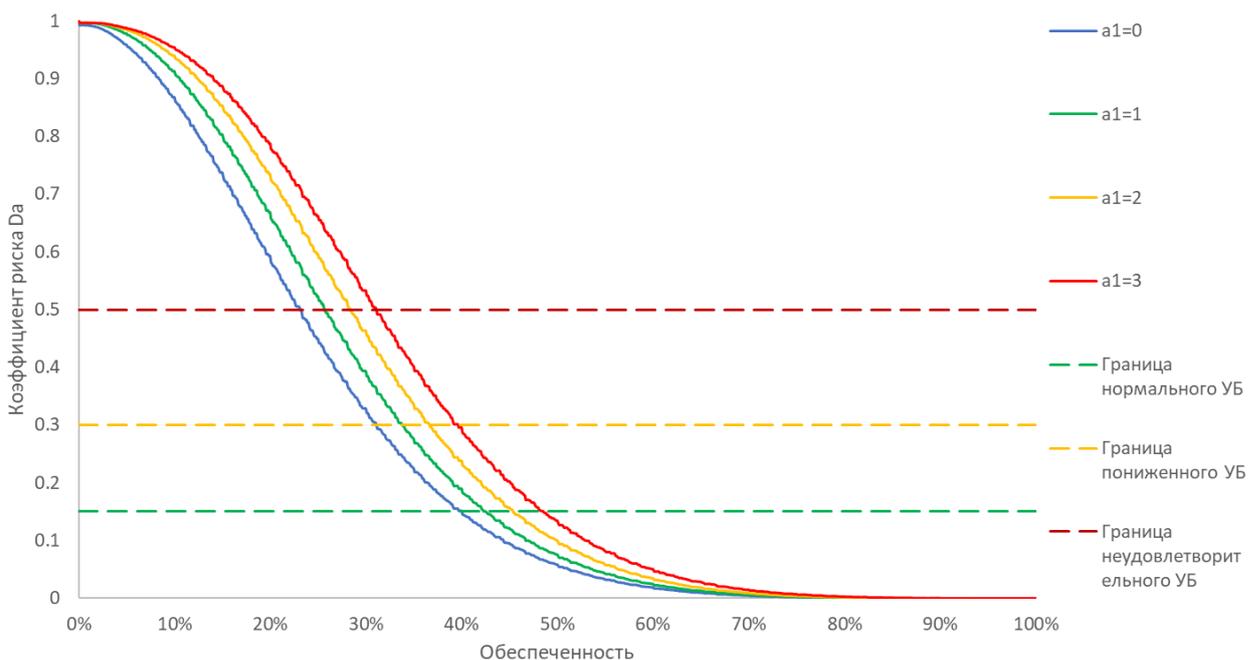


Рисунок 15 - Кривые обеспеченности коэффициента риска  $D_a$  при заданном значении показателя  $a_1$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение поставленных в диссертационном исследовании задач позволило получить следующие результаты и сделать выводы:

1. Выполненный аналитический обзор морского портового строительства в Арктическом и Дальневосточном регионах РФ в совокупности с проведённым анализом данных климатического моделирования позволил оценить климатические изменения, влияющие на условия эксплуатации ПГТС. Показана значимость климатических изменений для регионов прохождения трассы СМП.

2. Анализ климатических изменений уровня режима Арктического и Дальневосточного регионов позволил установить наличие динамики к росту уровня режима, превосходящей уровень ГСУМ. Выполненная количественная оценка прогнозного повышения уровня режима при различных сценариях социально – экономического развития показала, что наибольший рост уровня моря прогнозируется для портов восточной Арктики и к концу жизненного цикла, ПГТС в данном регионе могут эксплуатироваться при отметке акватории, превышающей проектную более чем на метр.

3. Выполненный анализ нормативно-технической документации позволил установить, что определение значимых параметров ПГТС производится без учёта климатических изменений уровня режима и требуется внесение корректировок в соответствующие методики.

4. Уточнены методики определения отметок верха морских ПГТС с учётом прогнозных климатических изменений уровня режима акватории. Экспериментально доказано, что уточнённые методики обеспечивают защищённость тыловой части ПГТС и позволяют в условиях климатических изменений уровня режима не допустить повышения удельного расхода заплесков и переливов, являющихся значимыми параметрами для обеспечения требуемых нормативно – технической документацией условий эксплуатации.

5. Разработанная методика оценки влияния климатических изменений на параметры расчётной волны при её распространении из глубоководной зоны акватории в мелководную зону позволила доказать, что при трансформации волн рост уровня режима акватории будет сопровождаться повышением высоты расчётной волны для заданной точки акватории. Максимальные относительные изменения параметров волнения будут наблюдаться для наименьших средних высот волн и с ростом средней высоты волны будут уменьшаться, а описанный процесс с достаточной точностью подчиняется степенному закону распределения.

6. Разработанная и апробированная методика проведения физического моделирования для определения удельного расхода заплесков и переливов в рамках проведённого эксперимента позволила получить достаточно точные результаты, отражающие влияние климатических

изменений уровня режима на условия эксплуатации морских ПГТС, и показала свою эффективность.

7. Полученные результаты расчётов и физических экспериментов подтверждают, что повышение уровня режима акватории сопровождается уменьшением отношения  $\frac{R_c}{h_i}$  (возвышения верха сооружения над уровнем акватории к высоте волны заданной обеспеченности), которое приведёт к многократному росту удельного расхода переливов и заплесков, что является негативным влиянием климатических изменений уровня режима акватории на условия эксплуатации ПГТС. Максимальное значение волновой нагрузки существенно не изменится, однако возрастёт момент от действия волновой нагрузки, что приведёт к снижению устойчивости и росту контактных напряжений в основании ПГТС.

8. Разработанная методика определения изменения параметров расчётной волны в мелководной зоне может применяться без изменений для акваторий с простыми условиями волнообразования и при учёте требований приложения А СП 38.13330 для сложных условий волнообразования, не требующих рассмотрения спектра морского волнения. Уточнённые методики определения отметок сооружений могут применяться в соответствии с назначением для регионов с прогнозным ростом уровня режима. Разработанную методику проведения физического моделирования ПГТС рекомендуется использовать для определения удельных расходов заплесков и переливов при воздействии расчётного волнения.

9. Произведённые расчёты позволили построить кривые обеспеченности коэффициента риска, напрямую связанного с вероятностью аварии на ПГТС, и установить значительное увеличение коэффициента риска при отличии нагрузок и воздействий на ГТС от расчётных значений, принятых при проектировании.

Таким образом, на основании проведённых исследований показана необходимость изменения подхода к определению отсчётных уровней порта и построению кривых обеспеченностей, разработаны методики определения отметок верха морских ПГТС, показана необходимость учёта прогнозных климатических изменений уровня режима акватории для обеспечения заданного уровня надёжности и безопасности ПГТС.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:**

1. Оценка влияния климатических изменений уровня режима на внутренние берегозащитные сооружения морских портов;
2. Оценка влияния климатических изменений ледового, ветрового, волнового и уровня режимов на морские ПГТС и ГТС континентального шельфа;
3. Развитие методов физического моделирования волновых воздействий на ПГТС в условиях изменения уровня режима акватории.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации.**

**Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:**

- 1) Долгушев, Т. В. Влияние климатических изменений уровня режима Баренцева моря на портовое гидротехническое строительство / Т. В. Долгушев // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 12. – С. 40-48.
- 2) Долгушев, Т. В. Физические основы изменений климата и их влияние на условия работы портовых гидротехнических сооружений / Т. В. Долгушев, И. Г. Кантаржи // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 7. – С. 30-36.

**Scopus:**

- 3) Dolgushev, T.V., Kantarzhi, I.G. Physical Basis of Climate Change and its Impact on the Operating Conditions of Port Hydraulic Structures // Power Technology and Engineering, 2023, 56(5), страницы 648-653.
- 4) Dolgushev, T.V. Influence of Climate Changes in the Barents Sea Level Mode on Port Hydraulic Engineering // Power Technology and Engineering, 2023, 57(1), страницы 75–84.

**Свидетельства, патенты и др. результаты интеллектуальной деятельности, зарегистрированные в установленном порядке:**

- 5) Т. В. Долгушев; Программа для расчёта изменения высоты трансформируемой волны в мелководной зоне при повышении уровня режима акватории. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617974 Российская Федерация. № 2023616958; Заявл. 11.04.2023; Оpubл. 17.04.2023; Бюл. №. 4. <https://elibrary.ru/item.asp?id=52300829>.
- 6) Т. В. Долгушев; Программа для расчёта коэффициента риска и вероятности аварии гидротехнических сооружений при повышении уровня режима акватории. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660648 Российская Федерация. № 2023618348; Заявл. 28.04.2023; Оpubл. 23.05.2023; Бюл. №6. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54047442>.

**Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:**

- 7) Долгушев, Т. В. Влияние климатических изменений на реализацию строительных проектов транспортной инфраструктуры в Арктике / Т. В. Долгушев // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6(90). – С. 563-572.
- 8) Dolgushev, T.V. Reliability of Port Hydraulic Structures in the Arctic under Climatic Changes of Global Sea Level // AIP Conference Proceedings, 2023, 2791(1), 030008.

- 9) Долгушев, Т. В. Изменение волновой нагрузки на вертикальную стенку при климатическом повышении уровня моря / Т. В. Долгушев, И. Г. Кантаржи // В книге: СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРАВЛИКИ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА. Сборник тезисов докладов VI Всероссийского научно-практического семинара. Москва, 2023. С. 57-58.
- 10) Долгушев, Т. В. Изменение климата и условия работы портовых гидротехнических сооружений / Т. В. Долгушев // В сборнике: Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли - 2022. Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Москва, 2022. С. 57-60.
- 11) Долгушев, Т. В. Эксплуатационная надежность портовых гидротехнических сооружений Арктической зоны Российской Федерации в условиях прогнозных изменений климата / Т. В. Долгушев // В книге: Моря России: Вызовы отечественной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь, 2022. С. 300-301.
- 12) Долгушев, Т. В. Влияние климатических изменений уровня Баренцева моря на портовое гидротехническое строительство / Т. В. Долгушев // В книге: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. Сборник тезисов докладов V Всероссийского научно-практического семинара. Москва, 2022. С. 53.
- 13) Долгушев, Т. В. Учет климатических изменений уровня моря при проектировании портовых гидротехнических сооружений / Т. В. Долгушев, И. Г. Кантаржи // В сборнике: XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования - в практику берегопользования. Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием. Калининград, 2022. С. 167-169.
- 14) Долгушев, Т. В. О необходимости учёта влияния климатических изменений при проектировании морских сооружений / Т. В. Долгушев // В книге: Моря России: Год науки и технологий в РФ - Десятилетие наук об океане ООН. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь, 2021. С. 387-388.
- 15) Долгушев, Т. В. Влияние изменений климата на условия работы портовых сооружений / Т. В. Долгушев, И. Г. Кантаржи // В книге: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. Сборник тезисов докладов IV Всероссийского научно-практического семинара. Москва, 2021. С. 28.
- 16) Долгушев, Т. В. Перспективы реализации строительных проектов морских сооружений в Арктической зоне РФ / Т. В. Долгушев, А. В. Меньшикова // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Материалы конференции. Белгород, 2021. С. 1107-1110.