

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Кантаржи Измаил Григорьевич

Москва – 2024

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В ПОРТОВОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ .....	16
1.1. Освоение Арктической зоны РФ.....	16
1.2. Освоение Северного морского пути до настоящего времени.....	20
1.3. Аналитический обзор нормативно-технической документации ....	26
1.4. Портовые гидротехнические сооружения, применяемые на СМП	35
1.4.1. Оградительные сооружения .....	36
1.4.2. Причальные сооружения .....	39
1.4.3. Совмещённые оградительные и причальные сооружения.....	41
1.5. Выводы по первой главе .....	44
ГЛАВА 2. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА. ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ И АДАПТАЦИЯ.....	46
2.1. Причины изменений климата .....	46
2.1.1. Естественные причины .....	47
2.1.2. Антропогенные причины.....	49
2.1.3. Обратные связи.....	54
2.2. Влияние климатических изменений на условия эксплуатации портовых гидротехнических сооружений .....	57
2.3. Влияние климатических изменений на уровенный режим моря до настоящего момента .....	62
2.4. Глобальное моделирование климатической системы .....	66

2.5. Региональные прогнозные климатические изменения. Оценка изменения уровня режима для ряда портов, расположенных на трассе СМП  
89

2.6. Адаптация к климатическим изменениям в РФ ..... 100

2.7. Выводы по второй главе ..... 107

ГЛАВА 3. ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛН В МЕЛКОВОДНОЙ ЗОНЕ ПОРТА ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ УРОВЕННОГО РЕЖИМА АКВАТОРИИ..... 111

3.1. Учёт волнения при проектировании ПГТС и действующая методика определения границ волновых зон..... 112

3.1.1. Классификации волн на воде ..... 112

3.1.2. Ветровые волны на воде ..... 114

3.1.3. Нормативная методика определения характеристик волнения  
127

3.2. Оценка влияния климатических изменений уровня режима акватории на расчётные характеристики волнения в зоне строительства ПГТС  
134

3.2.1. Изменение границ зон воспринимаемых нагрузок..... 135

3.2.2. Оценка факторов, лимитирующих волнообразование на глубокой воде и границы мелководной зоны ..... 139

3.2.3. Трансформация волн при уклоне дна 0.03 и более ..... 143

3.2.4. Трансформация волн при уклоне дна менее 0.03..... 150

3.2.5. Совокупное изменение высоты волны при трансформации и рефракции волн ..... 153

3.3. Обобщённая оценка изменения высот волн при трансформации в условиях повышения уровня режима акватории ..... 158

3.4. Изменение величины волновой нагрузки на ПГТС при учёте прогнозного повышения уровня моря ..... 163

3.5. Выводы по третьей главе ..... 166

#### ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВЕННОГО РЕЖИМА АКВАТОРИИ НА ОТСЧЁТНЫЕ УРОВНИ, НАВИГАЦИОННЫЕ ГЛУБИНЫ, ЗАПЛЕСК И НЕЗАТОПЛЯЕМОСТЬ ПГТС

169

4.1. Влияние климатических изменений уровня режима акватории на отсчётный уровень морского порта ..... 170

4.2. Заплеск волн для ПГТС вертикального профиля ..... 179

4.3. Влияние климатических изменений уровня режима акватории на навигационную глубину порта и возвышение кордона причалов ..... 187

4.4. Влияние климатических изменений уровня режима акватории на незатопляемость ограждающих ПГТС ..... 195

4.5. Моделирование ПГТС в условиях климатических изменений уровня режима акватории ..... 202

4.5.1. Условия для проведения физического эксперимента ..... 205

4.5.2. Эксперименты для определения волновых нагрузок ..... 218

4.5.3. Эксперименты для определения заплесков (переливов) ..... 232

4.6. Влияние климатических изменений уровня режима на вероятность аварии ПГТС ..... 239

4.7. Выводы по четвёртой главе ..... 248

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 253

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ..... 256

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ..... 257

Приложение А Авторская программа для ЭВМ №1 и полученные с её помощью результаты .....	297
Приложение Б Авторская программа для ЭВМ №2.....	313
Приложение В Список публикаций автора по тематике диссертационного исследования.....	314
Приложение Г Акт о внедрении результатов диссертационной работы ....	317

## ВВЕДЕНИЕ

**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., Абузьярова 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 оградительных 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.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, профессору кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства» НИУ «МГСУ», доктору технических наук Кантаржи И.Г. за всестороннюю помощь и поддержку в подготовке данной работы; сотрудникам ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН: научному руководителю, доктору физико-математических наук, академику РАН Мохову И.И., заместителю директора, доктору физико-математических наук, академику РАН Семенову В.А. и младшему научному сотруднику, кандидату физико-математических наук Акперову М.Г. за консультации по вопросам климатического моделирования в Арктике; сотрудникам лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН: научному сотруднику, кандидату физико-математических наук Вerezемской П.С. и младшему научному сотруднику Шармару В.Д. за консультации и предоставленные материалы регионального моделирования изменений климата в Баренцевом море; заведующему лабораторией ФГБУ "Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова" доктору географических наук Кабатченко И.М. за консультации по вопросу влияния климатических изменений на условия эксплуатации портовых гидротехнических сооружений и моделированию ветровых волн; заместителю директора института тепловой и атомной энергетики по учебной и социально-воспитательной работе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» кандидату технических наук, доценту Губиной Н.А. за консультации по вопросам моделирования волнения в акватории порта; доценту кафедры «Гидравлика и гидротехническое строительство» ФГБОУ ВО НИУ МГСУ кандидату технических наук, доценту Пиляеву С.И. за консультации по вопросам моделирования трансформации и рефракции волн в мелководной зоне акватории порта; профессору кафедры «Гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева доктору технических наук, профессору Ратковичу Л.Д. за консультации по вопросам построения кривых обеспеченности уровнями режима порта; сотрудникам ОП

АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега»: руководителю НИЦ, кандидату технических наук Р.М. Тлявлину и главному инженеру проектов Е.А. Вялому за предоставленную возможность проведения представленных в данной работе физических экспериментов; моей семье и друзьям за поддержку и советы при написании данной работы.

## ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В ПОРТОВОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

### 1.1. Освоение Арктической зоны РФ

Арктическая зона РФ (АЗРФ) представляет собой значительную по площади территорию, находящуюся не только на континентальной части страны, но и на мелководном шельфе. Данный регион занимает около двадцати процентов площади страны и «обеспечивает добычу более 80 процентов горючего природного газа и 17 процентов нефти (включая газовый конденсат) в Российской Федерации» [286, п.5, п.п. а], при этом «континентальный шельф Российской Федерации в Арктике (далее - континентальный шельф), по оценкам экспертов, содержит более 85.1 трлн. куб. метра горючего природного газа, 17.3 млрд. тонн нефти (включая газовый конденсат) и является стратегическим резервом развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации» [286, п.5, п.п. в]. Также нельзя не упомянуть о значительных запасах твёрдых полезных ископаемых, таких как уголь, медно-никелевые руды, золото, олово, платиноиды, редкие металлы и редкоземельные элементы [11].

Актуальность данного исследования, в том числе, обусловлена стратегическим значением освоения ресурсного потенциала Арктики по мнению Правительства РФ [44]. Среди отечественных и иностранных инвесторов также наблюдается заинтересованность в реализации крупных инвестиционно-строительных проектов, в первую очередь благодаря целенаправленной политике Правительства РФ по освоению данного региона. Общая стоимость запасов в Арктической зоне РФ оценивается в 1.5 – 2 трлн. долларов [79], что не может не вызывать повышенный интерес как частных инвесторов, так и правительств различных стран [102].

Арктическая зона разделена между несколькими странами, географическое положение которых позволяет им претендовать на данные территории. В число этих стран входят: Российская Федерация, США, Канада, Великобритания, Швеция, Норвегия, Финляндия, Китай и т.д. Указанные страны уже достаточно



долгое время занимают разграничением Арктического региона. В настоящий момент в РФ уже более двадцати лет идут активные исследования границ континентального шельфа с целью обеспечения доказательной базы, подтверждающей правомочность заявки РФ в ООН на расширение границ шельфа за пределами двухсотмильной исключительной экономической зоны [84, 125].

Результаты проведенных в Арктической зоне исследований позволили доказать принадлежность к Российскому шельфу таких территорий, как: шельф российских Арктических окраинных морей, часть Евразийского бассейна (котловины Нансена и Амундсена и хребет Гаккеля) и центральную часть Американо-Арктического бассейна, которая включает в себя котловину Макарова и комплекс Центрально-Арктических подводных поднятий. Благодаря полученным результатам исследований в 2019 году ООН признало претензии РФ на данные территории общей площадью около 1.2 млн. кв. км. [299] (см. Рисунок 1 [298]).

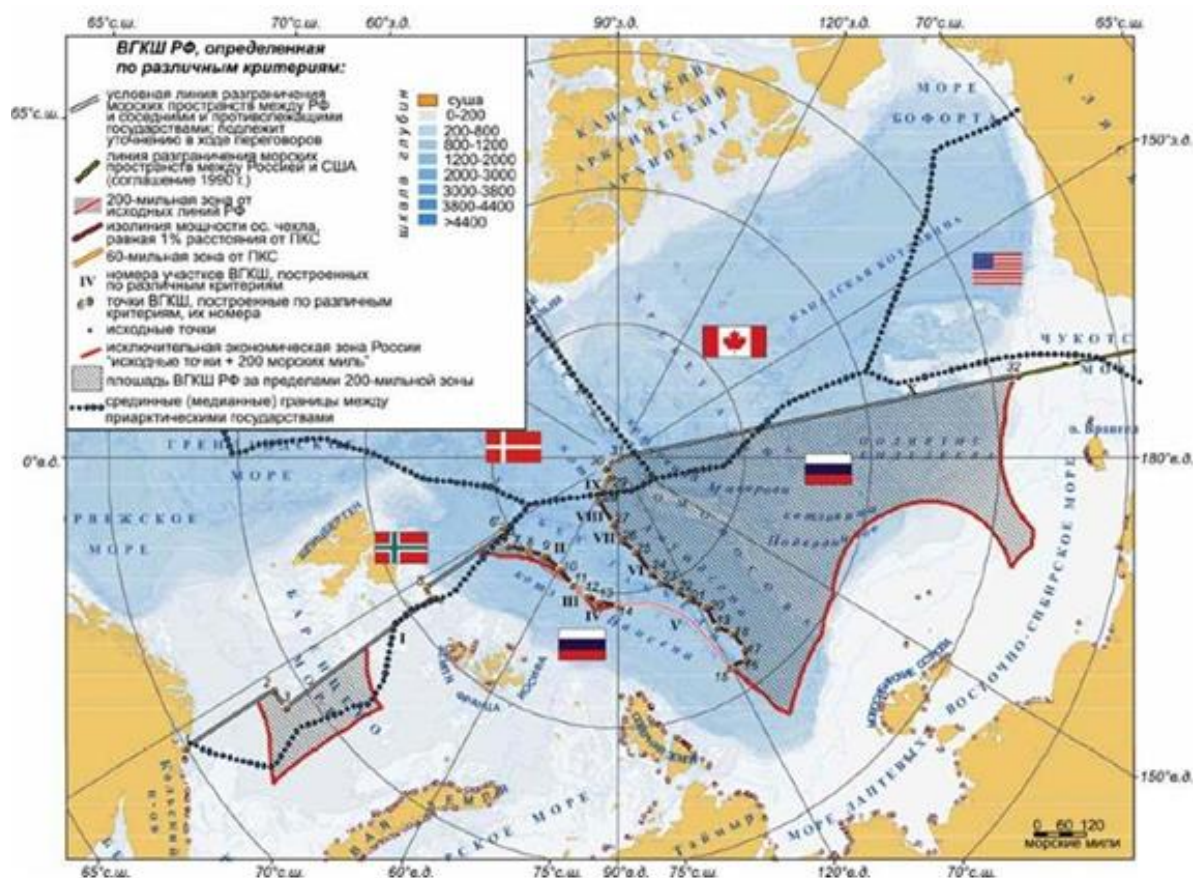


Рисунок 1 – Площадь расширенного континентального шельфа России за пределами 200-мильной исключительной экономической зоны [298].

Проведённые систематические широкомасштабные научные исследования позволили более полно изучить геологическое строение морского дна Северного Ледовитого океана (СЛО) и получить количественные оценки запасов минерально-сырьевых ресурсов. Это оказало положительное влияние и повысило инвестиционную привлекательность региона для крупных инвесторов [15]. Основными проектами, планируемыми на данный момент в этом регионе, являются крупные проекты по добыче нефти и природного газа [77], спрос на которые в среднесрочной перспективе только возрастёт.

Перспективность (развития) нефтедобычи в АЗРФ обусловлена сочетанием факторов: увеличение себестоимости добычи нефти в континентальных месторождениях, наряду с постепенным удешевлением себестоимости добычи в АЗРФ, связанным с появлением более совершенных технологий и положительными последствиями климатических изменений в регионе. Значительная доля месторождения нефти и газа континентальной части страны находятся на заключительной стадии разработки [3, 5, 134] (см. Рисунок 2 [3]), что сопровождается снижением дебета скважин, высокой обводнённостью и снижением пластового давления. Описанные негативные эффекты приводят к увеличению технической сложности процесса нефте- и газодобычи и соответственно увеличению издержек компаний, разрабатывающих месторождения, а значит повышением привлекательности проектов по освоению месторождений шельфового газа и нефти.

Для реализации уже поставленных целей по освоению данного региона, неизбежно потребуются интенсификация реализации инвестиционно-строительных проектов, как минимум в текущем десятилетии. Масштабы же потенциальных проектов трудно оценить даже приблизительно, поскольку наблюдаемый рост инвестиционной привлекательности, нарастание геополитической напряжённости и прочих факторов достаточно трудно учесть комплексно в целях прогнозирования. Однако результаты проводимых геологоразведочных работ на шельфе морей СЛО, а также прибрежных территорий, позволяют говорить о

высокой инвестиционной привлекательности региона с целью добычи не только природной нефти и газа, но и широкого списка других полезных ископаемых.



Рисунок 2 – Степень выработанности разведанных запасов нефти в нефтегазовых бассейнах и областях Российской Федерации, % (на 2015 г) [3].

Основными сдерживающими факторами [78] освоения АЗРФ являются:

- Суровые климатические условия, включающие: сложные ледовые условия, складывающиеся из значительной площади и толщины ледового покрова региона; негативное воздействие айсбергов; значительные отрицательные температуры на протяжении большей части года; высокая экологическая чувствительность региона к антропогенному воздействию;

- Низкий уровень развития береговой инфраструктуры, включая не только непосредственно портовые сооружения, но и железнодорожную сеть, проекты развития которой в настоящее время активно обсуждаются;

- Недостаточный опыт в реализации проектов по освоению морских месторождений в Арктическом регионе;

- Недостаточный уровень развития отечественных технологических решений, способных обеспечить высокую рентабельность проекта при условии обеспечения экологической безопасности [124]. Это создаёт определённую зависимость от санкционных ограничений со стороны стран североатлантического альянса.

Основными направлениями развития Арктического региона являются строительство:

- Морских нефтяных платформ;
- Регазификационных терминалов сжиженного природного газа;
- Морских перегрузочных комплексов природного сжиженного газа;
- Освоение месторождений полезных ископаемых в зонах, находящихся на незначительном удалении от трассы СМП;
- Строительство новых и реконструкция существующих портов для обеспечения активного транспортирования минерально-сырьевых ресурсов;
- Строительство портов-хабов для обеспечения каботажных грузоперевозок;
- Расширение грузового и ледокольного флотов РФ.

Таким образом, анализ текущего и исторического состояния Арктической зоны РФ позволяет сделать вывод о значительном инвестиционном потенциале данного региона и перспективности развития морской логистической сети. В настоящее время уже реализуется ряд крупных инвестиционно-строительных проектов в данном регионе и, по мнению автора, в ближайшее десятилетие будет наблюдаться интенсификация темпов реализации начатых и запуска новых проектов.

## **1.2. Освоение Северного морского пути до настоящего времени**

Северный морской путь в соответствии с [86] – «Исторически сложившаяся национальная единая транспортная коммуникация России в Арктике». Трасса СМП в соответствии с [261] представляет собой: «водное пространство, прилегающее к северному побережью Российской Федерации, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону Российской Федерации и ограниченное с востока линией

разграничения морских пространств с Соединенными Штатами Америки и параллелью мыса Дежнева в Беринговом проливе, с запада меридианом мыса Желания до архипелага Новая Земля, восточной береговой линией архипелага Новая Земля и западными границами проливов Маточкин Шар, Карские Ворота, Югорский Шар» (см. Рисунок 3 [266]).

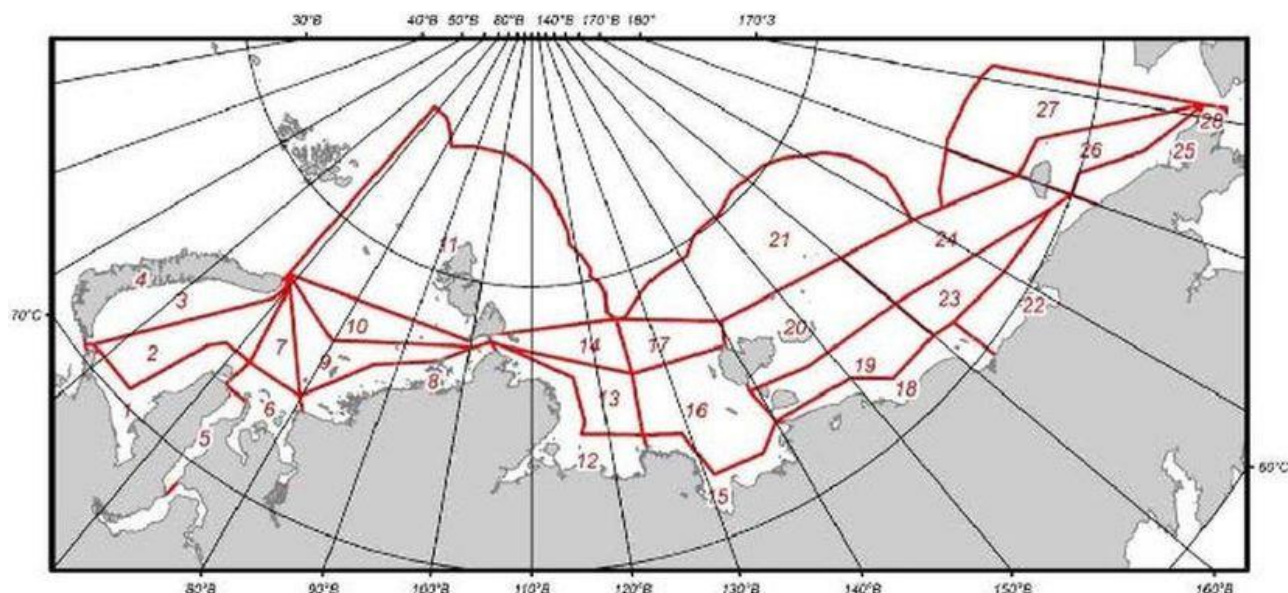


Рисунок 3 – Схема расположения районов акватории Северного морского пути [266].

Однако в общепринятой формулировке, СМП представляет собой морскую трассу, соединяющую через Северный ледовитый океан самый крупный западный порт Арктики – Мурманск и самый южный из крупных восточных портов – Владивосток. В данной работе под СМП будет подразумеваться трасса Мурманск–Владивосток, проходящая через СЛО (см. Рисунок 4 [9]), что совпадает с мнением ряда исследователей [9, 86].



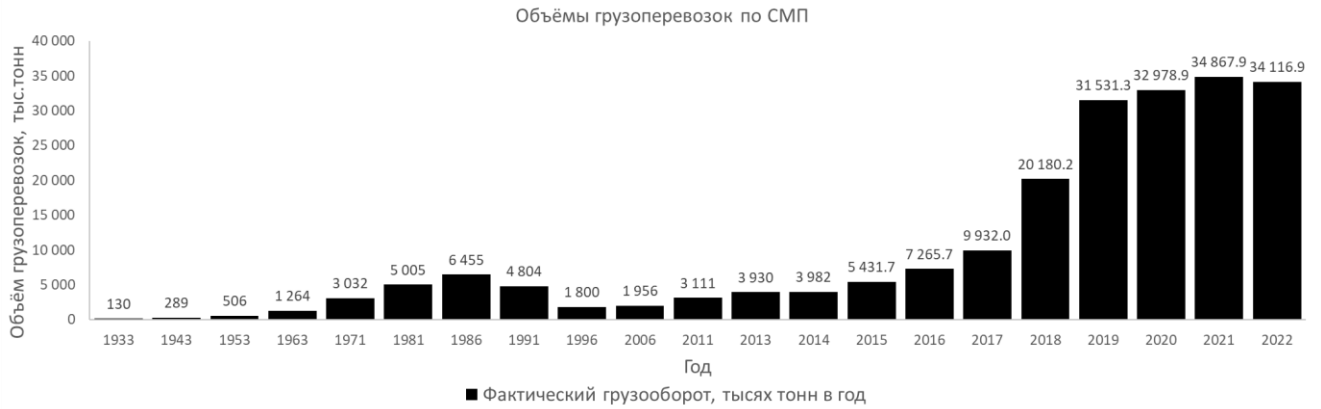


Рисунок 5 – Объёмы грузоперевозок на СМП в период с 1933 по 2022 год.

Реализуемые сейчас проекты призваны на фоне общей динамики к увеличению объёма грузоперевозок изменить существующее распределение грузов в сторону увеличения доли транспортируемого СПГ. По данным Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», в состав которой входит ФГУП "АТОМФЛОТ", с момента начала производства СПГ в Арктическом регионе, его доля в общем объёме грузоперевозок по СМП превысила 55% (см. Рисунок 6 [314]).

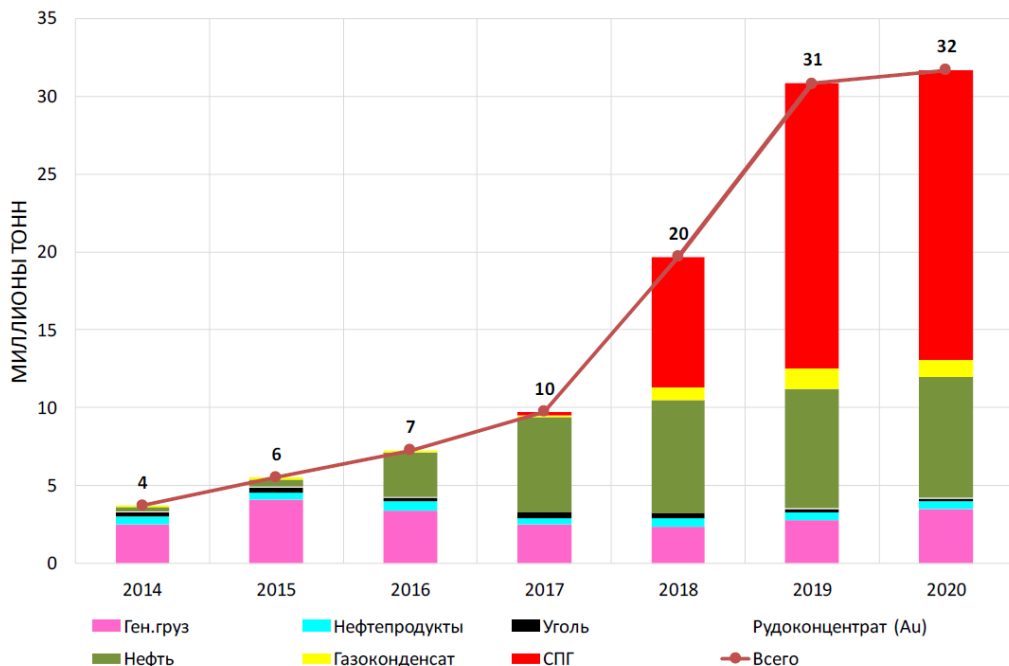


Рисунок 6 – Динамика импортно-экспортных и каботажных перевозок [314].

Такое изменение качественного состава перевозимых грузов вызвано значительной сложностью транспортировки добываемого природного газа. Географическое расположение месторождений в районах вечной мерзлоты, на значительном удалении от основных потребителей добываемого сырья, вынуждает

отказываться от использования широко распространённой системы трубопроводной транспортировки в пользу СПГ.

Сжиженный природный газ – это «криогенная жидкость без цвета и запаха, состоящая в основном из метана, которая может содержать небольшие количества этана, пропана, бутана, азота и других компонентов, присутствующих в природном газе» [258]. «При атмосферном давлении, в зависимости от состава, СПГ кипит при температуре приблизительно минус 160°С. При этой температуре пары СПГ имеют большую плотность, чем окружающий воздух» [258]. «Очень небольшие объемы жидкости превращаются в большие объемы газа. Из одного объема СПГ образуется примерно 600 объемов газа» [258]. Несмотря на столь большое количество трудностей с СПГ, данный продукт имеет высокую экономическую ценность, постоянно растущий спрос и в результате этого считается перспективным энергоносителем. Свойства СПГ несомненно заставляют предъявлять повышенные требования как к объектам, занимающимся его сжижением и регазификацией, так и к судам и портовой инфраструктуре, необходимой для транспортировки СПГ от мест производства к конечному потребителю.

Перспективность развития СМП, как транспортного маршрута, обуславливается в первую очередь сокращением дальности перевозки грузов. Так, для транспортировки грузов из Мурманска во Владивосток при использовании СМП, расстояние, по сравнению с маршрутом через Суэцкий канал, будет более чем в два раза меньшим. Однако, несмотря на значительное сокращение пути при транспортировке грузов из портов Балтийского и Баренцева морей, географическое расположение СМП накладывает существенные ограничения на грузоперевозки. Основными ограничивающими факторами являются требования к ледовому классу судов и относительно небольшой период навигации в настоящее время.

Активное наращивание ледокольного флота в Арктических морях, а также увеличение количества новых судов повышенного ледового класса Arc7 (см. Рисунок 7 [314]), способных осуществлять самостоятельное плавание в зимне-весеннюю навигацию при толщине льда до 1.4 метра, позволяет нивелировать значимость данной проблемы в настоящее время и позволит и в будущем при



условии сохранения динамики увеличения темпов выпуска судов повышенного ледового класса Arc7 и развития судостроительной отрасли РФ в целом. Пока в общем объёме судов, используемых для грузоперевозок в мире, доля судов с необходимым ледовым классом ничтожно мала, для активного осуществления грузоперевозок в Арктике, однако проекты по строительству таких судов начали появляться в РФ, Китае, США, Канаде и ряде других стран.

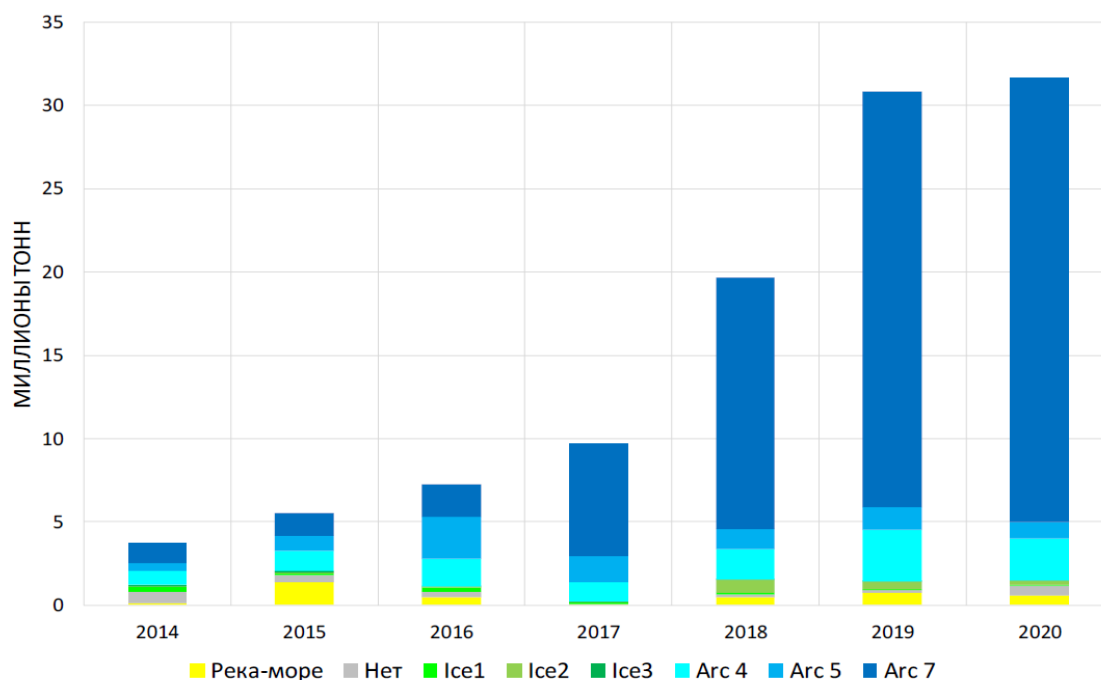


Рисунок 7 – Импортно-экспортные и каботажные перевозки судами различных ледовых классов [314].

При сырьевых грузоперевозках в Арктическом регионе наибольший экономический эффект оказывает применение крупнотоннажных судов (см. Рисунок 8 [314]), что несомненно накладывает ряд требований к портовой инфраструктуре. В первую очередь это касается длины причального фронта, глубин у причала и в навигационном канале, характеристик отбойных и швартовых устройств, а также применяемого технологического оборудования. Современные темпы развития транспортных судов приводят к необходимости проектирования ПГТС с учётом морального устаревания сооружений при увеличении габаритных параметров эксплуатируемых судов.

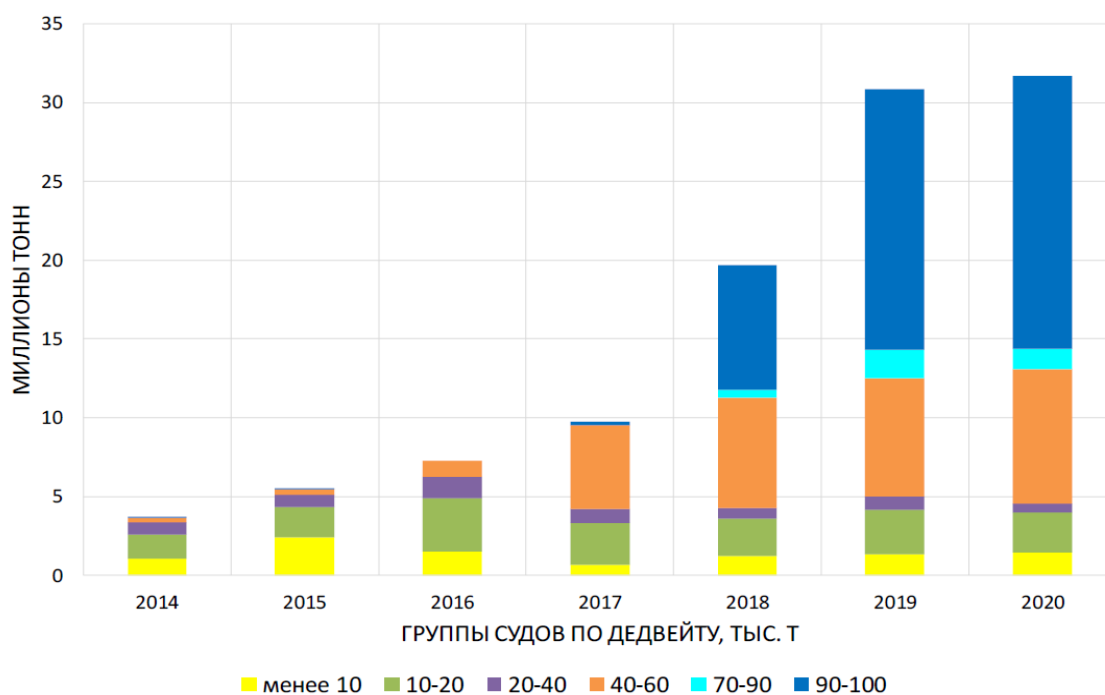


Рисунок 8 – Импортно-экспортные и каботажные перевозки судами различного дедвейта [314].

### 1.3. Аналитический обзор нормативно-технической документации

В соответствии с [255, п.3.10.1] термин «эксплуатация», в контексте ПГТС, трактуется как «Использование сооружения по функциональному назначению с проведением необходимых мероприятий по сохранению состояния конструкций, при которых они способны выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации». Термин «условия эксплуатации» в [255, п.3.10.3] трактуется как «Совокупность факторов, действующих на сооружение при его эксплуатации».

Проектирование ПГТС в условиях изменяющегося климата неизбежно связано с изменением условий внешней среды, в которых осуществляется эксплуатация ПГТС. В связи с этим, изучение изменения условий эксплуатации ПГТС при изменении уровня режима акватории, видится автору актуальной и значимой для народного хозяйства страны научной задачей.

В практике отечественного гидротехнического строительства наиболее активно применяется СП 58.13330 «Гидротехнические сооружения. Основные положения», который, как следует из названия, рассматривает основные требования к проектированию гидротехнических сооружений (ГТС), однако

главный акцент в данном нормативно-техническом документе, сделан на речных ГТС, связанных с проектированием гидроузлов.

В свою очередь морские порты и портовые сооружения являются неотъемлемой частью гидротехнического строительства и наиболее подробно рассматриваются в СП 350.1326000 «Нормы технологического проектирования морских портов». Особый статус морских портов легко объясним: в сравнении с речными гидроузлами задачи проектирования и строительства морских портов существенно отличаются.

В соответствии с [315] порты по расположению можно подразделять на:

- Островные (рейдовые, точечные) порты и причалы, например островные (точечные) нефтяные причалы, соединенные с берегом трубопроводом;
- Морские порты и гавани на открытом побережье;
- Устьевые порты (для приема морских и речных судов);
- Лагунные порты у отлогих берегов;
- Порты и гавани на реках и каналах;
- Порты и гавани на озерах и водохранилищах.

«Под морским портом понимаются его территория и совокупность размещенных в границах этой территории объектов инфраструктуры морского порта, используемых для осуществления деятельности в целях торгового мореплавания, в том числе для оказания услуг» [п.1, ст.9, 261]. Но данное определение отражает лишь одну из задач портов, порты по своему назначению бывают [289]:

- а) Военные
- б) Гражданские:
  - 1) Торговые;
  - 2) Промысловые (преимущественно рыбные);
  - 3) Убежища;
  - 4) Бункеровочные;
  - 5) Прочие.

Так, наиболее исчерпывающее определение гражданского морского порта приведено в п.А3 [275] «морской порт: Совокупность объектов инфраструктуры, расположенных на специально отведенных территории и акватории и предназначенных для обслуживания судов, используемых в целях торгового мореплавания, обслуживания пассажиров, осуществления операций с грузами, в том числе для их перевалки, и других услуг, обычно оказываемых в морском порту, а также взаимодействия с другими видами транспорта».

Однако независимо от назначения, морской порт должен принимать суда и быть защищён от неблагоприятного воздействия волн со стороны океана, которые могут создавать препятствия для организации разгрузочно-погрузочных работ, швартовке судов и т.д. В соответствии с [прил. А, 277] гидротехнические сооружения морского порта, подразделяются на:

а) Основные:

- 1) Берегоукрепительные (внепортовые), регуляционные и оградительные сооружения;
- 2) Судоходные каналы и сооружения на них;
- 3) Молы, волноломы, причалы, набережные, пирсы;
- 4) ГТС судостроительных и судоремонтных предприятий, паромных переправ, кроме отнесенных к второстепенным;

б) Второстепенные:

- 1) Ледозащитные сооружения;
- 2) Отдельно стоящие служебно-вспомогательные причалы;
- 3) Берегоукрепительные сооружения портов.

Таким образом, к рассматриваемым гидротехническим сооружениям, в рамках данной диссертационной работы, посвящённой оценке влияния климатических изменений уровня режима акватории порта на основные ПГТС, будем относить: оградительные сооружения (молы и волноломы) и причальные сооружения, под которыми будут пониматься сооружения, обеспечивающие швартовку судов, т.е. пирсы и причалы (также часто выполняющие функцию набережных).

Проектирование морских портов сопряжено с необходимостью учёта воздействий от наземной (литосфера и реге криосфера), воздушной (атмосфера) и морской (гидросфера) сред, образующих в совокупности естественный режим рассматриваемого для строительства участка побережья. В соответствии с [прил. Г, 277], для ПГТС рассматриваются 13 нагрузок для расчётов основного, и 6 нагрузок для особого сочетания нагрузок, или в соответствии с [255] «факторов, действующих на сооружение при его эксплуатации»:

а) Основное сочетание нагрузок:

- 1) собственный вес конструкции и сооружения;
- 2) вес постоянного технологического оборудования;
- 3) давление воды непосредственно на поверхность сооружения и основания;
- 4) вес грунта и его боковое давление; давление грунта, возникающее вследствие деформации основания и конструкции, вызываемой внешними нагрузками и температурными воздействиями;
- 5) давление отложившихся наносов;
- 6) нагрузки от предварительного напряжения конструкций;
- 7) температурные воздействия строительного и эксплуатационного периодов, определяемые для года со средней амплитудой колебания среднемесячных температур наружного воздуха;
- 8) нагрузки от перегрузочных и транспортных средств и складированных грузов, а также другие нагрузки, связанные с эксплуатацией сооружения;
- 9) нагрузки и воздействия от волн при расчетном шторме;
- 10) нагрузки и воздействия от льда и ледяного покрова при расчетных ледовых условиях;
- 11) нагрузки от судов (вес, навал, швартовные и ударные) и от плавающих тел;
- 12) снеговые и ветровые нагрузки;
- 13) нагрузки от подъемных и других механизмов (мостовых и подвесных кранов и т.п.);

б) Особое сочетание нагрузок:

1) температурные воздействия строительного и эксплуатационного периодов, определяемые для года с наибольшей амплитудой колебания среднемесячных температур наружного воздуха;

2) нагрузки и воздействия от волн для особых условий волнения;

3) нагрузки и воздействия от ледяного покрова при прорыве заторов и зажоров на реках и для особых ледовых условий в акваториях морей, озер и водохранилищ;

4) сейсмические воздействия;

5) динамические нагрузки от взрывов;

б) гидродинамическое и взвешивающее воздействия, обусловленные цунами.

Основным документом, регламентирующим определение нагрузок, свойственных непосредственно портовым гидротехническим сооружениям, является СП 38.13330 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». В дополнение к СП 38.13330 и СП 58.13330, в соответствии с [п.4.2, 277], также применяются технические регламенты и иные нормативно-правовые акты (ГОСТ, РД и т.п.), которые уточняют и дополняют общие положения, приведённые в сводах правил.

Наиболее часто в практике проектирования ПГТС инженерно-геологические условия участка строительства относятся к сложным [п.5.3, 256], что в сочетании с значительным количеством нагрузок, обусловленных влиянием различных природных сред, позволяет сделать вывод о значительной сложности и ответственности процесса проектирования ПГТС даже в обычных условиях строительства, характерных для средних и южных широт РФ.

Однако активное освоение Арктического региона РФ создаёт необходимость проектирования данных сооружений в неблагоприятных условиях СЛО. Необходимость проектирования портов в сложных климатических условиях Арктического региона РФ в совокупности с многообразием воздействий, приходящихся на ПГТС, образуют ситуацию, при которой определение

достоверных данных о регионе строительства особенно значимо для условий работы порта в течение всего жизненного цикла, продолжительность которого для ПГТС может составлять от 50 лет для сооружений III и IV классов ответственности, до 100 лет для сооружений I и II классов ответственности [п.8.21, 277]. Основные портовые гидротехнические сооружения, в соответствии с [п.8.1 и прил. Б, 277], разделяют по классам ответственности (см. Таблица 1 - Таблица 3):

Таблица 1 - Класс ответственности основных гидротехнических сооружений в зависимости от глубины акватории у основания сооружения, м

	I	II	III	IV
1) Морские причальные сооружения основного назначения	Более 25	От 20 до 25	Менее 20	-
2) Оградительные сооружения, в том числе морские внутрипортовые оградительные сооружения (молы, волноломы и дамбы); ледозащитные сооружения	Более 25	От 5 до 25	Менее 5	-

Таблица 2 - Класс ответственности основных гидротехнических сооружений в зависимости от их назначения и условий эксплуатации

1) Морские оградительные сооружения и гидротехнические сооружения морских каналов, оградительные и причальные сооружения морских портов при объеме грузооборота в навигацию:	
- более 6 млн. тонн сухогрузов (более 12 млн. тонн наливных)	I
- от 1,5 до 6 млн. тонн сухогрузов (от 6 до 12 млн. тонн наливных)	II
- менее 1,5 млн. тонн сухогрузов (менее 6 млн. тонн наливных)	III
2) Морские оградительные сооружения и гидротехнические сооружения морских судостроительных и судоремонтных предприятий и баз в зависимости от класса предприятия	II, III
3) Причальные сооружения для отстоя, межрейсового ремонта и снабжения судов	III
4) Причальные сооружения судостроительных и судоремонтных предприятий для судов с водоизмещением порожнем, тыс. т:	
- более 3.5	II
- менее 3.5	III
5) Стапельные и подъемно-спусковые сооружения для судов со спусковой массой, тыс. т:	
- более 30	I
- от 3,5 до 30	II
- менее 3,5	III
6) Стационарные гидротехнические сооружения средств навигационного оборудования	I

Таблица 3 - Класс ответственности гидротехнических сооружений в зависимости от последствий возможных аварий

Класс	Количество постоянно проживающих людей, которые могут пострадать от аварии, чел.	Количество людей, условия жизнедеятельности которых могут быть нарушены при аварии, чел.
I	Более 3000	Более 20000
II	От 500 до 3000	От 2000 до 2000
III	До 500	До 2000
IV	-	-

Таким образом, можно сделать ряд выводов:

- Для портовых гидротехнических сооружений применяются три класса ответственности: I, II и III;

- Для крупных портов (с грузооборотом более 6 млн. тонн сухогрузов (более 12 млн. тонн наливных)) и оградительные, и причальные сооружения будут относиться к I классу ответственности вне зависимости от их геометрических размеров и характеристик грунтов основания;

- Даже в самых малых портах (с грузооборотом менее 1.5 млн. тонн) оградительные сооружения при глубине у основания от 5 метров будут относиться к I или II классу ответственности.

По данным Конференции ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД) расчётный срок службы портовой инфраструктуры составляет от 30 до 50 лет, но зачастую такая инфраструктура как дороги, мосты, причалы и железнодорожные станции эксплуатируются гораздо дольше [248].

В связи с этим можно сделать вывод, что с практической точки зрения, наиболее целесообразным было бы рассмотрение оградительных ПГТС I и II классов ответственности, а причальных ПГТС всех трёх классов ответственности. Для рассмотрения периода жизненного цикла ПГТС предпочтительными, по мнению автора, будут являться временные промежутки 100 и 50 лет, которые соответствуют требованиям действующей нормативно-технической документации по расчётным срокам службы основных гидротехнических сооружений в зависимости от их класса ответственности.



В соответствии с требованиями [п.4.4, 277] «При проектировании гидротехнических сооружений следует предусматривать и обеспечивать надежность и безопасность сооружений на всех стадиях жизненного цикла». В связи с этим стоит подробнее рассмотреть значения терминов «надёжность» и «безопасность». Под термином «надёжность», по мнению автора, стоит понимать обеспечение установленных в [п.8.21, 277] расчётных сроков службы основных гидротехнических сооружений, которые рассматривались ранее и определение [п.3.8, 277]: «Надёжность – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования».

Наиболее полно, раскрывают значения термина «безопасность» [п.3.1.1 255 и п.3.2, 277]: «Безопасность – это свойство гидротехнических сооружений, позволяющее обеспечивать защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов» и [п.4.18, 277], который устанавливает, что «При проектировании гидротехнических сооружений должны быть предусмотрены конструктивно-технологические решения по предотвращению развития возможных опасных повреждений и аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в периоды строительства и эксплуатации».

Совокупный анализ нормативно–технической документации [п.4.4, п. 4.18 и п.8.21, 277] позволяет сделать вывод о том, что если, в связи с каким-либо воздействием, возможны опасные повреждения и/или аварийные ситуации в период строительства или эксплуатации на всей продолжительности расчётного срока службы ПГТС, то при проектировании ПГТС их необходимо учитывать.

В связи с этим разовьём ранее полученный вывод таким образом: если климатические изменения уровня режима акватории порта в течение расчётного срока службы ПГТС могут привести к аварийной ситуации или опасным повреждениям, а равно если климатические изменения уровня режима акватории порта в течение расчётного срока службы ПГТС могут привести к невозможности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, то отсутствие учёта при проектировании климатических изменений

уровенного режима акватории порта приведёт к необеспечению надежности и/или безопасности, а значит будет являться нарушением [п.4.4, 277].

На данное обстоятельство также указывает СП 482.1325800, который устанавливает в [п.5.8.10, 284], что «В состав основных гидрологических наблюдений и гидрометрических работ, выполняемых в процессе инженерно-гидрометеорологических изысканий для изучения гидрологического режима водных объектов, включают:

- наблюдения за уровнем воды;
- наблюдения за волнением (моря, озера, водохранилища, большой реки);
- прибрежные ледовые наблюдения (на море, озере, водохранилище) и дополнительные ледовые наблюдения на акватории моря (профильные, маршрутные, наблюдения за температурой и стаиванием снега и льда, измерение размеров дрейфующего льда, параметров торосов и стамух, исследования физико-механических свойств льда)».

При этом СП 47.13330 устанавливает [п.4.1, 283], что «Инженерные изыскания - обязательная часть градостроительной деятельности, обеспечивающая комплексное изучение природных условий территории (региона, района, площадки, участка, трассы) и факторов техногенного воздействия на территорию объектов капитального строительства для решения следующих задач:

- составления прогноза изменений природных условий».

Требования к составлению прогноза изменения природных условий содержатся в [ст.15, 285]: «Результаты инженерных изысканий должны быть достоверными и достаточными для установления проектных значений параметров и других проектных характеристик здания или сооружения, а также проектируемых мероприятий по обеспечению его безопасности. Расчетные данные в составе результатов инженерных изысканий должны быть обоснованы лицом, выполняющим инженерные изыскания, и содержать прогноз изменения их значений в процессе строительства и эксплуатации здания или сооружения».

Таким образом, в результате проведённого аналитического обзора нормативно-технической документации была показана необходимость

рассмотрения климатических изменений уровня режима акватории порта, с целью выполнения требований СП 58.13330 в части необходимости обеспечения надежности и безопасности сооружений на всех стадиях жизненного цикла, а также 384-ФЗ в части необходимости наличия прогноза изменения результатов инженерных изысканий, достаточных для установления проектных значений параметров и характеристик сооружения.

#### **1.4. Портовые гидротехнические сооружения, применяемые на СМП**

Как уже было отмечено в п.1.3, к основным гидротехническим сооружениям порта в данной работе относятся причальные и оградительные сооружения. Под данными терминами, в соответствии с [п.3.3.1 и п.3.4.1, 255] понимается:

- Оградительное сооружение: Сооружение для защиты акватории порта или береговой полосы от волнения, течений, наносов и льда;
- Причальное сооружение: Устройство или сооружение, предназначенное для стоянки, обработки и обслуживания судов.

В частности, у портов в Арктической зоне РФ есть ряд особенностей. Большинство эксплуатируемых в настоящее время в данном регионе портов и пунктов базирования были построены в XX веке для целей каботажных грузоперевозок или обеспечения военно-морского флота. При этом особенностью реализованных проектов портов являлось строительство их в относительно защищённых условиях с использованием преимущественно особенностей района строительства (естественные защищённые бухты, устьях рек и полузащищённые бухты), благодаря чему не требовалось строительство крупных дорогостоящих оградительных сооружений (см. Рисунок 9 [320]). Порты на открытых побережьях в Арктическом регионе не получили распространения в XX веке.

Так, например: порты и пункты базирования Кольского побережья, такие как Мурманск, Гаджиево, Полярный и Североморск, расположенные в Кольском заливе (см. Рисунок 10) относящиеся к типу фьордовых берегов [73]; пункты базирования Видяево и Западная Лица, находящиеся в глубине губы Ура и губы Западная Лица соответственно; порт Дудинка, расположенный в глубине Енисейского залива на реке Енисей и дополнительно ограждённый островом

Сибирякова; порт Сабетта, расположенный в глубине Обской губы, огражденный полуостровом Явай; порт Тикси, ограждаемый островом Бруснева и полуостровом Быковский; порт Певек, огражденный островом Большой Роутан и т.д.



Рисунок 9 – Пример естественного ограждения причального фронта в Кольском заливе (красным выделены зоны расположения причалов) [320].



Рисунок 10 – Пример естественно огражденной акватории с пирсовой компоновкой причального фронта в Кольском заливе (фотография сделана в декабре 2022 г.).

#### 1.4.1. Оградительные сооружения

К оградительным ПГТС предъявляется ряд требований, включая доступность строительных материалов в районе строительства сооружения; приемлемые волновые условия на защищаемой акватории, которые обеспечивают условия швартовки и погрузочно-разгрузочных работ; ограничение или недопущение

перелива волн через сооружение. Наиболее важным параметром для реализации строительного проекта является экономичность конструкции, которая достигается проведением технико-экономического обоснования конструкции благодаря сравнительному анализу возможных вариантов реализации проекта и достижения наименьших затрат за счёт определения рационального соотношения материалоемкости и трудоёмкости проектируемого сооружения.

Внешние оградительные сооружения могут иметь различные конфигурации в плане, которые проиллюстрированы ниже (Рисунок 11 [82]). В связи с этим возникает множество инженерных задач, важнейшей из которых является обеспечение приемлемого для погрузочно-разгрузочных работ и швартовки волнового режима на защищаемой акватории при наименьших затратах.

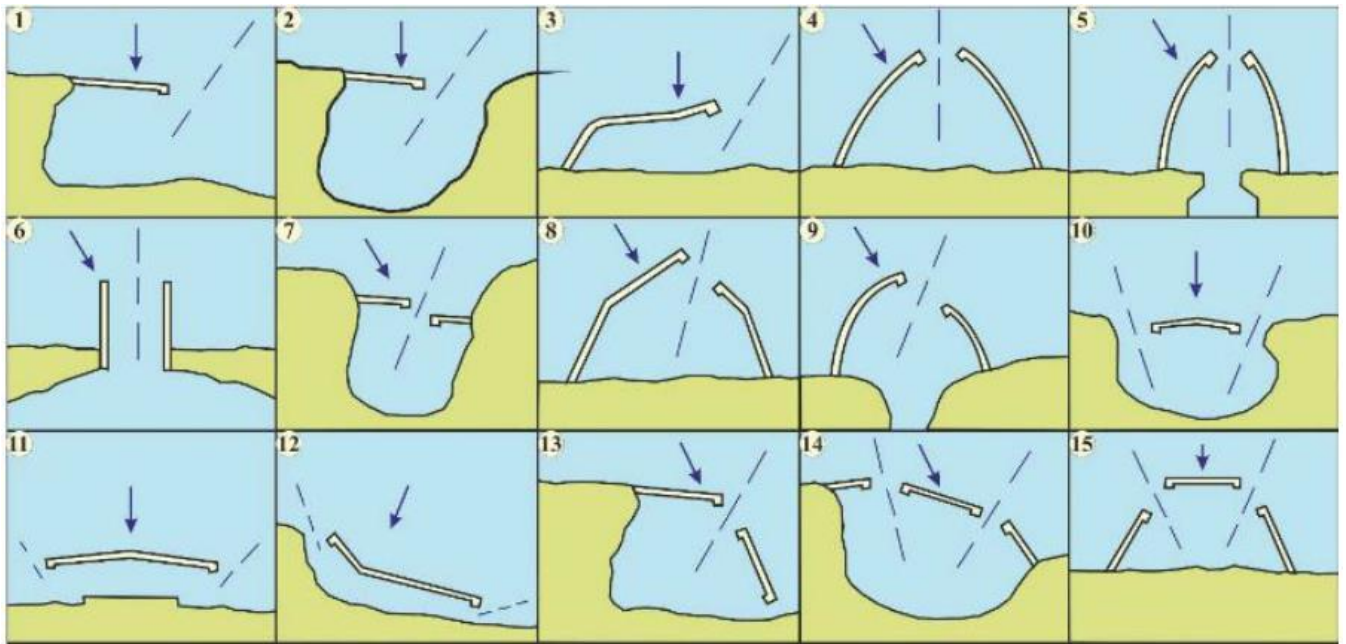


Рисунок 11 – Варианты планового расположения оградительных сооружений [82].

Внешние оградительные ПГТС Арктическом регионе, предназначенные для защиты акватории порта от проникновения со стороны открытого моря волнения, течений, наносов и движущегося льда [31], как правило, подразделяют на несколько категорий, в том числе:

а) По связи с берегом [132]:

- Молы – оградительные ПГТС, примыкающее одним концом к берегу или искусственно созданной территории;

- Волноломы – оградительные ПГТС, не примыкающие к берегу или искусственно созданной территории.

б) По проницаемости для воды:

- Проницаемые, полупроницаемые, сквозные – волноломы облегченной конструкции, имеющие множественные отверстия, щели и т.д., позволяющие свободно или ограниченно проникать волновой энергии через сооружение;

- Не проницаемые – сооружения, представляющие собой сплошную преграду, не позволяющую проникать волновой энергии через сооружение.

в) По форме поперечного сечения (Рисунок 12 [12, 87, 130, 133, 135]):

Вертикального профиля, которые подразделяют на гравитационный и свайный тип, имеющие вертикальную фронтальную часть;

Откосного профиля, которые могут применяться практически в любых условиях, при наличии местного строительного материала необходимых физико-механических свойств;

Смешанного профиля, которые включают в себя откосную нижнюю часть и вертикальную верхнюю, объединяя тем самым предыдущие два типа;

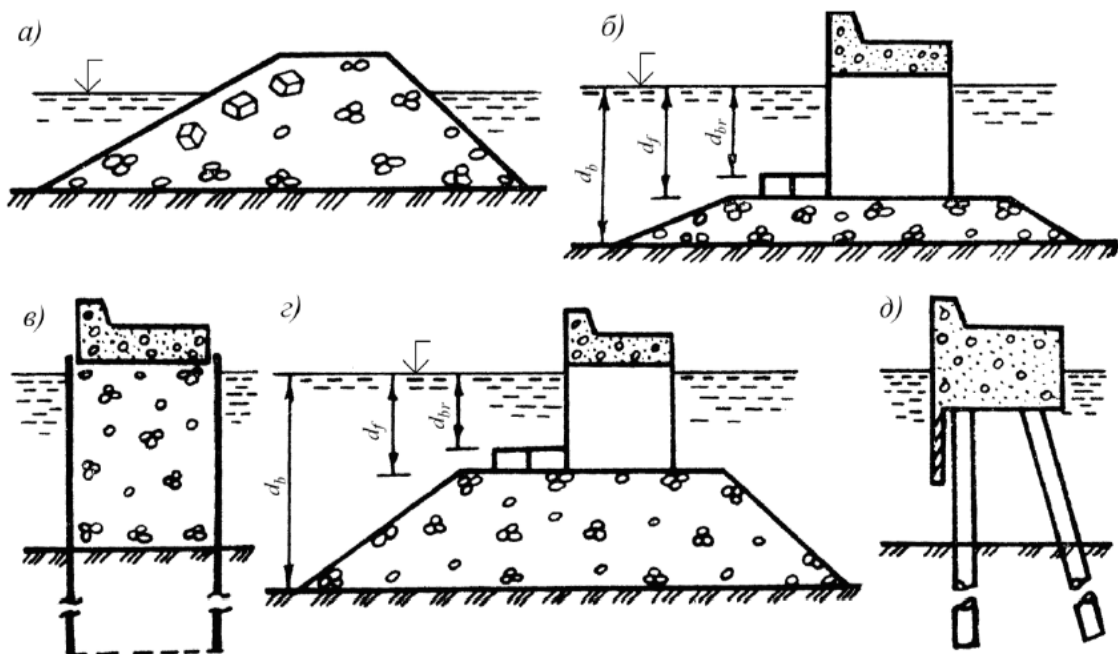


Рисунок 12 – Поперечные профили оградительных сооружений порта: а – откосный; б, в – вертикальный; г – смешанный; д – сквозного типа [12, 87, 130, 133, 135].

Однако каждый из описанных типов ПГТС имеет свои условия применения и особенности. Наибольшее уменьшение волнового давления на фронтальную часть мола достигается при использовании конструкций откосного профиля, однако применение таких конструкций видится не рациональным при больших глубинах в связи с большой потребностью в строительном материале. В практике портового строительства РФ распространение получили преимущественно гравитационные ПГТС в виде молв, представляющие собой непроницаемую преграду. Применение молв, особенно сходящихся молв, позволяет также получить более благоприятные условия волнового режима на защищаемой акватории в связи с возникновением явления дифракции волн при проникновении волнения через ворота порта.

Непроницаемые ПГТС вертикального типа применяются преимущественно при достаточно плотных грунтах, где ограничиваются глубинами воды до 28 метров и высоте расчётной волны однопроцентной обеспеченности до 7 метров и практически не имеют ограничений по условиям применения на скальных основаниях.

В АЗРФ в связи с наличием существенных ледовых нагрузок сооружения гравитационного типа видятся наиболее предпочтительными, а условия достаточно распространённых приглубых побережий [302] зачастую дополнительно сужают выбор типа конструкции оградительных сооружений до вертикальных или смешанного типа.

#### **1.4.2. Причальные сооружения**

Плановое расположение причального фронта напрямую зависит от условий района строительства, таких как характеристики грунтов основания (песчаные, скалистые и т.д.), уклон дна (приглубые или отмельные), расположение на открытом побережье или в бухте и т.д. Причальный фронт может выполняться из различных конструкций, однако в условиях восприятия ледовых нагрузок рекомендуется использовать ячеистые конструкции или заанкеренные больверки (предпочтительны заанкеренный больверк из металлического шпунта, экранированный больверк или больверк – эстакада) [272].

По вариантам плановой компоновки причальных сооружений выделяют варианты расположения [22, 31, 82, 136, 137, 138, 275]:

- Фронтальное;
- Пирсовое;
- Ковшовое;
- Вдоль оградительных сооружений.

Фронтальное расположение причалов – в линию вдоль берега, является наиболее простым и удобным для подхода судов и устройства береговых подъездных путей для автомобильного и железнодорожного транспорта. В отечественном портовом строительстве можно упомянуть порты Архангельск, Петропавловск – Камчатский, Владивосток и т.д. Данный вариант компоновки причального фронта требует значительного развития причального фронта по длине, что неизбежно связано с необходимостью удлинения оградительных сооружений, а следовательно, с увеличением их стоимости.

В связи с этим, при необходимости защиты акватории оградительными сооружениями, такой вариант компоновки является не рациональным. Наиболее часто фронтальное расположение применяется в портах, расположенных в бухтах с естественной защищённостью или в малых портах, в которых фронтальное расположение причалов не вызовет значительного рассредоточения районов порта и необходимости существенного удлинения оградительных сооружений.

Пирсовая компоновка – с двух сторон на выступающих в акваторию сооружениях (пирсах) является наиболее удобным и широко распространённым в практике отечественного портового строительства. Как правило пирсы устраиваются группами в виде «гребёнки», такая конфигурация причального фронта обеспечивает значительное увеличение концентрации причалов в относительно небольшом участке акватории, благодаря чему существенно сокращается протяжённость оградительных сооружений.

В условиях Арктического региона зачастую приходится проектировать порты в достаточно стеснённых условиях естественно защищённых бухт, что накладывает ограничения на плановые габариты порта и приводит к



необходимости использовать пирсовую компоновку причалов. Примерами портов с данным видом расположения причалов могут служить Новороссийск, Туапсе, Керчь, Мурманск, Североморск, Корсаков и т.д.

Ковшовое или бассейновое расположение порта характерно для устьевых участков рек или безливных морей, особенно с отмелыми побережьями. Выемка грунта в отмелой части с последующим наращиванием отметок берегов до незатопляемых отметок позволяет создавать удобные бассейны, которые могут образовывать систему, состоящую из множества отдельных бассейнов, соединяемых каналами. Такие бассейны могут располагаться как нормально по отношению к береговой линии, так и под углом около 60 – 70 градусов, облегчая тем самым условия маневрирования судов.

Примерами проектирования портов ковшового типа могут служить порты Поти, Гдыня и Ильичевск. Однако сдерживающим фактором для широкого применения ковшовой компоновки является невозможность использования такого типа расположения причального фронта в существующих портах с существенной застроенностью примыкающих территорий. В связи с этим и из-за географических и топографических особенностей морей Арктического и Дальневосточного регионов страны, которые представлены преимущественно ливными морями, данный вид компоновки причального фронта не получил широкого распространения.

#### **1.4.3. Совмещённые оградительные и причальные сооружения**

Предыдущие три типа компоновки причального фронта подразумевают разделение причальных и оградительных сооружений. Однако зачастую в условиях стеснённых акваторий или некрупных портов может быть целесообразным размещение причалов с внутренней стороны оградительных сооружений (см. Рисунок 13 [331]). При такой компоновке причальные сооружения находятся в защищённой от волнения акватории вдали от главного луча волнения. Однако дополнительно к основному ограждающему сооружению может применяться защита причального фронта от дифрагированных волн с помощью устройства шпор, перпендикулярных молу.



Рисунок 13 – MS Queen Elizabeth в Ялтинском порту и совмещённое оградительное и причальное ПГТС [331].

Использование молов – причалов получило широкое распространение, однако, данные дополнительные причалы использовались преимущественно для портового флота. Ввиду экономических ограничений по ширине такого сооружения, составляющей, как правило, не более 40 метров, становится невозможным использование причалов – молов при необходимости организации складов или подвода железнодорожных путей и ограничивает применение таких причалов для целей осуществления пассажирских операций или перегрузки наливных грузов.

Как отмечается в [138]: «В результате действия на сооружение значительной горизонтальной нагрузки при сравнительно небольшой ширине сооружения напряжения под его подошвой распределяются неравномерно, и максимальные их значения достигают значительной величины». В связи с этим, использование конструкций с увеличением их ширины может быть оправдано для достижения равномерности распределения усилий под подошвой. Однако искусственное увеличение ширины оградительного сооружения зачастую может быть не экономичным решением, в то же время, при объединении в оградительном сооружении ещё и причального сооружения, данное конструктивное решение

становится экономически целесообразным и компоновочно удобным, поэтому часто применяется на практике.

Благодаря вышеперечисленными положительными свойствами объединения глубоководных оградительных и причальных сооружений, такой тип конструкций активно применяется в практике отечественного портового строительства. В XX веке конструкции совмещённого типа использовались в множестве проектов, таких как Ялтинский порт, Генуэзский порт, Марсельский порт [137]. Из наиболее показательных примеров современного строительства, можно отметить совмещённые причалы-молы: для ПАТЭС в порту Певек (см. Рисунок 14 [304]), причал №1 в порту Ванино, ВМБ ВМФ РФ в порту Новороссийск, проектируемые сооружения в портах Эльга и Корсаков и т.д.



Рисунок 14 – ПАТЭС «Академик Ломоносов» в порту Певек и причал – мол вертикального профиля [304].

Использование гидротехнических портовых сооружений, объединяющих в себе функции оградительного и причального сооружений экономически целесообразно и реализуемо на практике, однако накладывает дополнительные эксплуатационные ограничения. Практика мирового портового гидротехнического строительства имеет немало примеров организации значительных (более 100 м) причалов – молов, как например порт Коломбо, Лонг – Бич, Сочи, Новороссийск и т.д. Ввиду недопустимости воздействия на причал высоких волновых всплесков или переплеска (перелива, заплеска) причала в условиях волнения, организация причалов непосредственно за оградительными сооружениями вынуждает

предъявлять повышенные требования к защитным параметрам, а в частности необходимость увеличения возвышения парапета, который в ряде случаев может достигать величин 5 и более метров.

### **1.5. Выводы по первой главе**

Существенно приращение шельфовых территорий в СЛО создаёт возможности для активного освоения ресурсного потенциала данного региона. В связи с географической удалённостью и суровыми климатическими условиями, доставка грузов и людей возможна только морским и авиационным путем. При этом водный транспорт является наиболее экономически эффективным видом транспорта и единственным способным обеспечить транспортирование сырья от мест его добычи до существующей транспортной железнодорожной или трубопроводной инфраструктуры.

В связи с этим развитие существующих и строительство новых портов, отвечающих потребностям в увеличении грузооборота, является значимой задачей в рамках освоения ресурсного потенциала шельфа СЛО. Порты в Арктическом и Дальневосточном регионах представлены преимущественно на приглубых побережьях (Находка, Ванино и пр.) и в устьях рек (Архангельск, Дудинка и пр.). Строительство портов в условиях приглубых побережий зачастую связано с необходимостью строительства дорогостоящих оградительных сооружений и использования пирсовой компоновки причального фронта. Однако стоит отметить, что при достаточной естественной защищённости акватории целесообразным может быть расположение причалов фронтально, например в портах Находка и Ванино.

Рассмотрение крупных портов в Арктической зоне РФ показало, что при проектировании портов в рассматриваемом регионе в XX веке сложилась практика компоновки причальных и оградительных сооружений или с совмещением этих функций в причалах – молах, или чаще 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 фронтальной.

Высокий класс ответственности возводимых ГТС, а также дополнительное влияние сурового климата Арктики и важность обеспечения бесперебойной эксплуатации в сложных климатических условиях, обуславливают высокую стоимость строительства и реконструкции таких объектов. В условиях больших капитальных вложений особенно важно проводить научные исследования, обосновывающие наиболее экономически целесообразную конструктивную схему и компоновку основных объектов ПГТС. При реализации проектов морских ПГТС, прогнозируемый период эксплуатации которых составляет 50 или 100 лет [277], необходимо учитывать долгосрочные изменения климата, которые непосредственно в Арктическом регионе оказывают наибольшее влияние, нежели в других регионах планеты. В связи с этим оценка воздействия морского волнения на ПГТС, имеющая огромное значение для проектирования, необходима не только для наблюдаемых условий климата, но и для прогнозируемых.

Обзор нормативной документации позволил сделать вывод о необходимости учёта климатических изменений при проектировании ПГТС с целью выполнения требований в части необходимости обеспечения надёжности и безопасности сооружений на всех стадиях жизненного цикла. Данное положение не противоречит позиции СП 287.1325800, которая устанавливает: «Нагрузки и воздействия следует принимать в наиболее неблагоприятных, но реальных для рассматриваемого случая сочетаниях» [п.8.2, 280].

В связи со всем вышеизложенным, на основании проведённого аналитического обзора морского портового строительства в РФ, рассмотрения классификаций ПГТС и условий их эксплуатации, в данной работе целесообразным видится проведение оценки влияния климатических изменений уровня режима акватории на ПГТС вертикального профиля, которые включают оградительные сооружения с причальным фронтом на тыловой стороне, воспринимающие значительные волновые нагрузки от ветрового волнения со стороны открытого моря и причальные сооружения, воспринимающие незначительное волновое воздействие от волн, формирующихся в условиях защищённой акватории или проникающих через входные ворота порта.

## ГЛАВА 2. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА. ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ И АДАПТАЦИЯ

Оценка изменений климата в условиях Арктического региона представляется значимой научной задачей не только для научного сообщества РФ, но и для таких стран, как США, Канада, Великобритания, Швеция, Норвегия, Финляндия, Китай и т.д. Работ, непосредственно оценивающих происходящие изменения с точки зрения гидротехнических сооружений в Российской Федерации, у зарубежных авторов довольно мало, хотя и присутствует ряд работ, отражающих динамику изменения ветрового, волнового и ледового режимов Северного Ледовитого океана [181, 213, 221, 233, 251]. В связи с этим, моделирование климата в данной работе будет рассмотрено более подробно с целью освещения прогнозируемых климатических изменений на трассе Северного морского пути.

Термин «климат» рассматривается в настоящей диссертации в формулировке, ставшей классической для Российского научного сообщества [67], автором которой является академик РАН А.С. Монин [119]: «Климатом называется статистический ансамбль состояний, проходимых системой атмосфера-океан-суша за периоды времени в несколько десятилетий».

### 2.1. Причины изменений климата

В настоящее время на территории РФ наблюдаются локальные проявления глобального процесса изменения климата. Явление глобального потепления подвергается систематическим исследованиям начиная со второй половины XX века. В настоящее время причины данного явления ещё изучаются, но уже доказано по стандарту 5 сигм [236] значительное антропогенное воздействие на изменения климата, помимо естественной изменчивости. Дискуссия продолжается относительно соотношения доли влияния естественных факторов и антропогенных. Попытка учёта результатов прогнозирования изменений климата связана со значительными сложностями. В настоящее время принято говорить о комплексной оценке изменений климата, которая учитывает совокупное влияние

естественных и антропогенных воздействий [122, 123], хотя, есть и альтернативные мнения [154], которые, однако, как правило высказываются учёными не из области климатологии. Представленные в данном разделе результаты частично или в изменённом виде содержатся в статьях автора и научного руководителя [51, 187].

### 2.1.1. Естественные причины

К естественным причинам изменения климата относится достаточно большой спектр факторов, основными из которых являются:

- Изменение оси вращения земного шара ( $T \approx 26\ 000$  лет);
- Изменение наклона оси вращения земли относительно плоскости её движения вокруг Солнца или плоскости эклиптики ( $T \approx 41\ 000$  лет);
- Изменение формы орбиты Земли или колебание эксцентриситета ( $T \approx 100\ 000$  лет) (см. Рисунок 15 [13]);

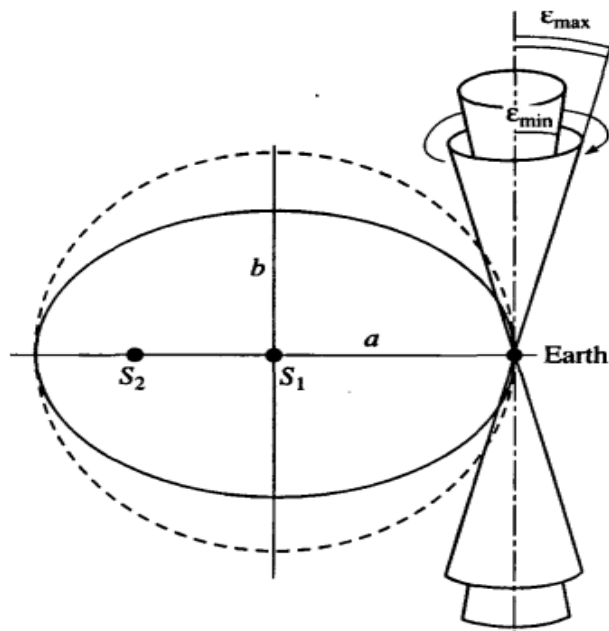


Рисунок 15 – Орбитальные элементы Земли, характеризующие изменения ее орбиты и направления земной оси в пространстве [13].

- Светимость солнца [54, 120]. Например, цикл Швабе-Вольфа (см. Рисунок 16 [330]), несмотря на небольшой период, тоже оказывает ощутимое воздействие ( $T \approx 11$  лет);

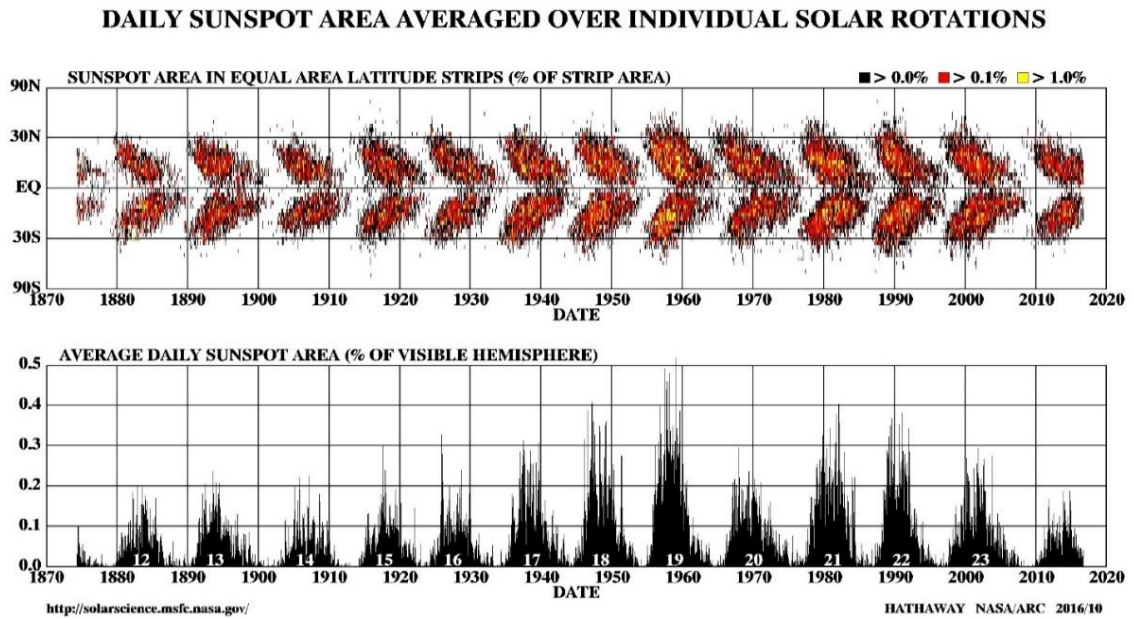


Рисунок 16 – Суточная площадь солнечных пятен, усредненная по отдельным солнечным циклам [330].

- Воздействие вулканов, т.е. увеличение содержания вулканического аэрозоля [55], преимущественно диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), в стратосфере (см. Рисунок 17 [326]). При небольших, но регулярных выбросах возникает совокупное влияние множества некрупных извержений, в результате которых происходит воздействие на климатическую систему. Тяжело прогнозируемыми являются крупные извержения в субдукционных зонах планеты, которые способны изменять климат на периоды в несколько лет;

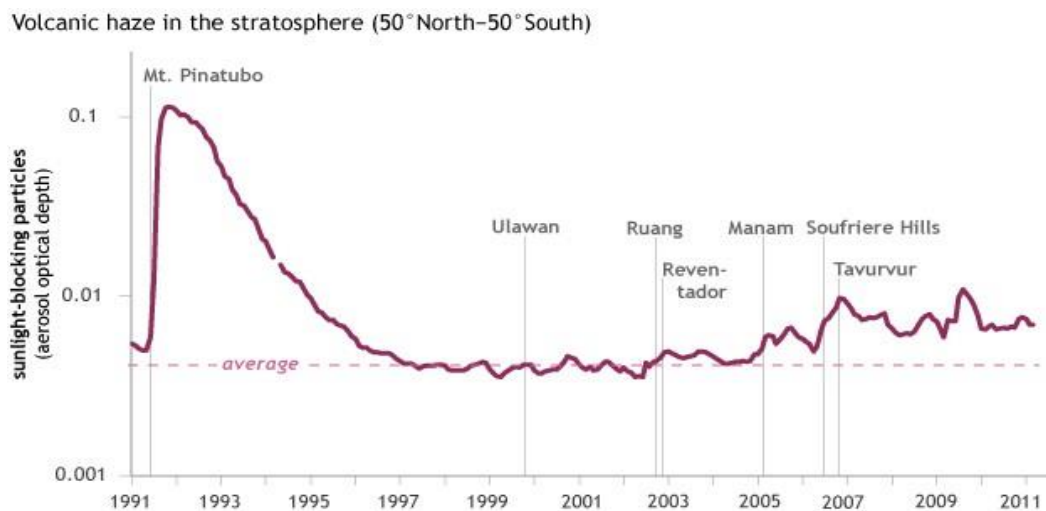


Рисунок 17 – Содержание вулканического аэрозоля в стратосфере за период с 1991 по 2011 года. График подготовлен NOAA на основе данных SAGE, GOMOS и CALIPSO, предоставленных Жан-Полем Вернье [326].



- Атмосферные колебания, такие как Эль-Ниньо, Арктическое и Антарктическое колебания, Атлантическая мультидекадная осцилляция, Североатлантическое колебание, циркуляции Вангейгейма — Гирса и т.д. [98, 148];

- Прочие факторы.

Долгопериодные колебания климата оказывают воздействие на условия эксплуатации любых сооружений, однако вследствие большой продолжительности данных процессов, их влияние в рамках жизненного цикла сооружений не учитывается при проектировании портовых объектов. Когда речь идёт о жизненном цикле гидротехнических сооружений, подразумевается период от 50 до 100 лет [277], что не исключает и более длительной эксплуатации при проведении соответствующих инженерных работ по модернизации. При такой «небольшой» продолжительности жизненного цикла сооружений изменения климата, связанные с естественными причинами, не успевают оказать сколь-нибудь значимое воздействие, или наступление таких событий имеет слишком большую степень неопределённости, выходящую за рамки требований нормативной документации.

### **2.1.2. Антропогенные причины**

Антропогенные факторы включают в себя всё многообразие хозяйственной деятельности человека: сжигание ископаемого топлива, производство цемента, металлургию, животноводство, а также вырубку лесов, осушение болот, рост городов и т.д. [218]. Сферы хозяйственной деятельности человека по отдельности могут не оказывать существенного влияния, однако суммарное воздействие в виде значительных выбросов парниковых газов, уменьшения площадей лесов, а также подчас непоследовательная климатическая политика делают совокупное антропогенное воздействие значимым для климата планеты.

На протяжении последних нескольких веков развитие промышленности не только в РФ, но и во всём мире испытывает значительный рост, что привело к усилению антропогенного воздействия, сделав его по степени влияния в краткосрочном периоде сопоставимым с естественными факторами. Воплотились в жизнь слова В.И. Вернадского «Человечество, взятое в целом, становится мощной

геологической силой» [24]. Основным негативным последствием антропогенного воздействия является увеличение выбросов твёрдых аэрозольных частиц и сажи, а также увеличение концентрации в атмосфере парниковых газов [243], таких как водяной пар, углекислый газ, метан и другие (Рисунок 18 а) [338] и б) [339]).

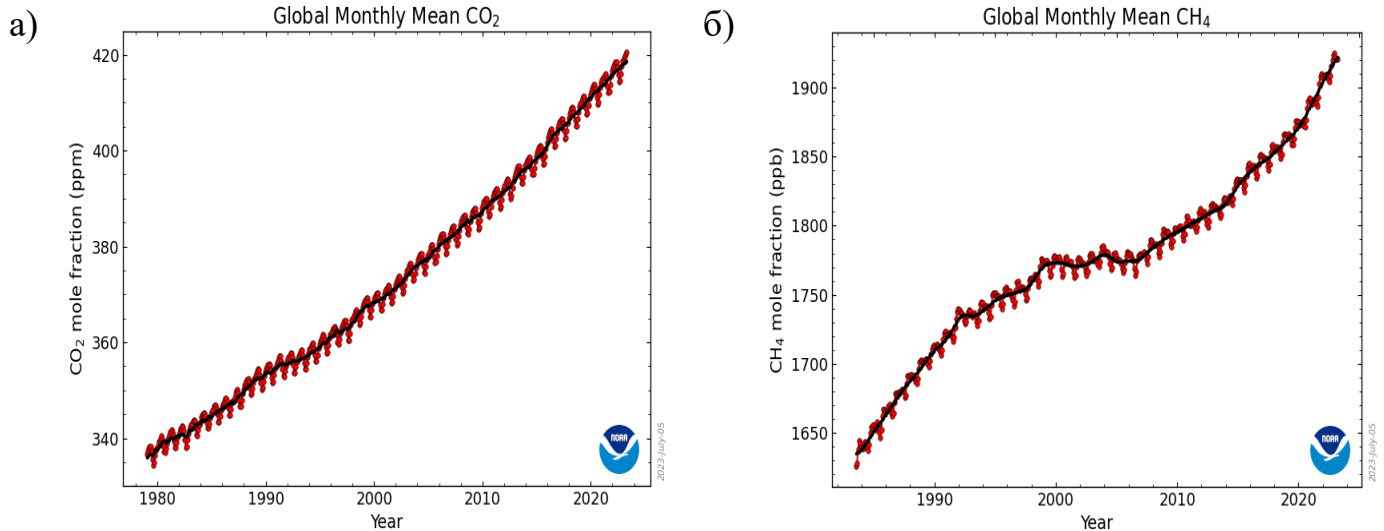


Рисунок 18 – а) Среднемесячные значения двуокиси углерода, измеренные в обсерватории Мауна-Лоа, Гавайи в период с 1983 по 2022 год [338]; б) Глобально усредненное, среднемесячное содержание метана в атмосфере, определенное по участкам морской поверхности в период с 1983 по 2022 год [339].

Значительная интенсивность антропогенного воздействия создала ситуацию, при которой климатические изменения ощущаются даже на масштабах десятилетий, не говоря уже о столетнем периоде жизненного цикла гидротехнического сооружения. При этом примечательным является не столько факт резкого роста концентрации данных газов в атмосфере, хотя он и является весьма существенным, сколько то, что таких концентраций в отношении, например, двуокиси углерода не наблюдалось как минимум последние 800 тыс. лет (Рисунок 19 [337]), за которые молярная доля не превышала значение в 320 частей на миллион, а по состоянию на 2023 год это значение превысило отметку в 420 частей на миллион [338], т.е. стало рекордным за последние несколько сотен тысяч лет.

Наряду с данными, представленными выше, автором работы были построены аналогичные графики используя данные [210, 211, 212, 231, 322], полученные на российской станции Восток в Восточной Антарктиде в январе 1998 года благодаря

совместному проекту по бурению льда между Российской Федерацией, США и Францией. В результате работ на станции Восток был получен самый глубокий из когда-либо извлеченных ледяных кернов, глубина которого достигла 3623 м. Обработав полученные результаты по 3310 значениям был построен график изменения содержания углекислого газа в атмосфере и её температуры за последние 420 тысяч лет (см. Рисунок 20).

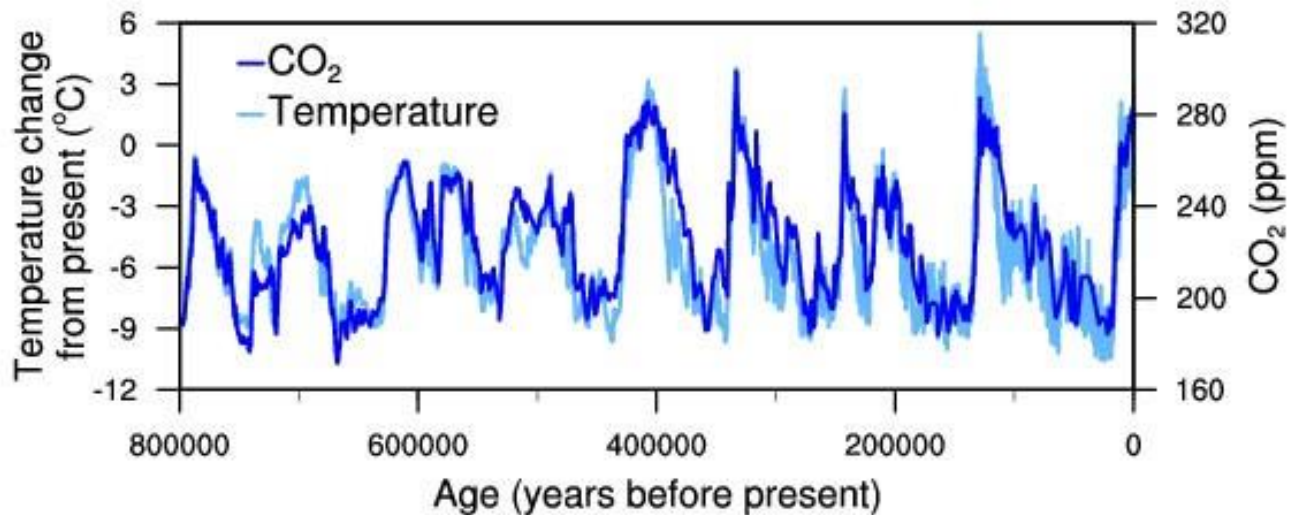


Рисунок 19 – Изменение температуры (голубой) и изменение углекислого газа (темно-синий), измеренные по ледяному керну EPICA Dome C в Антарктиде [337].

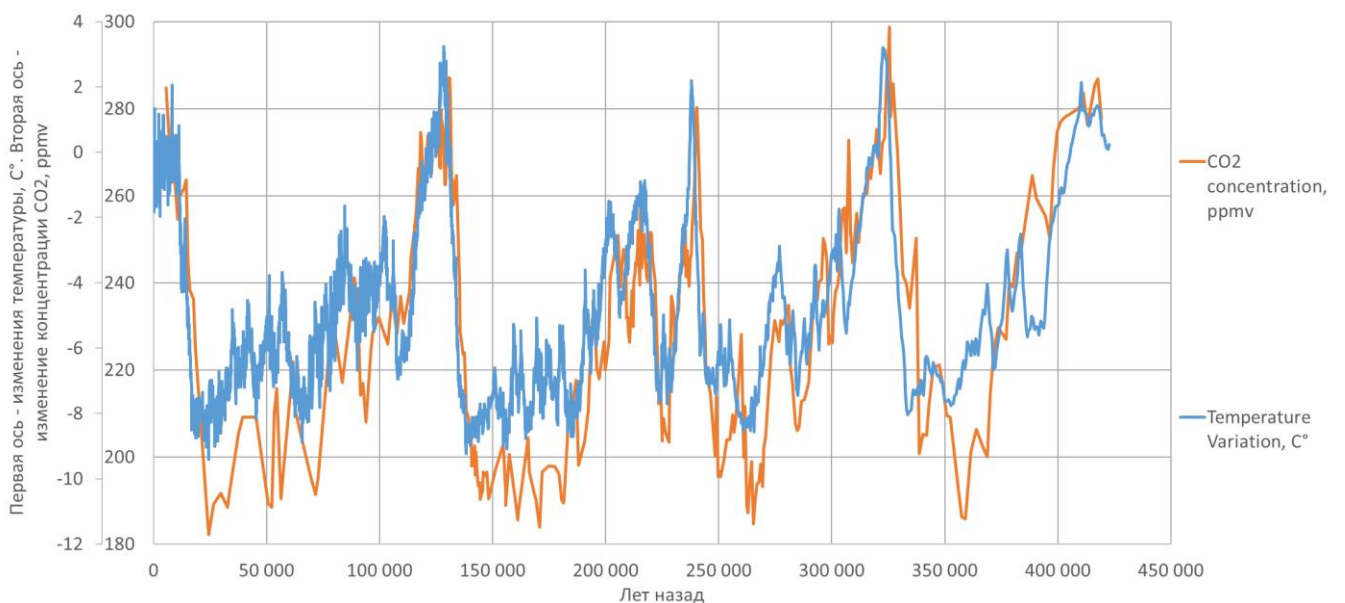


Рисунок 20 – Изменения температуры и углекислого газа, измеренные по ледяному керну со станции Восток в Антарктиде.

Показанные выше зависимости иллюстрируют, что изменения состава атмосферы происходили на протяжении последних сотен тысяч лет и этот процесс является абсолютно естественным. Однако наблюдаемые в настоящее время изменения носят характер не естественных, а вызванных антропогенным воздействием [190], в пользу чего свидетельствует не сам факт наличия изменений, а тот темп, с которым эти изменения происходят. Рисунок 21 [249] показывает изменение глобальной аномалии температуры атмосферы, где за ноль принята температура на примерно 300 год н.э., аналогичные результаты показывает сравнение моделей, выполненное в [229].

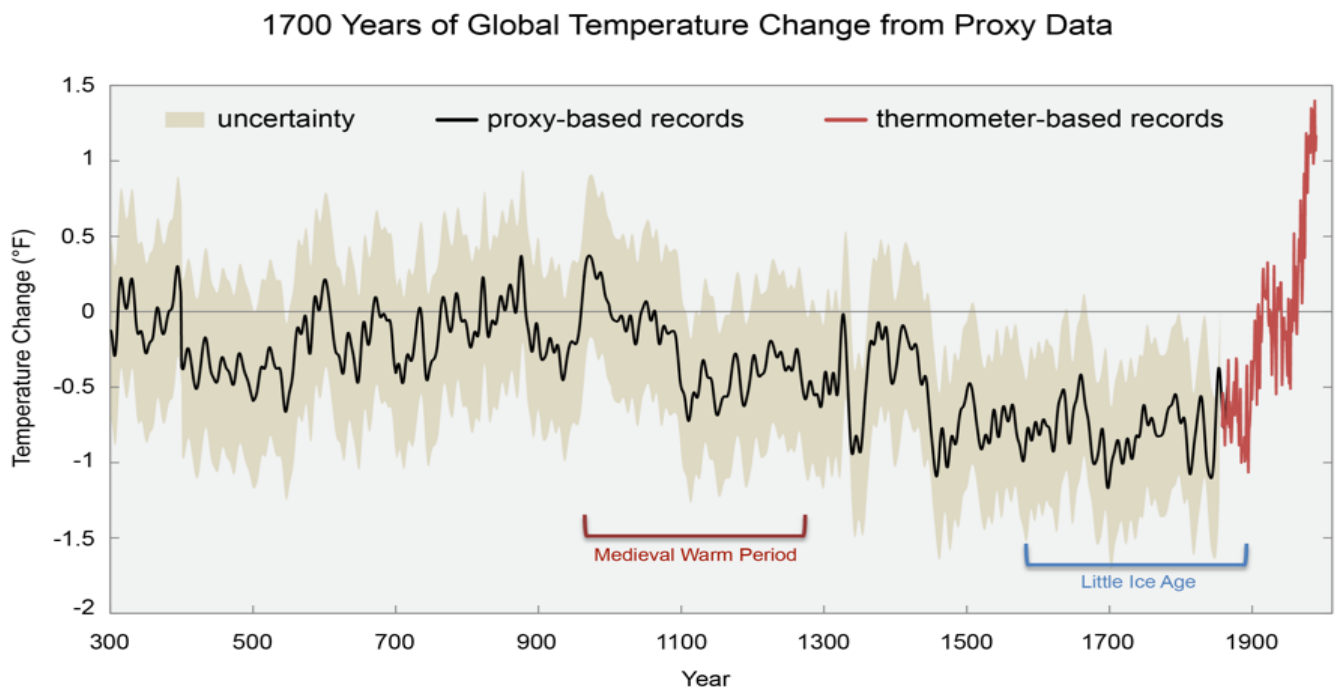


Рисунок 21 – Изменение аномалии приземной температуры атмосферы с 300 по 2017 год, так называемая «Хоккейная клюшка» [249].

Наблюдавшиеся ранее процессы изменения температуры происходили существенно медленнее наблюдаемых в настоящее время и были обусловлены преимущественно орбитальными параметрами планеты. Рисунок 22 ( а) [209] и б) [219]) показывает данные, которые свидетельствуют о наличии существенного влияния антропогенной деятельности на атмосферу планеты. Моделирования, проведённые только с учётом естественных факторов, а также с учётом совместного воздействия естественных и антропогенных факторов, показали, что наблюдаемые изменения в климатической системе не могут быть объяснены

одними естественными причинами, а лишь совокупным воздействием естественных и антропогенных факторов (см. Рисунок 23[209]).

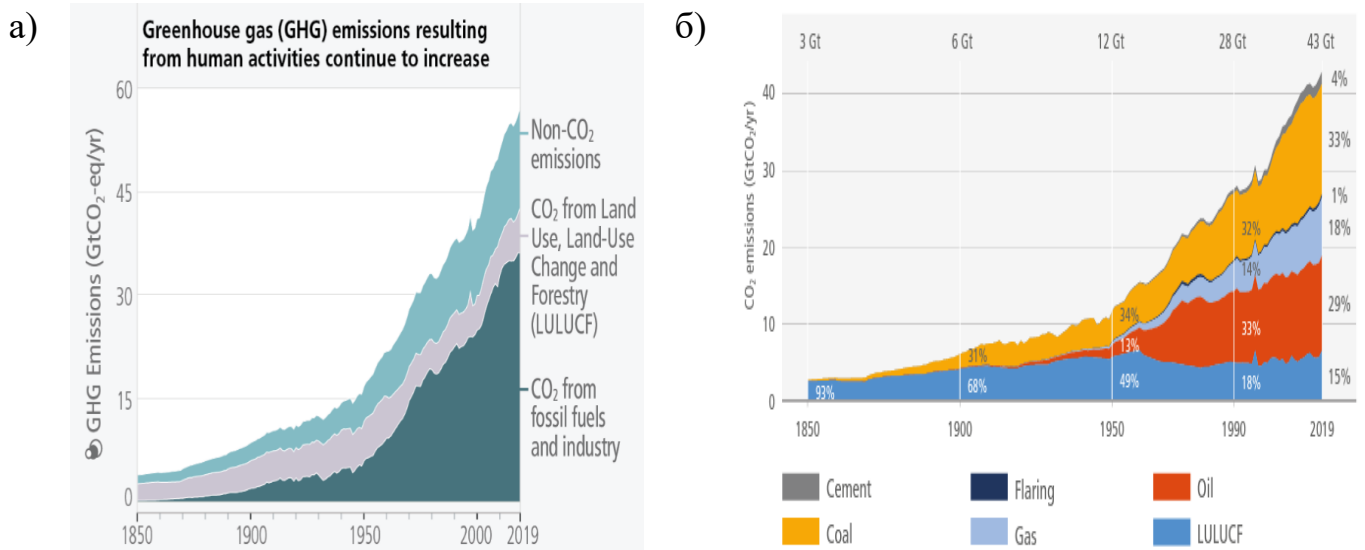


Рисунок 22 – а) Изменение антропогенных эмиссий парниковых газов с 1850 по 2019 год [209]; б) Долгосрочная тенденция источников антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> с 1850 по 2019 год [219].

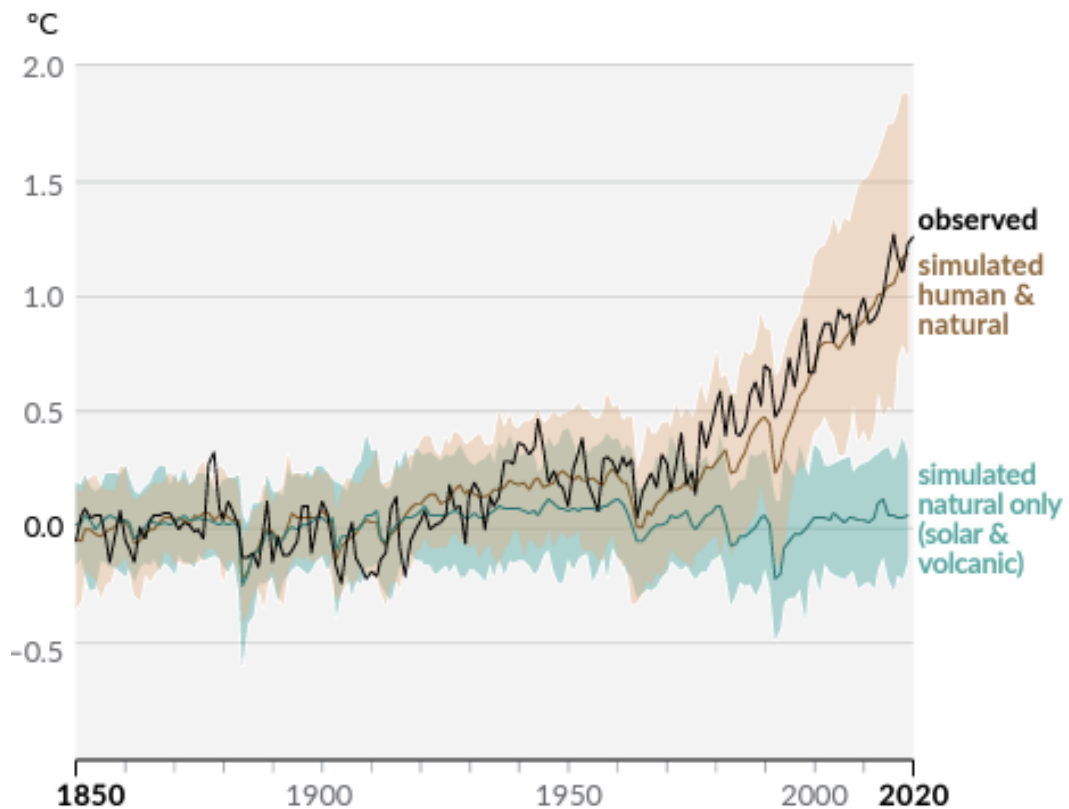


Рисунок 23 – Изменение глобальной температуры поверхности (среднегодовое значение), **наблюдаемое** и смоделированное с использованием **антропогенных и природных** факторов и только **природных** факторов (оба 1850-2020 год) [209].

Вывод об антропогенном вкладе в наблюдаемые изменения климата подтверждается и позицией Росгидромета РФ [29]: «Согласованность наблюдаемых и расчетных изменений во всей климатической системе, включая глобальные и региональные значения температуры, температуру тропосферы и стратосферы, глобальный влагооборот, глобальный баланс энергии, изменения в криосфере и Мировом океане, указывает на то, что наблюдаемые изменения климата вызваны в первую очередь увеличением концентраций атмосферных парниковых газов вследствие хозяйственной деятельности человека. При этом амплитуда и пространственная структура наблюдаемого потепления в разных компонентах хорошо согласуются с ожидаемым по модельным расчетам откликом климатической системы на антропогенные и естественные внешние воздействия».

Закончить этот раздел автор хочет двумя цитатами из статьи лауреата Нобелевской премии мира, академика РАН Ю.А. Израэля [66]: 1) «Г-н Пачаури выделил основные тезисы выступления Генерального Секретаря ООН и представил подтверждающие выводы из четверного доклада: “Время сомнений миновало. МГЭИК представлены несомненные свидетельства потепления в климатической системе и их связи с человеческой деятельностью”»; 2) В статье академика Израэля приведён ряд вопросов, на один из которых частично даёт ответ исследование, представленное в данной работе: «Как подготовить человечество к угрозам, связанным с ростом уровня моря и изменением природной среды?»».

### **2.1.3. Обратные связи**

Обратные связи, являются откликом климатической системы на внешнее изменяющее воздействие, такое, например, как рост концентрации термодинамически активных примесей (а именно парниковых газов) в атмосфере. Различают положительные и отрицательные обратные связи, являющиеся внутренними процессами климатической системы, которые в ответ на внешнее воздействие соответственно усиливают или ослабляют её [150]. Примером положительных обратных связей может служить влияние, оказываемое повышением температуры атмосферы, которое приводит к:

- Более интенсивному выделению водяного пара в атмосферу. Поскольку водяной пар является одним из парниковых газов, то это приводит к ещё большему росту температуры;

- Сокращению площади морских [64, 65, 118, 127, 142] и наземных ледников и, следовательно, снижению альбедо данных поверхностей (см. Рисунок 24 [329]). Снижение альбедо поверхности приводит к интенсификации нагрева атмосферы;

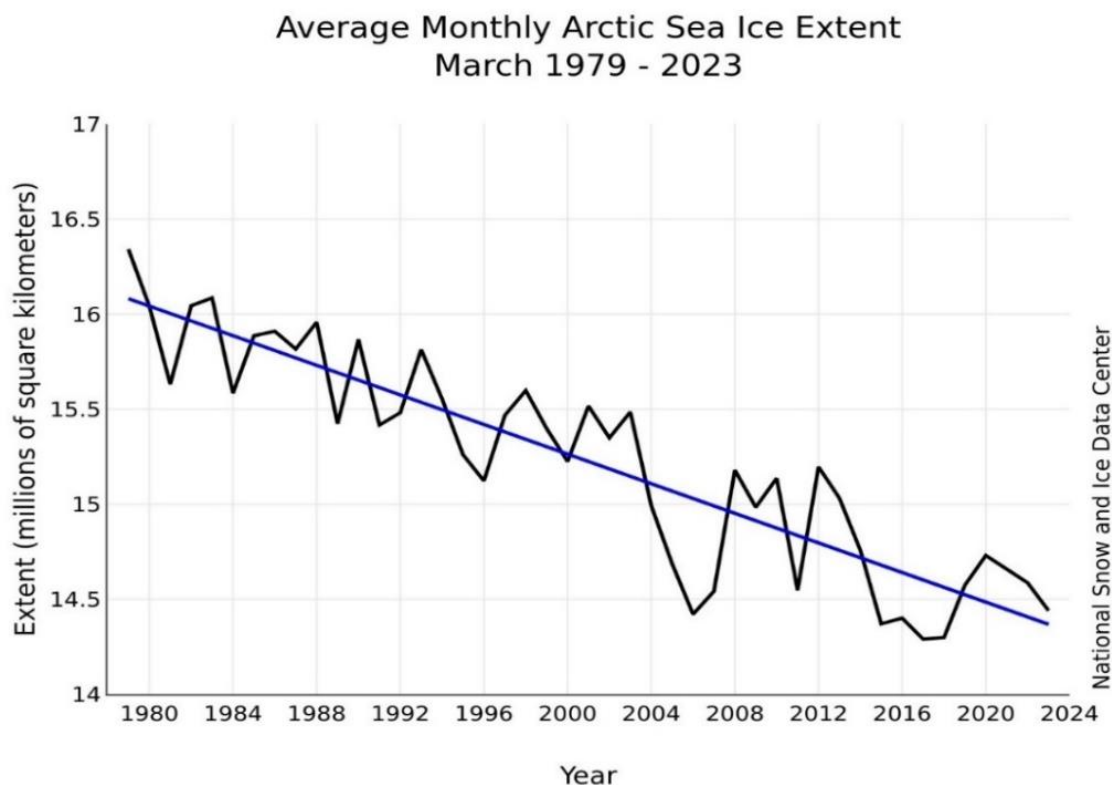


Рисунок 24 – Ежемесячная мартовская протяженность льда с 1979 по 2023 год показывает снижение на 2.5 процента за десятилетие [329].

- Аккумуляции энергии в глобальном океане, что влечёт за собой повышение температуры океанических вод (см. Рисунок 25 а) [140] и б) [321]). Это приводит к дестабилизации зоны устойчивости газовых гидратов, т.е. выбросам в результате деградации клатратов метана и подводной вечной мерзлоты, что так же усиливает глобальное потепление;

- Увеличению мощности сезонного-талого слоя [117]. Это приводит к деградации вечной мерзлоты [34, 116, 126] (см. Рисунок 26 [156]), которая занимает более 60% площади РФ, что в свою очередь сопровождается выделением метана, являющегося парниковым газом;

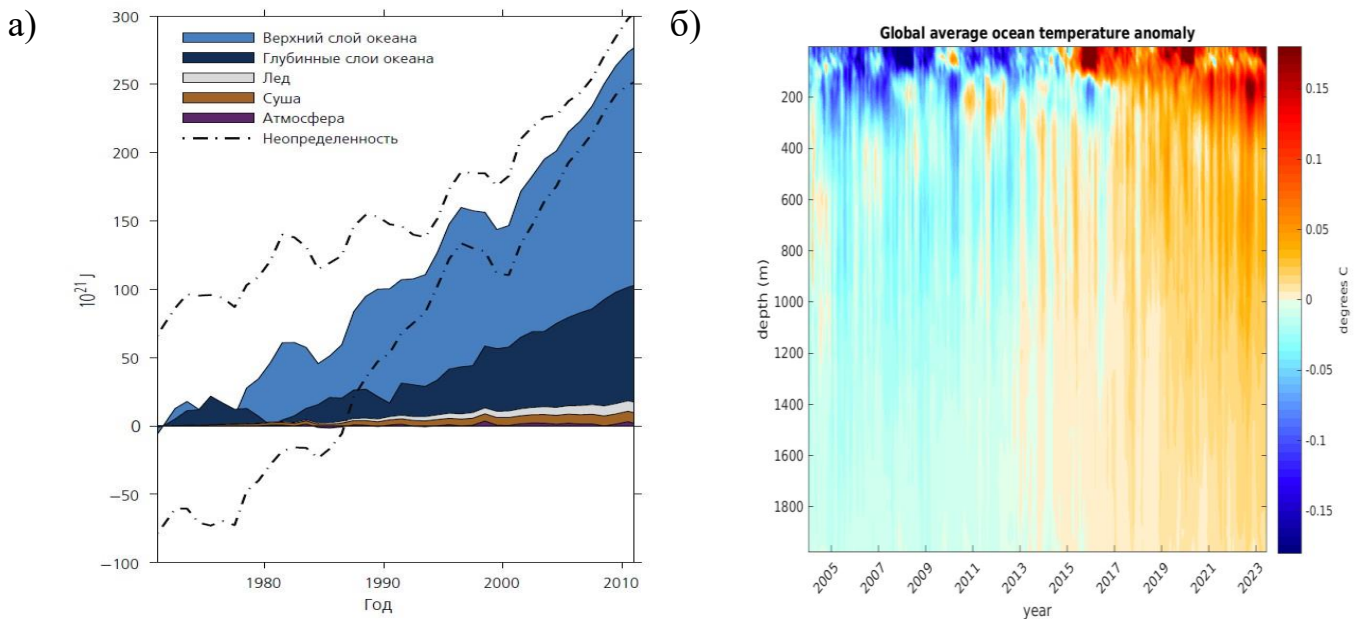


Рисунок 25 – а) Энергия, аккумулированная в климатической системе Земли [140]. б) Аномалии температуры, усредненные по мировому океану до 1900 метров, с 2004 по 2023 год, измеренные Argo [321].

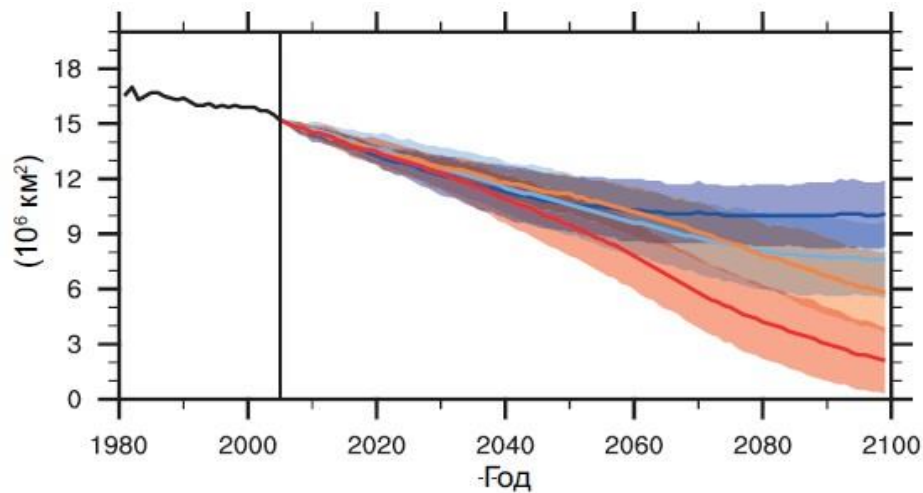


Рисунок 26 – Площадь приповерхностного слоя многолетней мерзлоты северного полушария в рамках CMIP5. Линиями показано мультимодельное среднее, затенением показан межмодельный разброс (одно стандартное отклонение) [156].

- Повышению засушливости многих регионов, что ведёт к гибели лесов в результате пожаров и засух. Это влечёт за собой снижение альбедо поверхности и выделение накопленного углерода в атмосферу.

Примером отрицательных обратных связей могут служить:

- Принцип Ле Шателье, который говорит о том, что при нарушении равновесия в системе она изменится с целью уменьшить внесённые изменения и



прийти к новому равновесному состоянию. Примером этого может служить увеличение поглощения океаном углекислого газа в ответ на рост его концентрации в атмосфере, что в настоящее время уже привело к подкислению океанических вод;

- Увеличение содержания водяного пара в атмосфере приводит к увеличению облачности. Увеличение количества облаков на больших высотах приводит к ослаблению парникового эффекта;

- Обратная связь Планка. По закону Стефана-Больцмана мощность излучения абсолютно чёрного тела пропорциональна температуре в четвёртой степени. В связи с чем рост температуры будет сопровождаться значительно большим увеличением излучаемой Землёй энергии.

## **2.2. Влияние климатических изменений на условия эксплуатации портовых гидротехнических сооружений**

Увеличение антропогенного воздействия повлекло за собой интенсификацию изменений климата, учёт которых при проектировании крупных сооружений становится необходимым не только для обеспечения безаварийной эксплуатации, но и для достоверной оценки требуемых капиталовложений при реализации столь масштабных проектов, а также правильной оценки эксплуатационных затрат.

По влиянию на эксплуатационный режим сооружений все значимые последствия изменения климата можно условно разделить на улучшающие условия эксплуатации (ведут к сокращению издержек) и ухудшающие (ведут к увеличению издержек). К положительным последствиям изменений климата, улучшающим условия эксплуатации, можно отнести в первую очередь сокращение площади Арктического льда. Сокращение площади льда приводит к ряду положительных последствий для транспортной инфраструктуры Арктического региона. Очевидно, что сокращение площади льдов в летний период и увеличение продолжительности безлёдного периода приводит к удлинению периода навигации, что создаёт условия для увеличения грузооборота. Увеличение периода навигации создаёт условия для эксплуатации причальных сооружений в более интенсивном режиме,

что означает не только рост величины грузооборота, но и повышение ритмичности, а также изменение структуры грузооборота.

Сокращение площади ледяного покрова в летний период создаёт возможности для более длительной навигации, в то же время наблюдается сокращение площади льда и в марте-апреле, т.е. в зимний период. Этот факт свидетельствует о существенном изменении баланса накопления и расходования ледовой массы на уровне межгодовых циклов. Сокращение ледяного покрова зимой приводит к изменению качественного состава льда, а именно к сокращению многолетних сплочённых льдов и к переходу к однолетним льдам. Для портовой инфраструктуры это является положительным фактором, который приводит к снижению величины ледовой нагрузки и следовательно, к улучшению условий эксплуатации портовых гидротехнических сооружений.

Для эксплуатации портовых зданий и сооружений можно выделить ещё один положительный аспект: рост приземной температуры приведёт к незначительному сокращению энергопотребления на отопление, следовательно снизится величина эксплуатационных издержек. В то же время увеличение частоты появления «волн жары» и рост среднегодовой температуры приведут к значительному повышению энергопотребления на кондиционирование. Таким образом, с точки зрения затрат на поддержание комфортного микроклимата в зданиях и сооружениях порта можно ожидать изменения структуры эксплуатационных затрат и рост их величины.

Повышение приземной температуры повлияет на наблюдаемый в настоящее время водный баланс отдельных регионов, что приведёт к перераспределению водности по территории планеты. Для ПГТС данное воздействие не окажет сколько-нибудь значимого воздействия, однако для зданий и сооружений порта увеличение количества твёрдых и жидких осадков в зимний период приведёт к повышению снеговой нагрузки [91]. Рост снеговой нагрузки отразится на необходимости реализации проектов по усилению конструкций кровель, т.е. приведёт к дополнительным затратам при капитальном ремонте.

Помимо прочего, рост среднегодовой температуры приведёт к увеличению продолжительности периода около нулевых температур для регионов с

преимущественно отрицательной температурой в течение года. Рост числа переходов температуры через нулевую отметку отразится на эксплуатационных характеристиках бетона основных конструкций. В связи с этим, значимым для работы сооружений будет являться повышение марки по морозостойкости бетона для объектов реализуемых в ряде регионов.

К негативным последствиям изменения климата, ухудшающим условия работы ПГТС, можно отнести несколько основных воздействий. Сокращение площади ледяного покрова помимо изменения структуры льда, приводит к изменению его расположения в пространстве [64, 65, 142]. В силу физических факторов наибольшая концентрация льда наблюдается у полюсов, в связи с этим при сокращении площади льда будет наблюдаться отступление границы ледяного покрова от берегов с образованием у берега лишь припайного однолетнего льда. Такое изменение пространственного распределения льда приведёт к увеличению свободной ото льда поверхности океана как в летний, так и в зимний периоды с одновременным увеличением частоты образования айсбергов и изменением траекторий их дрейфа, моделирование которых уже возможно с помощью специализированных моделей [167]. В свою очередь освобождение вдольбереговой зоны океана ото льда приводит к увеличению длины разгона ветровых волн.

Увеличение длины разгона ветровых волн при неизменном направлении, силе и продолжительности ветрового воздействия приводит к росту значимой высоты волны. Однако освобождение части поверхности океана от льда и рост теплосодержания океана приводит к изменению условий ветрообразования. В некоторых регионах могут существенно измениться как направления господствующих ветров, так и их интенсивность [141, 164]. Иными словами, прогнозирование величин значимых высот волн невозможно только при учёте одного фактора, а требует комплексной оценки. Однако уже сейчас можно говорить об ожидаемом изменении основных факторов, влияющих на волнообразование в Арктическом регионе [129, 181].

Для Арктического региона с исторически наблюдаемой низкой среднегодовой температурой в условиях глобального потепления значимой станет

проблема учёта изменения физико-механических характеристик грунтов основания [6]. Для большинства территорий, расположенных на трассе Северного морского пути, характерно наличие вечной мерзлоты. Данный тип основания является весьма чувствительным к увеличению температуры, т.е. оттаиванию, в связи с чем потребуются внедрение конструктивных решений, позволяющих обеспечить нормативные эксплуатационные характеристики зданий и сооружений при росте среднегодовой температуры.

На фоне увеличения теплосодержания атмосферы и океана наблюдается устойчивый тренд к повышению среднего уровня моря в результате термического расширения воды, вклада таяния ледников и прочих факторов. Рост среднего глобального и, как следствие, локального уровня моря вызовет ряд значимых последствий, влияющих на эксплуатацию портовых сооружений. Повышение уровня моря приведёт к росту гидростатической нагрузки на причальные и оградительные ПГТС. Изменение глубины акватории, в свою очередь, повлияет на условия формирования внутренних волн, что скажется на характеристиках волнения и может отразиться на величине высоты максимального заплеска.

Рост уровня моря приведёт к усилению штормовых нагонов в прибрежных зонах и эрозии берегов как за счёт механического воздействия, так и за счёт термоабразии, которой особенно подвержены берега, омываемые Северным Ледовитым океаном. При этом рост среднего уровня моря, который для различных районов береговой зоны РФ будет отличаться, приведёт к необходимости повышения отметок основных сооружений, что является весьма дорогостоящим и пока полностью отсутствующим в нормах проектирования фактором. Рассмотренные выше последствия изменения климата, оказывающие влияние на эксплуатацию ПГТС и портовых зданий и сооружений, были обобщены (Таблица 4).

Таблица 4 - Влияние последствий изменений климата на морские ГТС

Последствие изменения климата	Оказываемое воздействие	Влияние на эксплуатацию
Изменение климата в сторону смягчения зим и более жаркого лета	Значительное повышение энергопотребления на кондиционирование	Рост затрат на эксплуатацию
	Не значительное сокращение энергопотребления на отопление	Снижение затрат на эксплуатацию
	Увеличение количества циклов замораживания и оттаивания	Увеличение требований, предъявляемых к материалам (марка бетона по морозостойкости)
Таяние вечной мерзлоты	Ухудшение физико-механических свойств грунтов	Снижение несущей способности оснований и фундаментов сооружений
Перераспределение водности по территории планеты	Увеличения количества твёрдых и жидких осадков в зимний период	Повышение снеговой нагрузки
Таяние льдов как полярных, так и континентальных	Исчезновение многолетнего льда, снижение толщины льда	Снижение ледовой нагрузки
	Увеличение периода навигации	Потенциальное увеличение грузооборота портов
	<b>Повышение глобального среднего уровня моря</b>	Усиление штормовых нагонов в прибрежных зонах и эрозии берегов. Необходимость повышения отметок основных сооружений
	Увеличение длины разгона волны, влекущее за собой рост высот ветровых волн	Повышение волновых нагрузок на сооружения
	Увеличение числа айсбергов	Повышение частоты воздействия дрейфующих айсбергов на портовую инфраструктуру
Усиление ветров	Увеличение торосистости ледяного покрова	Необходимость дополнительной защиты морской инженерной инфраструктуры. Увеличение нагрузки на защитные сооружения
	Увеличение высот ветровых волн	Повышение волновых нагрузок на сооружения

Таким образом, можно сделать вывод о том, что изменения климата являются естественным процессом происходящим на протяжении многих тысяч лет, однако в настоящее время совокупность выбросов от хозяйственной деятельности человечества достигла значений, при которых антропогенное воздействие стало сопоставимо с естественным. Для безопасной и эффективной эксплуатации морских гидротехнических сооружений требуется комплексный учёт всего многообразия последствий наблюдаемых и прогнозных изменений климата,

которые при неблагоприятном сценарии социально-экономического развития могут оказать значительное влияние на режим эксплуатации сооружений. В связи с этим задача исследования влияния различных последствий изменения климата на портовые гидротехнические сооружения приобретает всё большую актуальность и требует всестороннего изучения. В данной работе акцент сделан на оценке влияния повышения уровня моря на ПГТС, как на наиболее достоверном предикторе климатических изменений.

### **2.3. Влияние климатических изменений на уровенный режим моря до настоящего момента**

Климатические изменения являются процессом, происходившим на протяжении всей истории планеты с момента появления системы, атмосфера-океан-суша. Рассмотрение климатических изменений всего периода фанерозоя, невозможно и нецелесообразно в данной работе. Данные по изменению приземной температуры и содержанию углекислого газа, приведённые в предыдущем разделе, дают общее представление о динамике процесса за почти миллион лет, но для реализации целей данной работы требуется рассмотреть не изменения температуры или концентрации термодинамически активных примесей, а то, как эти изменения отразятся на глобальном среднем уровне моря (ГСУМ).

«Уровень моря, климатическая переменная, которая объединяет изменения нескольких компонентов климатической системы» [171], в связи с этим изменения уровня моря являются наиболее очевидным «маркером» изменения параметров климатической системы. Измеряемые или рассчитываемые изменения относительного уровня моря складываются из трёх составляющих [4, 168, 174, 188, 312]:

- эвстатические изменения уровня моря, связанные с изменением составляющих пресноводного баланса (испарение, осадки, речной и айсберговый сток), а в настоящее время преимущественно с увеличением объёма воды в Мировом океане в результате таяния ледников;

- стерические изменения уровня моря, связанные с изменением плотности или удельного объёма без изменения массы воды. «Они обусловлены, главным

образом, изменчивостью температуры и в меньшей степени солёности деятельного слоя океана», т.е. стерический рост уровня моря отражает увеличение теплосодержания океана, приводящее к температурному расширению вод;

- изостатические и тектонические (геолого-геодинамические) изменения уровня моря [111], связанные с вертикальными движениями земной коры берегов и дна, обусловленные механизмами гляциоизостатической компенсации и тектоническими процессами, а также донным осадконакоплением.

Наиболее значимыми в период жизненного цикла ПГТС являются стерические изменения уровня моря, связанные с тепловым расширением вод мирового океана, и эвстатические изменения, связанные с вкладом таяния ледников [99]. При этом на тысячелетних временных масштабах все три составляющие становятся значимыми, но наиболее быстрые и существенные изменения уровня моря, как правило, были связаны с эвстатическими изменениями, сопровождавшими периоды начала и окончания ледниковых периодов.

Проведённый анализ исследований международного научного сообщества в области палеоклиматологии, а в частности динамики изменения глобального среднего уровня моря, показал взаимосвязь между глобальной осреднённой температурой атмосферы и уровнем моря (см. Рисунок 27 [174, 175]), который изменялся в широком диапазоне с амплитудой порядка 200 метров.

Арчер и Бровкин показали, что «В геологической летописи существует четкая и сильная корреляция между долгосрочной глобальной средней температурой и уровнем моря. Уровень моря потенциально может измениться гораздо сильнее, чем прогнозируется на предстоящее столетие, и это происходило в прошлом» [175]. При этом амплитуда климатических колебаний ГСУМ превышала 100 метров (см. Рисунок 28 [206]).

Однако при временном масштабе, исчисляемом миллионами лет, недостаточно понятно, насколько быстро происходит процесс перехода от одного условно статического уровня к другому. Для оценки этого процесса рассмотрим период с последнего ледникового максимума и изменения уровня моря,

происходившие в этом временном периоде (от наших дней до  $\approx 20$  тыс. лет назад). За выбранный период, повышение уровня моря, обусловленное таянием Североамериканского и Евразийского ледяных щитов, составило примерно 125 метров, при этом большая часть этих изменений произошла в период примерно с 15 до 7.5 тыс. лет назад (см. Рисунок 29 [188]).

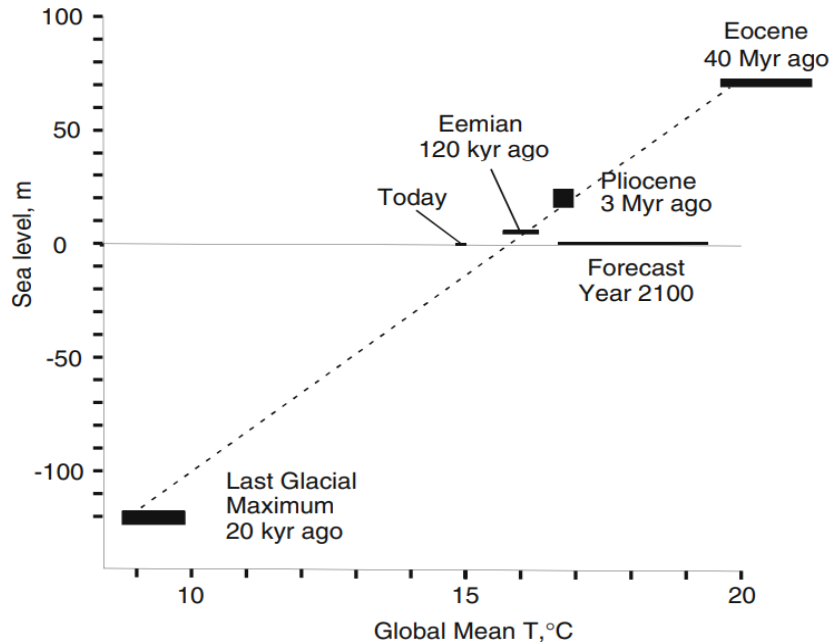


Рисунок 27 – Взаимосвязь между температурой и уровнем моря в последние геологические временные рамки [174, 175].

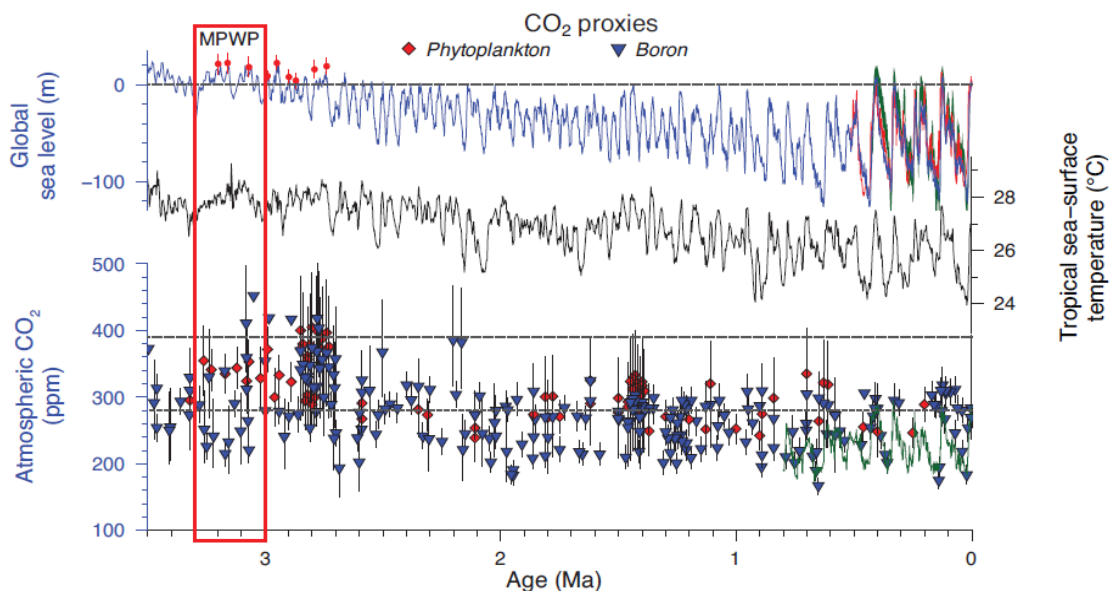


Рисунок 28 – Реакция земной системы орбитального масштаба на радиационные воздействия и возмущения в период с 3.5 млн лет назад по настоящее время. Красный прямоугольник с надписью MPWP соответствует теплому периоду середины плиоцена (3.3-3.0 млн лет назад) [206].



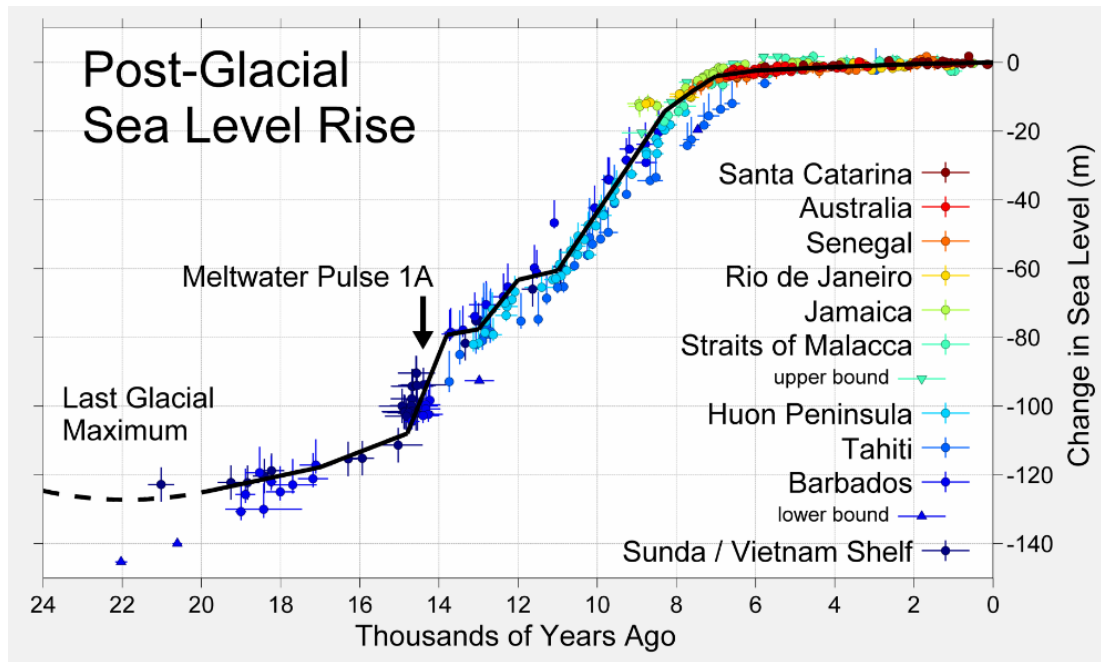


Рисунок 29 – Эвстатическая кривая уровня моря за последние 24 тыс. лет (повышение уровня моря в результате таяния ледникового льда) [188].

В период ускоренного (максимально быстрого) повышения уровня моря скорость роста уровня моря составляла примерно 14 мм/год с последующим переходом к условно постоянному уровню моря [97], который за последние 6 тыс. лет изменялся со скоростью около 0.5 мм/год [188]. Однако антропогенное изменение климата (примерно с середины 19 века) привело к увеличению скорости роста уровня моря (см. Рисунок 30 [177, 215]), которая к 1993–2003 годам составила 3.1 мм/год (см. Таблица 5). По данным спутниковых наблюдений за уровнем моря центра космических полетов имени Годдарда НАСА к 1993-2023 гг. скорость роста уровня моря составляла уже примерно 3.3 мм/год, причём с 2011 по 2023 гг. скорость роста составила примерно 4.5 мм/год [327] (см. Рисунок 31 [189, 327]).

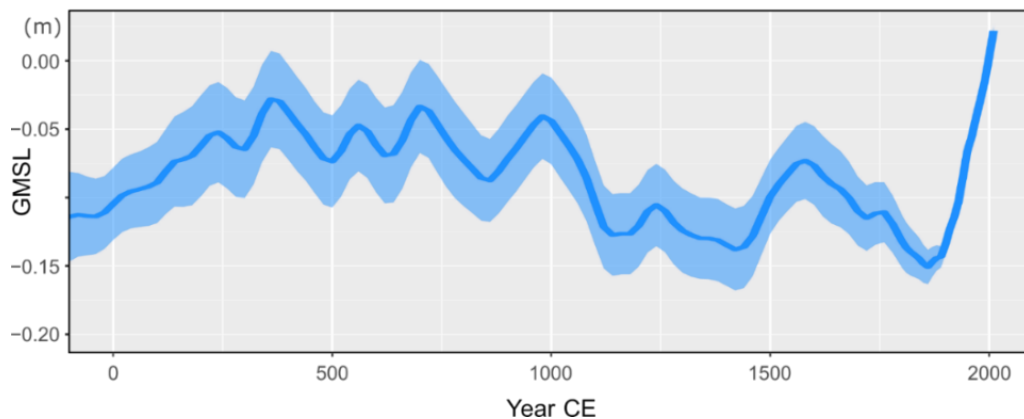


Рисунок 30 – Кривая ГСУМ позднего голоцена (эпохи нашей эры) [177, 215].

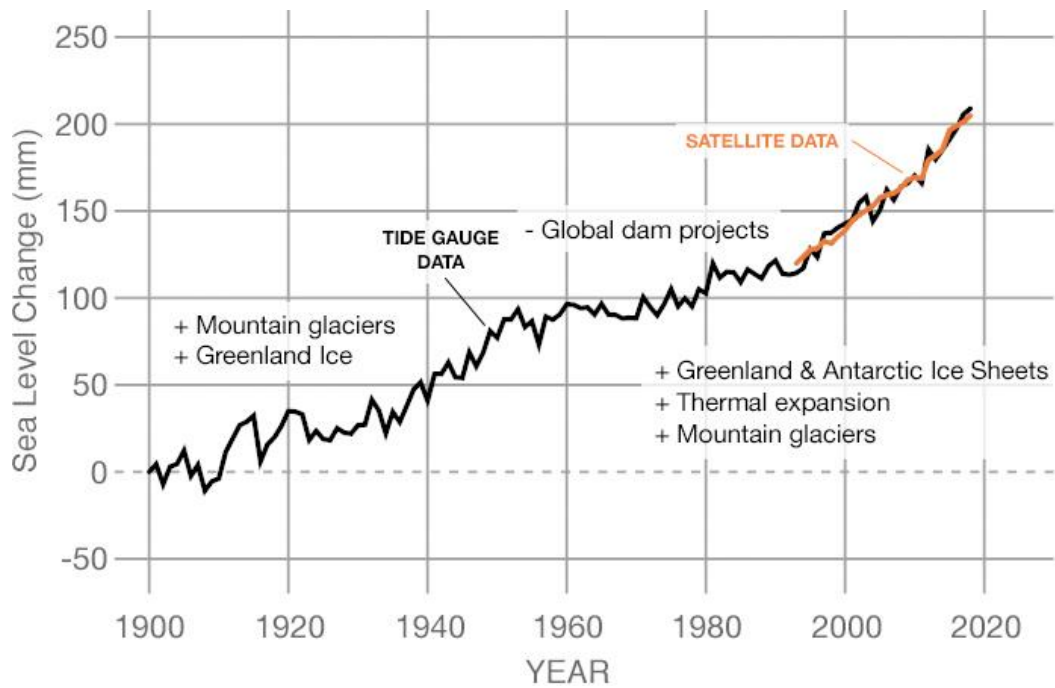


Рисунок 31 – Глобальная кривая среднего уровня моря с 1900 года [189, 327].

Таблица 5 - Наблюдаемые темпы повышения уровня моря и оценки вкладов различных источников [244].

Источник повышения уровня моря	Скорость роста уровня моря (мм/год)	
	1961–2003 годы	1993–2003 годы
Тепловое расширение	0.42 ± 0.12	1.60 ± 0.50
Ледники и ледяные шапки	0.50 ± 0.18	0.77 ± 0.22
Гренландский ледовый щит	0.05 ± 0.12	0.21 ± 0.07
Антарктический ледовый щит	0.14 ± 0.41	0.21 ± 0.35
Общее влияние отдельных климатических воздействий на повышение уровня моря	1.10 ± 0.50	2.80 ± 0.70
Наблюдаемое общее повышение уровня моря*	1.80 ± 0.50	3.10 ± 0.70

\* Данные до 1993 года получены мареографами, а после 1993 года – с помощью спутниковой альтиметрии.

#### 2.4. Глобальное моделирование климатической системы

Под термином «климатическая система» в данной работе будет пониматься определение, данное в 5 оценочном докладе межправительственной группы экспертов по изменениям климата при ООН (МГЭИК) – «чрезвычайно сложная

система, состоящая из пяти основных компонентов: атмосферы, гидросферы, криосферы, литосферы и биосферы, а также взаимодействий между ними» [205]. В связи со сложностью данной системы «классическое» физическое моделирование становится невозможным, а использование аналитических методик возможно только для максимально укрупнённых процессов. К примеру, составление уравнения баланса для заданных жёстких граничных условий позволит провести какие-то укрупнённые расчёты, однако междисциплинарное детальное описание глобальных процессов в климатической системе Земли становится возможным только при использовании математического численного моделирования [226] (модели общей циркуляции атмосферы и океана – МОЦАО) с использованием натуральных данных (в том числе, реанализа) для валидации [114, 162].

Реанализ – «Метод расчета набора трехмерных полей метеорологических элементов за достаточно продолжительный (порядка нескольких десятилетий) отрезок времени, который основан на усвоении данных наблюдений различного рода — стационарных, аэрологических, судовых, спутниковых и т.д., и результатах гидродинамического моделирования» [п. 3.56, 259].

В СССР развитие численного моделирования климатической системы велось с 50-х годов прошлого века, но наиболее активно этот процесс начался в 70-х годах [105] и привел к публикации в 1984 году коллективом исследователей под руководством Г.И. Марчука монографии «Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана» [106]. Используемая Г.И. Марчуком математическая модель, разработанная на базе института вычислительной математики РАН, используется и в настоящее время, естественно претерпев существенные изменения.

Численное моделирование климатической системы базируется на физической основе, которая, как следует из определения, черпается у 5 областей научного познания и содержится в модулях атмосферы, океана, льда, суши и биосферы. Реализация вычислительного алгоритма, параметризация процессов, выбор сеток моделирования, подсеточных масштабов и т.д. представляют собой сложную самостоятельную задачу, находящуюся на стыке физико-математических

наук и программирования. В связи с этим различные научно-исследовательские коллективы создают свои модели климатической системы и отдельных её элементов, наиболее достоверные из которых используются и улучшаются мировой научной общественностью и МГЭИК [2, 7, 20, 25, 26, 38, 39, 40, 57, 58, 127, 162].

Для валидации результатов работы модели, отражающей изменения уровня океана, используются следующие виды данных: данные береговых футшточных (мареографных) измерений уровня, данные спутниковой альтиметрии и данные роботизированных поплавков Argo. Однако только использование данных береговых мареографных изменений уровня моря позволяют изучать длительные колебания уровня мирового океана (спутниковые данные имеются только за прошедшие 30 лет, а данные поплавков Argo за примерно менее чем 25 лет). В то же время береговые наблюдения обладают принципиальным недостатком, а именно возможностью измерения уровня моря только вдоль береговой черты в весьма ограниченном числе точек [100].

Развитие технологий дистанционного зондирования в последние десятилетия привело к широкому распространению использования данных спутниковой альтиметрии [246], которые позволяют охватывать практически всю поверхность мирового океана, создавая «густое» облако точек измерений. Благодаря данным спутниковой альтиметрии начиная с 1993 года имеется непрерывный ряд наблюдений с высоким пространственно-временным разрешением (см. Рисунок 32 [157]) (среднеквадратичное отклонение  $\approx 2$  см [85]), с помощью которого с высокой точностью в глобальном масштабе были определены необходимые термогидродинамические и метеорологические параметры океанической системы [89], позволившие проверить модель общей циркуляции океана. Спутниковая альтиметрия осуществлялась рядом спутников: TOPEX/Poseidon 1992-2006; Jason-1 2001-2013; OSTM/Jason-2 2008-2019; Jason-3 2016-по н.в.; Sentinel-6 Michael Freilich 2020-по н.в.; SWOT 2022-по н.в.

Использование данных сети поплавков Argo, насчитывающей почти 4000 поплавков (см. Рисунок 33 [321]), производящих более 100 000 профилей

температуры/солености в год, позволяют получать подробные данные [стр. 16, 125] с глубин до 2000 метров, а для поплавков Deep Argo Mission до 6000 метров [321]. Argo значительно уменьшил неопределенность оценок глобальных запасов тепла и изменений солености, и, следовательно, прогнозов повышения уровня моря. Совместное использование данных спутниковых альтиметров и поплавков Argo позволили с высокой степенью достоверности описать изменения глобального среднего уровня моря (см. Рисунок 34 [180, 321]).

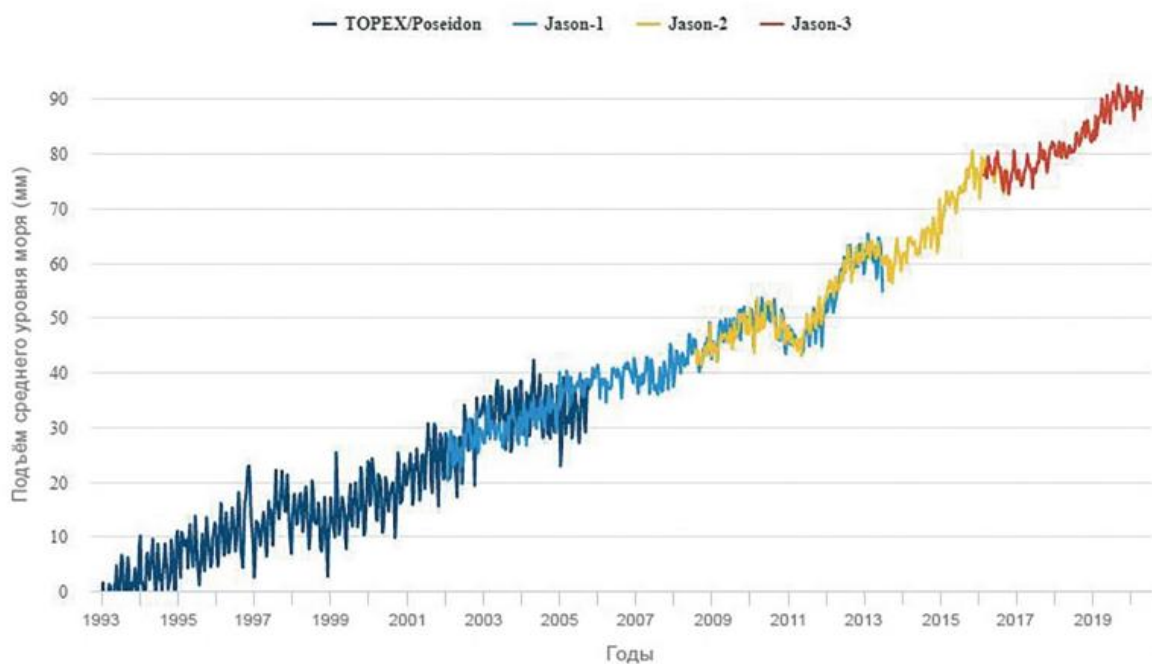


Рисунок 32 – Повышение ГСУМ на основе спутниковых данных NOAA (по результатам миссий TOPEX/Poseidon и Jason) с января 1993 года по 2020 год. Добавлена поправка на глобальный средний изостатический отскок 0.3 мм/год [157].

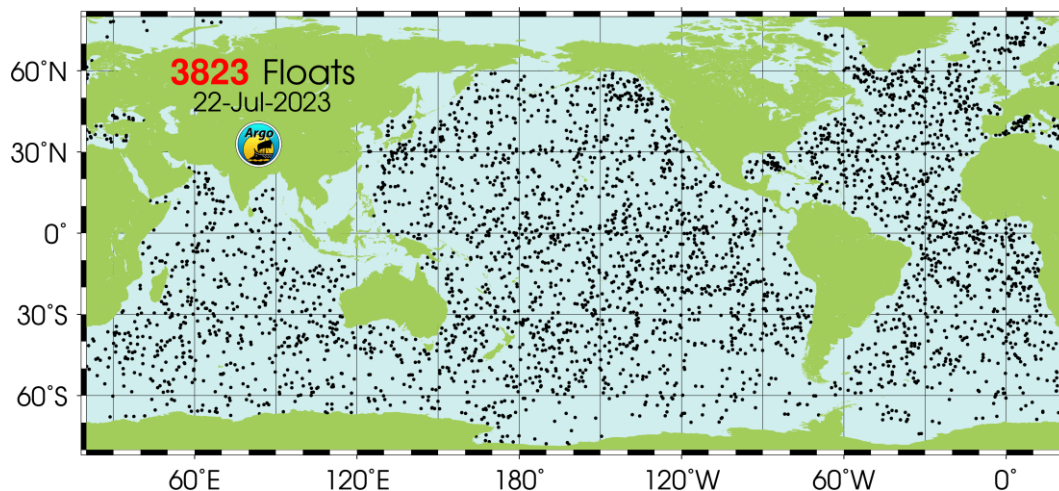


Рисунок 33 – Расположение поплавков Argo на 22 июля 2023 года [321].

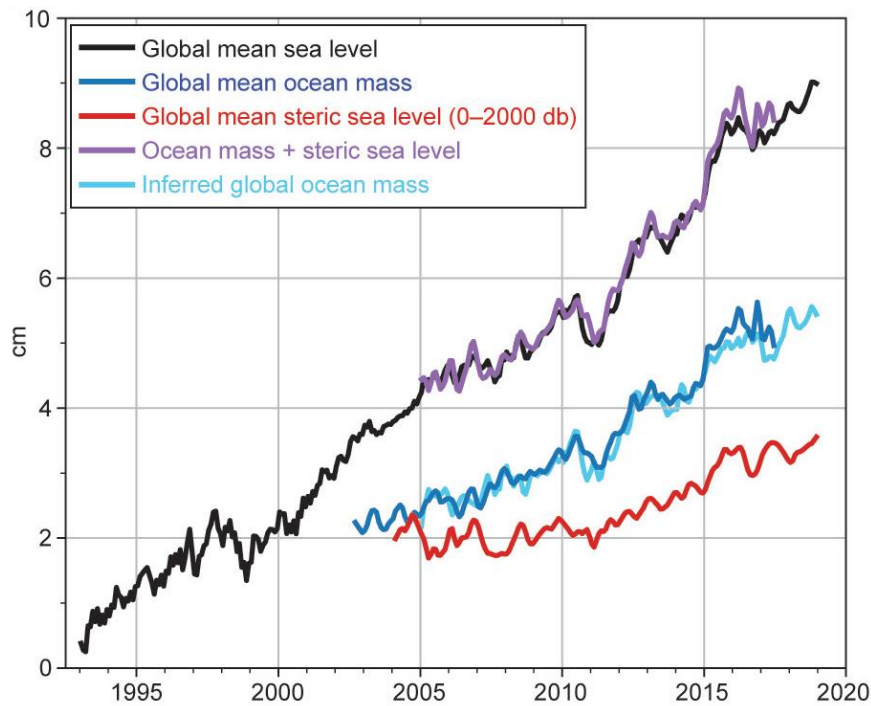


Рисунок 34 – (черный) среднемесячный глобальный средний уровень моря, наблюдаемый с помощью спутниковых альтиметров (1993–2018 гг., лаборатория спутниковой альтиметрии NOAA); (синий) среднемесячная глобальная масса океана (2003 г. – август 2017 г., по результатам эксперимента по восстановлению гравитации и климату); (красный) среднемесячный глобальный средний стерический уровень моря (2004–2018 гг.) по данным массива профилирующих поплавков Argo; (фиолетовый) изменение массы океана плюс стерические изменения. (голубой) предполагаемая глобальная масса океана, рассчитанная путем вычитания глобального среднего стерического уровня моря из ГСУМ. Все временные ряды сглажены 3-месячным фильтром [180, 321].

Однако моделирование состояния ГКС в прошлом, базирующееся на имеющихся данных наблюдений, недостаточно для моделирования динамики развития изменений в будущем. Моделирование климатической системы в будущем требует установления параметров антропогенного влияния. Для этой цели используются сценарии прогнозного изменения климата. Первые попытки прогнозной оценки в нашей стране были сделаны ещё в 1970-х и принадлежат академику РАН М.И. Будыко, который с высокой степенью достоверности (высокая корреляция между прогнозом и данными наблюдений за  $\approx 50$  лет) предсказал рост приземной температуры атмосферы и сокращение площади Арктических морских льдов (см. Рисунок 35 [313] и Рисунок 36 [309]).

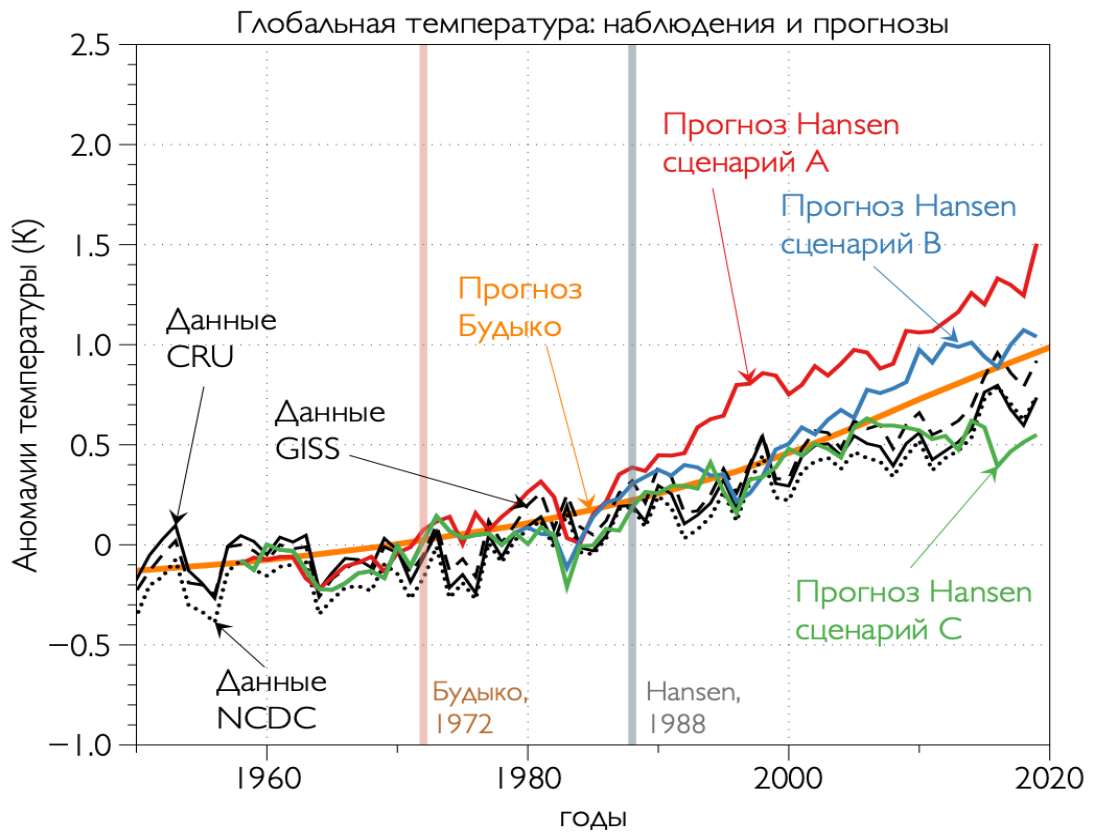


Рисунок 35 – Сравнение температуры по данным наблюдений (черные кривые) и по прогнозам Будыко (1972 год [16], оранжевая кривая) и Hansen (1988 год [196], зеленая, синяя и красная кривые) [313].

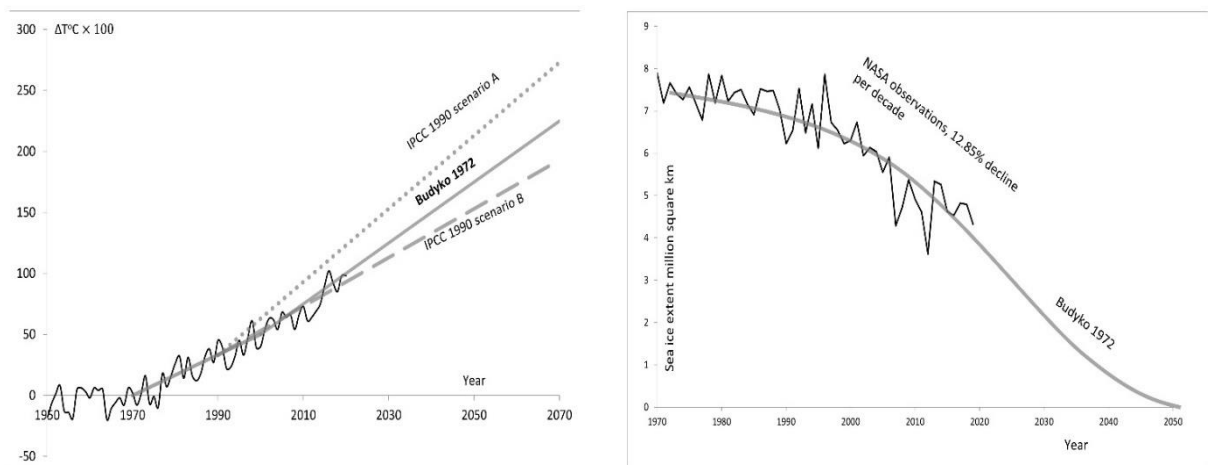


Рисунок 36 – Прогнозы Михаила Будыко 1972 года [16] (сплошные серые линии): (а) температура поверхности и (б) изменения в Арктических морских льдах. На рисунке (а) тонкая черная сплошная линия показывает средние за 5 лет наблюдения изменений средней глобальной температуры, сделанные Институтом космических исследований Годдарда НАСА. Пунктирными линиями (точки и дефисы) показываются сценарии МГЭИК «обычного развития событий» и при низких выбросах. На рисунке (б) тонкая черная сплошная линия показывает спутниковые наблюдения за изменениями площади многолетних льдов Арктики [309].

В связи с этим научным сообществом под эгидой МГЭИК было разработано несколько наборов сценариев изменения климата. В первом отчёте МГЭИК, опубликованном в 1990 году [183], содержалась информация о четырёх сценариях А-D (SA90) (см. Рисунок 37 [183]) с изменением концентрации  $\text{CO}_2$ -экв от 440 до 830 частей на миллион (ppm) и изменениях ГСУМ для наиболее «наилучшей оценки» агрессивного сценария А в 66 см (диапазон от 31 до 110 см) к 2100 году (см. Рисунок 38 [183]).

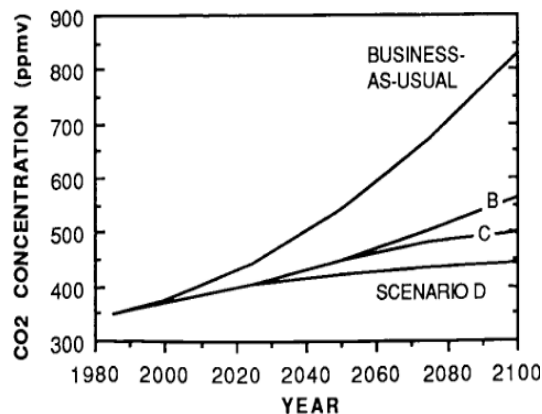


Рисунок 37 – Изменение концентраций  $\text{CO}_2$  в атмосфере в соответствии с иллюстративными сценариями SA90 [183].

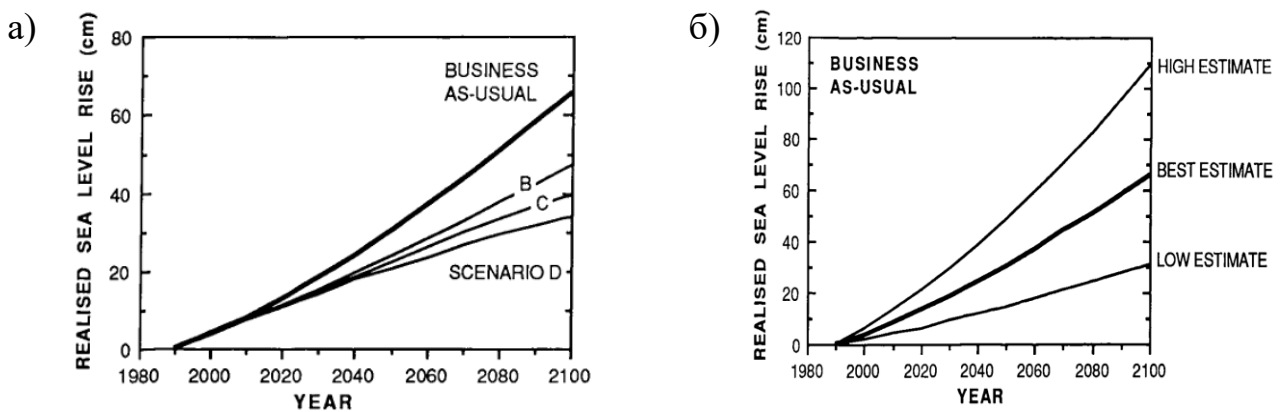


Рисунок 38 – а) Наилучшая оценка изменения ГСУМ в соответствии с иллюстративными сценариями SA90; б) Разброс результатов оценки изменения ГСУМ в соответствии с иллюстративными сценариями SA90 [183].

Уже к 1992 году группа сценариев SA90 была пересмотрена и заменена на набор сценариев IS92 [182], использовавшийся во втором оценочном докладе МГЭИК [202]. Набор сценариев IS92 содержал в себе 6 сценариев А-Е с изменением концентрации  $\text{CO}_2$ -экв (повышением верхней границы) к 2100 году от



примерно 475 до 910 ppm (см. Рисунок 39 а) [173]) в 1992 году [182], и с изменением концентрации  $\text{CO}_2$ -экв уже от 490 до 950 ppm в 1995 году [202] (см. Рисунок 39 б) [173, 202]). Изменились и прогнозные значения изменения ГСУМ для наиболее «наилучшей оценки» до 49 см (диапазон от 13 до 94 см) к 2100 году (см. Рисунок 40 [202]). Из второго оценочного доклада МГЭИК следует, что несмотря на пересмотр сценариев по объёму выбросов двуокси углерода, прогнозная величина роста ГСУМ уменьшилась.

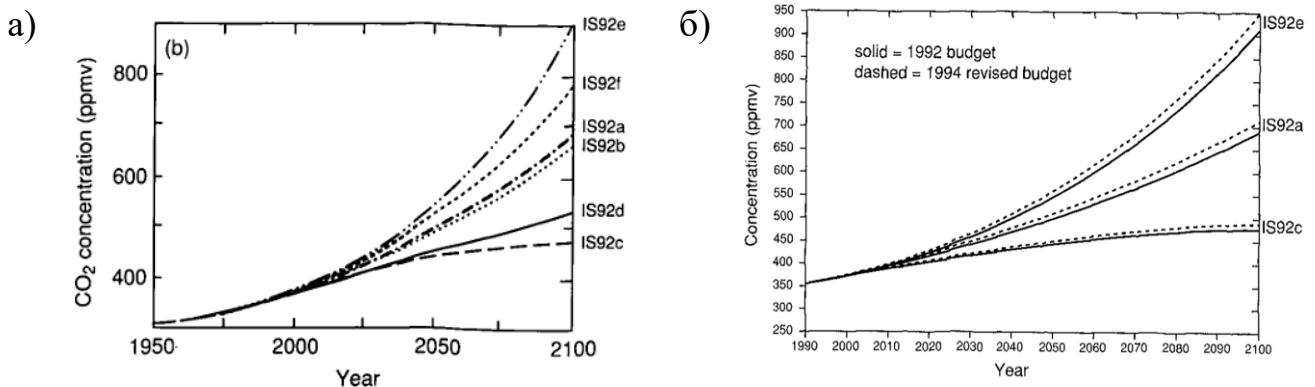


Рисунок 39 – а) Изменение концентраций  $\text{CO}_2$ -экв в атмосфере в соответствии с иллюстративными сценариями IS92 по данным IIASA [173]; б) Наилучшая оценка изменения ГСУМ в соответствии со сценариями IS92 по данным МГЭИК [173, 202].

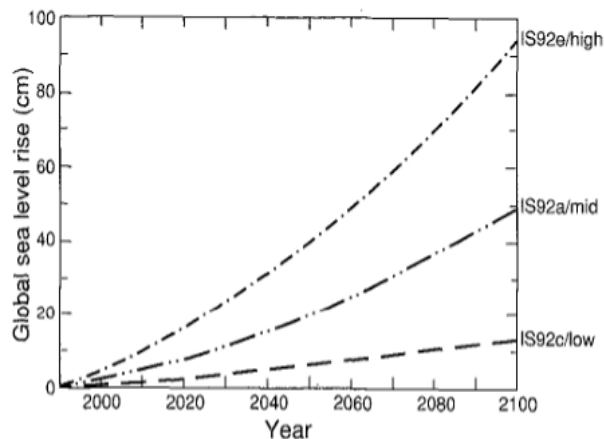


Рисунок 40 – Наилучшая оценка изменения ГСУМ в соответствии с иллюстративными сценариями IS92 [202].

Следующим этапом развития сценарного подхода к моделированию развития климатической системы стало создание группы сценариев (SRES) из 40 сценариев развития населения планеты, опубликованных в 2000 году [225]. МГЭИК отобрало 6 иллюстративных сценариев, получивших широкое освещение в научных

исследованиях (A1 (подразделяющийся на A1FI, A1T, A1B), A2, B1, B2). «Эти шесть иллюстративных сценариев широко использовались группами по моделированию климата и являются основой для большинства прогнозов климата в Третьем и Четвертом оценочных докладах МГЭИК» [203, 204, 220]. При этом наибольшее распространение получили сценарии B1 – оптимистичный вариант, отражающий развитие «зелёной» энергетики; A2 – реалистичный вариант, отражающий активное развитие глобальной экономики; A1FI – самый «агрессивный» сценарий; A1B – считавшийся реалистичным.

Набор сценариев SRES отличается от IS92 в том числе и концентрацией CO<sub>2</sub>-экв (повышением верхней границы) к 2100 году от 549 до 970 ppm (см. Рисунок 41 а) [203]). В соответствии с третьим оценочным докладом МГЭИК [203] к 2100 году рост ГСУМ может достигнуть для наиболее «наилучшей оценки» до 49.1 см (диапазон от 9.2 до 85.9 см) к 2100 году (см. Рисунок 41 б) [203]).

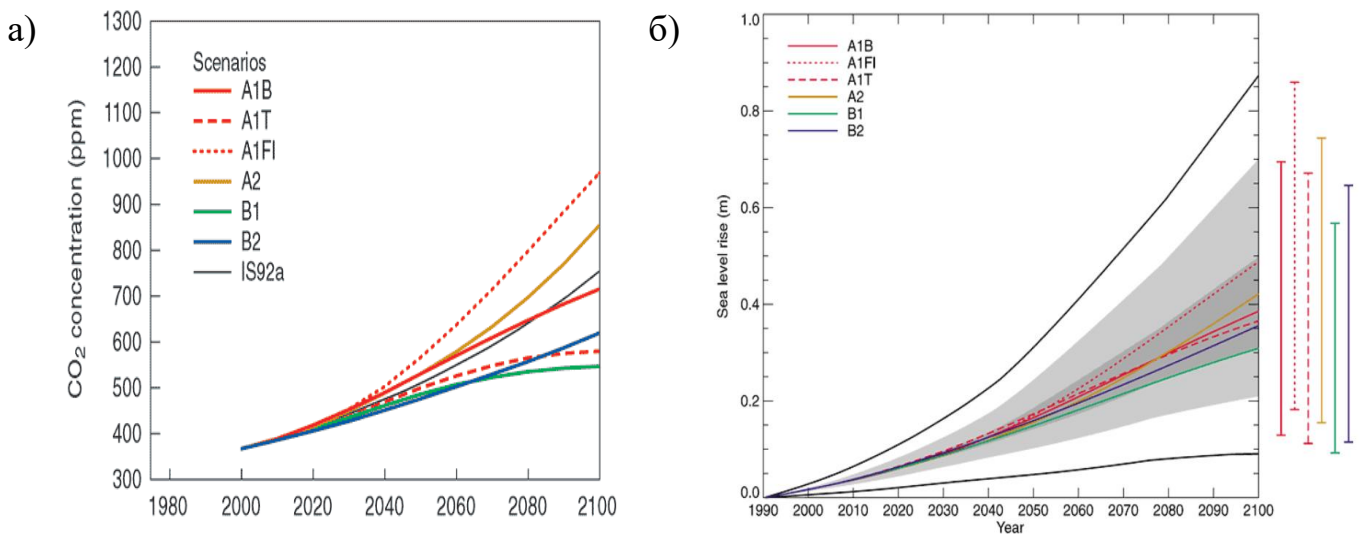


Рисунок 41 – а) Изменение концентраций CO<sub>2</sub>-экв в атмосфере в соответствии с иллюстративными сценариями SRES [203]; б) Наилучшая оценка изменения ГСУМ в соответствии со сценариями SRES [203].

В третьем оценочном докладе МГЭИК (аналогичная методика использовалась и в дальнейшем) применяется методика определения повышения ГСУМ  $h(t)$ , как функции времени  $t$ , выражающейся относительно уровня в 1990 г. (в 1990 году все компоненты равны нулю), см. (1)[203]:

$$\Delta h(t) = X(t) + g(t) + G(t) + A(t) + I(t) + p(t) + s(t) \quad (1)$$

где  $X$  – тепловое расширение;  $g$  – потеря массы ледников и ледяных шапок;  $G$  – потеря массы ледяного щита Гренландии из-за прогнозируемого и недавнего изменения климата;  $A$  – потеря массы Антарктического ледяного щита из-за прогнозируемого и недавнего изменения климата;  $I$  – потеря массы ледяных щитов Гренландии и Антарктиды из-за продолжающейся адаптации к прошлым изменениям климата;  $p$  – сток от таяния вечной мерзлоты;  $s$  – отложение осадка на дне океана.

В четвёртом оценочном докладе уровень прогнозной концентрации парниковых газов не изменился (см. Рисунок 42 а) [184]), однако установлены границы диапазона стабилизации концентрации  $\text{CO}_2$ -экв парниковых газов от 445 до 1130 ppm (см. Рисунок 42 б) [204]).

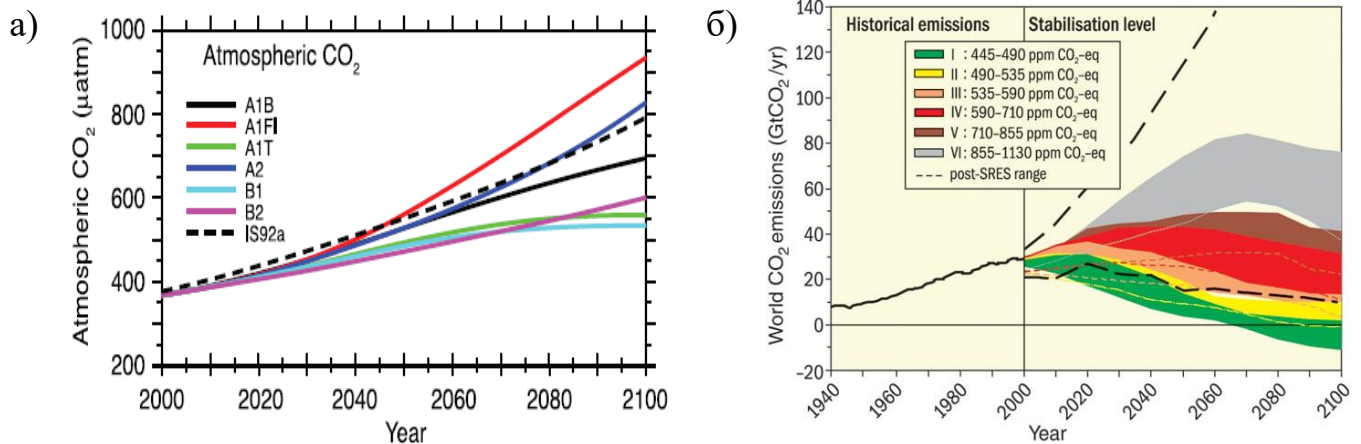


Рисунок 42 – а) Изменение концентраций  $\text{CO}_2$ -экв в атмосфере в соответствии с иллюстративными сценариями SRES [184]; б) Уровни стабилизации концентрации  $\text{CO}_2$ -экв в атмосфере в соответствии со сценариями SRES [204].

Однако в четвёртом оценочном докладе прогнозное повышение ГСУМ оценено существенно меньшей величиной, чем в предыдущих докладах, и находится в диапазоне от 18 до 59 см (среднее для A1FI – 43 см), с указанием что данная оценка основана на диапазонах, полученных с помощью моделей «без будущих быстрых динамических изменений в движении льда», что может объяснить «консервативность» полученных прогнозных значений [204].

Уже к 2008-2009 году было установлено, что только сценарии, отвечающие наибольшим выбросам, согласуются с данными наблюдений [217] (см. Рисунок 43 [220]). «Недавние наблюдения за глобальными средними выбросами показывают

более высокие траектории, чем наихудший сценарий A1FI, описанный в ДО4 МГЭИК» [191], однако рассмотрение всех сценариев SRES показывает, что наблюдавшиеся объёмы выбросов двуокиси углерода превышали значения не всех, а только 35 из 40 сценариев (см. Рисунок 44 [333]).

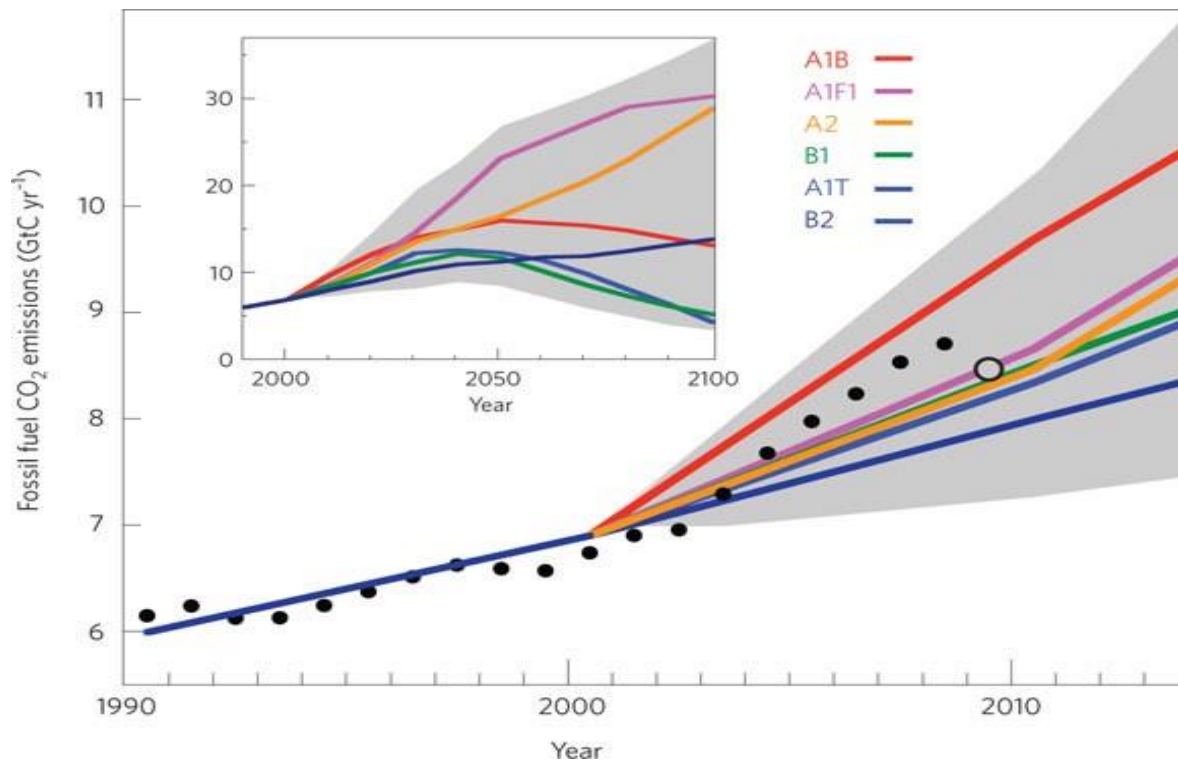


Рисунок 43 – Оценки ежегодных промышленных выбросов CO<sub>2</sub> за 1990–2008 гг. 13 (черные кружки) и за 2009 г. 9 (незаштрихованные кружки) попадают в диапазон всех 40 сценариев SRES (область, заштрихованная серым цветом) и шести иллюстративных маркерных сценариев SRES (цветные линии). На вставке в левом верхнем углу показаны эти сценарии до 2100 года [220].

Разработанные сценарии не учитывают в должной мере наблюдаемые изменения климата и не отражают реализацию вступившего в силу 16 февраля 2005 года Киотского протокола. В связи с этим Россия «выступила с инициативой включения в программу работ на 2008 и последующие годы следующих двух крупных направлений: разработка сценариев изменений климата и их последствий на ближайшие десятилетия, учитывающих реализацию Киотского протокола; разработка подходов к сохранению современного климата путем использования регулирующего воздействия стратосферного аэрозоля» [66].

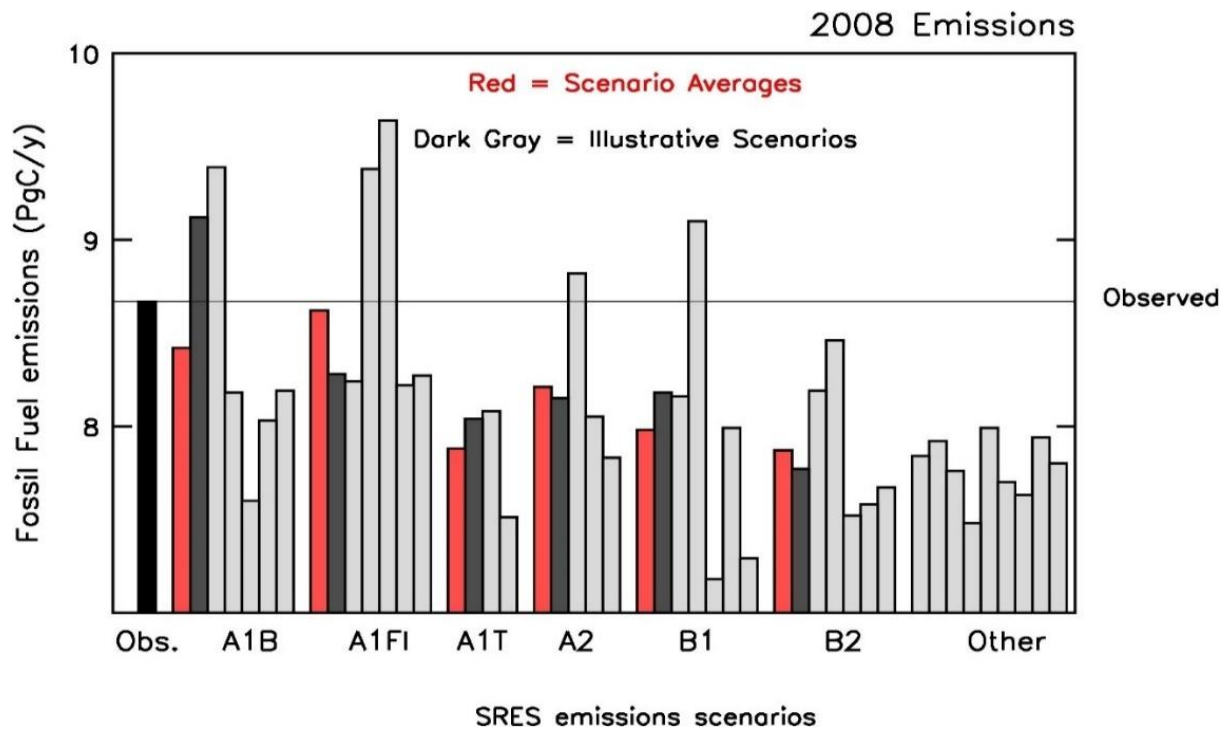


Рисунок 44 – Выбросы CO<sub>2</sub> от сжигания ископаемого топлива за 2008 г. в ПгС/год [333].

Рисунок 44 показывает выбросы для каждого из 40 сценариев выбросов, опубликованных в Специальном отчете МГЭИК о сценариях выбросов. Наблюдаемые выбросы показаны черным цветом (погрешность около  $\pm 6\%$ ). Красные столбцы — это средние значения по семействам сценариев. Темно-серые полосы — это иллюстративные сценарии, используемые МГЭИК для прогнозирования климата [333].

Следует упомянуть, что разработка подходов с использованием стратосферного аэрозоля, особенно сульфатного и серного, широко освещалась и освещается в научных публикациях климатологов [56, 58, 59, 108, 109, 110, 159], однако не получила широкого распространения, поскольку выбрасывание атмосферного аэрозоля сопряжено с необходимостью существенных финансовых вложений в создание соответствующей инфраструктуры, и при этом обладает лишь кратковременным эффектом, т.е. после прекращения распыления аэрозоля в течение нескольких лет климатическая система вернётся к тому температурному режиму, который должен был установиться при отсутствии контролируемых эмиссий аэрозоля.

В свою очередь, инициатива по разработке изменённых сценариев климатических изменений привела к созданию обновлённой группы сценариев, получившей название репрезентативные траектории концентраций (RCP). Началось активное исследование климатических изменений с моделированием сценариев RCP [7, 121]. Данные показательные сценарии использовались в пятом оценочном докладе МГЭИК [206, 207], а также специальном докладе МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата [107].

Сценарии получили наименования, состоящие из аббревиатуры RCP и значения дополнительного радиационного воздействия при данном сценарии к 2100 году, выраженное в Вт/м<sup>2</sup> (от 2.6 до 8.5 в первой редакции, что относительно солнечной постоянной в 342 Вт/м<sup>2</sup> составляет от 0.76 до 2.49 процента). При этом наибольшее распространение получили сценарии RCP4.5 и RCP8.5, как реалистично-оптимистичный и реалистично-пессимистичный сценарии. RCP8.5 достаточно хорошо коррелирует по CO<sub>2</sub>-экв с SRES A1FI, а RCP4.5 с SRES B1, при этом появился сценарий RCP2.6, подразумевающий к 2020 году начало снижения выбросов CO<sub>2</sub> и полное отсутствие выбросов к 2100 году, благодаря чему глобальное повышение температуры вероятно будет ограничено 2 C° (см. Рисунок 45 [206]).

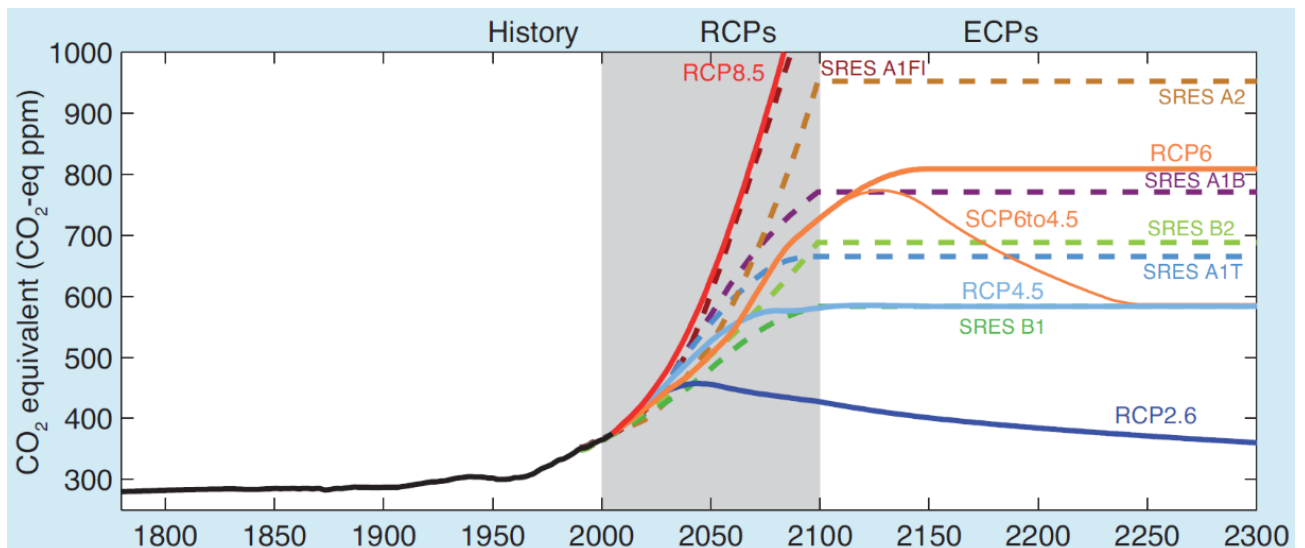


Рисунок 45 – Концентрация CO<sub>2</sub>-экв для иллюстративных сценариев RCP и SRES [206].

Набор сценариев RCP ограничивает концентрацию  $\text{CO}_2$  к 2100 году от 420.9 до 935.9 ppm [332] (см. Рисунок 46 а) [206]) и  $\text{CO}_2$ -экв к 2100 году от 427 до 1231.5 ppm (см. Рисунок 46 б) [332]). При этом оценка роста ГСУМ к 2100 году, для 5-го оценочного доклада МГЭИК составит от 26 до 98 см, где RCP2.6 соответствует рост на 44 см, RCP4.5 на 53 см, RCP6.0 на 55 см, а для RCP8.5 на 74 см (см. Рисунок 47 б) [на основе данных из 206]). При этом на Рисунок 47 а) [206] наглядно продемонстрировано наличие динамики к ускорению прогнозного повышения уровня моря к концу века.

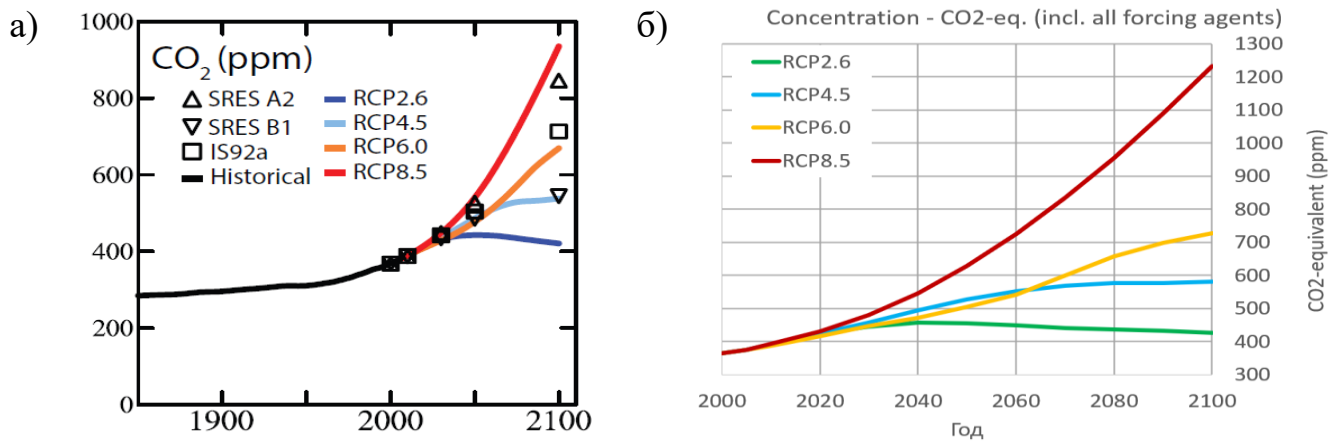


Рисунок 46 – а) Изменение концентраций  $\text{CO}_2$ -экв в атмосфере в соответствии с иллюстративными сценариями RCP, SRES A2, B1 и IS92a [206]; б) Изменение концентраций  $\text{CO}_2$ -экв в атмосфере в соответствии с сценариями RCP [332].

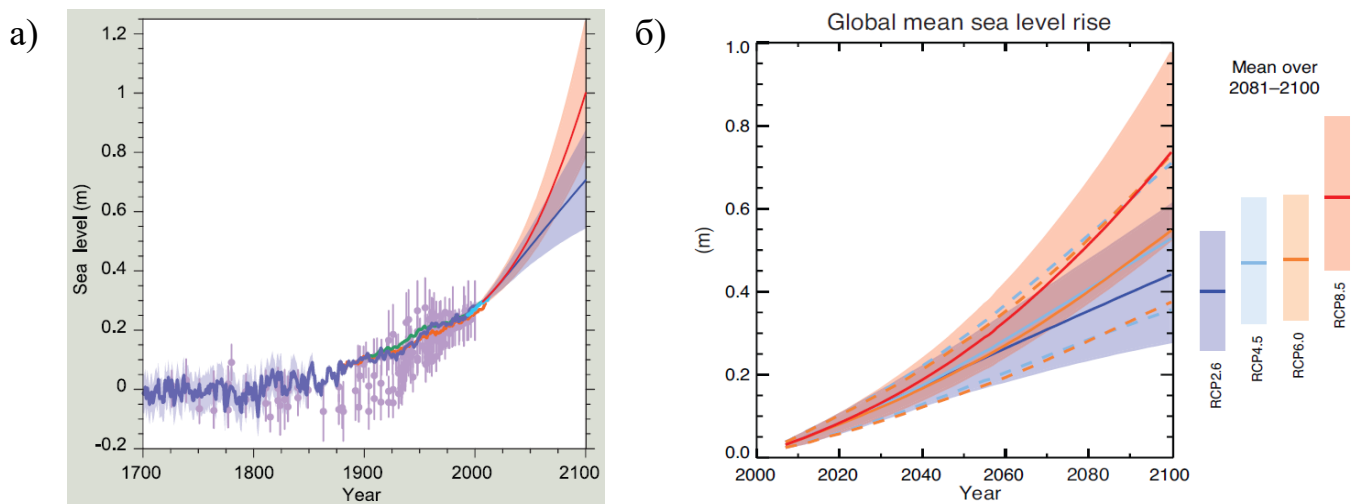


Рисунок 47 – а) Изменения ГСУМ до 2100 года по данным наблюдений и сценариев RCP относительно 1700 года [206]; б) Изменения ГСУМ до 2100 в соответствии со сценариями RCP относительно 1986-2005 годов [на основе данных из 206]).

При этом отмечается, что «Только разрушение морских секторов Антарктического ледяного покрова, если оно будет инициировано, может привести к значительному повышению ГСУМ выше вероятного диапазона в течение 21 века» [206]. При этом в [242] отмечается, что «Наблюдаемые потери ледникового щита соответствуют верхнему диапазону прогнозов уровня моря в Пятом оценочном докладе МГЭИК, недавно обусловленных динамикой льда в Антарктике и таянием поверхности в Гренландии» (см. Рисунок 48 [242]).

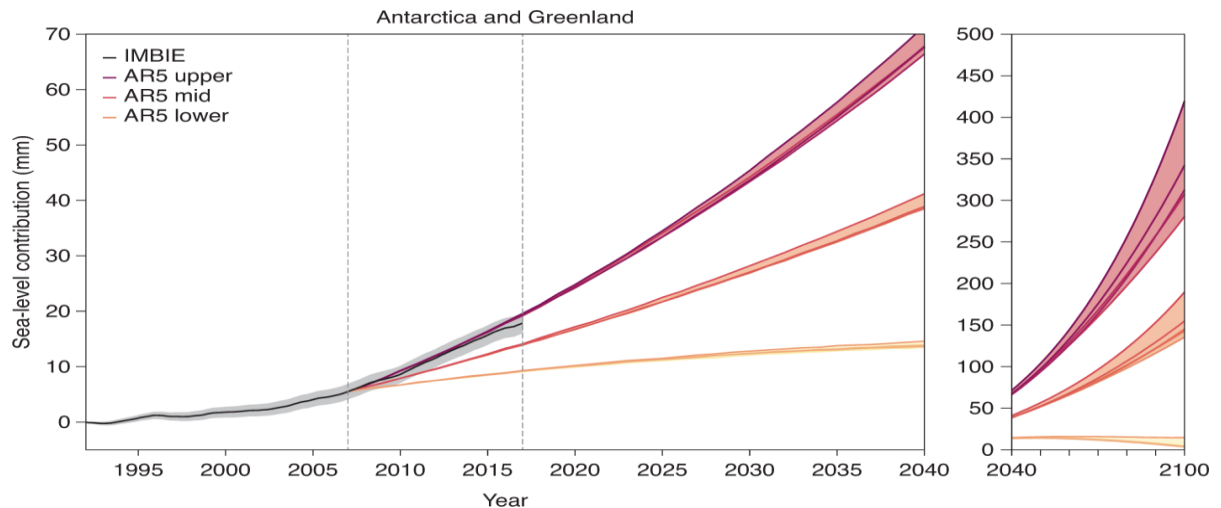


Рисунок 48 – Наблюдаемый и прогнозируемый вклад изменения массы ледникового щита Антарктики и Гренландии в уровень моря [242].

В связи с этим в 2019 году (через 5 лет после четвёртого оценочного доклада МГЭИК) был опубликован «Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата» [107], в котором были пересмотрены (повышены) прогнозные значения изменения ГСУМ до 84 см (диапазон от 61 до 110 см) при сценарии RCP8.5, 55 см (диапазон от 39 до 72 см) при RCP4.5 и 43 см (диапазон от 29 до 59 см) при RCP2.6, т.е. в общем диапазоне от 29 до 110 см, см. Рисунок 49 [107]. В Специальном докладе отмечается, что «Основной причиной повышения глобального среднего уровня моря с 1970-х годов является антропогенное воздействие» и «Повышение уровня моря ускорилось в результате совокупной убыли массы льда Гренландского и Антарктического ледниковых покровов» [107].

Однако наблюдения показали, что фактические измерения концентраций  $\text{CO}_2$  согласуются со сценарием RCP8.5: «в настоящее время темп увеличения



концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере практически идентичен темпу её роста по сценарию RCP8.5» [159] (см. Рисунок 50 а) [159]), эту же точку зрения подтверждает работа [239], в которой говорится: «среди сценариев RCP наиболее близко согласуется RCP8.5 — в пределах 1 % для периода с 2005 по 2020 год — с суммарными кумулятивными выбросами  $\text{CO}_2$ » (см. Рисунок 50 б) [239]). В работе [159] делается вывод о том, что «наблюдаемый рост концентрации  $\text{CO}_2$  в глобальной приземной стратосфере в настоящее время не даёт надежды на реализацию этих оптимистичных сценариев» (имеются ввиду сценарии RCP2.6 и RCP4.5) [159].

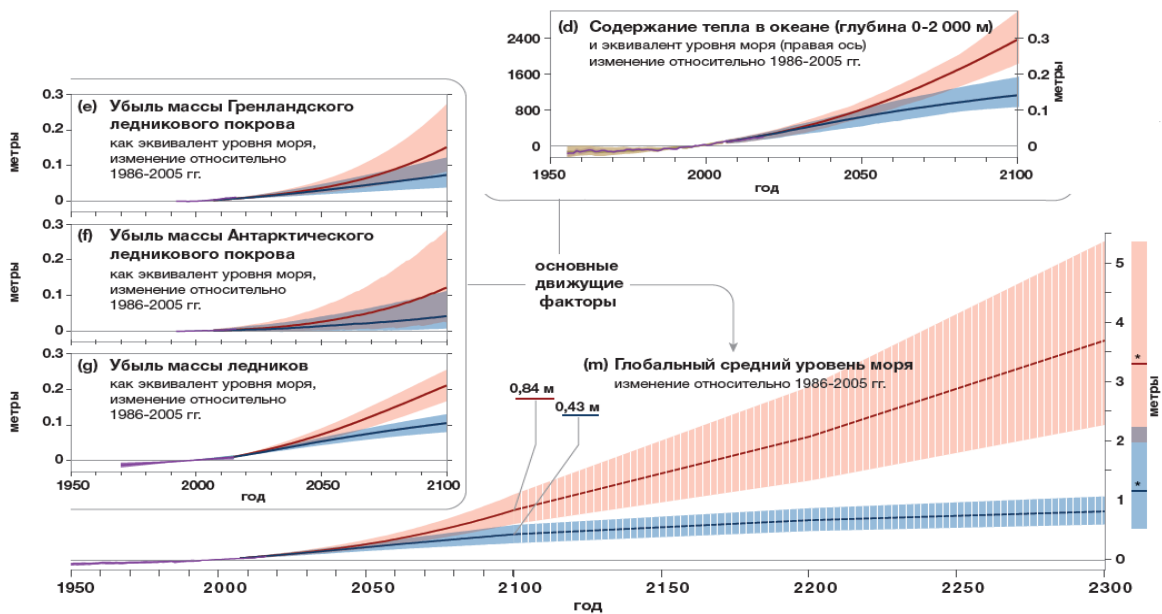


Рисунок 49 – Наблюдаемые и моделируемые исторические изменения в океане и криосфере с 1950 года, а также проекции будущих изменений в рамках сценариев низких (RCP2.6) и высоких (RCP8.5) выбросов парниковых газов [107].

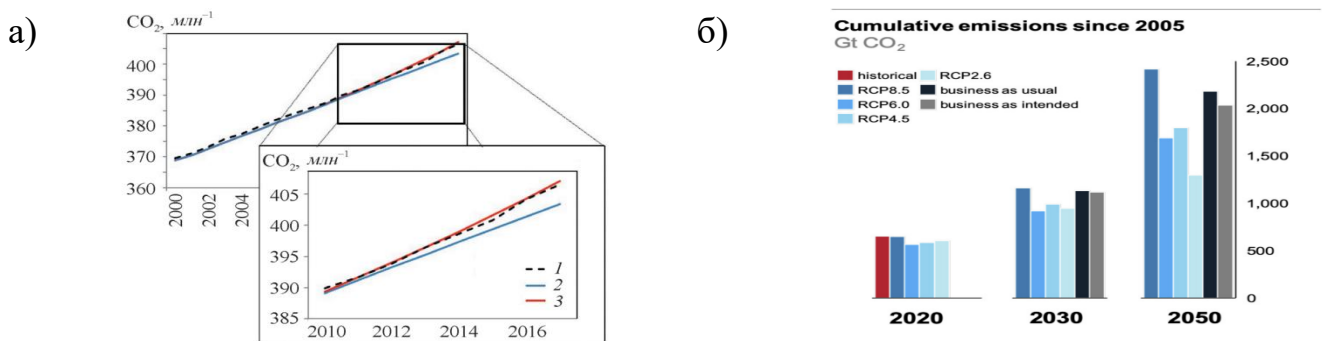


Рисунок 50 – а) Изменение концентрации  $\text{CO}_2$  в приземной глобальной атмосфере с 2000 по 2017 гг., наблюдаемое на станции Мауна Лоа (1) и рассчитанное по модели ИВМ РАН для реализации сценариев RCP6.0 (2) и RCP8.5 (3) [159]; б) Общие совокупные выбросы  $\text{CO}_2$  с 2005 по 2020 гг. и прогнозные величины на 2030 г. и на 2050 г. [239].

При этом ряд авторов указывает, что «В совокупности это говорит о том, что предполагаемое повышение глобального уровня моря к концу этого века в различных докладах МГЭИК в лучшем случае носит консервативный характер и, следовательно, занижает верхнюю границу того, что называется вероятным повышением уровня моря к концу этого века» [195] (см. Рисунок 51 [195]) и согласуется с [176, 216, 230, 237]. Данная точка зрения также согласуется с работой [227], в которой отмечается, что данные наблюдений с 1960 года хорошо описываются квадратичной, а не линейной зависимостью.

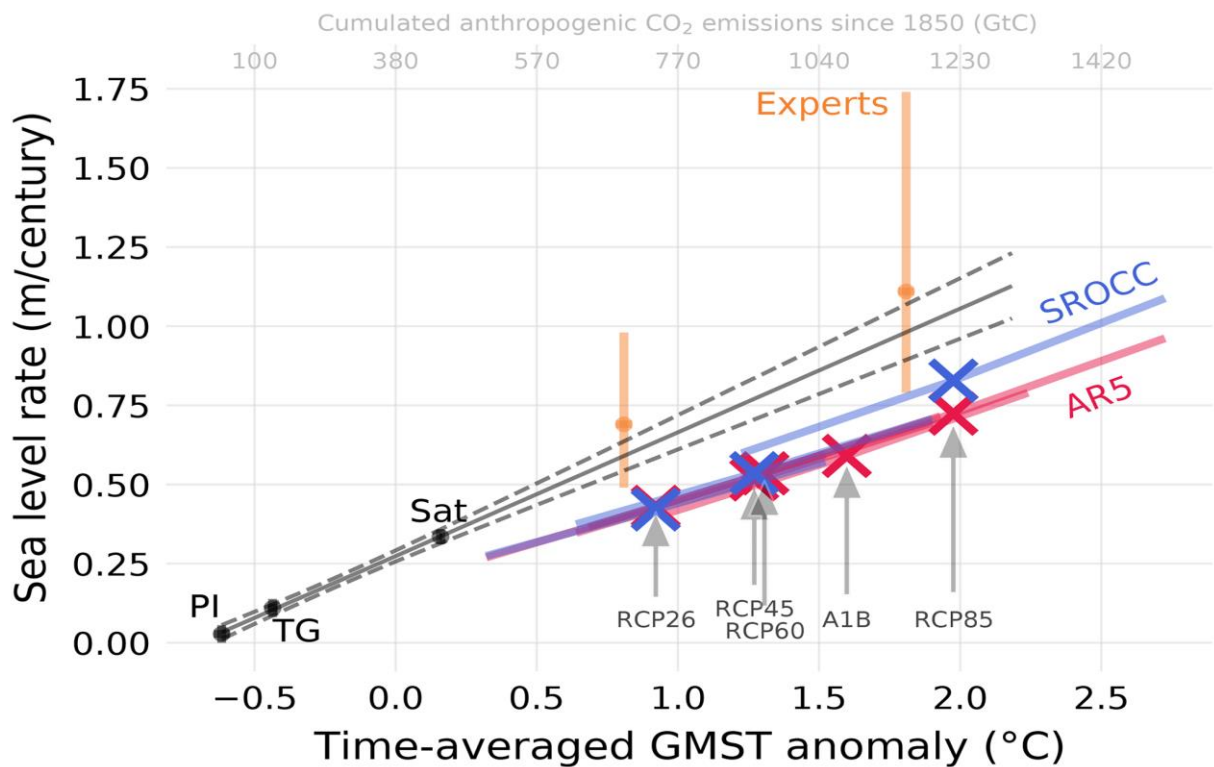


Рисунок 51 – Скорость роста уровня моря в зависимости от долгосрочной средней температуры, как видно из наблюдений (черный цвет), прогнозов модели (красный/синий) и ожиданий эксперта (оранжевый цвет). Каждая точка представляет собой среднее значение за определенный период времени (PI: 1850–1900; TG: 1900–1990; SAT: 1993–2017; AR5/SROCC/experts: 2000–2100) [195].

В связи со всем вышеизложенным была разработана следующая группа сценариев изменения климатической системы «Общие социально-экономические пути» (SSP), которая использовалась в шестом оценочном докладе МГЭИК, опубликованном в 2023 году [201]. Набор сценариев SSP ограничивает концентрацию CO<sub>2</sub> к 2100 году от 395 до 1140 ppm [201](см. Рисунок 52 [201, 336]).

При этом существенно расширяется моделируемый диапазон сценариев, SSP8.5 становится более «агрессивным» сценарием по сравнению с RCP8.5 [224, 228], появляется дополнительный сценарий SSP1.9, моделирующий выполнение Парижских соглашений и ограничение глобального потепления на 1.5 C° [172] (данный уровень при текущих темпах глобального потепления будет достигнут в период с 2030 по 2052 год [199], а принимаемые меры недостаточны для реализации столь «амбициозной» задачи [193]) (см. Рисунок 53 [224]).

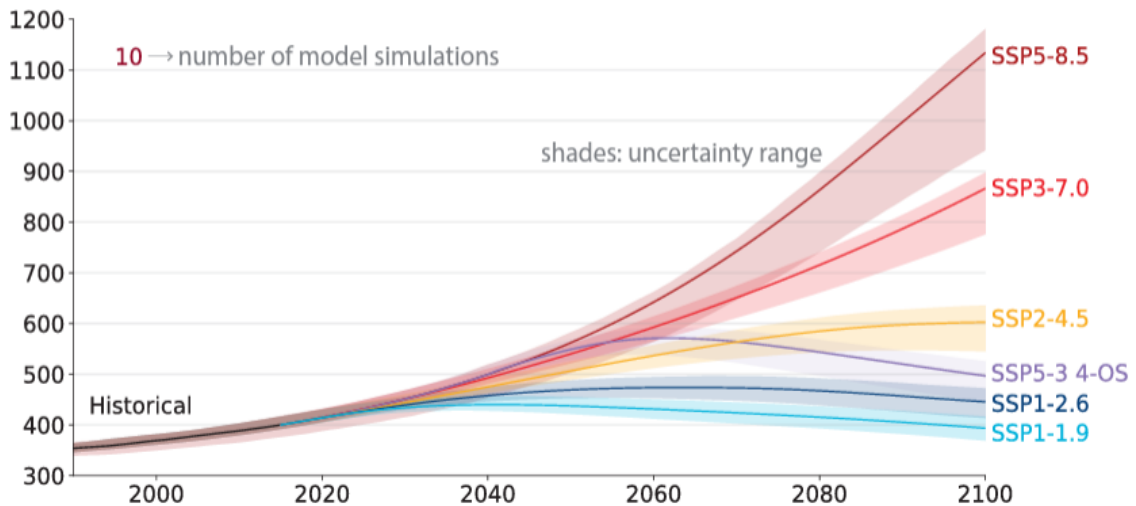


Рисунок 52 – Сопоставление различных общих социально – экономических путей на примере изменений концентрации CO<sub>2</sub> [201, 336].

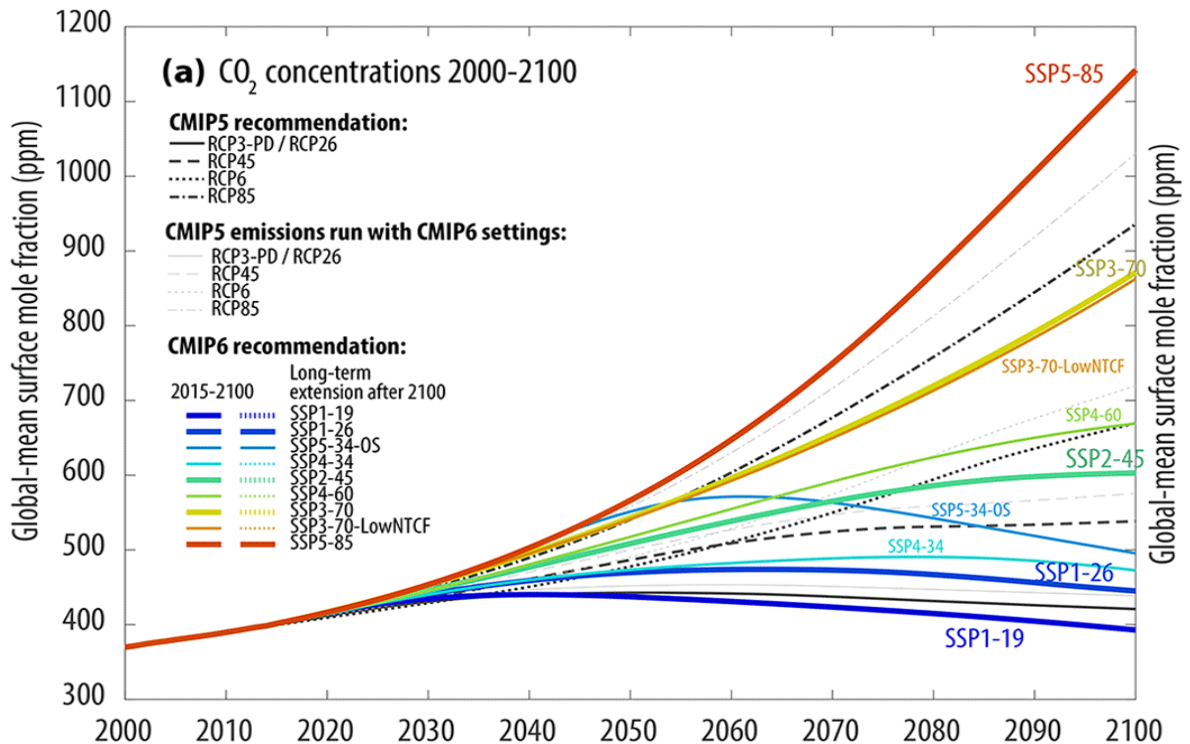


Рисунок 53 – Концентрации CO<sub>2</sub> при сценариях RCP и SSP до 2100 г [224].

Для 6-го оценочного доклада МГЭИК [208] по сравнению с 1995-2014 годами вероятное среднее глобальное повышение уровня моря к 2100 году составит 0.38 м (диапазон 0.28–0.55) по сценарию SSP1-1.9; 0.44 м (диапазон 0.32–0.62) по сценарию SSP1-2.6; 0.56 м (диапазон 0.44–0.76) по сценарию SSP2-4.5; 0.68 м (диапазон 0.55–0.90) по сценарию SSP3-7.0; 0.77 м (диапазон 0.63–1.01) по сценарию SSP5-8.5; 0.88 м (диапазон 0.63–1.60) м по сценарию SSP5-8.5 малой достоверности. При этом повышение среднего глобального уровня моря выше вероятного диапазона – приближение к 2 м к 2100 году при сценарии SSP5-8.5 – нельзя исключать из-за глубокой неопределенности в процессах формирования ледяного покрова (см. Рисунок 54 [208]); изменения относительно 1900 года рассчитываются путем добавления 0.158 м (наблюдаемое глобальное среднее повышение уровня моря с 1900 по 1995-2014 годы) к смоделированным и наблюдаемым изменениям относительно 1995-2014 годов.

Однако с момента опубликования первого оценочного доклада прошло более 20 лет и период моделирования до 2100 года уже составляет не 100 лет, а лишь 77, в связи с этим целесообразным решением было увеличить рассматриваемый для основных модельных расчётов горизонт до 2150 года (и в данном отчёте, и ранее рассматривались периоды моделирования до 2300 года (ЕСР)).

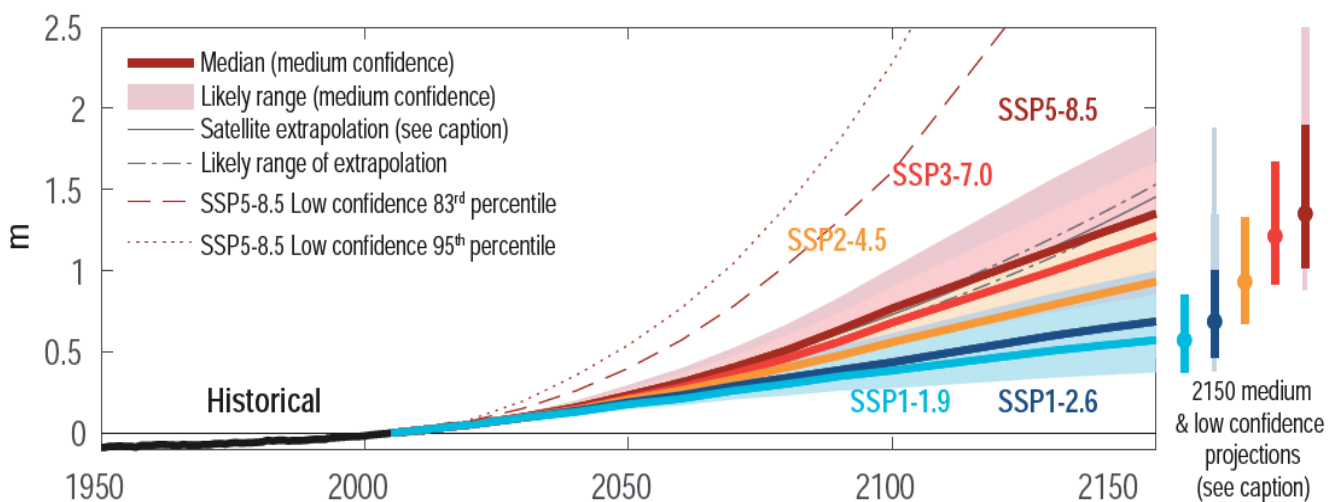


Рисунок 54 – Среднее глобальное изменение уровня моря с 1900 по 2150 год [208].

Для 6-го оценочного доклада МГЭИК [208] по сравнению с 1995-2014 годами вероятное среднее глобальное повышение уровня моря к 2150 году составит 0.57 м

(диапазон 0.37–0.86) по сценарию SSP1-1.9; 0.68 м (диапазон 0.46–0.99) по сценарию SSP1-2.6; 0.92 м (0.66–1.33) по сценарию SSP2-4.5; 1.19 м (диапазон 0.89–1.65) по сценарию SSP3-7.0; 1.32 м (диапазон 0.98–1.88) по сценарию SSP5-8.5; 1.98 м (диапазон 0.98–4.82) по сценарию SSP5-8.5 малой достоверности. В данном оценочном докладе прямо указываются причины и доля их вклада в глобальное повышение среднего уровня моря: «Нагрев климатической системы вызвал глобальное повышение среднего уровня моря из-за потери льда на суше и теплового расширения в результате потепления океана. Тепловое расширение объяснило 50% повышения уровня моря в период 1971–2018 годов, в то время как потеря льда с ледников составила 22%, ледяные щиты - 20%, а изменения в запасах воды на суше - 8% (см. Рисунок 55 [208]).

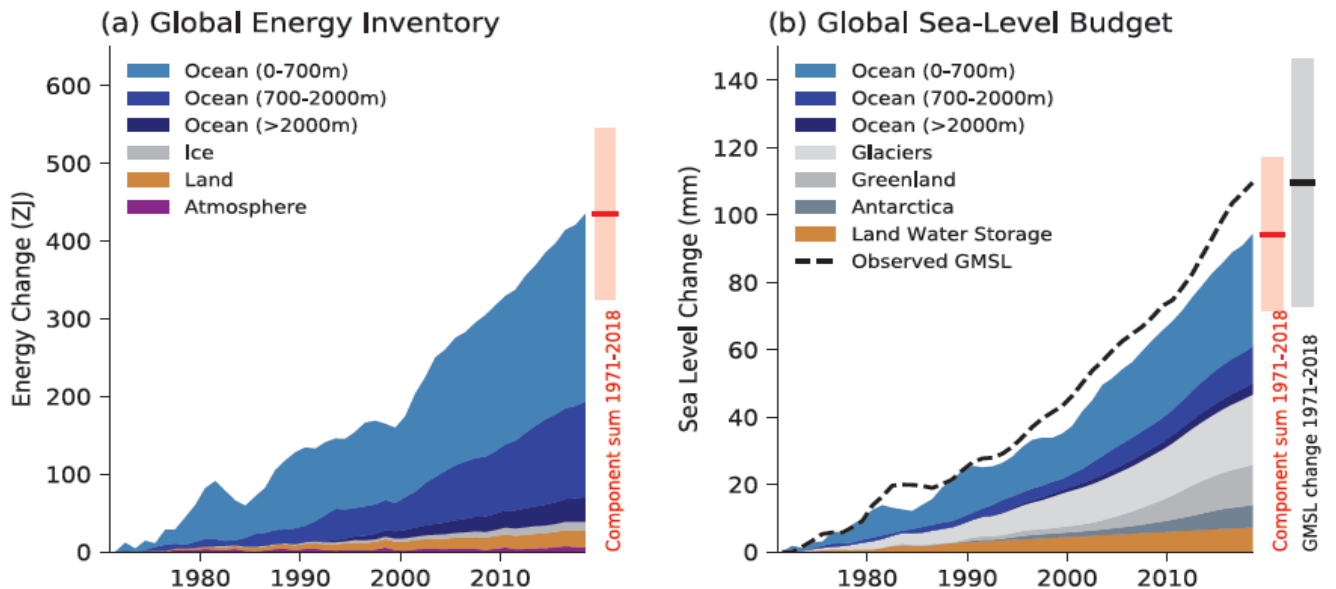


Рисунок 55 – а) Наблюдаемые изменения в глобальном энергетическом балансе за 1971–2018 годы; б) Наблюдаемые изменения компонентов глобального среднего уровня моря за 1971–2018 годы [208].

Темпы таяния ледяного покрова увеличились в четыре раза в период с 1992–1999 по 2010–2019 годы. В совокупности ледяной покров и потеря массы ледников были основными причинами глобального повышения среднего уровня моря в 2006–2018 годах» [208]. При этом уточняется динамика изменения скорости роста ГСУМ, которая «повысился на 1.3 мм/год (диапазон 0.6–2.1) в период с 1901 по 1971 год, увеличившись до 1.9 мм/год (диапазон 0.8–2.9) мм в год в период с 1971 по 2006 год и далее увеличившись до 3.7 мм/год (диапазон 3.2–4.2) мм в год в

период с 2006 по 2018 год. Влияние человека, весьма вероятно, было основной движущей силой этого роста, по крайней мере, с 1971 года» [208].

Однако не корректно говорить о том, что для конкретного сценария получена N-я величина роста уровня моря, поскольку при моделировании климатической системы используется множество наиболее достоверных моделей, следовательно производится осреднение по ансамблю моделей, выполнявших моделирование (прогон) по одному и тому же сценарию изменения климатической системы, и получается осреднённая по ансамблю величина с указанием диапазона полученных значений.

Проект взаимного сравнения совмещенных моделей (CMIP) (моделей общей циркуляции атмосферы и океана (AOGCMs) и моделей земной системы (ESMS) [206]) с 1995 года служит для объединения результатов множества моделей с целью подготовки данных для дальнейшего использования в виде осреднённых результатов по ансамблю моделей. Различные этапы данного проекта объединяют в себе разное количество моделей, так CMIP3 включает в себя 24 модели, в том числе одну Российскую – INM-CM3.0 [206]; CMIP5 включает в себя 41 модель, в том числе одну Российскую – INM-CM4 [206]; в 6-й оценочный доклад МГЭИК, использующий данные CMIP6, были включены результаты 68 моделей, в том числе двух Российских – INM-CM4-8 и INM-CM5-0 [208]. При этом количество используемых моделей не одинаково для всех сценариев и количество используемых моделей для сценария SSP1-1.9 более чем в два раза меньше чем для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 (13 против 31 модели на 2020 год [245]).

Приведённый выше обзор развития групп иллюстративных сценариев, используемых МГЭИК и мировой научной общественностью для моделирования климата, позволяет сделать ряд выводов:

- Создаваемые группы сценариев имеют тенденцию к увеличению предельных рассматриваемых концентраций CO<sub>2</sub>, т.е. рассматриваются всё более «агрессивные» сценарии выбросов парникового газа;

- Наблюдаемые уровни концентраций CO<sub>2</sub> наиболее хорошо согласуются с «агрессивными» и «умеренно-агрессивными» сценариями, такими как RCP6.0 – RCP8.5 и SSP3-7.0 – SSP5-8.5;

- Наблюдается наличие устойчивого тренда к повышению ГСУМ, которое имеет не линейный характер, а ускоряется во времени и наиболее близко к квадратичной зависимости [227];

- В модельных прогнозах присутствует неопределённость [234], как поддающаяся количественной оценке, так и связанная с недостаточной изученностью ряда физических механизмов;

- Наибольшую неопределённость в будущие прогнозы изменения ГСУМ вносит недостаточная изученность динамики таяния ледникового покрова в Антарктике и Гренландии [174, 176, 216], которая может быть недооценена в используемых моделях, что может привести к более существенному повышению ГСУМ;

- Наблюдаемые потери ледникового покрова в Антарктике и Гренландии соответствуют верхнему диапазону прогнозов уровня моря в Пятом оценочном докладе МГЭИК [242];

- Развитие глобальных климатических моделей и вычислительных мощностей [238], и, как следствие, повышение точности моделирования, привело к смещению диапазона прогнозного повышения уровня моря в сторону увеличения (см. Рисунок 56);

- Прогнозные значения повышения ГСУМ, представленные МГЭИК, достаточно консервативны [176, 195, 216, 230, 237], а наиболее хорошо согласуются с экспертными оценками [176, 195] сценарии SSP3-7.0, SSP5-8.5, SSP5-8.5 малой достоверности и средне-высокие сценарии NOAA [230] (см. Рисунок 57 [176]).

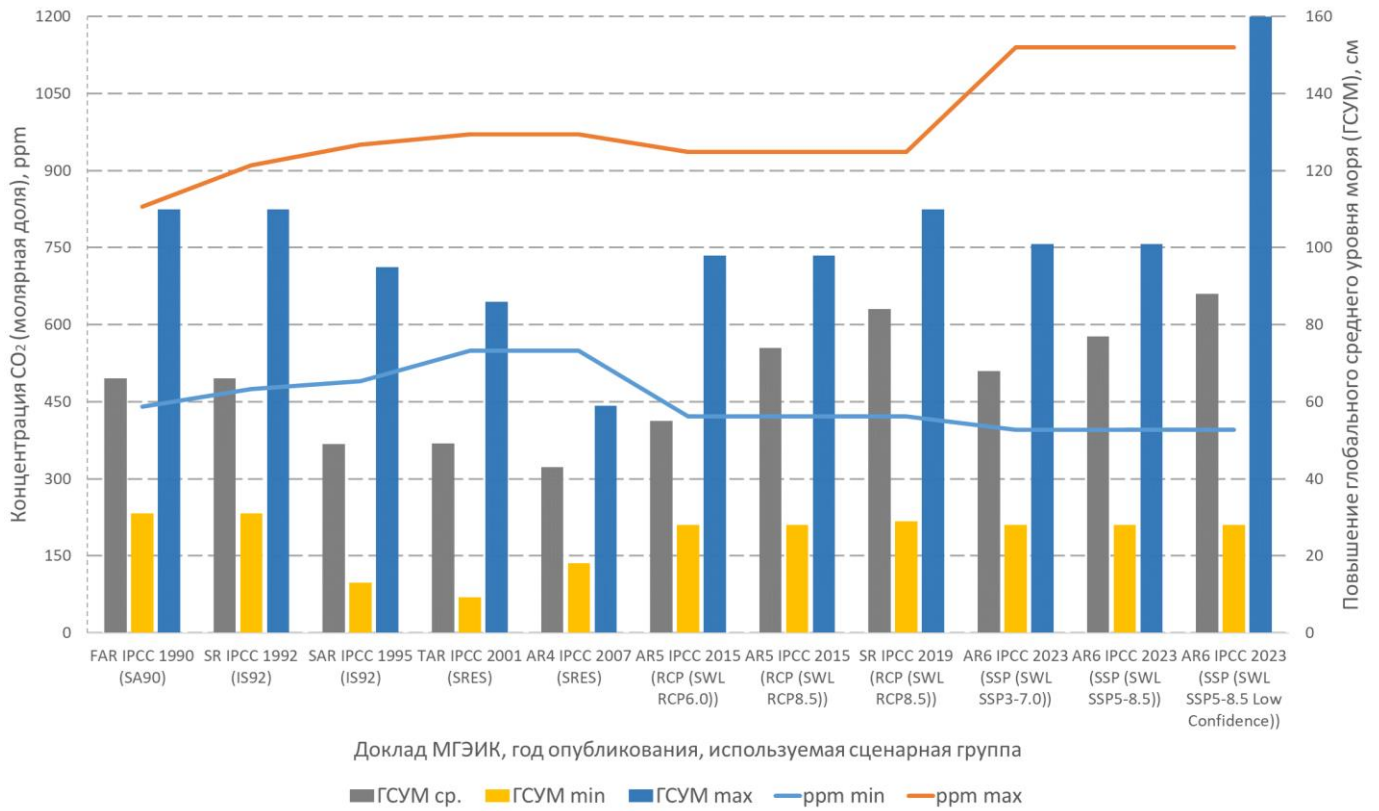


Рисунок 56. – Сравнение диапазонов концентраций CO<sub>2</sub> и повышения ГСУМ, приведённых в различных оценочных докладах МГЭИК.

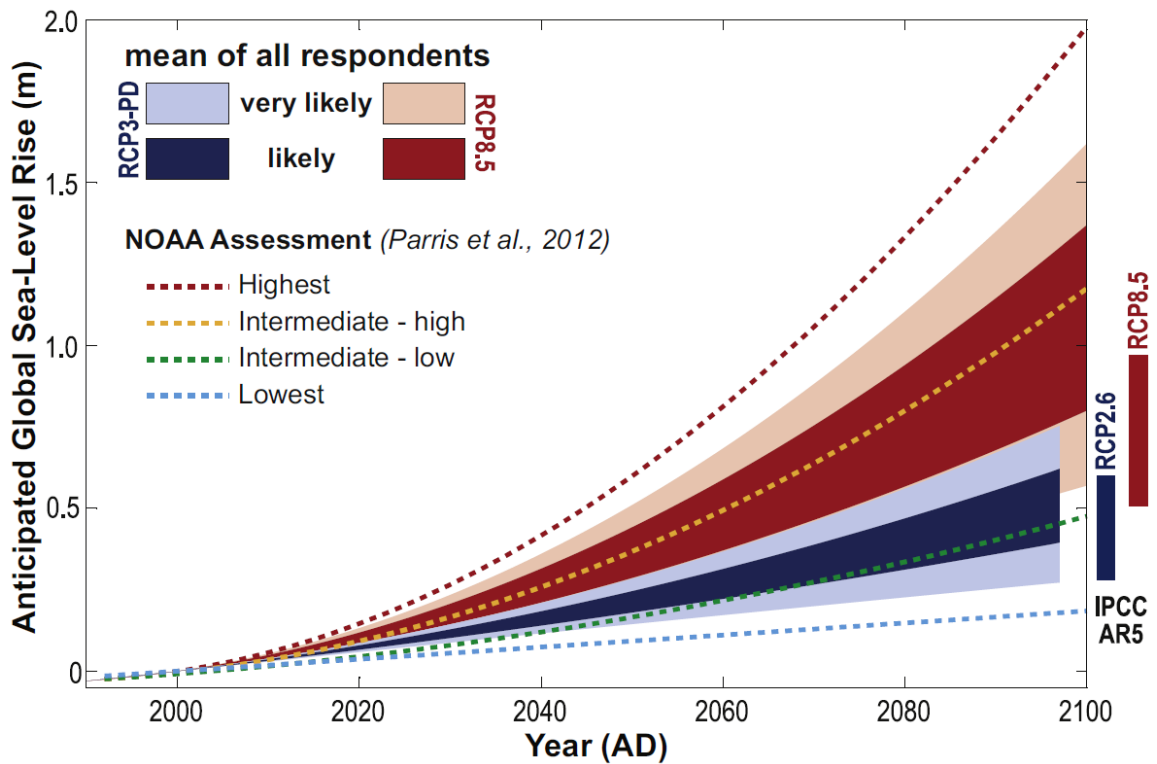


Рисунок 57 – Прогнозные значения будущего повышения ГСУМ для сценариев (RCP3-PD; синий и RCP8.5; красный) [176].



## **2.5. Региональные прогнозные климатические изменения. Оценка изменения уровня режима для ряда портов, расположенных на трассе СМП**

Прогнозные оценки изменения глобального среднего уровня моря позволяют лишь понять общую тенденцию, в то время как для принятия решений при проектировании гидротехнических сооружений портов требуется информация о локальных, прогнозных изменениях уровня режима свойственных региону строительства. Это мнение подтверждается в [216]: «Местное изменение уровня моря (LSL) может значительно отличаться от повышения глобального уровня моря (GSL), поэтому для планирования адаптации и управления рисками локальные оценки имеют решающее значение».

Пространственная неоднородность изменений уровня моря связана с рядом факторов [216]:

- Неравномерные изменения в динамике океана, теплосодержании и солености;
- Возмущения гравитационного поля Земли и высоты земной коры (вместе известные как эффекты статического равновесия), связанные с перераспределением массы между криосферой и океаном;
- Изостатическая корректировка ледников (GIA);
- Вертикальное движение суши из-за тектоники, местных грунтовых вод и изъятия углеводородов, а также естественного уплотнения и переноса отложений.

Так, в [197] отмечается: «Поскольку ни один процесс, влияющий на уровень моря, не вызывает глобально однородного изменения уровня моря, региональные изменения уровня моря обычно отличаются от повышения ГСУМ». Это же мнение высказывается в [66]: «Огромная территория России существенно неоднородна по потенциальному отклику на изменение климата. Поэтому необходимы региональные исследования, в частности с помощью региональных моделей, уточняющие оценки первого приближения». Уже в настоящее время данные спутниковой альтиметрии позволяют фиксировать неоднородность изменений уровня режима в различных регионах планеты (см. Рисунок 58 [334]).

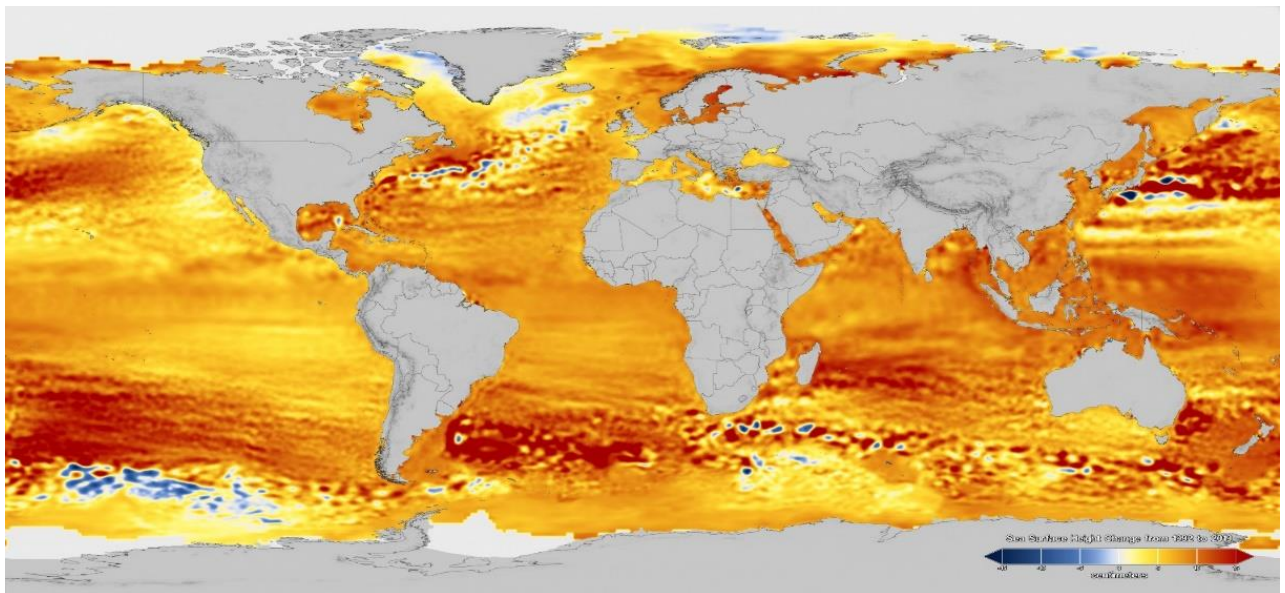


Рисунок 58 – Изменения уровня моря с 1992 по 2019 гг. по данным NASA [334].

На сегодняшний день проведено большое количество исследований как зарубежных, так и отечественных климатологов, которые сходятся в едином мнении: изменения климата - реальность XXI века, которая не исчезнет, и темпы изменений будут только прогрессировать. Арктика, как регион наиболее чувствительный к изменениям температуры атмосферы и, как следствие, температуры приповерхностных вод, имеет устойчивый положительный тренд к потеплению, который в несколько раз превышает средний планетарный уровень. В Арктическом регионе локальные эффекты становятся ещё более значимыми при моделировании климата, особенно заметными для наиболее «агрессивных» сценариев (см. Рисунок 59 [206]). Существенной особенностью Арктического региона является наличие круглогодичных Арктических льдов. Наблюдаемая тенденция к сокращению площади Арктических льдов (см. Рисунок 60 [323] и Рисунок 61 [208]) означает увеличение безлёдного пространства вблизи берегов, что может благоприятно сказаться на условиях навигации.

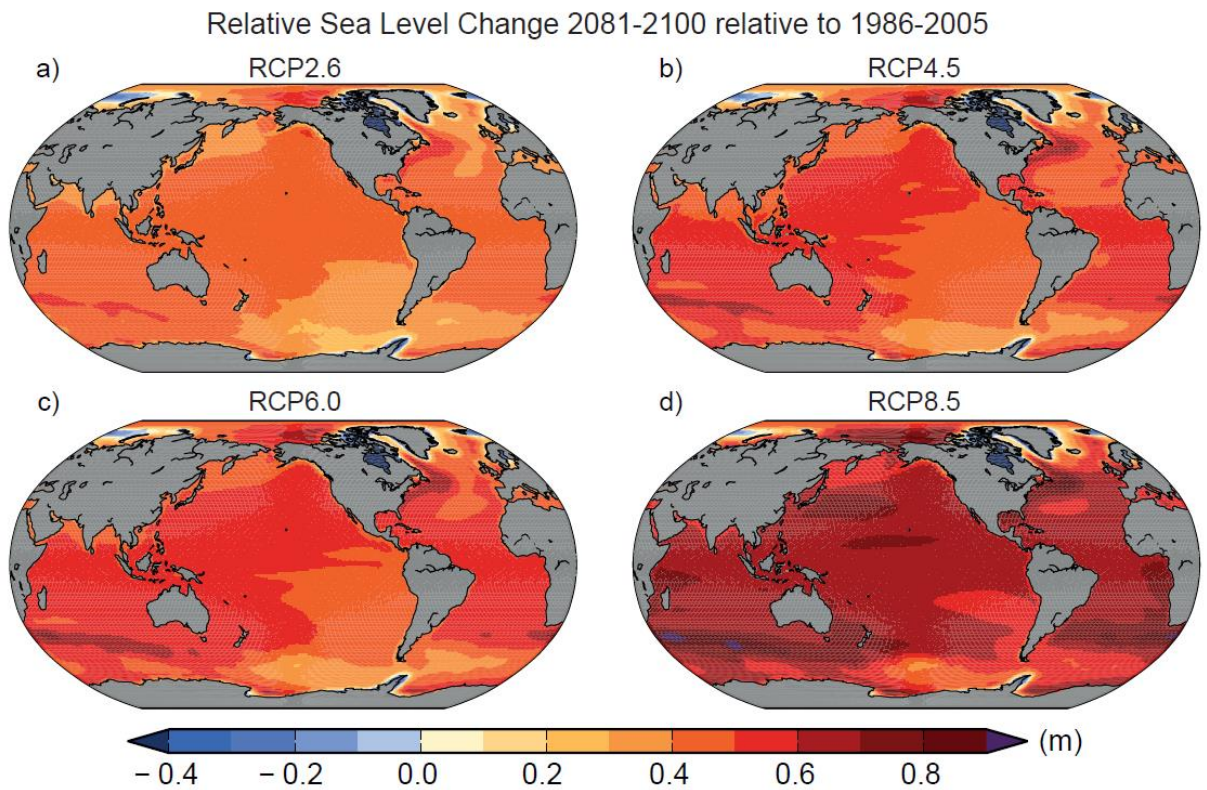


Рисунок 59 – Совокупное среднее чистое региональное изменение относительного уровня моря (в метрах), оцененное по 21 модели CMIP5 для сценариев RCP [206].

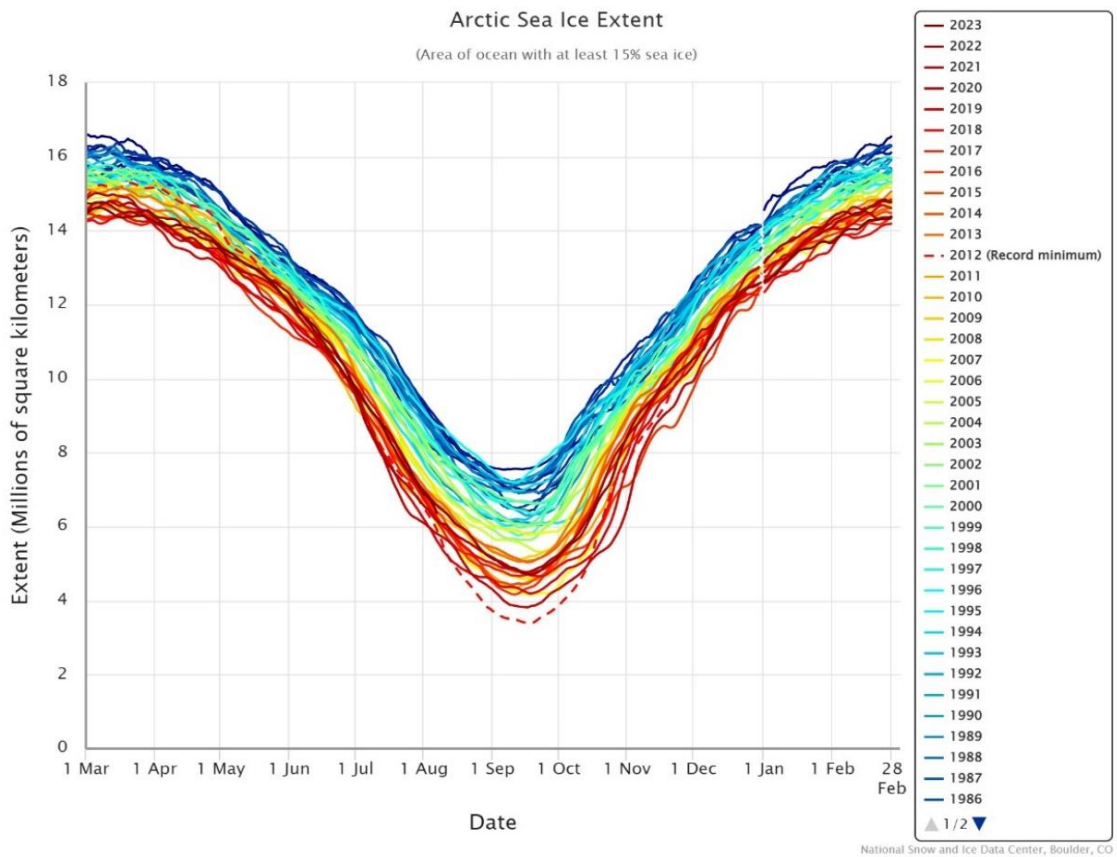


Рисунок 60 – Площадь морского льда в Арктике по данным наблюдений в период с 01 января 1979 по 07 августа 2023 года [323].

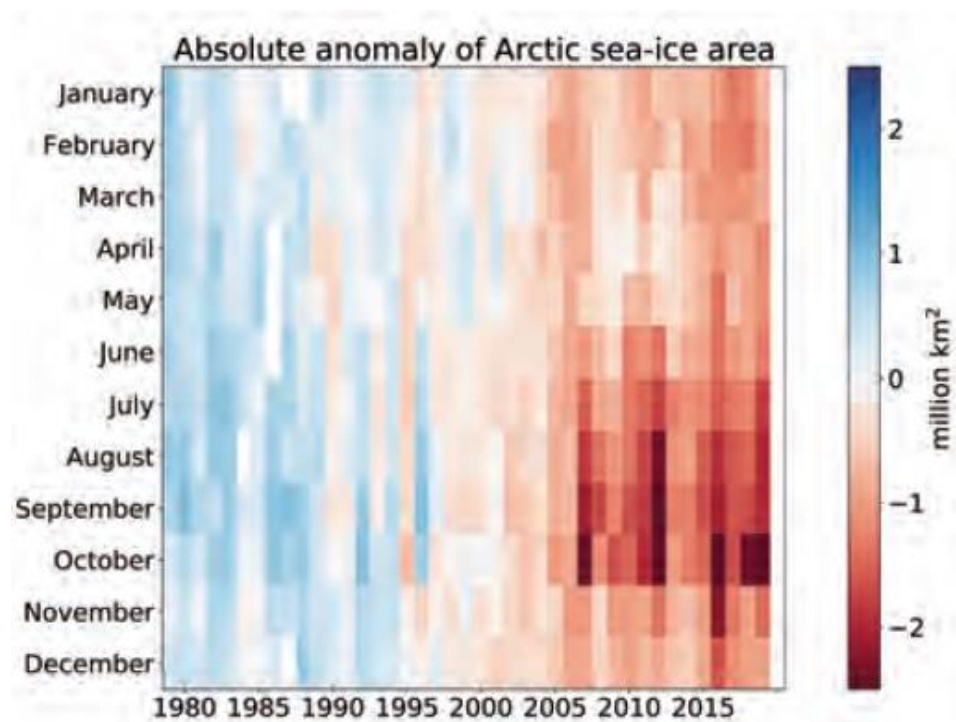


Рисунок 61 – Абсолютная аномалия среднемесячной площади морского льда в Арктике за период с 1979 по 2019 год относительно среднемесячной площади морского льда в Арктике за период с 1979 по 2008 год [208].

Поскольку процесс сокращения площади льда происходит в результате повышения температуры как поверхностных вод, так и приземной атмосферы, то при этом наблюдается и уменьшение толщины ледового покрова. Данный эффект обусловлен сокращением распространения многолетних льдов и изменением структуры льдов Арктики к преимущественно однолетним. Однолетние же льды, в силу естественных причин, имеют меньшую толщину, и, следовательно, оказывают меньшее воздействие на суда и на морские гидротехнические сооружения.

Данные моделирования, представленные в [200], подтверждают, что тенденция к сокращению площади Арктических морских льдов будет продолжаться в ближайшие десятилетия, а к середине века Арктика, в которой в летний сезон происходит максимальная потеря площади льда ввиду климатических изменений, сможет полностью освободиться ото льда (см. Рисунок 62 [200]). Данный факт неизбежно отразится на длительности периода навигации в Арктическом регионе.

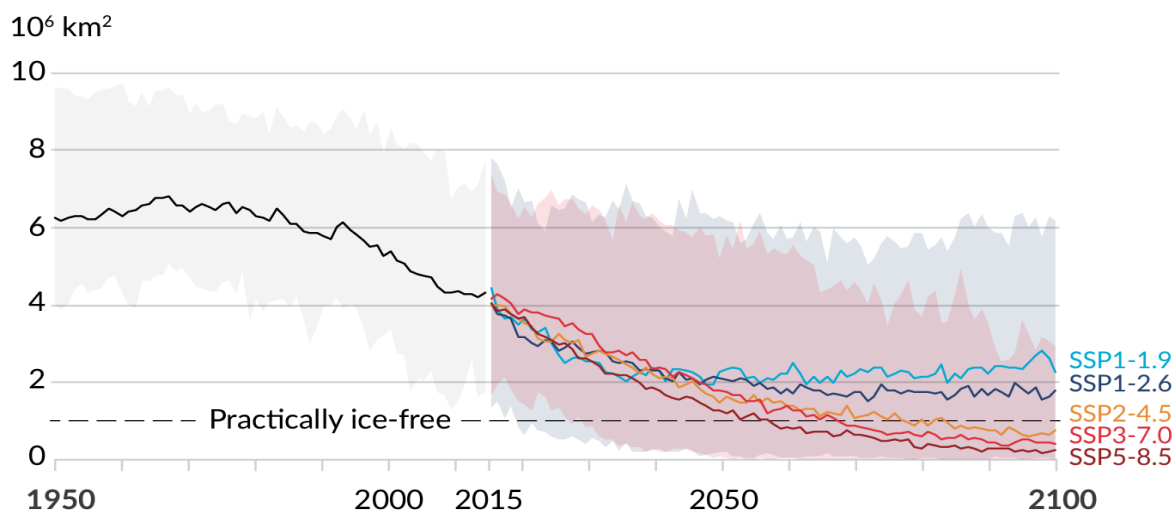


Рисунок 62 – Распространение Арктических морских льдов на месяц сентябрь относительно 1986-2005 гг. [200].

Исторически период навигации составлял до пяти месяцев в году, остальное же время моря были покрыты льдами значительной толщины. Однако наблюдаемые изменения климата привели к существенному увеличению продолжительности периода навигации. К 2020 году продолжительность навигации на отдельных участках СМП могла достигать до девяти месяцев. В 2021 году СПГ-танкеры «Кристоф де Маржери» и «Николай Евгенов», относящиеся к ледовому классу Arc7, впервые осуществили самостоятельное, то есть без сопровождения ледокола, плавание из порта Сабетта по СМП, выйдя 16 и 17 января соответственно в Берингов пролив [328]. «Субсидированные каботажные рейсы на лихтеровозе «Севморпуть» «Атомфлот» запустил в 2022 году» [53], а уже 7 июля 2023 года был запущен первый рейс (контейнеровоз «Newnew Polar Bear») из Санкт-Петербурга в Шанхай с сокращением времени в пути до 28 дней, по сравнению с 45-50 днями при маршруте через Суэцкий канал [53].

Наиболее западное из морей АЗРФ – Баренцево имеет исключительную роль в климатической подсистеме Европейского севера в связи с поступлением тёплых вод Гольфстрима [149, 179] и непрерывной адвекцией этих тёплых атлантических вод [160] Мурманским течением и притоком вод Центрального Арктического бассейна [17]. В результате тепляющего влияния Северо-Атлантического течения, Баренцево море имеет высокий уровень теплосодержания (уровень его теплообмена заметно превышает показатели Исландской и Норвежской

энергоактивных зон [30]), в связи с чем уже в настоящее время его юго-западная часть является незамерзающей.

В рамках проведения исследований автор проходил обучение по научно-образовательной программе «Плавающий университет», осуществляемой при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ и входящей в список поддержанных инициатив Десятилетия наук об океане в интересах устойчивого развития (2021-2030 гг.) ООН. В рамках проекта на базе ИО им. П.П. Ширшова РАН и МТФИ изучалось численное моделирование в трёхмерной гидродинамической модели высокого разрешения океана – NEMO. В процессе обучения был проведён численный эксперимент по моделированию термохалинной структуры вод Баренцева моря по осреднённым данным суточных наблюдений за январь 2020 года. В результате расчётов в модели NEMO наглядно продемонстрирован теплоперенос Гольфстрима в Баренцево море. Данная задача решалась в достаточно жёстких граничных условиях для наглядной демонстрации сути явления (референсный эксперимент) с суточным разрешением данных, и не обладает научной новизной, однако позволяет наглядно оценить степень проникновения отепляющих вод Гольфстрима в прибрежные районы Баренцева, Печорского и частично Белого и Карского морей (см. Рисунок 63).

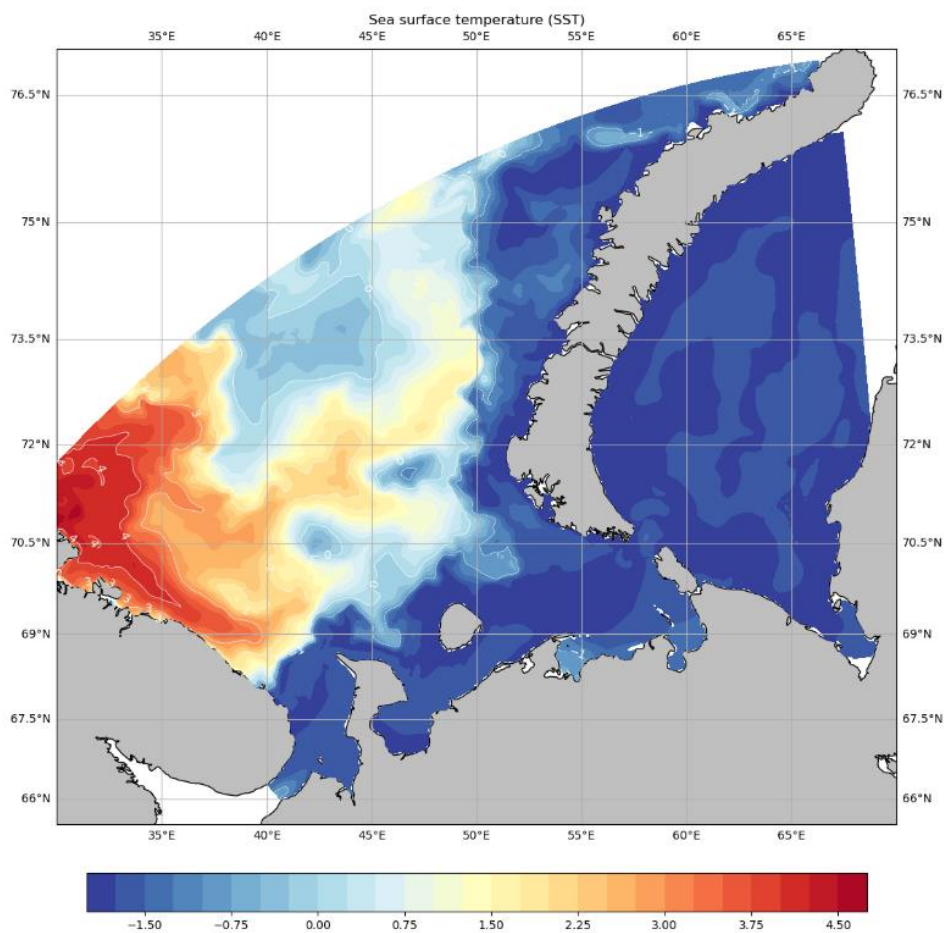


Рисунок 63 – Изополе поверхностной температуры вод в рассматриваемом районе, по результатам референсного численного эксперимента в модели NEMO.

По данным ИО им. П.П. Ширшова РАН, полученным с использованием климатических моделей MPI-ESM-MR, HadGEM2-ES, CCSM4, ярко выраженное изменение уровня в области Белого и Печорского морей, т.е. в зоне расположения транспортной инфраструктуры СМП. Прогнозы представлены относительно периода 1979-2005 годов [23] и показывают, что в рассматриваемом регионе уровень моря будет повышаться в южной части Баренцева моря наиболее интенсивно с максимальными значениями в Белом море и Чёшской губе (см. Рисунок 64 а-в) [23]) [185, 186]. При этом существенные изменения будет претерпевать и продолжительность навигации, которая к концу века при сценарии RCP8.5 будет круглогодичной до 80° с.ш. (см. Рисунок 64 г-е [23]). В проведённых расчетах оценивалось «количество суток в году, когда концентрация льда в данной ячейке сетки составляла более 15%» [23].

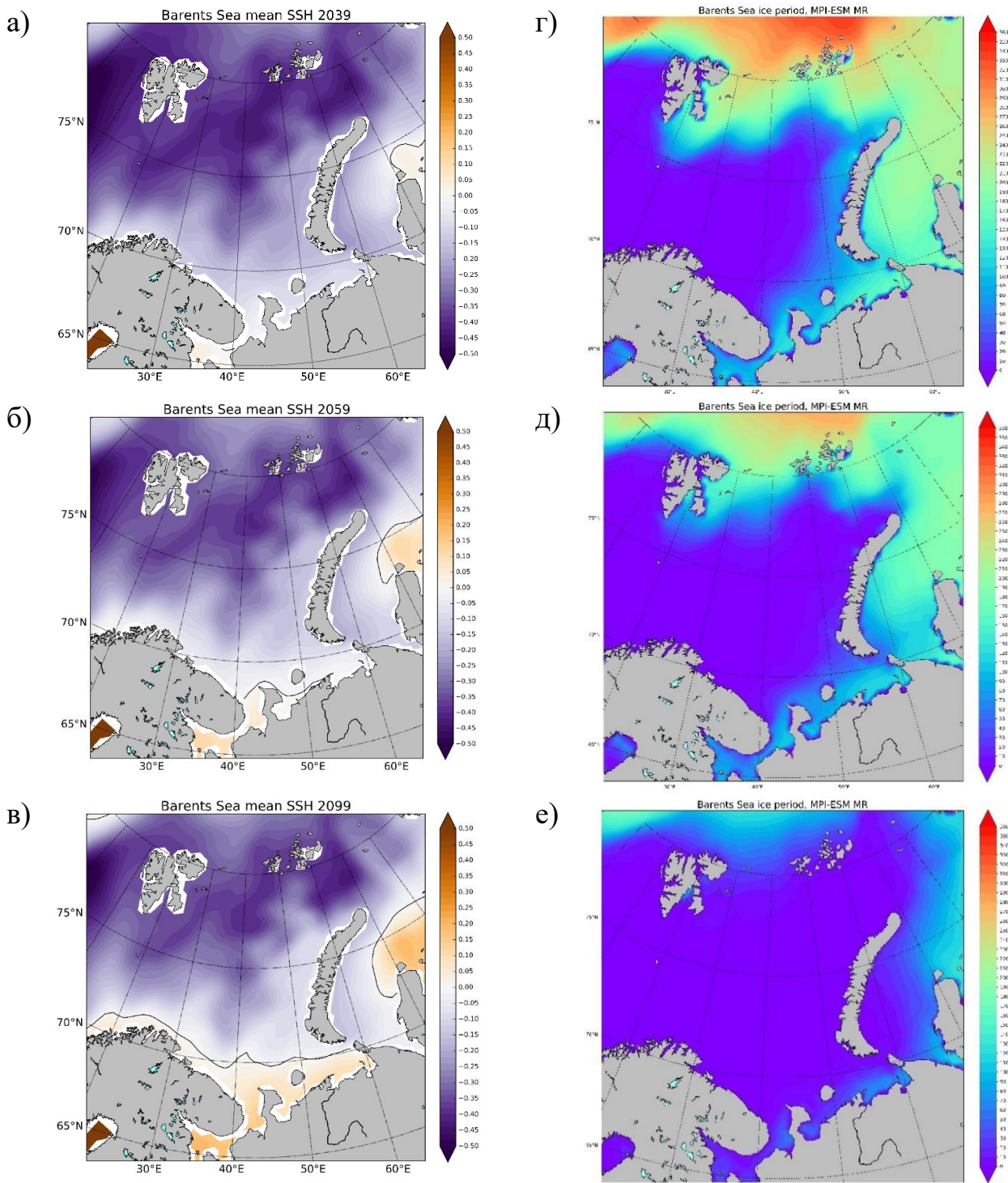


Рисунок 64 – Изополя изменения уровня режима (а-в) и продолжительности ледового периода (г-д) для сценария RCP8.5 в 2039 году (а и г), в 2059 году (б и д) и в 2099 году (в и е). Для уровня режима шкала изменяется от -0.5 (фиолетовый) до +0.5 (бордовый) метров, а для продолжительности ледового периода от 0 (фиолетовый) до 360 (красный) дней в году [23].

В настоящей работе для оценки региональных прогнозных изменений уровня режима моря будут рассматриваться данные, представленные в отчёте Рабочей группы №1 в Шестом оценочном докладе МГЭИК [208]. Эти результаты



использованы в [335], в котором даётся ряд представленных далее пояснений. Рассматриваемые прогнозы уровня моря учитывают только процессы, для которых прогнозы могут быть сделаны как минимум со средней степенью достоверности, а именно результаты 17–83 перцентилей, интерпретируемые как вероятные диапазоны, отражающие использование термина «вероятно», относящегося к вероятности не менее 66% по методике МГЭИК. Для процессов изменения ледниковых щитов Антарктики и Гренландии в настоящий момент существует невысокий уровень согласия, но они учтены в сценариях низкой достоверности SSP1-2.6 и SSP5-8.5, что означает также результаты 17–83 перцентилей, но не оцениваемые как вероятные диапазоны из-за низкой согласованности и ограниченности доказательств. Результаты представлены относительно периода 1995–2014 гг. для пяти сценариев SSP, при этом после 2100 г. доступно меньше моделей глобального климата, что может приводить к разрыву в прогнозах между 2100 г. и следующим десятилетием, особенно в регионах, где динамические эффекты уровня моря имеют важное значение.

В связи с тем, что результаты моделирования опубликованы с разбивкой через десятилетие, а внедрение новых методик в практику и нормативно-правовую документацию требует времени, то в данной работе целесообразно использование рассматриваемого периода с 2030 по 2130 год. Автором диссертации было проведено сравнение сценариев локальных изменений уровня режима портов на трассе СМП (см. Таблица 6). Из представленных в Таблица 6 результатов можно сделать вывод о том, что для портов, расположенных на побережьях окраинных морей Арктического и дальневосточного бассейнов, характерно более высокое прогнозное повышение уровня режима по сравнению с глобальным (см. Рисунок 65 на основе данных [335]). Для портов в устьях рек, губах или сильно удалённых от океана, как правило, характерно меньшее увеличение уровня режима. При этом аномальными относительно общей тенденции, а именно с тенденцией к понижению уровня моря, являются центральная и восточная оконечности северного побережья Новой земли, острова Франца – Иосифа, Шпицберген.

Таблица 6 - Грузооборот и прогнозный рост уровня моря (SSP3-7.0 / SSP5-8.5 квантиль 50% [335]) за рассматриваемый период для портов на трассе СМП.

№ п/п	Бассейн	Порт (широта и долгота, при отсутствии порта в модели) (регион)	Грузооборот на 2022 год, млн. тонн	Рост уровня моря, см
	Глобальный средний уровень моря			88.4 / 100.2
1	Арктический	Мурманск (Баренцево море)	56.3 (2022) [293]	64.6 / 77.5
2		Архангельск (65;39) (Белое море)	2.3 (2022) [293]	75.2 / 90.4
3		Индига (68;47) (Баренцево море)	- (80 к 2030, 120 к 2035 [307])	110.6 / 124.7
4		Варандей (68;57) (Баренцево море, Печорское море)	5.9 (2022) [293]	95.2 / 108.8
5		Сабетта (71;73) (Карское море)	28.4 (2022) [293]	66.8 / 81.4
6		Диксон и Порт «Бухта Север» (Карское море)	- (25 к 2025 [306])	73.6 / 87.6
7		Тикси (море Лаптевых)	0.67 (2022) [293, 295]	111.0 / 128.8
8		Певек (Восточно – Сибирское море)	0.4 (2022) [308]	106.3 / 128.4
	Итого		93.57 (95.0 % от 98.5)	
9	Дальне-восточный	Анадырь (63;180) (Берингово море)	1.4 (2022) [294]	89.4 / 105.8
10		Петропавловск – Камчатский (Тихий океан)	2.07 (2022) [303]	98.3 / 111.3
11		Магадан (Охотское море)	1.87 (2022) [318]	73.0 / 84.4
12		Эльга (55;136) (Охотское море)	- (30 к 2030 [311])	81.5 / 93.6
13		Корсаков, Пригородное (46;142) (Охотское море)	1.4 (2022) (30 к 2035 [290]), 15.4 (2022) [292, 297]	89.4 / 102.5
14		Ванино (49;141) (Японское море)	37.6 (2022) [308]	86.5 / 98.4
15		Ольга (43;135) (Японское море)	1.5 (2022) [308]	93.5 / 106.3
16		Восточный, Находка, Вера, Владивосток (42;132) (Японское море)	82.3 (2022), 25.8 (2022), 6.3 (2022), 32.2 (2022) = 146.6 (2022) [308]	93.3 / 106.6
	Итого		207.84 (91.2% от 227.8)	

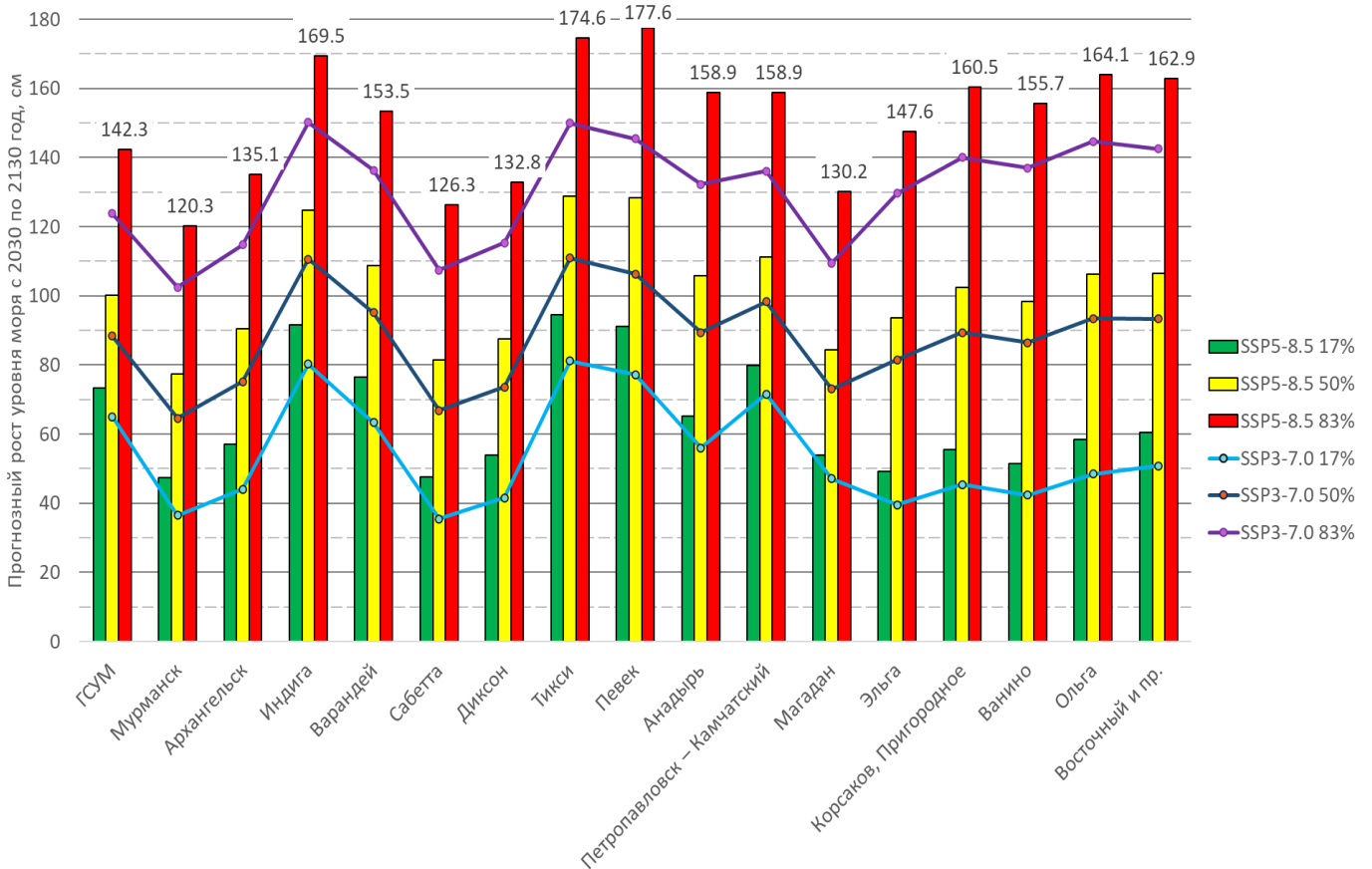


Рисунок 65 – Прогнозный рост уровня моря по сценариям SSP3-7.0 и SSP5-8.5 за период с 2030 по 2130 год для портов на трассе СМП. В легенде после наименования сценария указывается процентиль используемых результатов из [335].

Климатические изменения уровня режима оказывают существенное влияние на прибрежную инфраструктуру, включая ПГТС. Для малых островных развивающихся государств (например острова Карибского бассейна [240]) данная проблема является трудной для решения ввиду необходимости существенных капиталовложений и большого масштаба (для данных стран): «Окружающие портовые земли в 35 из 44 карибских портов будут затоплены 1 м SLR, если они не будут защищены новыми прибрежными сооружениями» [241] (под SLR подразумевается региональное изменение относительного уровня моря).

Однако это касается не только островных государств [192, 198, 250], в [250] отмечается, что: «Без прямых инвестиций в адаптацию к 2100 году риск прибрежных наводнений в Европе может возрасти на два-три порядка», а в [192]: «Более половины сообществ в США недооценивают верхнюю границу будущего повышения уровня моря по сравнению с прогнозами из последнего отчета

МГЭИК». Опрос [178] о состоянии (инфраструктур) портов мира и их готовности к прогнозным изменениям климата представителей 89 портов, имеющих членство в Международной ассоциации портов и гаваней (IAPH) и Американской ассоциации портовых властей (AAPA), показал, что «Несмотря на создание инфраструктуры, рассчитанной на многие десятилетия, горизонт планирования большинства портов не превышал 10 лет» [178]. И хотя респонденты отмечают, что рост уровня моря – это главная проблема для эксплуатации портов, которая приведёт к увеличению количества штормов, волн, наводнений и других факторов приводящих к нарушениям их деятельности, а горизонт планирования преимущественно не превышает 10 лет, тем не менее «большинство респондентов также считают, что их порты должным образом защищены от роста, который они ожидают увидеть в следующие 100 лет» [178].

Для РФ решение подобной проблемы реализуемо, хотя и потребует существенных инвестиционных затрат, особенно для портов, расположенных в регионах с опережающим ГСУМ ростом уровня моря. Именно порты в регионах с быстрым ростом уровня акватории являются наиболее уязвимыми для негативных эффектов, описанных в разделе 2.2. Реализация строительных проектов ПГТС с учётом климатических изменений уровня акватории могла бы повысить устойчивость транспортной инфраструктуры к значительным изменениям уровня акваторий портов, расположенных на трассе СМП.

## **2.6. Адаптация к климатическим изменениям в РФ**

Российская Арктика является наиболее чувствительным регионом планеты к климатическим изменениям, так в [269] отмечается, что: «Температура воздуха у поверхности Земли на территории РФ с середины 1970-х годов растет в среднем на  $0.51^{\circ}\text{C}$  за 10 лет (темп роста температуры увеличился на  $0.04^{\circ}\text{C}$  по сравнению с 2019 годом), что в 2.8 раза превышает темпы роста средней глобальной температуры воздуха ( $0.18^{\circ}\text{C}$  за 10 лет). При этом темп роста среднегодовой температуры в Арктической зоне Российской Федерации в 3.9 раза превышает темпы роста средней глобальной температуры воздуха ( $0.71^{\circ}\text{C}$  за 10 лет)». Наблюдаемые климатические изменения носят в АЗРФ повсеместный характер и проявляются

наиболее интенсивно по сравнению с другими регионами планеты. Сокращение площади Арктических льдов создаёт благоприятные условия для освоения ресурсного потенциала региона [50], однако наблюдаются и негативные процессы: деградация зоны вечно мёрзлых грунтов, увеличение штормовой активности, рост числа айсбергов и т.д. [28].

Необходимость учёта наблюдаемых и прогнозных изменений климата нашла отражение в национальном плане РФ от 2019 и 2023 гг. [269, 270]. В данном документе обозначены основные положительные и отрицательные влияния, которые планируется учитывать при реализации национального плана, к которым относятся «деградация вечной мерзлоты в северных регионах с ущербом для строений и коммуникаций» [270] и «улучшение ледовой обстановки и, соответственно, условий транспортировки грузов в Арктических морях, облегчение доступа к континентальному шельфу Российской Федерации в Северном Ледовитом океане» [270].

Однако, несмотря на негативные факторы, освоение Арктического региона является важной стратегической задачей для Правительства РФ, что привело к подписанию Правительством РФ ряда документов [252, 265, 267, 286, 287], определяющих развитие АЗРФ и СМП. В Арктическом регионе планируется геологоразведка и активное освоение подтверждённых запасов минерально-сырьевых ресурсов с расширением участия частных инвесторов [286, п.12, п.п. 3]. При этом для обеспечения транспортировки добываемых ресурсов предполагается использовать морские грузоперевозки.

Наиболее активно происходит освоение месторождений в Баренцевом и Карском морях, что согласуется с концепцией [101], предполагающей освоение Арктического шельфа с опорой на сеть крупных промышленных баз, имеющих развитую логистическую инфраструктуру. Реализация концепции возможна при условии строительства в Мурманской области конгломерата предприятий, которые будут в совокупности представлять центральную базу.

Концепция Арктических баз [101] получила своё логическое продолжение и преобразовалась в механизм регионального развития, предложенный

Минэкономразвития России, который подразумевает создание 8 опорных зон в субъектах АЗРФ [161], а «комплексный план развития Севморпути до 2035 года предусматривает строительство и модернизацию 14 портов и терминалов» [319]. Реализация проектов по строительству портов-хабов, терминалов и заводов для работы с СПГ, а также морских ледостойких платформ в АЗРФ создаст условия для организации процесса активного освоения залежей минерально-сырьевых ресурсов региона [151]. Для этих целей АЗРФ была разделена на Арктические акваториальные производственные комплексы (АТПК), которые подразумевают создание и развитие морской и железнодорожной инфраструктуры для освоения запасов полезных ископаемых (см. Рисунок 66 [8] и Рисунок 67 [310]).



Рисунок 66 – Обзорная схема прогнозируемых АТПК [8].

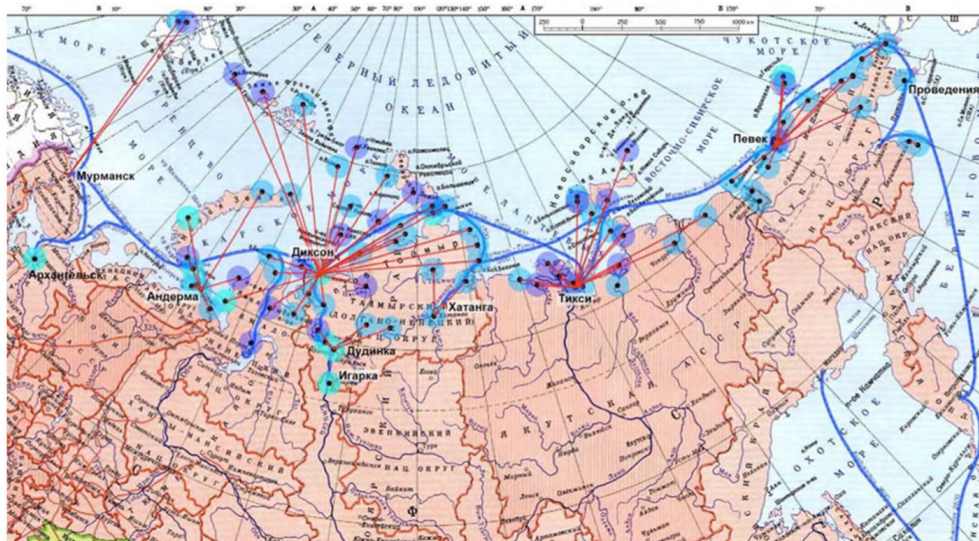


Рисунок 67 – Схема структуры соподчинения морских портов (как опорных пунктов) и полярных станций [310].

Интенсификация добычи полезных ископаемых неизбежно приведёт к росту грузооборота по СМП. Согласно плану развития СМП до 2035 года, утверждённому Правительством РФ в августе 2022 года, в период с 2020 по 2035 год предполагается увеличение объёма грузоперевозок с 32.97 млн. тонн до 220 млн. тонн соответственно, что превышает уровень 2020-2022 годов примерно в 6.5 раз (см. Рисунок 68 прогноз на основе данных из [265]). Этот уровень объёма грузоперевозок планируется достичь благодаря «заключению соглашения, направленного на установление взаимных обязательств, касающихся объёма ежегодного грузопотока» с компаниями: «Росатом», «НОВАТЭК», «Роснефть», «Газпром нефть», «Норильский никель», «Северная звезда», «Горнодобывающая компания Баимская» [265].

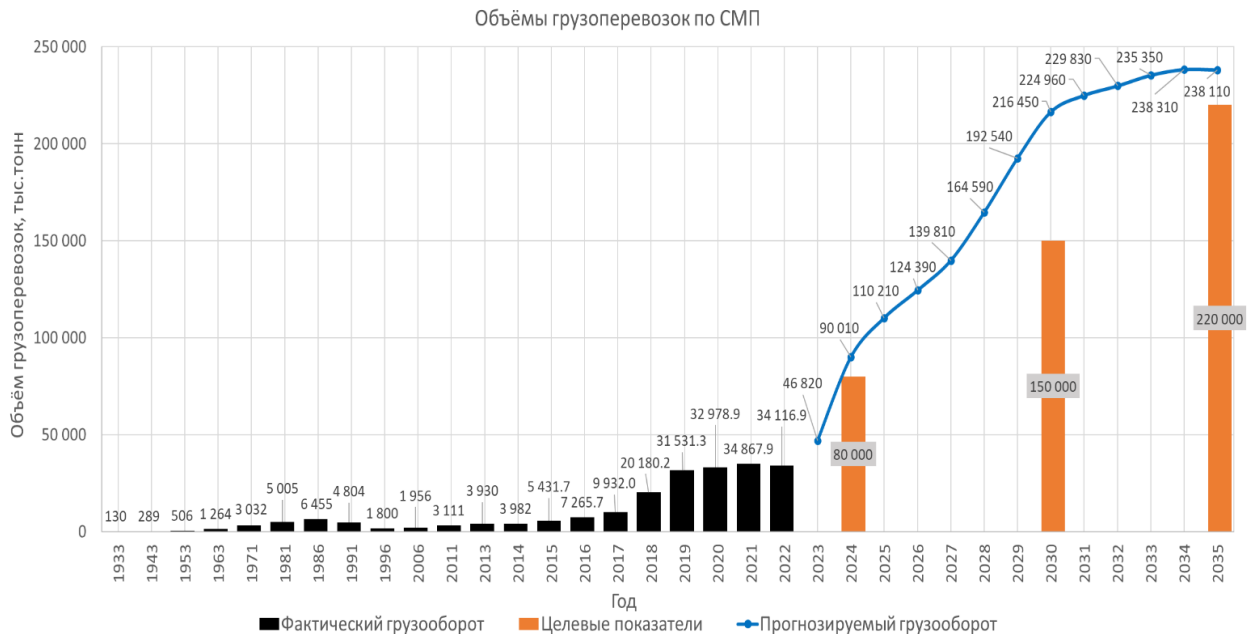


Рисунок 68 – Объёмы грузоперевозок по СМП в период с 1933 по 2022 год, целевые показатели и прогнозные значения до 2035 года.

Первым этапом реализации плана развития СМП является строительство Арктик СПГ-2 и завода по производству гравитационных оснований МЛСП на базе Мурманского СРЗ №82 (судоремонтный завод), а также масштабные работы по реконструкции объектов инфраструктуры морского и железнодорожного транспорта. Запланирована реализация ряда крупных проектов по развитию портовой и сопутствующей наземной транспортной инфраструктуры [265]:

- Создание Восточного и Западного транспортно-логистических узлов для перевалки транзитных контейнерных грузов;
- Реализация проекта "Комплексное развитие Мурманского транспортного узла";
- Реализация инвестиционных проектов ПАО "Мурманский морской торговый порт";
- Реконструкция объектов третьего грузового района морского порта Мурманск;
- Строительство специализированного терминала навалочных грузов в морском порту Мурманск (терминал "Тулома");
- Строительство комплекса перегрузки угля "Лавна" в рамках комплексного развития Мурманского транспортного узла;
- Строительство морского перегрузочного комплекса сжиженного природного газа в Мурманской области, в том числе объектов федеральной собственности (объекты безопасности мореплавания);
- Разработка комплексного плана по развитию Архангельского транспортного узла;
- Строительство морского терминала по отгрузке свинцово-цинкового концентрата на архипелаге Новая Земля;
- Строительство объектов федеральной собственности терминала сжиженного природного газа и газового конденсата "Утренний" в порту Сабетта;
- Строительство объектов федеральной собственности терминала "Бухта Север" для проекта "Восток Ойл";
- Строительство объектов федеральной собственности терминала "Енисей" на базе Сырадасайского угольного месторождения;
- Строительство морского терминала на мысе Наглейнын в морском порту Певек;
- Разработка предложений по строительству баз бункеровки и технического обслуживания в портах Диксон и Тикси;



- Строительство морского перегрузочного комплекса сжиженного природного газа в Камчатском крае (объекты федеральной собственности);
- Реализация в районе Обской губы компанией «Новатэк» проектов Арктик СПГ-1,2,3 и Обский СПГ;
- Комплексное развитие порта Корсаков в заливе Анива Охотского моря;
- Строительство порта Эльга в Удской губе Охотского моря;
- Строительство порта Индига в Чёшской губе Баренцева моря;
- Строительство морского СПГ терминала (с планируемой мощностью по регазификации СПГ в 20 млн. тонн/год к 2027 году [300]) в районе бухты Бечевинская (100 км от г. Петропавловск-Камчатский).

Данные проекты нацелены на создание инфраструктуры Арктической зоны, позволяющей обеспечивать грузовые перевозки в акватории Северного морского пути. Нарращивание флота атомных ледоколов и грузопассажирских судов, развитие инфраструктуры морских портов в акваториях СМП, а также строительство портов-хабов для обеспечения каботажных перевозок [286, п.13], создадут базу для значительного увеличения показателей добычи минерально-сырьевых ресурсов в Арктической зоне. Уже сейчас начата реализация многих из перечисленных выше проектов, в том числе подразумевающих создание новых портов на трассе СМП (см. Рисунок 69 [301]).

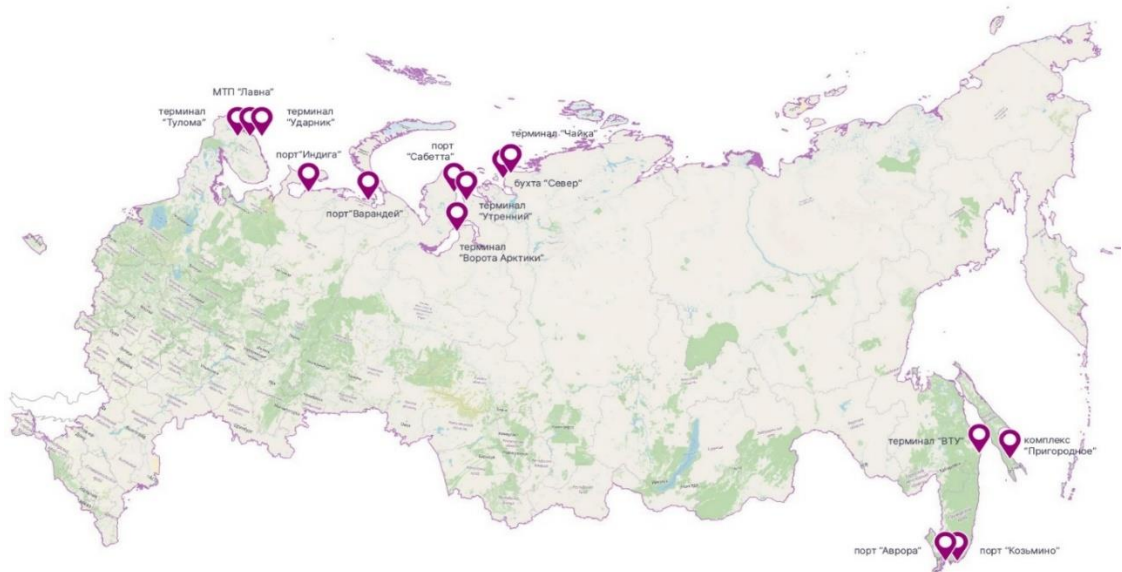


Рисунок 69 – Схема расположения новых портов СМП [301].

Рассмотренные ранее прогнозные изменения климата и их влияние на ПГТС согласуются с информацией, представленной в Плане адаптации к изменениям климата в области транспорта в РФ от 2022 года [264], в котором отмечается:

а) Описание характерных климатических рисков:

- Уменьшение количества морского льда вдоль побережья может вызывать увеличение волнового воздействия на причальные сооружения, автомобильные и железные дороги, прилегающие к берегу;

- Затопление прибрежных районов в результате экстремальных явлений может привести к невозможности использования портов и связанных с ними транспортных систем в период затопления, повредить терминалы, логистические центры, зоны хранения и грузы и дезорганизовать цепочки поставок на более длительное время.

б) Описание новых возможностей для развития в связи с изменением климата:

- Глобальное потепление может создать новые возможности для развития каботажных и транзитных перевозок по СМП;

- Таяние арктических льдов может способствовать увеличению навигационного периода;

- Перевозки по трассе СМП могут стать более выгодными, благодаря сокращению расходов на ледокольное сопровождение судов.

в) Изменение уровня моря, усиление разрушительной силы штормов, сгонно-нагонных явлений, изменение силы и направления волн затронет 100% объектов транспортной инфраструктуры, расположенных в прибрежных районах;

г) Перечень приоритетных адаптационных мероприятий:

- Разработка и утверждение нормативно-методических документов, корректирующих существующие нормативы, содержащие требования к методам расчёта, проектирования, строительства и эксплуатации дорог, объектов транспортной инфраструктуры с учётом климатических изменений;

- Формирование перечня объектов транспортной инфраструктуры федерального значения, уязвимых к последствиям изменения климата.

д) Адаптационные мероприятия:

- Сокращение площади подверженности объекта транспортной инфраструктуры с опасным уровнем климатического риска;
- Снижение уровня риска для объекта транспортной инфраструктуры, подверженного опасному уровню климатического риска;
- Снижение показателя уязвимости;
- Увеличение пороговых значений;
- Использование страховых инструментов;
- Обеспечение резервов (финансовые, материальные и другие).

Автор считает целесообразным в данной работе, специализирующейся на морском портовом гидротехническом строительстве, уделить внимание именно снижению уровня риска для объекта транспортной инфраструктуры, подверженного опасному уровню климатического риска, путём разработки методик, позволяющих проектировать ПГТС таким образом, чтобы изменения уровня режима акватории не оказывали негативного влияния на их надёжность и безопасность.

## **2.7. Выводы по второй главе**

Климатические изменения являются следствием совокупного воздействия естественных и антропогенных причин, а также ряда обратных связей. Океан обладает существенно большей энергетической ёмкостью по сравнению с атмосферой, в результате чего именно океан аккумулирует излишнее тепло из атмосферы Земли. За последние десятилетия наблюдается устойчивый рост приземной температуры атмосферы и рост температуры не только поверхностных океанических вод, но и вод на глубинах 2000 метров и более.

Математическое моделирование климатической системы Земли с использованием групп иллюстративных сценариев социально – экономического развития населения планеты позволяет получать данные прогнозного изменения климата в глобальном и региональных масштабах, включая изменения морских и континентальных льдов, уровня моря и т.д. Группы сценариев, используемые в оценочных докладах МГЭИК, претерпели существенные изменения с начала их

использования в 1990-х годах прошлого века. Наблюдаемое повышение концентрации  $\text{CO}_2$  соответствует наиболее «агрессивным» сценариям выбросов, что приводит к регулярному пересмотру сценарных групп с увеличением предельных моделируемых концентраций.

Данные изменений ГСУМ с помощью мареографов, буёв и спутниковой альтиметрии подтверждают наличие устойчивого положительного тренда к повышению уровня моря. При этом рост уровня моря происходит нелинейно, а близок к квадратичной зависимости, и имеет ускорение во времени. Рост уровня моря обусловлен преимущественно двумя факторами: стерическими изменениями, связанными с ростом теплосодержания океана, и эвстатическими изменениями, связанными с повышением объёма вод обусловленным вкладом таяния ледников. Наибольшую неопределённость в прогнозы изменения ГСУМ вносит недостаточная изученность динамики уменьшения ледникового покрова в Антарктике и Гренландии, которая может быть недооценена в используемых моделях, что может привести к более существенному повышению ГСУМ. При этом наблюдаемые потери ледникового покрова в Антарктике и Гренландии соответствуют верхней границе диапазона прогнозов уровня моря в Пятом оценочном докладе МГЭИК.

Проведённый анализ данных климатического моделирования при различных сценариях социально-экономического развития населения Земли показывает, что ГСУМ повысится с 2030 по 2130 по данным МГЭИК на 88.4 см и 100.2 см при квантиле 50% для сценариев SSP3-7.0 и SSP5-8.5 соответственно. Данные изменения, окажут существенное воздействие на эксплуатационные условия ПГТС и потребуют количественной и качественной оценки. Изменения в ГКС происходят неоднородно по поверхности Земли, и, следовательно, учёт региональных особенностей является обязательным при использовании результатов моделирования изменения уровня режима при проектировании ПГТС.

В Арктике климатические изменения приповерхностной температуры воздуха происходят наиболее быстро и превышают среднепланетарный темп в 2.5 раза. Изменения уровня и ледового режимов происходят не так динамично и

не настолько превосходят среднепланетарный уровень. Данные численного моделирования подтверждают, что наблюдаемое сокращение площади Арктических льдов продолжится и в будущем, что в свою очередь может привести к улучшению условий судоходства и к увеличению продолжительности навигации по трассе СМП, которая сможет освобождаться от льда в летний период уже к середине века.

Освоение Российской Арктики связано с широким спектром задач как по строительству новых гидротехнических сооружений, так и по реконструкции существующих. Потребуется создание широкого круга сооружений, таких как: морские ледостойкие стационарные платформы (МЛСП), заводы по переработке сжиженного природного газа (СПГ), транспортная инфраструктура на море (включая ПГТС) и на суше и т.д. При этом в соответствии с утверждённым Правительством РФ планом развития СМП до 2035 года планируется увеличение объёма грузоперевозок с 32.97 млн. тонн в 2022 году до 220 млн. тонн к 2035 году, что превышает уровень 2020-2022 годов примерно в 6.5 раз.

Проведённый анализ и количественная оценка величины прогнозных изменений уровня режима акваторий портов в Арктическом и Дальневосточном регионах РФ показали, что региональный рост уровня моря превышает рост ГСУМ для портов, расположенных на побережьях окраинных морей Арктического и дальневосточного бассейнов. Для портов, расположенных в устьях рек, губах или сильно удалённых от океана, как правило, характерно меньшее увеличение уровня моря.

В работе рассматривались 16 участков, включающих более 20 портов. Для акватории СЛО при 50 процентиле сценариев SSP3-7.0 и SSP5-8.5 не превысили рост ГСУМ порты Мурманск, Архангельск, Сабетта и Диксон с ростом от 73 до 90% от ГСУМ, а для Дальневосточного бассейна не превысили рост ГСУМ порты Магадан, Эльга и Ванино с ростом от 83 до 90% от ГСУМ. Аномальным, с понижением уровня моря, оказались центральная и восточная оконечности северного побережья Новой земли, острова Франца – Иосифа и Шпицберген, однако на них практически отсутствует морская транспортная инфраструктура РФ.

Для портов Индига, Варандей, Тикси, Певек, Петропавловск – Камчатский, Корсаков, Пригородное, Ольга, Восточный, Находка, Вера, Владивосток, на которые приходится более половины грузооборота в Арктике и на Дальнем востоке, прогнозируемое повышение уровня моря при 50 процентиле сценария SSP5-8.5 превысит рост ГСУМ и составит свыше 100 см к концу расчётного периода эксплуатации ПГТС. При этом наибольший рост уровня моря прогнозируется для портов Певек (128.4 см), Тикси (128.8 см) и Индига (124.7 см).

Правительство РФ утвердило ряд документов, прямо отмечающих необходимость адаптации к климатическим изменениям в Арктике, включая развитие СМП [44]. В связи с этим, Минтранс РФ разработал отраслевой план адаптации к климатическим изменениям, который указывает на риски для 100% портовой морской транспортной береговой инфраструктуры и необходимость корректировки нормативов по расчёту и проектированию указанных объектов.

Данную главу хотелось бы закончить цитатой из [80], применимой и к задаче проектирования ПГТС: «в сложившемся положении самым разумным выбором был бы «принцип предосторожности», принятый в Рио-де-Жанейро в 1992 году, согласно которому при опасности непоправимого ущерба окружающей среде, недостаток научных знаний о сопутствующих явлениях не может служить причиной отсрочки принятия эффективных мер для ее защиты».

### ГЛАВА 3. ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛН В МЕЛКОВОДНОЙ ЗОНЕ ПОРТА ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ УРОВЕННОГО РЕЖИМА АКВАТОРИИ

Значимым параметром, необходимым для проектирования ПГТС, является высота волн расчётной обеспеченности, которая вкупе с данными о направлении волнения и другими параметрами волнения, позволяет определить нагрузки на проектируемое сооружение от волнового воздействия и принять решение о назначении характеристик конструкции. Большой объём капитальных вложений для реализации проектов сооружений данного типа требует повышенной точности получаемых характеристик, поскольку их завышение может значительно увеличить величину привлекаемых инвестиций, а их занижение привести к угрозе разрушения объекта в период эксплуатации.

В соответствии с действующей нормативной методикой, величина волновой нагрузки на ПГТС напрямую зависит от высоты расчётной волны, и изменение этого параметра оказывает наибольшее влияние на напряжённо – деформированное состояние конструкции и коэффициент запаса устойчивости, который может иметь существенное значение при проектировании оградительных сооружений со значительной глубиной у фронтальной грани. Для определения параметров ветровых волн, которые оказывают непосредственное воздействие на ГТС и суда в акватории порта, используют аналитические, эмпирические и полуэмпирические методики, описанные в [21, 135, 268, 276], а также численное и физическое моделирование или их сочетание [41, 70, 71].

В связи со всем вышеизложенным в данной главе будет рассмотрена действующая методика определения параметров ветровых волн, воздействующих на ПГТС в условиях расчётного шторма, а также произведена оценка влияния климатических изменений уровня режима акватории на расчётную волну заданной обеспеченности в мелководной зоне акватории.

### **3.1. Учёт волнения при проектировании ПГТС и действующая методика определения границ волновых зон**

#### **3.1.1. Классификации волн на воде**

В теории волн на воде сложилась общепринятая классификация волн [81], которая подразделяет волны на следующие категории:

- Поверхностные волны, которые, как следует из названия, охватывают волновое движение на поверхности жидкости. К поверхностным волнам относят ветровые волны, волны, вызванные движением тел в жидкости, приливные и т.д.;
- Упругие волны, которые охватывают не только поверхностный слой жидкости, но и всю её массу. К упругим волнам относятся звуковые волны, волны, образующиеся при взрывах и т.д.

Для целей проектирования портовых гидротехнических сооружений и сооружений континентального шельфа рассматриваются поверхностные волны, которые подразделяются на:

- Капиллярные волны, которые обусловлены преимущественно действием сил поверхностного натяжения [87]. Это малые волны на поверхности жидкости, которые характеризуются длиной волны до 0.2 см;
- Гравитационные волны, которые обусловлены преимущественно действием гравитации [87]. Это значительные волны длиной от 20 см и более;
- Капиллярно–гравитационные волны, которые представляют собой промежуточный вариант между капиллярными и гравитационными волнами. Данные волны подвержены воздействию как сил поверхностного натяжения, так и гравитационных сил в той мере, когда действие обеих сил сравнимо друг с другом и достаточно, чтобы учитывать совместное влияние [36]. Данный тип волн характеризуется длиной волны от 0.2 см до 20 см.

Однако для практических целей гидротехнического строительства поверхностные капиллярные и капиллярно–гравитационные волны не представляют большого значения сами по себе, поскольку в связи с малой длиной волны не оказывают существенной нагрузки на ПГТС, а имеют значение только в контексте изучения генезиса гравитационных волн. Гравитационные волны



представляют собой волны, создающие волновую нагрузку, являющуюся одной из наиболее значимых нагрузок для ПГТС и поэтому именно данный тип волн рассматривается при проектировании ПГТС.

В наиболее общем случае физической постановки задачи волны подразделяют на две категории [18, 93]:

1) Гиперболические волны, которые рассматриваются в таких разделах классической физики как акустика, теория упругости и электромагнетизм. Волны данного типа могут быть описаны уравнением вида (2):

$$\varphi_t + c_0 \cdot \varphi_x = 0 \quad (2)$$

2) Диспергирующие волны, общие методы теории которых были разработаны при изучении волн на воде. Линейный случай диспергированных волн может быть описан уравнением вида (3):

$$\varphi = a \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (3)$$

где,  $a$  – амплитуда волны;  $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$  – волновое число (количество длин волн, укладываемых в  $2\pi$  метров);  $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$  – круговая частота;  $\lambda$  и  $T$  – длина и период волны соответственно.

Для задач гидротехнического строительства будут рассматриваться диспергирующие волны на воде. Однако классификация волн не так проста, и диспергирующие волны на воде в свою очередь также подразделяются на две большие категории волн:

1) Линейные волны (теория волн Эйри), которые применяются для пологих поверхностных волн малой крутизны, перемещающихся достаточно медленно, чтобы величиной квадрата их скорости, а также произведениями скорости на малые величины можно было пренебречь [76];

2) Нелинейные волны (теория волн Стокса, теория кноидальных волн Кортевега – де Фриза и т.д.), которые не удовлетворяют определению линейных волн. Т.е. это значительные по высоте волны, которые перемещаются с значимой (не пренебрежимо малой) скоростью.

Рассмотрение нелинейных волн в рамках теории диспергирующих волн подразумевает решение ряда нелинейных уравнений в частных производных [144], однако в практических целях зачастую, рассматривая на начальных этапах проектирования или при простых условиях волнообразования, отказываются от использования сложного математического аппарата и рассматривают приближенные решения, принимая за первое приближение решение по линейной теории [81].

Таким образом, из всего вышесказанного следует, что для проектирования ПГТС в целях расчёта волнового воздействия на гравитационные сооружения могут рассматриваться поверхностные гравитационные волны, а именно ветровые волны [87], в рамках теории линейных диспергирующих волн.

### **3.1.2. Ветровые волны на воде**

Ветровые волны представляют наибольший интерес для определения волновых нагрузок при проектировании гидротехнических сооружений. Существенное воздействие на ПГТС также оказывают волны цунами, которые могут возникать в Арктическом регионе [68] и генерироваться, помимо прочего, подвижкой ледника [104]. Однако в данной работе не ставится задача рассмотрения данного типа волн и влияния прогнозных климатических изменений на их генезис и непосредственное развитие при выходе на мелководье, что, тем не менее, не умоляет значимости решения данной задачи в будущем.

Ветровые волны представляют собой гравитационные короткие (высокочастотные) волны, возникающие в результате процесса преобразования капиллярных волн в гравитационные под действием возмущающей силы, а именно ветрового воздействия (неустойчивость Кельвина–Гельмгольца). Возникновение капиллярных волн, в свою очередь, обусловлено случайными флуктуациями давления в турбулентном потоке воздуха (по обобщённой модели Филлипса–Майлза [61]) на границе раздела двух сред, или иначе – двух жидкостей разной вязкости.

Условия, в которых рассматриваются ветровые волны, в теории волн на воде подразделяется по отношению глубины воды ( $d$ ) к длине волны ( $\lambda$ ) на:

- 1) Глубокая вода:  $\frac{d}{\lambda} > 0.5$ ;
- 2) Вода промежуточной глубины:  $0.05 < \frac{d}{\lambda} \leq 0.5$ ;
- 3) Мелкая вода:  $\frac{d}{\lambda} \leq 0.05$ .

На глубокой воде движение частиц жидкости происходит по траекториям, близким к окружности, и дно не оказывает на них своего влияния ввиду большой глубины. По мере приближения к берегу начиная с зоны когда глубина равняется половине длины волны, дно начинает оказывать влияние на траекторию движения частиц жидкости, приводя к её изменению от круговой к эллипсовидной (см. Рисунок 70 и Рисунок 71).

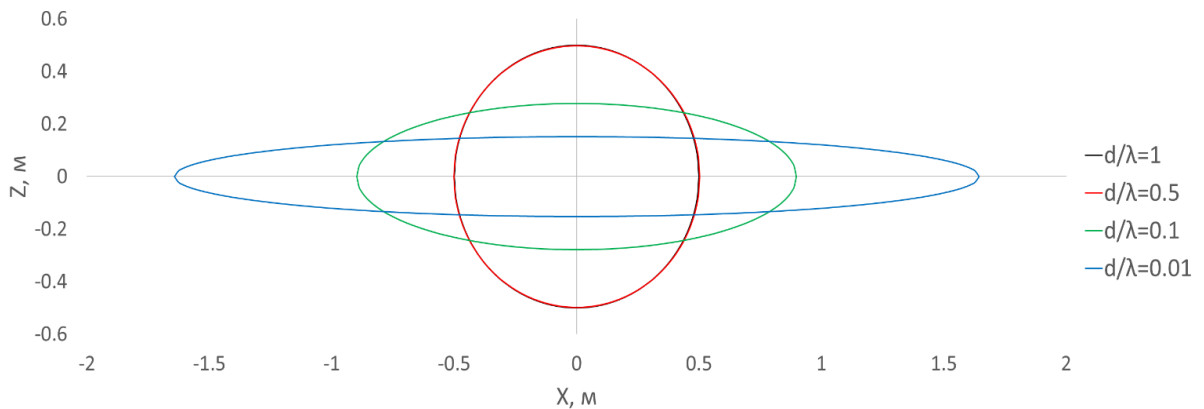


Рисунок 70 – Траектории частиц жидкости в волне при различных значениях  $\frac{d}{\lambda}$ .

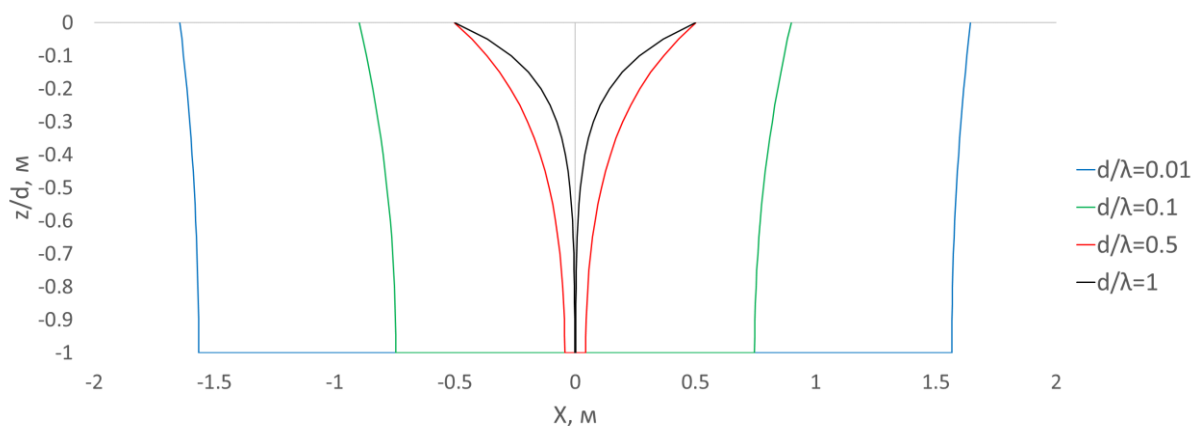


Рисунок 71 – Огибающие траекторий частиц жидкости в волне при различных значениях  $\frac{d}{\lambda}$ .

По мере продолжающегося уменьшения глубин верхние слои жидкости начинают обгонять нижние, создавая тем самым очертание волны с ярко выраженным гребнем. При достижении глубины равной глубине первого обрушения, происходит ряд обрушений и повторных формирований волны. За несколько обрушений волна теряет большую часть своей энергии. После  $n$ -го обрушения у волны уже недостаточно энергии для повторного её формирования и обрушения, и происходит накат на берег.

Ветровые волны имеют свою классификацию, которая достаточно полно и информативно изложена в [76] (см. Рисунок 72 [76]) в объёме достаточном для целей данной работы, Рассмотрим подробнее представленные классификации и влияние принадлежности ветровой волны к определённой категории на значимые для проектирования ПГТС параметры.

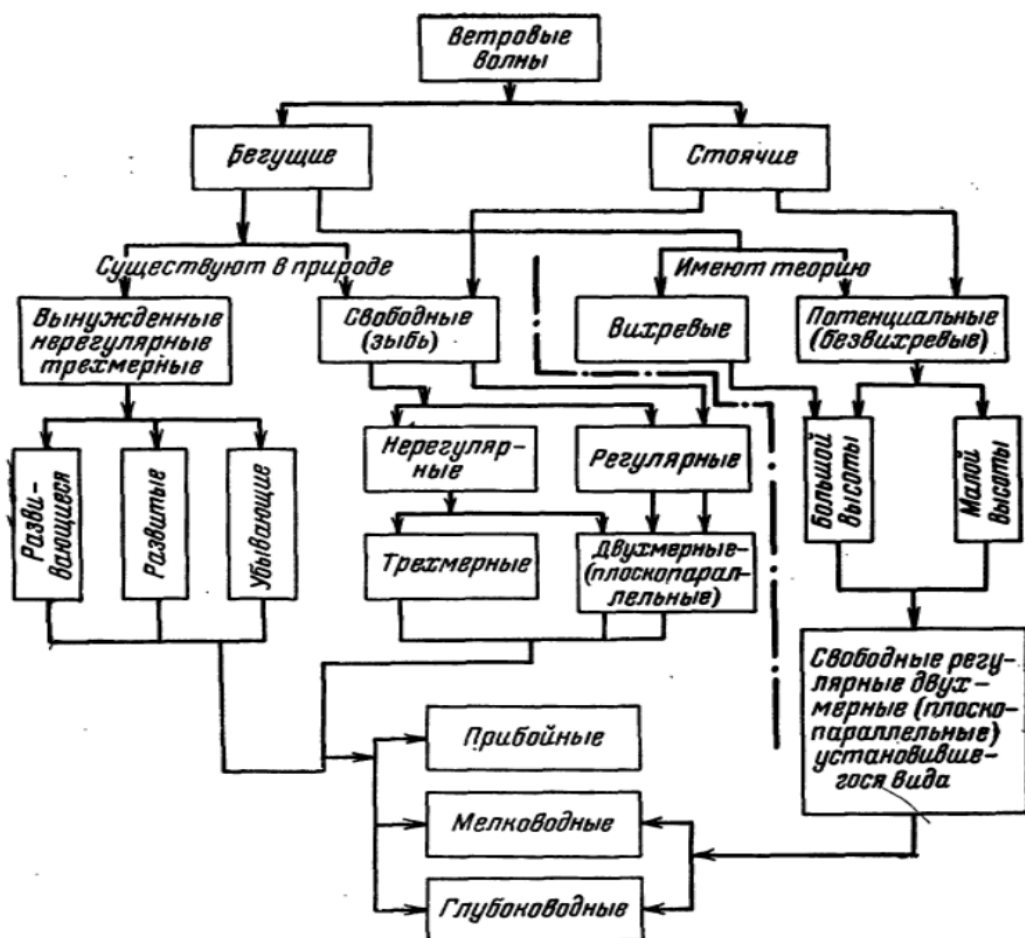


Рисунок 72 – Классификация ветровых волн [76].

Классификация волн, разделяющая их на бегущие и стоячие, подразумевает, что на открытой воде под действием возмущающей силы (ветрового воздействия) образуются и перемещаются в направлении породившего их ветра [76] бегущие волны. Однако бегущие волны не единичны, под действием переменного по своей силе и направлению ветра образуется множество волн, которые при постоянно дующем в одном направлении ветре будут накладываться друг на друга.

Наложение волн позволяет учесть принцип суперпозиции, который устанавливает, что при распространении в среде нескольких волн каждая из них распространяется независимо от других, а смещение частицы представляет собой совокупность отдельных смещений. Благодаря принципу суперпозиции задача расчётов параметров волны упрощается, и любую итоговую волну можно рассматривать как совокупность множества всех волн, распространяющихся в единичной области поверхности моря.

Частным случаем является распространение двух монохроматических волн с одинаковыми амплитудами ( $A_0$ ) и не значительно отличающимися длинами волн ( $\lambda$ ) (см. Рисунок 73, формулы (4) и (5)):

$$\eta_1(x, t) = A_0 \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (4)$$

$$\eta_2(x, t) = A_0 \cdot \cos((k + \Delta k) \cdot x - (\omega + \Delta\omega) \cdot t) \quad \bar{\lambda}_d = \frac{g \cdot \bar{T}^2}{2 \cdot \pi} \quad (5)$$

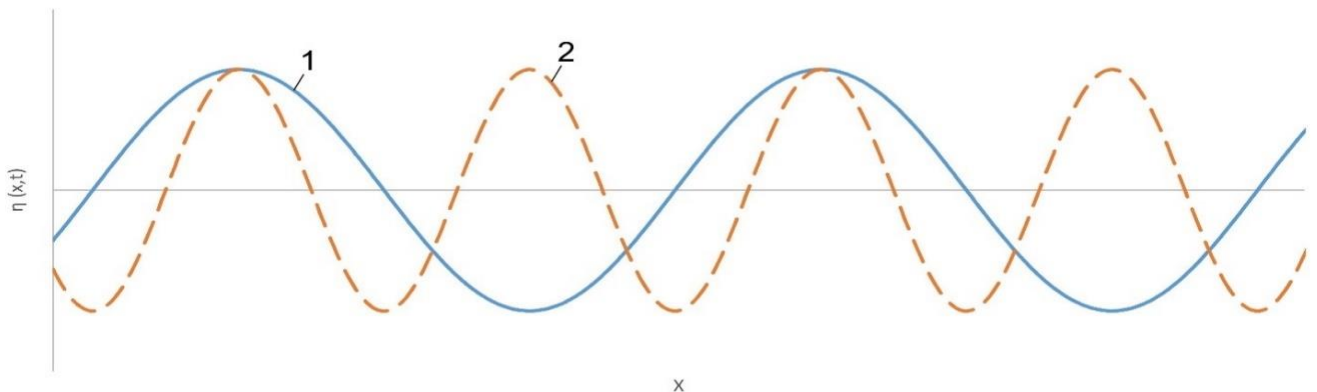


Рисунок 73 – График монохроматических волн. 1 –  $\eta_1(x, t)$ , 2 –  $\eta_2(x, t)$ .

При применении принципа суперпозиции к рассматриваемым уравнениям, получим уравнение вида (6) (см. Рисунок 74 [на основе рис.1.5. 14])[288]:

$$\eta(x, t) = \left[ 2 \cdot A_0 \cdot \cos\left(\frac{\Delta k}{2} \cdot x - \frac{\Delta \omega}{2} \cdot t\right) \right] \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (6)$$

где  $2 \cdot A_0 \cdot \cos\left(\frac{\Delta k}{2} \cdot x - \frac{\Delta \omega}{2} \cdot t\right)$  – амплитуда в виде постепенно изменяющейся функции, зависящей от  $x$  и  $t$ .

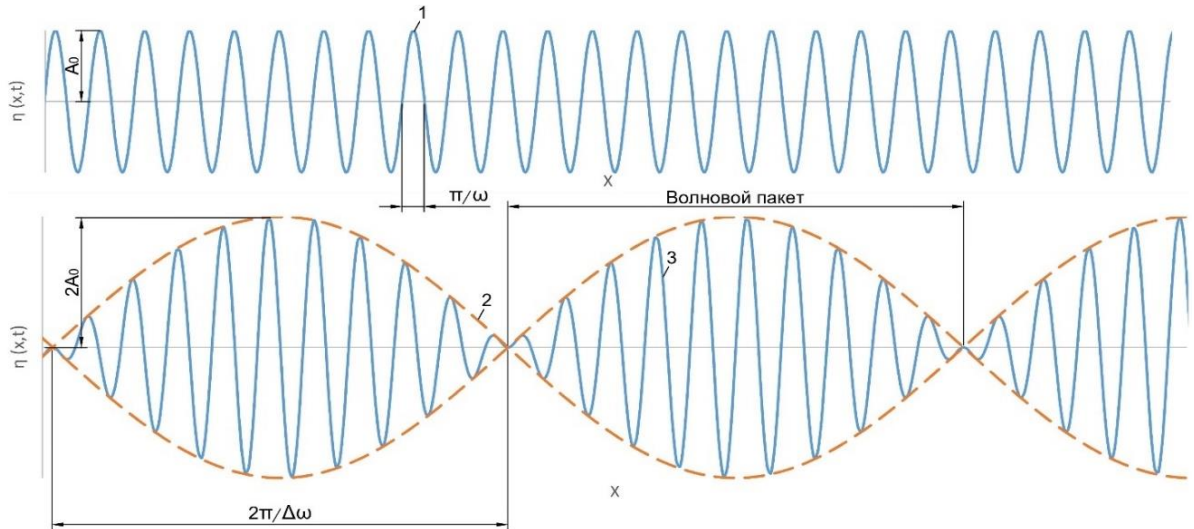


Рисунок 74 – Простая волновая группа или волновой пакет. 1 – волна  $\eta_1(x, t) = A_0 \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$ , 2 – волна  $\eta_A(x, t) = A = 2 \cdot A_0 \cdot \cos\left(\frac{\Delta k}{2} \cdot x - \frac{\Delta \omega}{2} \cdot t\right)$ , 3 – волновая группа  $\eta(x, t) = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$ .

В данном примере две косинусоидальные волны с одинаковыми амплитудами ( $A_0$ ) и не значительно отличающимися длинами волн ( $\lambda$ ) образуют суммарную волну, одиночный горб которой со временем превращается в длинный осциллирующий волновой пакет или волновую группу – цуг волн [14, 93].

В определённых условиях при соприкосновении бегущей волны с непроницаемым ПГТС вертикального профиля, бегущая волна отражается от преграды и начинает двигаться в противоположном направлении (7):

$$\eta_{1*}(x, t) = A_0 \cdot \cos(k \cdot x + \omega \cdot t) \quad (7)$$

При наложении подходящей и отражённой волн, обладающих одинаковой амплитудой и периодом, но противоположных по направлению (когерентные волны), образуется суперпозиция двух бегущих волн (интерференция), называемая стоячей волной (8), [76, 88]:

$$\eta_*(x, t) = 2 \cdot A_0 \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (8)$$

Стоячие волны, возникающие при интерференции ветровых волн, называются толчей (см. Рисунок 75), а при условиях мелкой воды ( $\frac{d}{\lambda} \leq 0.05$ ) – сейшами. Точки с  $A = 2 \cdot A_0$  – называются пучностями, а точки с  $A = 0$  – узлами. Стоячие волны играют значимую роль в определении волновой нагрузки на ПГТС, подробнее это явление будет рассмотрено в разделе, посвящённом определению параметров волн по методике СП.

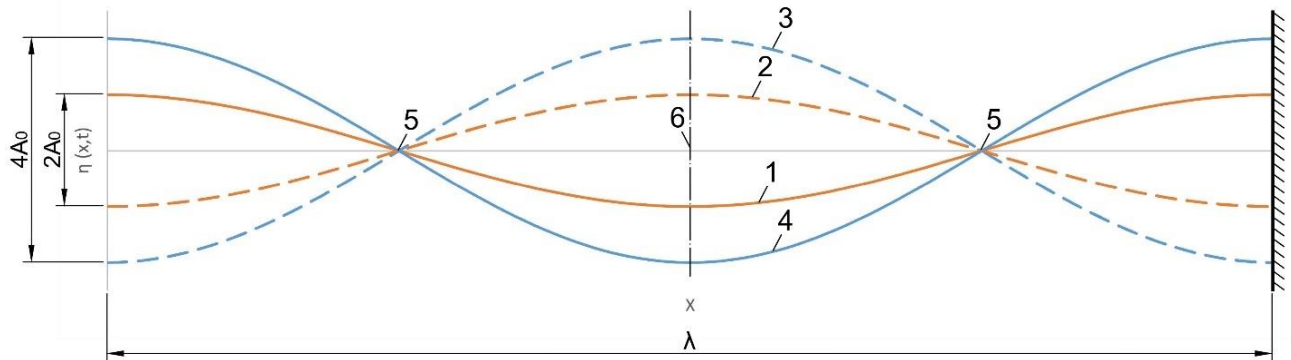


Рисунок 75 – Профили бегущей и стоячей волн. 1 – бегущая волна  $\eta_{1*}(x, t)$ , 2 – отражённая волна  $\eta_1(x, t)$ , 3 – стоячая волна  $\eta_*(x, t)$  в момент  $\cos(\omega \cdot t) = 1$ , 4 – стоячая волна  $\eta_*(x, t)$  в момент  $\cos(\omega \cdot t) = -1$ , 5 – узлы, 6 – пучности.

В силу особенностей образования волн в условиях открытого моря под действием возмущающей силы (ветрового воздействия) происходит одновременное образование различных волн, которые по мере повышения их геометрических габаритов вследствие восприятия энергии ветра начинают преобразовываться из капиллярных волн правильной формы в гравитационные волны, со временем образующие спектр волнения в заданной системе волн.

В частном случае, моделирование волн подразумевает рассмотрение процесса потенциального (безвихревого) движения невязкой и несжимаемой жидкости [62, 165]. Для потенциального (безвихревого) движения бегущих гравитационных волн критерий отсутствия обрушения связан с максимальной крутизной волны [1, 88]:

- 1)  $\frac{h}{\lambda} < 0.142$  – на глубокой воде (предел Митчела);
- 2)  $\frac{h}{\lambda} < 0.142 \cdot th\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}\right)$  – при промежуточной глубине (предел Миша);

3)  $\frac{h}{d} < 0.78$  – для уединённых волн на мелкой воде.

В линейной теории волн синусоидальная волна рассматривается симметричной относительно свободной невзволнованной поверхности жидкости, однако в реальных условиях волнообразования волна не симметрична. Волна в реальных условиях волнообразования имеет более крутые гребни и более пологие впадины, что отличается от синусоидального профиля волны, но описывается более сложными уравнениями трохоидальных волн на воде. В наиболее общем виде трохоида описывается уравнением (9):

$$\begin{cases} x = r \cdot t - h \cdot \cos t \\ y = r - h \cdot \cos t \end{cases} \quad (9)$$

где  $r$  – радиус окружности;  $h$  – расстояние точки от центра окружности.

Частный случай трохойды  $h = r$  называется циклоидой, при  $h < r$  трохоида называется укороченной циклоидой, а при  $h > r$  – удлинённой циклоидой (см. Рисунок 76).

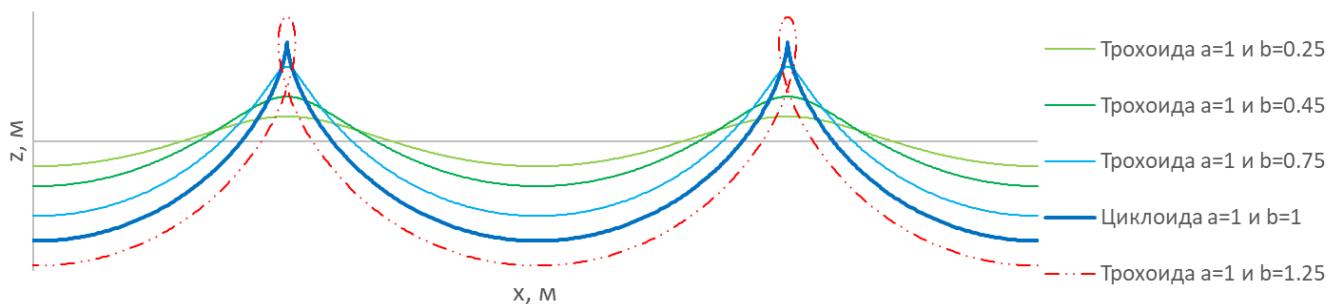


Рисунок 76 – Трохоиды и циклоиды. Случай  $a=1$  и  $b=0.45$  отражает предел Митчела и границу реальных профилей ( $b < 0.45$ ) и нереальных профилей волн ( $b > 0.45$ ).

Трохоидальные волны на воде рассматривают модели волн Герстнера, Стокса и т.д. Модель волн Герстнера вихревая, следовательно такие волны не являются потенциальными (движение не безвихревое [87, 113]), а являются лишь простым приближением к действительности и содержат в себе противоречия. Автор считает важным показать, что средняя волновая линия не совпадает с невзволнованным уровнем воды для реального волнения [п.3.44, 276], в котором волны не бесконечно малой амплитуды близкие по профилю к трохойде



(трохоидальные волны) и обладают не симметричным синусоидальным профилем, а более острыми вершинами и широкими и пологими подошвами [158]. Так в СП 38.13330 даётся следующее определение средней волновой линии: «Линия, пересекающая запись волновых колебаний так, что суммарные площади выше и ниже этой линии одинаковы» [п.3.36, 276]. Теория Герстнера описывает волны, показанные на рисунке ниже (см. Рисунок 77, адаптировано из [165, 276]) и описываемые уравнением (10) [165]:

$$z_w(x, t) = r \cdot \left( \sin(k \cdot x - \omega \cdot t) + \frac{\pi \cdot r}{\lambda} \cos 2 \cdot (k \cdot x - \omega \cdot t) \right) \quad (10)$$

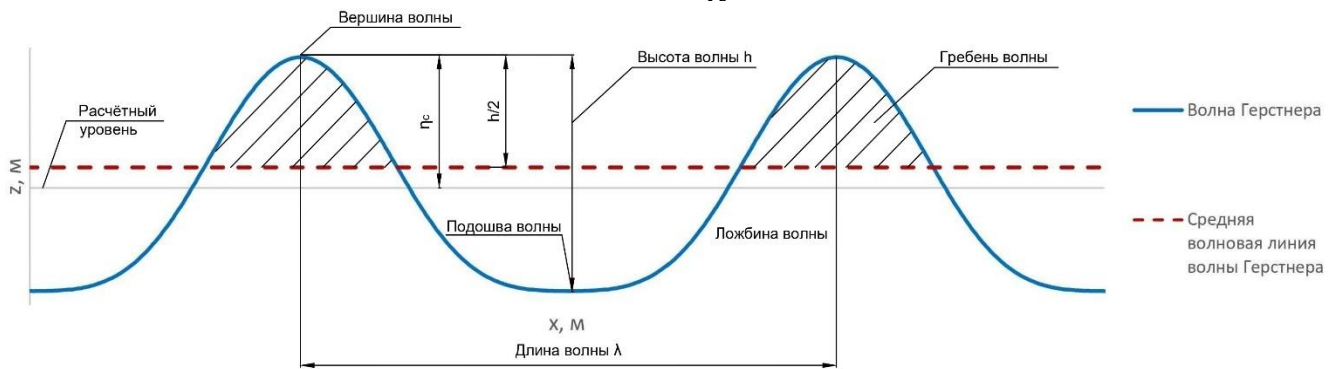


Рисунок 77 – Основные элементы волны на примере волны Герстнера (за ноль принят уровень невзволнованной поверхности воды).

В результате рассмотрения реальных условий волнообразования, при которых множество волн, имеющих различные направления распространения, амплитуды и частоты, сходятся в единичной области поверхности моря, была разработана спектральная модель волнения, рассматривающая множественные единичные волны как суперпозицию бесконечного количества волн (возмущений), распространяющихся в системе (океане, море) и несущих с собой энергию [1, 18, 93].

В спектральной теории волн на воде, используя вероятностно-статистические методы, спектр волн рассматривается как функция распределения энергии в заданном диапазоне частот и направлений распространения волн для рассматриваемой единичной поверхности моря. Частотный спектр может быть записан в виде формулы (11) [1]:

$$S(\omega) = A \cdot \omega^{-m} \cdot \exp(-B \cdot \omega^{-n}) \quad (11)$$

где  $A, B, m, n$  – параметры аппроксимации.

В условиях развития волнения при бесконечно большой продолжительности ветра и бесконечно большом разгоне, энергетический спектр зависит только от скорости ветра. Однако в наиболее общем случае энергия, средняя высота и средний период волнового частотного спектра могут быть выражены по формулам (12)-(14), как [1]:

$$E = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (12)$$

$$\bar{h} = \left[ 2\pi \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(\omega, \theta) d\omega d\theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\bar{T} = 2\pi \cdot \left[ \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(\omega, \theta) \omega^2 d\omega d\theta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Рисунок 78 [88] иллюстрирует частотно-энергетические характеристики волн с различными периодами. Ветровые волны представляют собой волны с наибольшей энергией, а защита сооружений внутренней акватории порта от воздействия значительных ветровых волн является первостепенной задачей для обеспечения нормальных условий швартовки и отстоя судов порта.

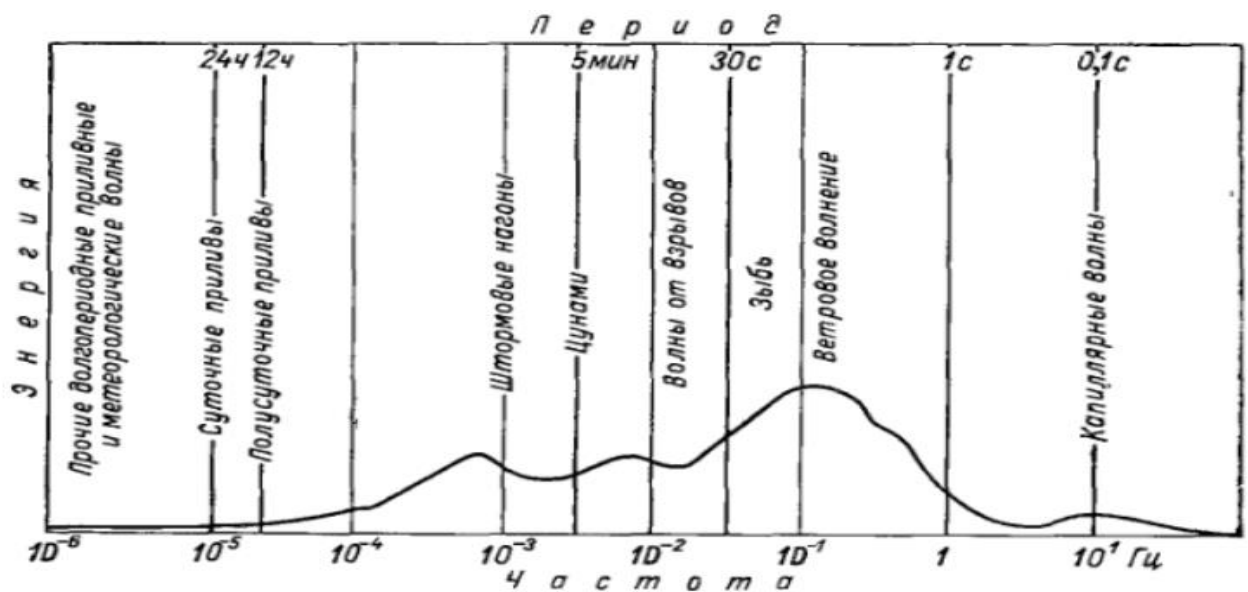


Рисунок 78 – Энергетический спектр волновых движений в море [88].

По мере развития спектральной теории волн на воде различные зарубежные и отечественные исследователи совершенствовали спектры волнения учитывая всё большее количество физических параметров и качественно достовернее моделируя каждый из них. Можно выделить следующие спектры: Неймана, Дарбишайра, Жельси, Бретшнайдера, Барлинга, Филлипса, Стрекалова, Пирсона–Московица, Давидана, Стрекалова–Масселя, JONSWAP (Join North Sea Wave Project), Крюземана, Артура, SWOP (Stereo Wave Observation Project), Крылова, Глуховского, Вознесенского–Нецветова, Мицуясу, Оки-Хаббла и др. [1, 19, 60, 124, 257].

Методика спектральной теории волн подразумевает образование нерегулярного [63] (беспорядочного, т.е. когда следующие друг за другом волны различаются по своим характеристикам) волнения, при котором возникает сложная система трёхмерных волн в пространстве. В общем случае волны могут быть разделены по степени их развития на три категории:

- 1) Развивающиеся – волны, значение параметров которых во времени возрастает;
- 2) Развитые (установившиеся) – волны, параметры которых во времени остаются неизменными;
- 3) Убывающие (затухающие) – волны, значение параметров которых во времени убывает.

В практике гидротехнического строительства наибольшее распространение получили два волновых частотных спектра [1, 61, 69, 257]:

- 1) Спектр Пирсона–Московица для условий развитого волнения, который описывается уравнением (15):

$$S_{\text{ПМ}}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^4\right) \quad (15)$$

где  $\alpha$  – параметр Филлипса, зависящий от стадии развития волнения, принимаемый равным  $8.1 \cdot 10^{-3}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения, принимаемое

равным  $9.81 \text{ м/с}^2$ ;  $\omega_m$  – модальная частота пика спектра ( $\frac{dS(\omega)}{d\omega} = 0$ ), определяемая по формуле (16):

$$\omega_m = \frac{g}{V} \cdot \sqrt[4]{\frac{4}{5} \cdot \beta} \quad (16)$$

где  $V$  – скорость ветра на высоте 19.4 метра над уровнем моря (может приниматься равной  $\frac{10}{9}V_{10}$  (где  $V_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 метров над уровнем моря));

$\beta$  – числовая постоянная, принимаемая равной 0.74.

2) Спектр JONSWAP – для условий развивающегося волнения, который описывается уравнением (17) [222]:

$$S_{JS}(\omega) = S_{ПМ}(\omega) \cdot \gamma^{\exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\omega - \omega_m}{\sigma \cdot \omega_m}\right)^2\right]} \quad (17)$$

где  $\gamma^{\exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\omega - \omega_m}{\sigma \cdot \omega_m}\right)^2\right]}$  – представляет собой безразмерный коэффициент "пикового усиления" или параметр пиковатости спектра, принимаемый в диапазоне от 1 до 15-20 [95] и средним значением 3.3, в котором параметр формы  $\sigma = \begin{cases} \sigma_a & \text{при } \omega \leq \omega_m \\ \sigma_b & \text{при } \omega > \omega_m \end{cases}$ ,  $\sigma_a = 0.07$ ,  $\sigma_b = 0.09$ . Случай  $\gamma = 1$  является граничным, при котором  $S_{JS}(\omega) = S_{ПМ}(\omega)$ .

Для практических целей важной характеристикой волнения является  $h_s$  – значительная высота волн (примерно равная  $h_{13\%}$ ), рассчитываемая по формуле (18), под которой в классическом определении понимается средняя из одной трети наибольших высот волн:

$$h_s = 4 \cdot \sqrt{m_0} \quad (18)$$

где  $m_0$  – спектральный момент нулевого порядка (19):

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S(\omega) d\omega \quad (19)$$

где  $n$  – порядок спектрального момента.

Помимо  $h_s$  также могут рассматриваться средняя высота волн  $h_{cp}$ , наиболее вероятная высота волн  $h_m$  и высота волн трёхпроцентной обеспеченности  $h_{3\%}$ , которые связаны между собой (20) [165]:

$$h_m = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot h_{cp} = 2 \cdot h_s = 2.645 \cdot h_{3\%} \quad (20)$$

Однако при таком уравнении спектра JONSWAP значительная высота волны для  $S_{JS}$  и  $S_{ПМ}$  будет иметь не одинаковую величину. Для обеспечения равенства значимых высот волн спектров  $S_{JS}$  и  $S_{ПМ}$  применяется «дополненный» волновой частотный спектр JONSWAP (21) [257]:

$$S_{JS \text{ доп}}(\omega) = F_n \cdot S_{ПМ}(\omega) \cdot \gamma^{\exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\omega - \omega_m}{\sigma \cdot \omega_m}\right)^2\right]} \quad (21)$$

где  $F_n$  – нормирующий или масштабный коэффициент, рассчитываемый по формуле (22):

$$F_n = \frac{1}{5 \cdot (0.065 \cdot \gamma^{0.803} + 0.135)} \quad (22)$$

При сравнении результатов расчёта по представленным волновым частотным спектрам, получим следующий результат (см. Рисунок 79).

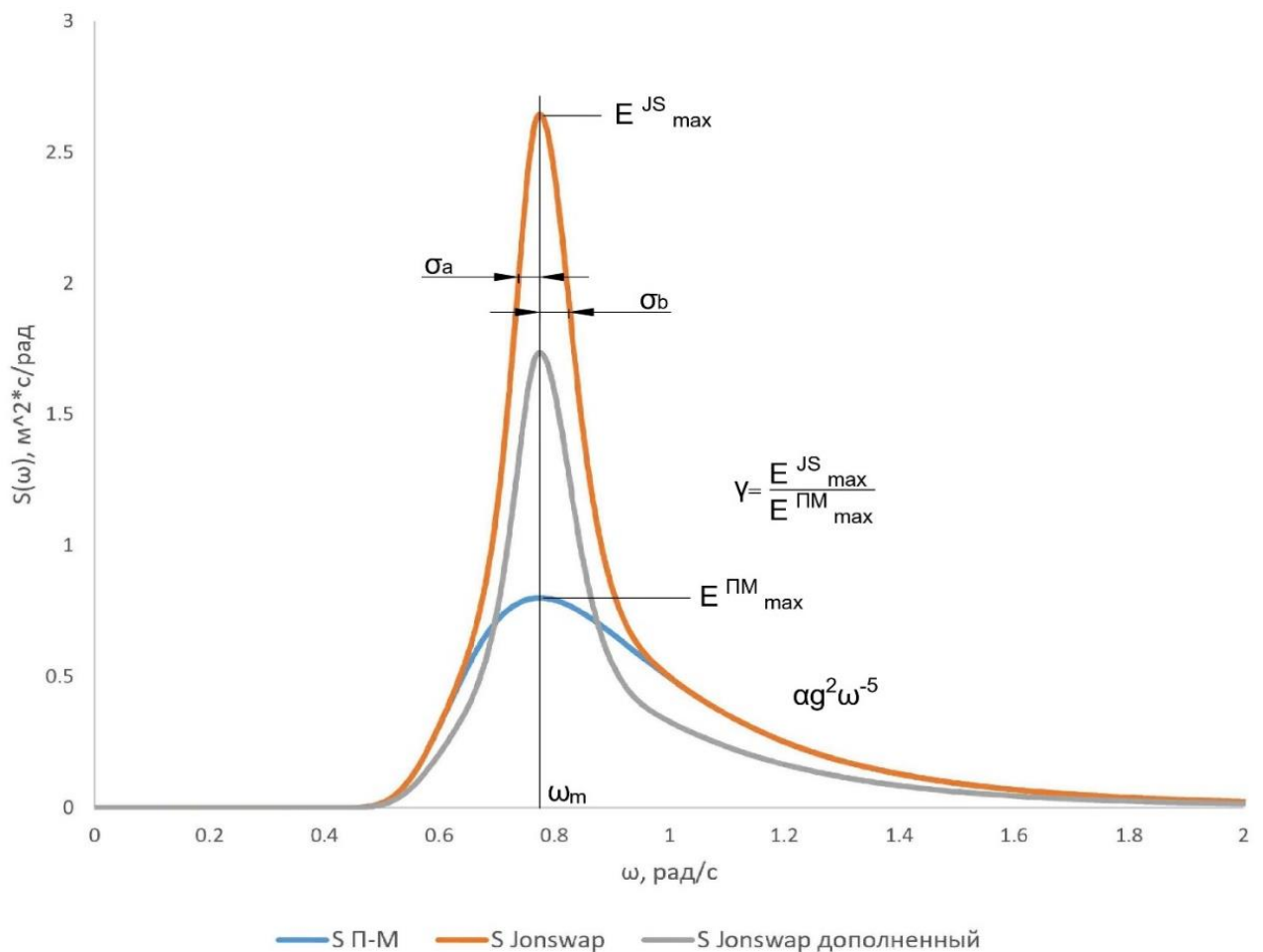


Рисунок 79 – Волновые частотные спектры Пирсона–Московица, JONSWAP и дополненного JONSWAP при  $V_{10} = 10$  [ $\text{м/с}$ ].

Указание на использование спектра JONSWAP содержится в СП 38.13330 [276, п.А.10]. Методика использования спектральной волновой теории для расчёта волнового климата [95] включает в себя следующие этапы:

- подготовка входной информации (поля ветра, батиметрия, ледовые условия и т.п.) для расчетов волнения;
- расчет спектров волнения по гидродинамической модели;
- обобщение и интерпретация результатов расчетов спектров волнения посредством вероятностных моделей.

Однако рассмотрение взволнованной поверхности как нерегулярных трёхмерных волн с помощью спектральной теории волн не всегда бывает

целесообразно в практических целях, т.к. развитое волнение обладает рядом свойств, позволяющих линеаризировать задачу [1, 76, 124, 165]:

- Свойство устойчивости или стационарности волнения. При рассмотрении достаточно больших выборок, характеристики волнения остаются практически одинаковыми для разных мест и времени измерения в рамках одной акватории;

- В реальных условиях волнообразования крутизна волн редко превышает  $\frac{1}{10}$ , а в закрытых морях и прибрежных водах обычно составляет  $\frac{1}{20}$  (для предельно развитых волн  $\frac{1}{23}$  (по В.В. Шулейкину) [137]), т.е. при такой малой крутизне можно использовать линейную теорию волн с достаточной для задач проектирования точностью;

- При образовании волн в глубоководной зоне они, как правило, бывают трёхмерными, однако развитые волны (при значительных разгонах) можно рассматривать как двухмерные;

- При подходе волн с глубокой воды к прибрежной отмели в условиях постепенно уменьшающейся глубины, трёхмерные волны постепенно перестраиваются в двухмерные.

В связи с перечисленными свойствами развитого волнения в целях проектирования гидротехнических сооружений портов можно при простых условиях волнообразования рассматривать потенциальные, гравитационные, ветровые, регулярные, двухмерные (плоскопараллельные) волны в рамках линейной теории (1-е приближение).

### **3.1.3. Нормативная методика определения характеристик волнения**

Наряду со спектральной волновой теорией, которая применяется при не простых условиях волнообразования (ветер, переменный по направлению и скорости и/или сложная конфигурация береговой черты) [274], в практике отечественного гидротехнического строительства используется методика СП 38.13330, которая зарекомендовала себя десятилетиями практического применения.

Зачастую для решения инженерных задач проектирование может вестись из предположения о наличии в районе строительства ПГТС простых условий волнообразования, когда ветер постоянной скорости действует на водную поверхность в направлении, перпендикулярном прямолинейной подветренной береговой черте [279, п.6.6.4]. Приняв данное допущение можно воспользоваться методикой, представленной в приложении А СП 38.13330.

Исходными данными для вычисления характеристик волнения на глубокой воде являются три параметра:

- 1) скорость ветра;
- 2) продолжительность действия ветра, которая для предварительных расчетов может приниматься для водохранилищ и озёр равной 6 ч [279, п.6.6.4], для морей - равной 12 ч [279, п.6.6.4], а для океанов - равной 18 ч [128];
- 3) длина разгона волны.

При этом для решения задачи получения расчётных характеристик волн на подходе к сооружению используются также данные реанализа штормов в регионе строительства за значительный (не менее 30 лет [274, п. 5.1.4]) период времени и/или расчёт с помощью метода эквивалентного шторма. Для того чтобы задать величину скорости и продолжительности действия ветра, необходимо определить расчётную обеспеченность шторма, что, в свою очередь, требует выполнения следующей последовательности действий:

- Необходимо задать класс ответственности для проектируемого объекта, в зависимости от этой величины определить повторяемость расчётного шторма, обеспеченность высот волн и расчётного уровня;

- В соответствии с [276, п.5.2] определить повторяемость расчётного шторма;

- В соответствии с [276, п.5.7] задать расчётную обеспеченность высот волн в системе;

- В соответствии с [276, п.5.9] задать расчётную обеспеченность уровня акватории.

Данные указанных пунктов СП 38.13330 были объединены в таблицу (Таблица 7).



Таблица 7. Обеспеченности расчётных параметров по СП 38.13330.

Класс ответственности	I	II	III	IV
Расчётный шторм	1%	2%	4%	4%
Расчётный уровень	1%	5%	5%	10%
Высоты волн для определения:				
– защищённости акваторий	5%			
– наката волн	1%			
– устойчивости и прочности	1%			

После этого требуется сопоставить длину разгона волны при принятой скорости ветра с предельной допустимой по т.А1 СП 38.13330, и, если длина разгона больше установленного по т.А1, то принять длину разгона равной предельной. Таким образом, при моделировании по методике СП для принятого класса ответственности рассматривается расчётный шторм заданной обеспеченности, продуцирующий систему волн, в которой рассматриваются волны, соответствующей задачам выполняемого расчёта обеспеченностью.

Задавшись продолжительностью действия ветра, скоростью ветра, а также длиной разгона волны, по данным номограмм определяются средний период  $\bar{T}$  и высота волн  $\bar{h}_d$  на глубокой воде. Зная средний период волн, по формуле (23) [274] определяется средняя длина волн:

$$\bar{\lambda}_d = \frac{g \cdot \bar{T}^2}{2 \cdot \pi} \quad (23)$$

После определения средней высоты волн, требуется перейти к высоте волн расчётной обеспеченности в глубоководной зоне по формуле (24) [274]:

$$h_{d i, \%} = k_i \cdot \bar{h}_d \quad (24)$$

где  $k_i$  – коэффициент, принимаемый по значению  $\frac{gL}{V_w^2}$  с помощью номограмм.

Однако номограммы в СП 38.13330 призваны лишь упростить работу инженеров и имеют более точные, математически строгие формулы для расчёта (25)-(27) [274, 276]:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \bar{h}_d = 0.16 \cdot \frac{V_w^2}{g} \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{g \cdot L}{V_w^2} \right)^{0.5}} \right]^2 \right\} \\ \bar{h}_d = 0.16 \cdot \frac{V_w^2}{g} \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{1 + 1.04 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{g \cdot t}{V_w} \right)^{0.635}} \right]^2 \right\} \end{array} \right. \quad (25)$$

где  $V_w$  – скорость ветра, м/с, на высоте 10 м с осреднением 10 мин;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – длина разгона, м;  $t$  – продолжительность действия ветра, с.

$$\bar{T} = 19.5 \cdot \frac{V_w}{g} \cdot \left( \frac{g \cdot \bar{h}_d}{V_w^2} \right)^{0.625} \quad (26)$$

$$k_i = \left[ -\frac{4}{\pi} \cdot \left( 1 + 0.4 \cdot \frac{\bar{h}_d}{d} \right) \ln F_h \right]^{\frac{1 - \frac{\bar{h}_d}{d}}{2}} \quad (27)$$

где  $F_h$  – обеспеченность высоты волны (доли единицы);  $d$  – фактическая глубина места, м.

При переходе волн из глубоководной зоны в прибрежную (с глубинами от  $\frac{\lambda}{2}$  и менее) происходит процесс трансформации волн под влиянием дна, учесть данное явление призваны коэффициенты трансформации и потерь. Помимо этого, в прибрежной зоне при подходе фронта волны под углом, отличным от 90 градусов и не прямолинейном очертании береговой линии, наблюдается явление рефракции волн. Процессы трансформации волн и их рефракции происходят в неглубоководной зоне, как правило, одновременно. После вычисления средней высоты волны заданной обеспеченности на глубокой воде определяется высота

волн в мелководной зоне с учётом упомянутых выше процессов по формуле (28) [274, 276]:

$$h_{i,\%} = h_{d i,\%} \cdot k_t \cdot k_l \cdot k_r \quad (28)$$

где  $k_t$  – коэффициент трансформации, волн в мелководной зоне под воздействием влияния дна;  $k_l$  – обобщённый коэффициент потерь, на взаимодействие с дном;  $k_r$  – коэффициент рефракции, учитывающий подход фронта волны под углом к берегу и не прямолинейность очертаний береговой линии.

Подробнее коэффициенты трансформации, потерь и рефракции будут рассмотрены в п.3.2.

При моделировании волн важным фактором является взаимодействие волн с поверхностью дна, по данному критерию волны подразделяются в соответствии с [276, п.5.6] на четыре зоны:

1) Глубоководную: с  $d > \frac{\lambda}{2}$ , где дно не оказывает существенного воздействия на траекторию движения частиц жидкости взволнованной поверхности;

2) Мелководную: с  $\frac{\lambda}{2} \geq d > d_{cr}$  ( $d_{cr}$  – критическая глубина первого обрушения волн), где дно оказывает значимое воздействие на траекторию движения частиц жидкости взволнованной поверхности и на характеристики волнения;

3) Прибойную: с  $d_{cr} \geq d \geq d_{cr,u}$  ( $d_{cr,u}$  – критическая глубина последнего обрушения волн), где начинается и завершается процесс потери энергии волнения при обрушении гребней;

4) Приурезовую: с  $d_{cr,u} > d$ , где разрушенные волны накатывают на берег.

При рассмотрении ПГТС важную роль играет глубина у фронтальной части сооружения, которая в расчётах волнового воздействия при отсутствии бермы принимается равной глубине до дна, а при наличии бермы заменяется на условную расчётную глубину, и определяется по формуле (29) [276, п.5.13]:

$$d = d_f + k_{br} \cdot (d_b - d_f) \quad (29)$$

где  $d_f$  – глубина под подошвой сооружения, м;  $d_b$  – глубина до дна, м;  $k_{br}$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от значения  $\frac{d_{br}}{\lambda}$ , где  $d_{br}$  – глубина над бермой.

При этом в описанных выше четырёх зонах при физической трактовке изменения удельного волнового давления присутствуют четыре вида волновых нагрузок, воспринимаемых ПГТС [128]:

- 1) Стоячая волна, при  $\begin{cases} d_b > d_{cr} \\ d_{br} \geq 2 \cdot h \end{cases}$
- 2) Переходный тип волнения, от стоячих к разбитым волнам, при  $\begin{cases} d_b > d_{cr} \\ 2 \cdot h > d_{br} > 0.7 \cdot h \end{cases}$
- 3) Разбитая волна, при  $\begin{cases} d_b \geq d_{cr} \\ d_{br} \approx 0.7 \cdot h \end{cases}$
- 4) Прибойная волна, при  $d_b < d_{cr}$

Однако в нормативной документации (СП 38.13330) принята другая классификация:

- 1) Стоячая волна, при  $\begin{cases} d_b > 1.5 \cdot h \\ d_{br} \geq 1.25 \cdot h \end{cases}$ ;
- 2) Разбивающаяся волна, при  $\begin{cases} d_b \geq 1.5 \cdot h \\ d_{br} < 1.25 \cdot h \end{cases}$ ;
- 3) Прибойная волна, при  $d_b \leq d_{cr}$ .

Наглядно расположение зон воздействия различных видов волн проиллюстрировано на плане см. Рисунок 80 (адаптировано из [50]), где цветом схематично показано увеличение высоты воспринимаемых сооружением волн от максимальных у головы мола до минимальных в корневой части. Рисунок 81 показывает поперечный разрез с обозначением границ зон акватории и типами рассматриваемых волн (адаптировано из [76, 87, 139, 155, 165, 252]).

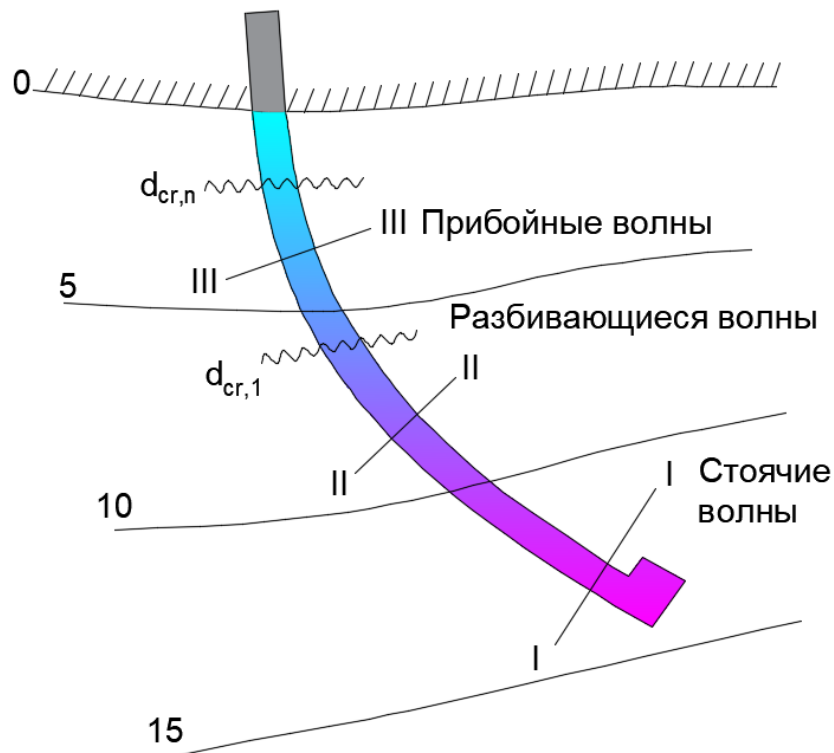


Рисунок 80 – Зоны воздействия волн на ПГТС.

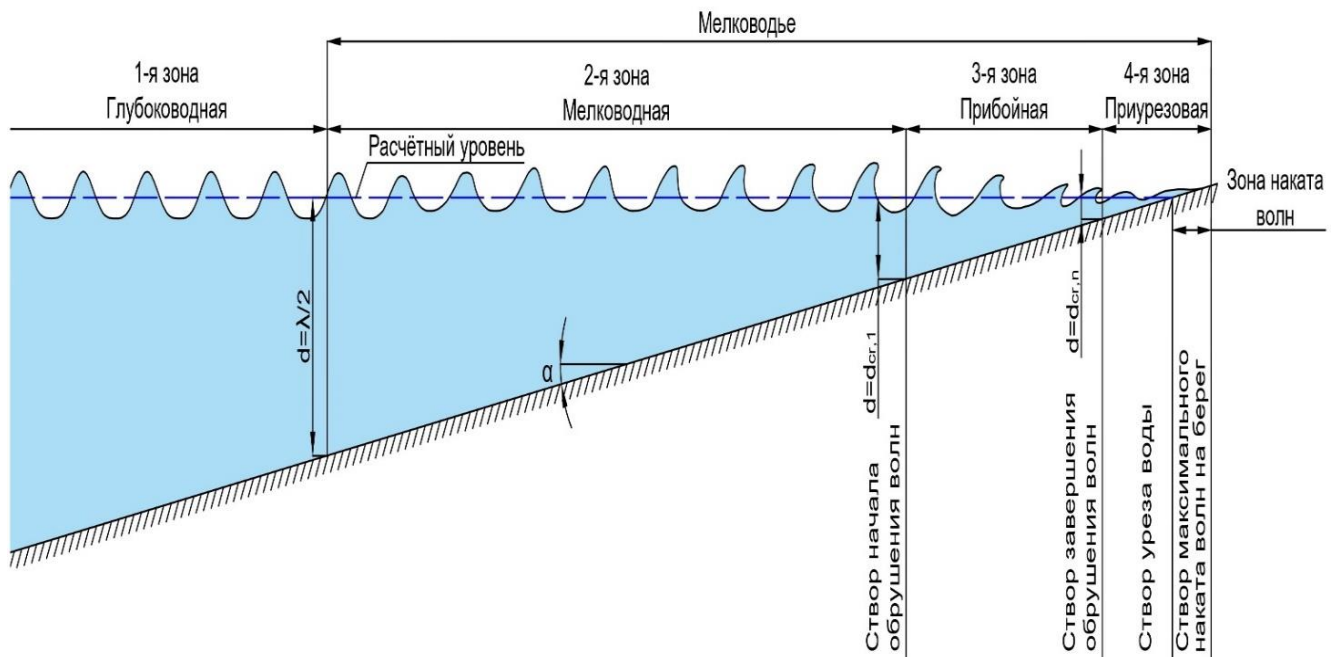


Рисунок 81 – Поперечный разрез участка потенциального расположения ПГТС в прибрежной районе акватории с указанием зон волнения.

В связи с тем, что головы молов располагаются по условиям компоновки на удалении от берега, то они, как правило, находятся в мелководной и реже в глубоководной зоне. Это совпадает с позицией «Внешние оградительные сооружения портов стремятся разместить во второй (мелководной) зоне. В

четвертую и третью зону попадают гидротехнические берегоукрепительные сооружения» [155, стр. 52].

Целесообразно располагать головы молв таким образом чтобы обеспечить восприятие стоячих волн, нагрузка от которых меньше нагрузки от разбивающихся волн. При этом высота как стоячей, так и разбивающейся волны будет удвоенной вследствие интерференции, но поскольку у разбивающихся волн происходит динамический процесс удара волны и всплеска большой массы воды, то и расход заплеска у таких волн будет больше, чем у стоячих.

### **3.2. Оценка влияния климатических изменений уровня режима акватории на расчётные характеристики волнения в зоне строительства ПГТС**

Рассматривая процесс моделирования ветро-волнового режима акватории, в первую очередь требуется решить практическую задачу выбора наиболее рационального взаимного расположения оградительных и причальных сооружений порта чтобы обеспечить неперевышение допустимых параметров волнения у причалов, которое хорошо описывается следующим алгоритмом (см. Рисунок 82 [адаптировано из 94]).

Оценка влияния климатических изменений уровня режима акватории на расчётные характеристики волнения в зоне строительства ПГТС производится, как и во всей работе, исходя из условия сохранности параметров волнения, продуцируемого возмущающими факторами в глубоководной зоне в условиях наступивших климатических изменений на момент оценки параметров волнения.



Рисунок 82 – Последовательность моделирования волнового режима на акватории порта и оптимизации компоновочных решений.

### 3.2.1. Изменение границ зон воспринимаемых нагрузок

Как уже отмечалось ранее, головы оградительных молв стараются располагать в зоне воздействия стоячих волн, данное компоновочное решение связано с необходимостью минимизации нагрузок, воспринимаемых сооружением в зоне максимальных высот волн. При расчёте оградительных гидротехнических сооружений в виде мола сооружение по своей длине воспринимает волновое воздействие при глубинах от нуля у корневой части мола и до максимальной глубины у головы мола.

В связи с этим целесообразным видится более подробное рассмотрение типов воспринимаемых волн для оценки влияния климатических изменений уровня волнового режима акватории на параметры волн, воспринимаемых оградительными сооружениями. Приводимые данные относятся в том числе и к причальным

сооружениям, однако ввиду расположения данных сооружений в защищённой акватории, как правило высоты волн для таких сооружений незначительны.

Характер изменения волнового давления при различных параметрах расположения сооружения подробно рассматривается в [31, 128, 138, 214]. Как уже отмечалось ранее, волновое давление напрямую зависит от вида волн воздействующих на сооружение. Для рассматриваемых в данной работе ПГТС наиболее значительное волновое давление возникает в мелководной зоне, где на сооружение могут воздействовать разбивающиеся или стоячие волны, а также волны переходного типа между стоячими и разбивающимися волнами. Рисунок 83 [128] показывает характер изменения удельного волнового давления во времени при различных значениях отношений глубины у бермы и высоты волны.

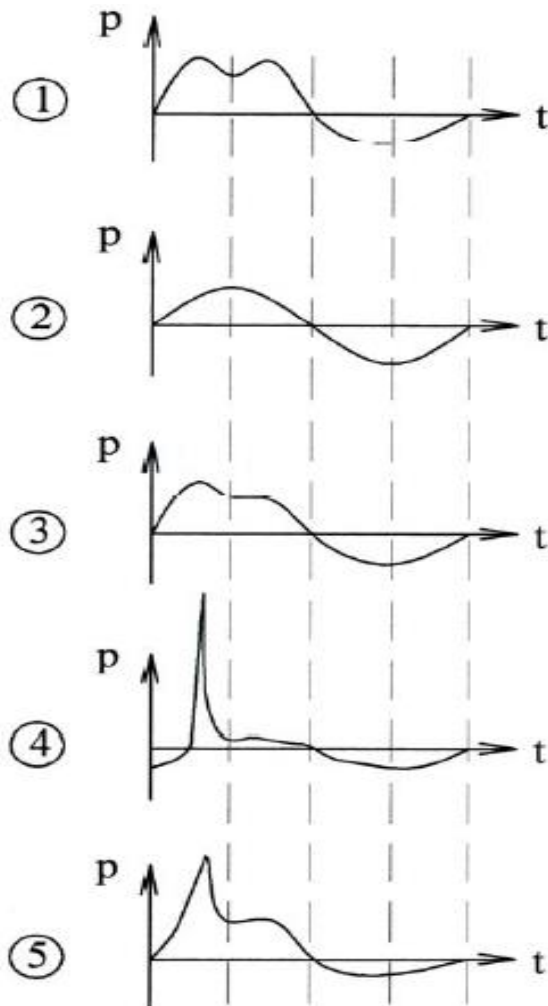


Рисунок 83 – Характер изменения волнового давления во времени. 1 –  $d > d_{cr}$  и  $d_{br} > 2 \cdot h$  - стоячая волна; 2 –  $d > d_{cr}$  и  $d_{br} \approx 2 \cdot h$  - стоячая волна; 3 –  $d > d_{cr}$  и  $d_{br} < 2 \cdot h$  - переходный тип волны; 4 –  $d \geq d_{cr}$  и  $d_{br} = 0.7 \cdot h$  - разбитая волна; 5 –  $d < d_{cr}$  - прибойная волна [128].



Разбивающиеся и стоячие волны имеют свои отличительные особенности, необходимые для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации ПГТС. Стоячая волна характеризуется не только удвоенной высотой, но и наибольшим возвышением свободной волновой поверхности  $\eta$  у вертикальной стены, что является важным критерием при определении незатопляемости ПГТС, т.е. при определении удельного расхода перелива. Разбивающиеся волны, в свою очередь, характеризуются наибольшим волновым давлением, для которого характерно динамическое изменение, а нарастание давления в отдельных случаях может составлять 0.005 сек и иметь величину до 0.9 МПа (см. Рисунок 84 [31, 138]).

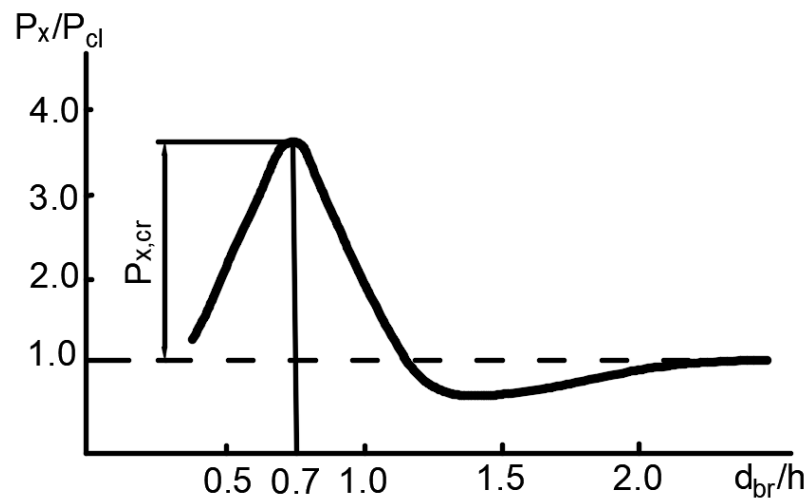


Рисунок 84 – Изменение суммарного волнового давления с уменьшением глубины над бермой [31, 138].

При изменении уровня режима физика процесса останется неизменной, однако повышение отметки водной поверхности для каждой конкретной рассматриваемой точки приведёт к тому, что для той же точки по прошествии заданного периода времени отношение  $\frac{d}{\lambda_d}$  увеличится при неизменной расчётной волне. В связи с этим, в условиях климатических изменений уровня режима произойдёт смещение створов каждой из зон, см. Рисунок 85.

Смещение створов начала и окончания мелководной зоны, в свою очередь, приведёт к тому, что секции сооружения, находившиеся при проектировании в прибойной зоне, по мере повышения уровня режима акватории окажутся в мелководной зоне, т.е. будут подвергаться воздействию не прибойных волн, более

аэрированных и оказывающих меньшее волновое давление, а разбивающихся или стоячих.

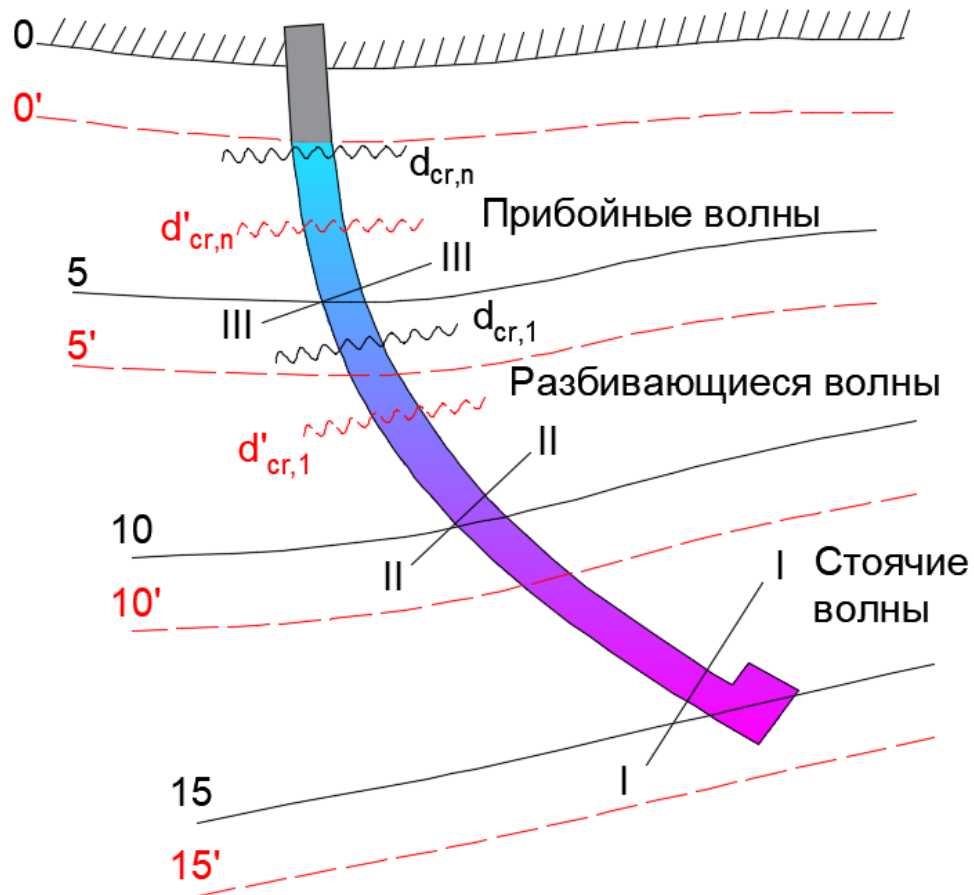


Рисунок 85. – Зоны воздействия волн на сооружения с учётом повышения уровня режима акватории (адаптировано из [128], цветом схематично показано увеличение высоты воспринимаемых сооружением волн от максимальных у головы мола до минимальных в корневой части; глубины с индексом ' и красные штриховые линии показывают значения на момент проектирования).

Изменение границ волновых зон при повышении уровня режима акватории окажет влияние на условия эксплуатации ПГТС, т.к. для каждого конкретного рассматриваемого участка ПГТС изменится тип волновой нагрузки, что, в свою очередь, можно трактовать как значимое изменение факторов, воздействующих на данный участок сооружения, и потребует учёта при проектировании.

### 3.2.2. Оценка факторов, лимитирующих волнообразование на глубокой воде и границы мелководной зоны

В соответствии с действующей нормативной документацией для условий волнообразования на глубокой воде от возмущающего действия ветра постоянного направления и силы основными факторами, лимитирующими эволюцию волн до полностью развитого волнения, являются продолжительность действия ветра и длина разгона волн. В связи с этим возникает необходимость оценки параметра, оказывающего наибольшее ограничивающее воздействие на высоты волн, продуцируемых в системе расчётного шторма.

Как уже отмечалось ранее, предельной продолжительностью шторма для морей и океанов является 12 и 18 часов соответственно, однако на предельную длину разгона волны также накладываются ограничения. Предельную (расчётную) длину разгона волны ограничивают параметры естественных географических условий района волнообразования, а также требования по предельной расчётной длине разгона, см. Таблица 8 [адаптировано из п.А.6, 276]:

Таблица 8 - Предельные значения длин разгона волн при различных скоростях ветра.

Скорость ветра $V_w$ , м/с	5	10	15	20	25	30	40	50
Предельная длина разгона $L_{max}$ , км	2800	2400	2000	1600	1200	600	200	100

Проведённый анализ различных вариантов продолжительности действия ветра и предельной длины разгона волн позволил получить ограничения на условия волнообразования (см. Рисунок 86). Из полученных данных следует, что, при скорости ветра примерно от 28 м/с и рассматриваемой предельной продолжительности шторма 18 часов, основным лимитирующим фактором будет выступать длина разгона волн. Аналогично для продолжительности шторма 12 часов предельная скорость ветра составит около 31 м/с.

Для условий возникновения расчётного шторма в глубоководной зоне открытого моря или океана предельные рассматриваемые продолжительности 12 и 18 часов, а также данные о моделировании отдельных штормов в условиях Арктики

[153], продолжительность которых может составлять несколько суток, позволяют сделать предположение, что основным ограничивающим фактором волнообразования при существенном шторме (1 – 4% повторяемости для рассматриваемых классов ответственности) будет являться длина разгона волн. Таким образом, в рамках данной работы будут рассматриваться существенные продолжительности действия ветра, в условиях которого главным лимитирующим фактором, будет являться длина разгона волн при скорости ветра более 28 м/с (основной расчётный случай) или продолжительность шторма при скорости ветра менее 28 м/с.

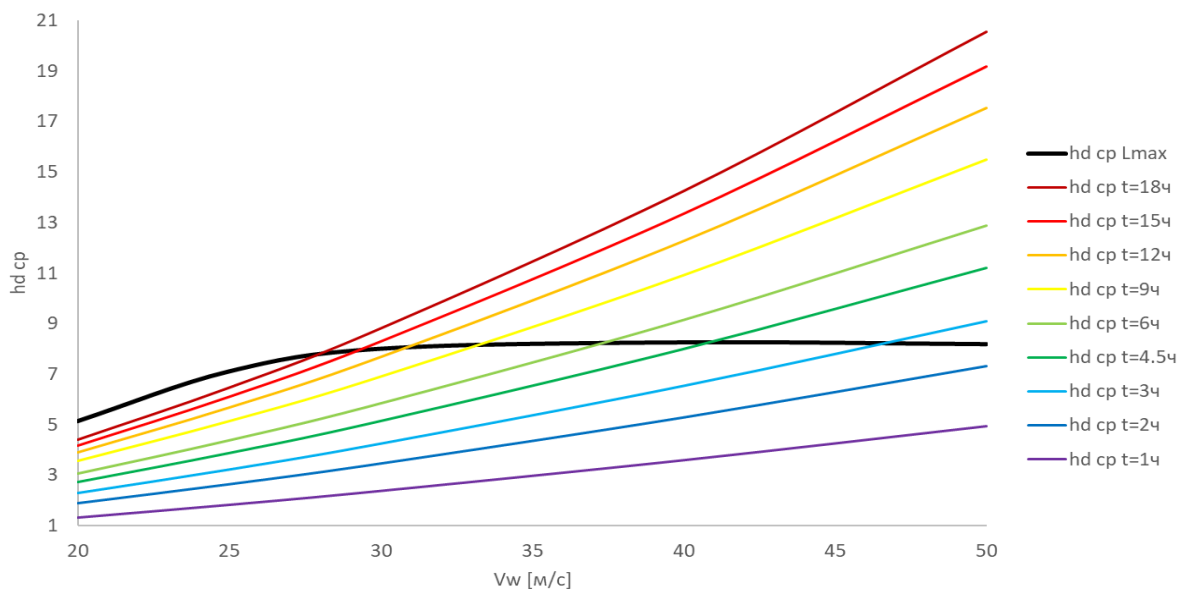


Рисунок 86 – Предельные высоты волн при бесконечной продолжительности ветра и ограничении по длине разгона равной предельной и при бесконечной длине разгона и различных вариантах продолжительности действия возмущающей силы.

Для расчётов по нормативной методике не требуется определять границу начала мелководной зоны, в которой сооружением воспринимаются стоячие и разбивающиеся волны, так как из физики процесса глубина перехода от глубокой воды к мелководной зоне или иначе зоны, где воздействие дна на частицы жидкости становится значимым, равняется половине длины волны. Однако окончание мелководной зоны в соответствии с нормативной методикой необходимо определять как глубину первого обрушения  $d_{cr}$ . Критическая глубина первого обрушения определяется по формуле (30) [274]:

$$d_{cr} = a_i \cdot \left[ \operatorname{arcth} \left( \frac{0.59 \cdot 2 \cdot \pi \cdot h_{d,1\%}}{g \cdot \bar{T}^2} \right) \right] \cdot \frac{g \cdot \bar{T}^2}{2 \cdot \pi} \quad (30)$$

где

$$a_i = \begin{cases} a_1 = 4.3 & 0.001 < i \leq 0.033 \\ a_2 = 5.4 & \text{при } 0.033 < i \leq 0.049 \\ a_3 = 6.3 & 0.049 < i \leq 0.200 \end{cases} \quad (31)$$

При подобном разделении уклонов дна на три типа, был рассмотрен каждый тип в отдельности с целью определить границы мелководной и прибойной зон в первом приближении. Предельные длины разгона волн были приняты по требованиям СП 38.13330, а для значений ветра менее 20 м/с с увеличением на 400 км предельной длины разгона волн на каждые 5 м/с уменьшения скорости ветра, см. Таблица 8. Рассматриваемым участком будет  $d = \frac{\bar{\lambda}_d}{2}$  и  $d = d_{cr}$  для наибольших средних высот волн в каждой расчётной группе. При этом минимальная длина разгона волн будет начинаться от 1 км с шагом 1 км при длине разгона волн до 20 км и с шагом 5 км при длине разгона от 20 км и более. Были рассмотрены следующие варианты:  $0.001 < i \leq 0.033$  (см. Рисунок 87);  $0.033 < i \leq 0.049$  (см. Рисунок 88);  $0.049 < i \leq 0.200$  (см. Рисунок 89).

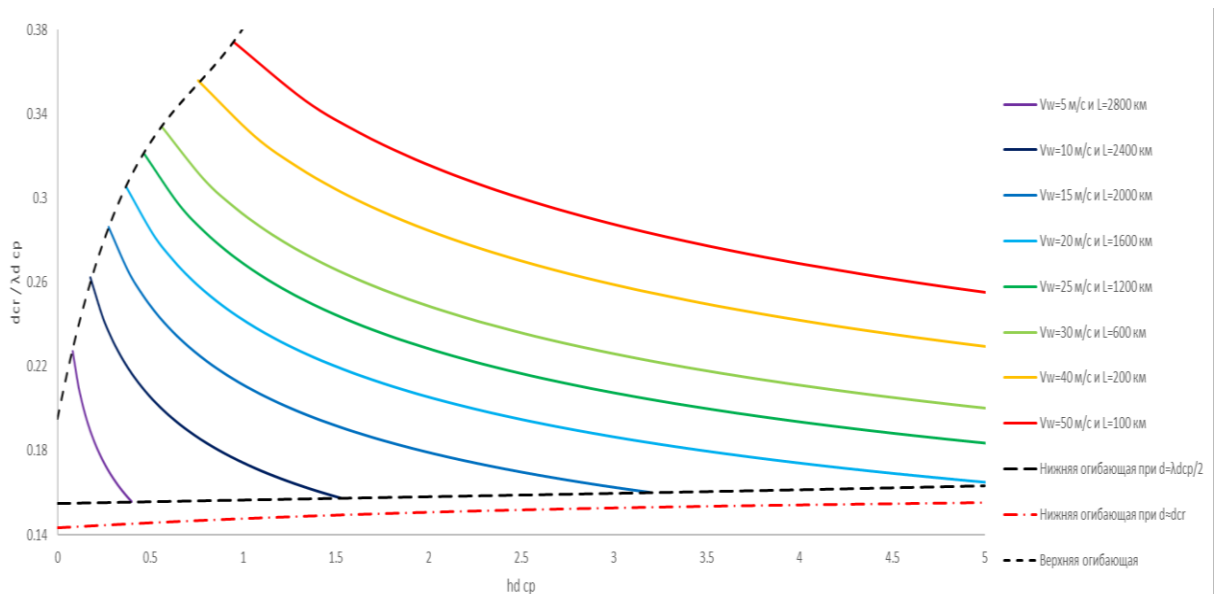


Рисунок 87 – Номограмма для определения отношения  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  по средней высоте волн в глубоководной зоне при предельной длине разгона волн в зависимости от скорости ветра и уклона дна в диапазоне (0.001; 0.033].

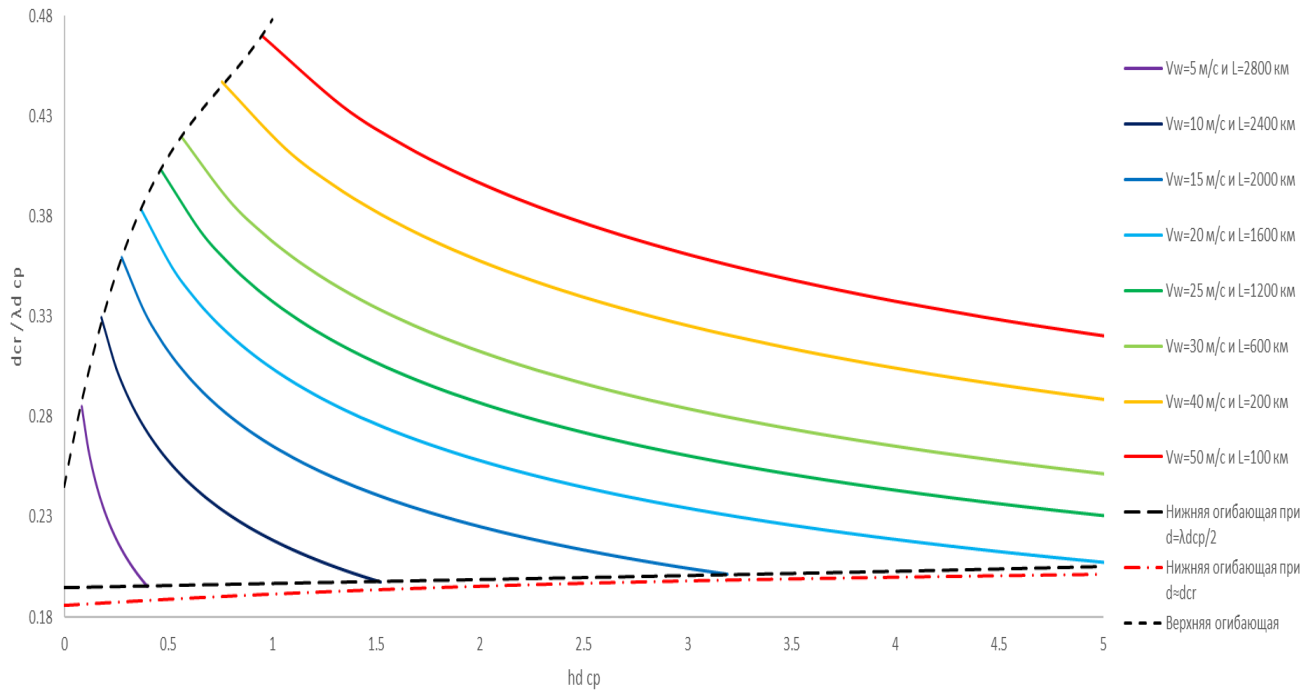


Рисунок 88 – Номограмма для определения отношения  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  по средней высоте волн в глубоководной зоне при предельной длине разгона волн в зависимости от скорости ветра и уклона дна в диапазоне (0.033; 0.049].

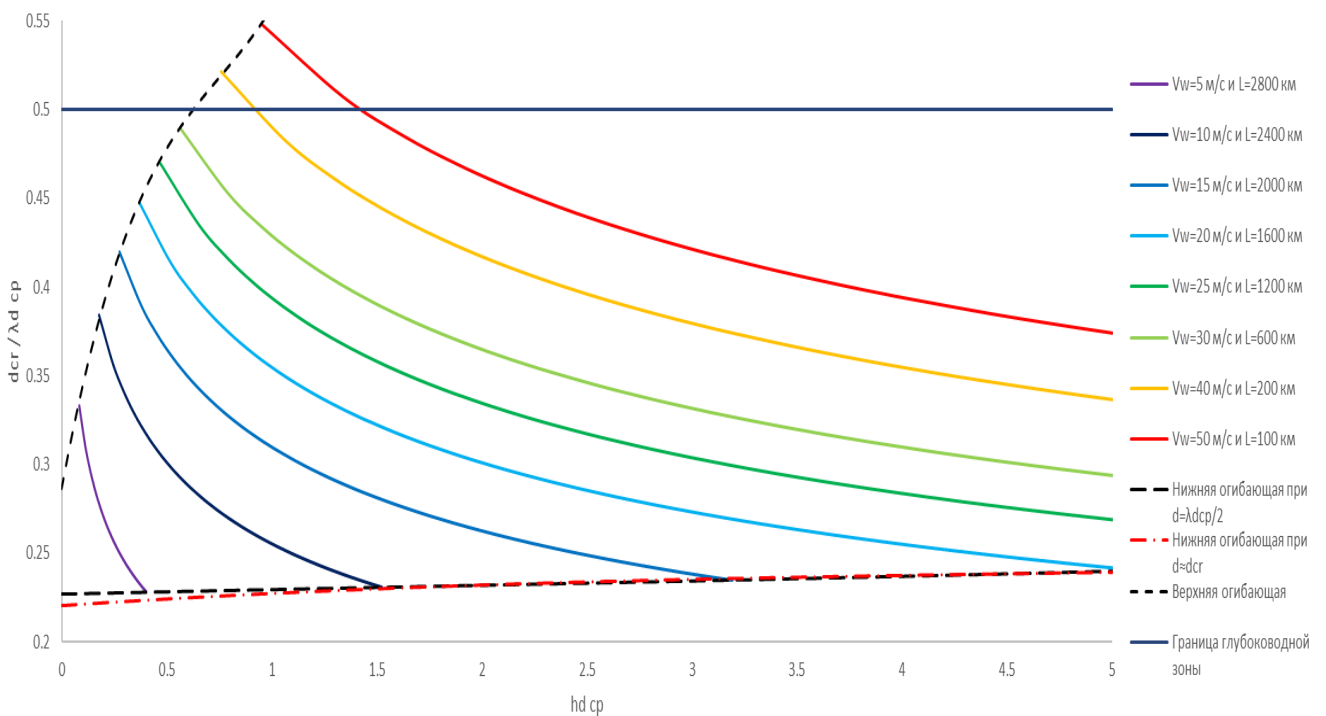


Рисунок 89 – Номограмма для определения отношения  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  по средней высоте волн в глубоководной зоне при предельной длине разгона волн в зависимости от скорости ветра и уклона дна в диапазоне (0.049; 0.2].

Полученные кривые в области минимальных  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  были аппроксимированы полиномами третьей степени с коэффициентом детерминации (величина достоверности аппроксимации)  $R^2 \approx 1 - 3.937 \cdot 10^{-6}$ . Таким образом, по результатам обобщения полученных данных определено предельное отношение  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  при  $\bar{h}_d = 0$  (было использовано  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  при  $d = \frac{\bar{\lambda}_d}{2}$  в связи с тем, что значение  $\bar{h}_d = 0$  и так является серьёзным занижением нижней границы диапазона рассматриваемых высот волн, и дополнительно занижать получаемые результаты не целесообразно поскольку это будет противоречить реальным условиям волнообразования), то есть условие границы перехода от мелководной к прибойной зоне:

- При  $0.001 < i \leq 0.033$  значение нижней огибающей кривых зависимости  $\bar{h}_d$  от  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$ , при  $\bar{h}_d = 0$  будет  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d} \approx 0.1434$  при  $d \approx d_{cr}$  и  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d} \approx 0.1549$  при  $d = \frac{\bar{\lambda}_d}{2}$ ;

- При  $0.033 < i \leq 0.049$  значение нижней огибающей кривых зависимости  $\bar{h}_d$  от  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$ , при  $\bar{h}_d = 0$  будет  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d} \approx 0.1862$  при  $d \approx d_{cr}$  и  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d} \approx 0.1945$  при  $d = \frac{\bar{\lambda}_d}{2}$ ;

- При  $0.049 < i \leq 0.200$  значение нижней огибающей кривых зависимости  $\bar{h}_d$  от  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$ , при  $\bar{h}_d = 0$  будет  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d} \approx 0.2207$  при  $d \approx d_{cr}$  и  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d} \approx 0.2269$  при  $d = \frac{\bar{\lambda}_d}{2}$ .

### 3.2.3. Трансформация волн при уклоне дна 0.03 и более

Расчёты данного раздела, произведены для следующих условий волнообразования: скорость ветра 25 м/с и длина разгона волн 200 км.

В соответствии с нормативными требованиями трансформация волн на мелководье учитывается с помощью коэффициента трансформации и обобщённого коэффициента потерь. Однако в соответствии с [А.13, 276] при уклонах дна равных 0.03 или более обобщённый коэффициент потерь принимается равным единице или, иными словами, не учитывается при оценке изменения высоты волн при трансформации на мелководье. Коэффициент трансформации определяется по формуле ((32) и (33))[п.4.4.1, 274]:

$$k_t = \frac{1}{\sqrt{C_n \cdot \left( 1 + \frac{\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{C_n \cdot \lambda_d}}{\operatorname{sh} \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot d}{C_n \cdot \lambda_d} \right)} \right)}} \quad (32)$$

где

$$C_n = \sqrt{\operatorname{th} \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{\lambda_d} \right)} \quad (33)$$

Коэффициент трансформации волн изменяется нелинейно по участку мелководья, т.е.  $0 \leq d \leq \frac{\lambda_d}{2}$ . Рассмотрим подробнее график изменения коэффициента трансформации по мере приближения волны к берегу (см. Рисунок 90).

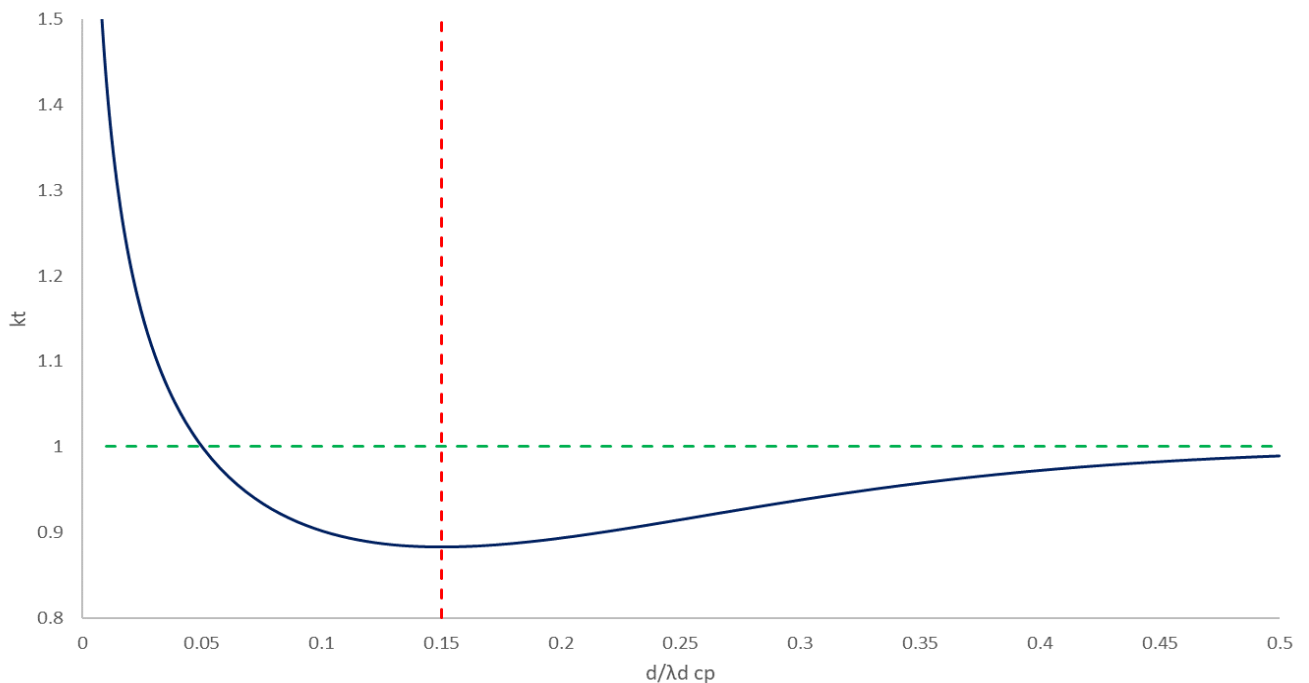


Рисунок 90 – Зависимость величины коэффициента трансформации от  $\frac{d}{\lambda_d}$ .

Однако рассмотрении формулы (32) остаётся не совсем ясна физика процесса, поскольку из условия баланса волновой энергии при допущении постоянства переносимой волной энергии, получаем, что энергии на длину волны и на единицу ширины волны должны быть равны (34), тогда:

$$F_{cp} d \geq \frac{\lambda}{2} = F_{cp} \frac{\lambda}{2} > d \geq \frac{\lambda}{20} \quad (34)$$



$$\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\frac{\bar{h}_d}{2}\right)^2 \cdot C_{\text{глуб}} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\frac{\bar{h}_s}{2}\right)^2 \cdot C_{\text{мелк}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\text{sh}(2 \cdot k \cdot d)}\right) \quad (35)$$

Подставив в выражение (35) значения скорости волны на глубокой воде и на мелкой воде, получим выражение (36):

$$\frac{\rho \cdot g}{4} \cdot \left(\frac{\bar{h}_d}{2}\right)^2 \cdot \frac{g \cdot T_{\text{глуб}}}{2 \cdot \pi} = \frac{\rho \cdot g}{4} \cdot \left(\frac{\bar{h}_s}{2}\right)^2 \cdot \frac{g \cdot T_{\text{мелк}}}{2 \cdot \pi} \cdot \text{th}(k \cdot d) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\text{sh}(2 \cdot k \cdot d)}\right) \quad (36)$$

При перемещении волн из глубоководной зоны в мелководную период волны принимается неизменным [А.12, 276], тогда при  $T_{\text{глуб}} = T_{\text{мелк}}$  и после подстановки значения волнового числа получим (37):

$$k_t = \frac{\bar{h}_s}{\bar{h}_d} = \frac{1}{\sqrt{\text{th}\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{\lambda}\right) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot \frac{d}{\lambda}}{\text{sh}\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{d}{\lambda}\right)}\right)}} \quad (37)$$

При построении графика зависимости коэффициента трансформации от отношения  $\frac{d}{\lambda}$  получим, что необходимо постоянно учитывать изменение длины волны при её приближении к берегу по формуле (38) [268, 274]:

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_d \cdot \sqrt{\text{th}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\bar{\lambda}_d}\right)} \quad (38)$$

Таким образом, уравнение для коэффициента сводится к зависимости только от отношения  $\frac{d}{\lambda_d}$ , то есть в том виде, который используется при получении данных в [268, 274, 276]. Полученная результирующая формула для определения коэффициента трансформации в зависимости от  $\frac{d}{\lambda_d}$  (39):

$$k_t = \frac{1}{\sqrt{\text{th}\left(\frac{2 \cdot \pi}{C_n} \cdot \frac{d}{\lambda_d}\right) \cdot \left(1 + \frac{\frac{4 \cdot \pi}{C_n} \cdot \frac{d}{\lambda_d}}{\text{sh}\left(\frac{4 \cdot \pi}{C_n} \cdot \frac{d}{\lambda_d}\right)}\right)}} \quad (39)$$

где  $C_n$  определяется по формуле (33).

Именно изменением длины волны по мере приближения к берегу можно объяснить появляющиеся на графике в диапазоне  $0.5 \geq \frac{d}{\lambda_d} > \approx 0.15$  уменьшения высоты волны на мелководье (коэффициента трансформации), и последующее его увеличение. Так в [76] данное явление (при решении задачи относительно  $\frac{d}{\lambda}$ ) объясняется следующим образом: «...волны начинают переносить энергию, обусловленную давлением, и переносят её во всё возрастающем количестве. Однако за рубежом  $\frac{d}{\lambda} = 0.17$  уменьшение глубины настолько ускоряется при продолжающемся уменьшении длины волны  $\bar{\lambda}$ , что для переноса волнами неизменного количества энергии необходимо возрастание их высоты».

При выводе формулы коэффициента трансформации, при допущении постоянства переносимой волной энергии, получаем, что перегиб графика происходит при значении  $\approx 0.17$ . Однако при рассмотрении графика коэффициента трансформации, построенного по нормативной методике, получим перегиб при значении  $\approx 0.15$  (см. Рисунок 91). Характер графиков и значения точек перегиба функций для обоих подходов достаточно близки по своим абсолютным значениям:

- при  $\frac{d}{\lambda} \in (0.000144; 0.5]$ , где левой границе для рассматриваемого случая соответствует  $d = 0.01\text{м}$  – коэффициент детерминации (величина достоверности аппроксимации)  $R^2 \approx 0.99933$ ;

- при  $\frac{d}{\lambda} \in (0.15; 0.2]$  – коэффициент детерминации (величина достоверности аппроксимации)  $R^2 \approx 0.50895$ ;

- при  $\frac{d}{\lambda} \in (0.15; 0.5]$ , где левой границе для рассматриваемого случая соответствует наименьшее из рассматриваемых  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  – коэффициент детерминации (величина достоверности аппроксимации)  $R^2 \approx 0.99465$ .

Таким образом выявлено, что в зоне перегиба графика функции коэффициента трансформации наблюдается расхождение значений данных функций. Однако в связи с тем, что на рассматриваемом участке  $\frac{d}{\lambda} \in (0.1575; 0.5]$

коэффициент детерминации  $> 0.99$ , будем считать точность нормативной методики достаточной для практических целей, и в дальнейшем будем использовать выражение для определения коэффициента трансформации согласно нормативной методике.

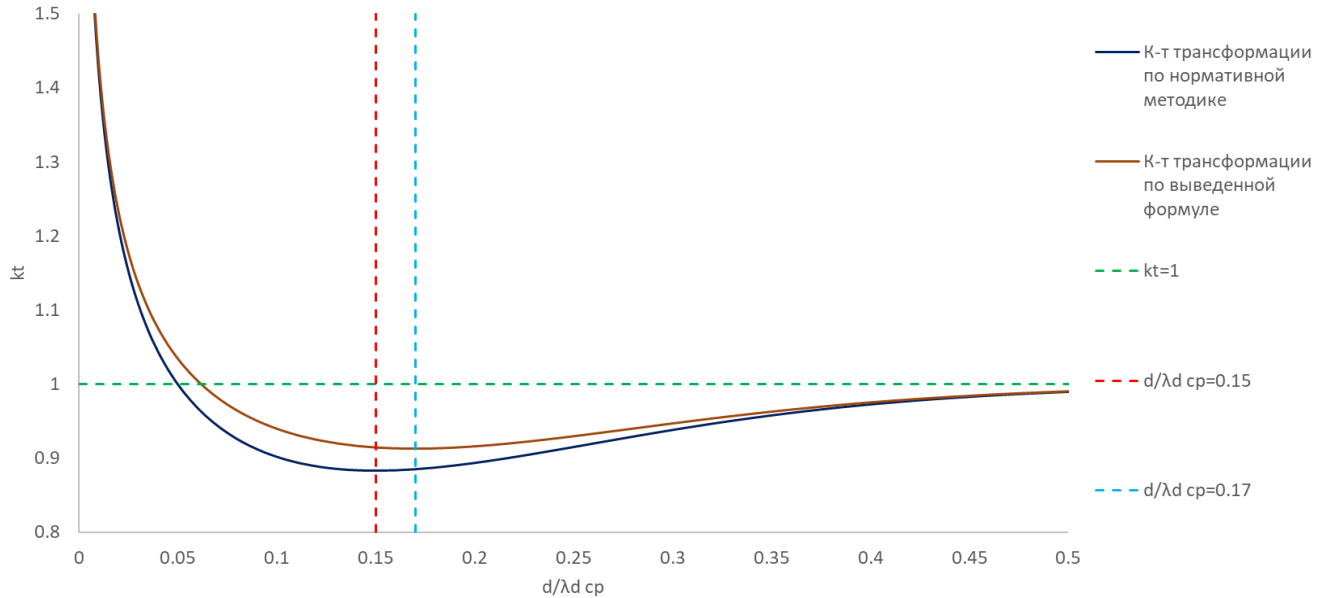


Рисунок 91 – Графики изменения коэффициента трансформации от отношения  $\frac{d}{\lambda_d}$ , построенные на основе нормативной методики и полученного выражения.

Анализ изменения приращения длины волны в мелководной зоне при фиксированном шаге изменения волны равном 0.01 метра, позволил получить зависимость изменения параметра от отношения  $\frac{d}{\lambda_d}$  (см. Рисунок 92).

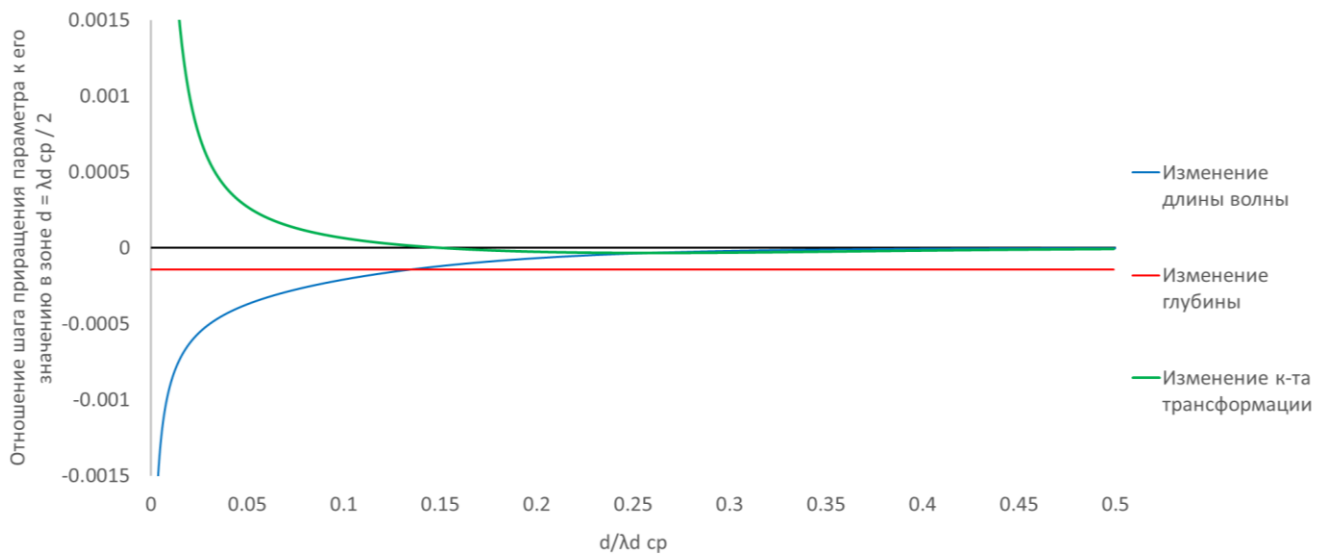


Рисунок 92 – Зависимость увеличения шага приращения длины волны, глубины и коэффициента трансформации от отношения  $\frac{d}{\lambda_d}$ .

Таким образом, прослеживается зависимость изменения коэффициента трансформации от отношения  $\frac{d}{\lambda_d}$ , при  $\frac{d}{\lambda_d} > \approx 0.15$  высота волны уменьшается, а при  $\frac{d}{\lambda_d} < \approx 0.15$  – увеличивается. Произведём оценку влияния изменения уровня режима акватории на величину трансформации высоты волны в мелководной зоне (коэффициента трансформации) при изменениях уровня моря от 0 (проектная глубина –  $d_{пр}$ ) до 2 (прогнозная, перспективная глубина –  $d_{персп}$ ) метров с шагом 0.5 метра (см. Рисунок 93). Поскольку анализ границ рассматриваемой мелководной зоны позволил определить, что даже для самого пологого дна в соответствии с нормативной методикой значение нижней огибающей кривых зависимости  $\bar{h}_d$  от  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  при  $\bar{h}_d = 0$  будет  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d} \approx 0.1575$ , и при  $0.5 > \frac{d}{\lambda_d} > \approx 0.15$  происходит уменьшение высоты волны, то для рассматриваемой зоны всегда будет наблюдаться снижение высоты волны, за счёт  $k_t < 1$ . Рассмотрим данный участок подробнее (см. Рисунок 94).

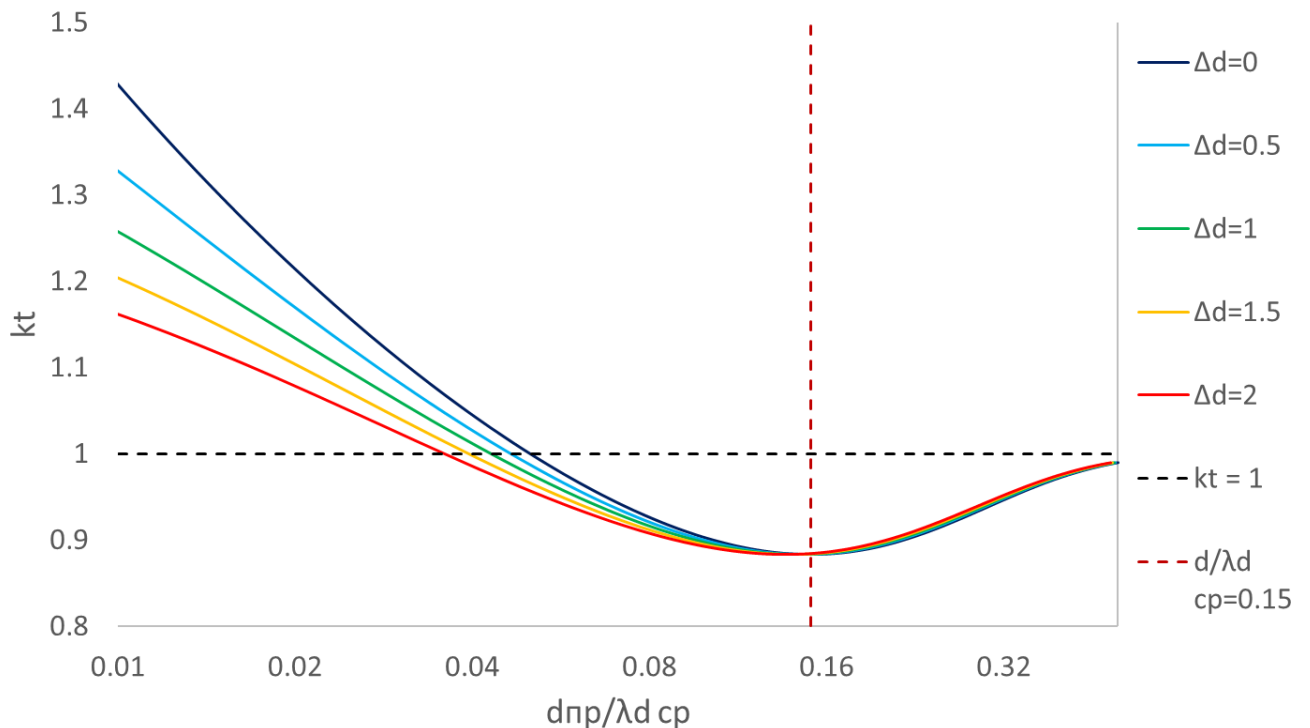


Рисунок 93 – Изменение кривой зависимости коэффициента трансформации от отношения  $\frac{d_{пр}}{\lambda_d}$  при повышении уровня моря для заданной рассматриваемой точки.

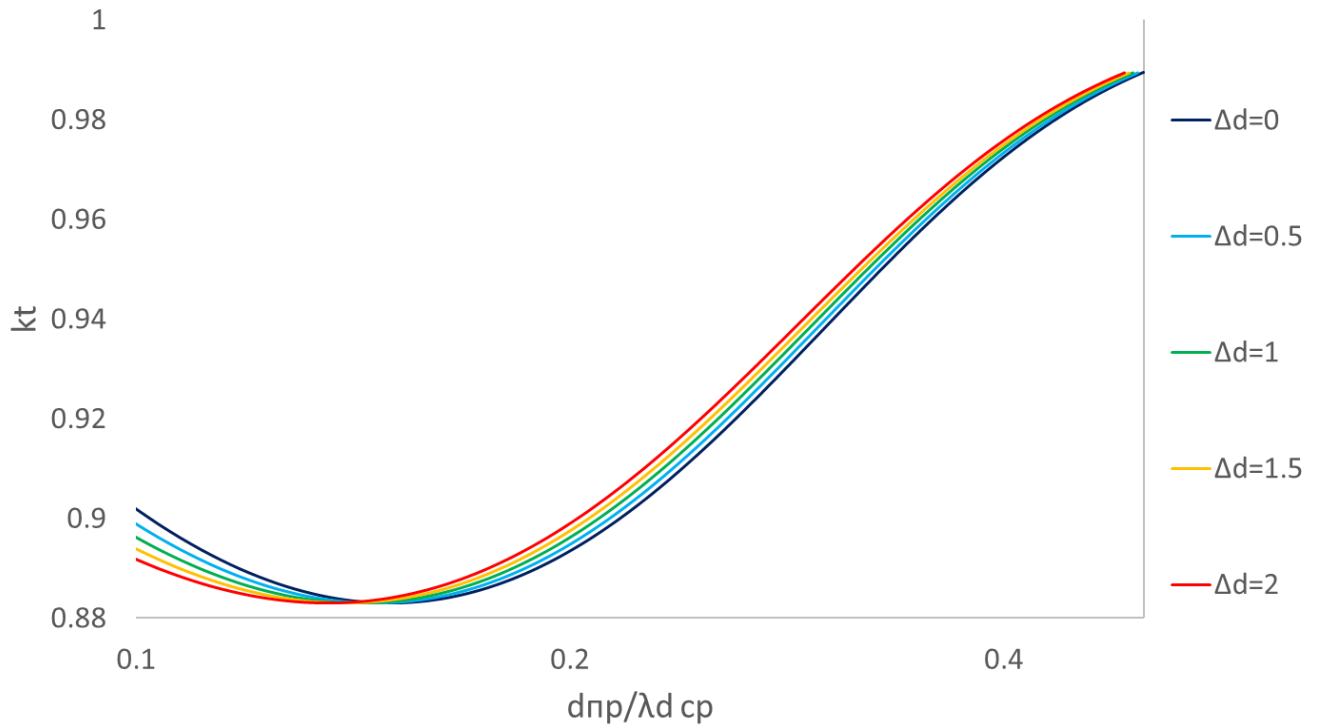


Рисунок 94 – Изменение кривой зависимости коэффициента трансформации от отношения  $\frac{d_{пр}}{\lambda d}$  при повышении уровня моря для заданной рассматриваемой точки в диапазоне  $\frac{d_{пр}}{\lambda d} \in [0.1; 0.5]$ .

Результаты расчётов, приведённые на Рисунок 94, позволяют сделать вывод о наличии положительной корреляции между величиной коэффициента трансформации волн в мелководной зоне и повышением уровня режима акватории. Данный результат объясняется с физической точки зрения тем, что смещение створа начала трансформации ближе к рассматриваемому сечению приводит к более позднему началу трансформации волн, выражающейся в уменьшении высоты волны на участке  $\frac{d_{пр}}{\lambda d} \in (0.15; 0.5]$ , и меньшему влиянию дна на частицы взволнованной поверхности жидкости.

Теперь необходимо провести количественную оценку изменения коэффициента трансформации при повышении уровня режима акватории относительно базового периода, т.е. периода получения гидрометеорологических данных об уровне режима акватории (см. Рисунок 95).

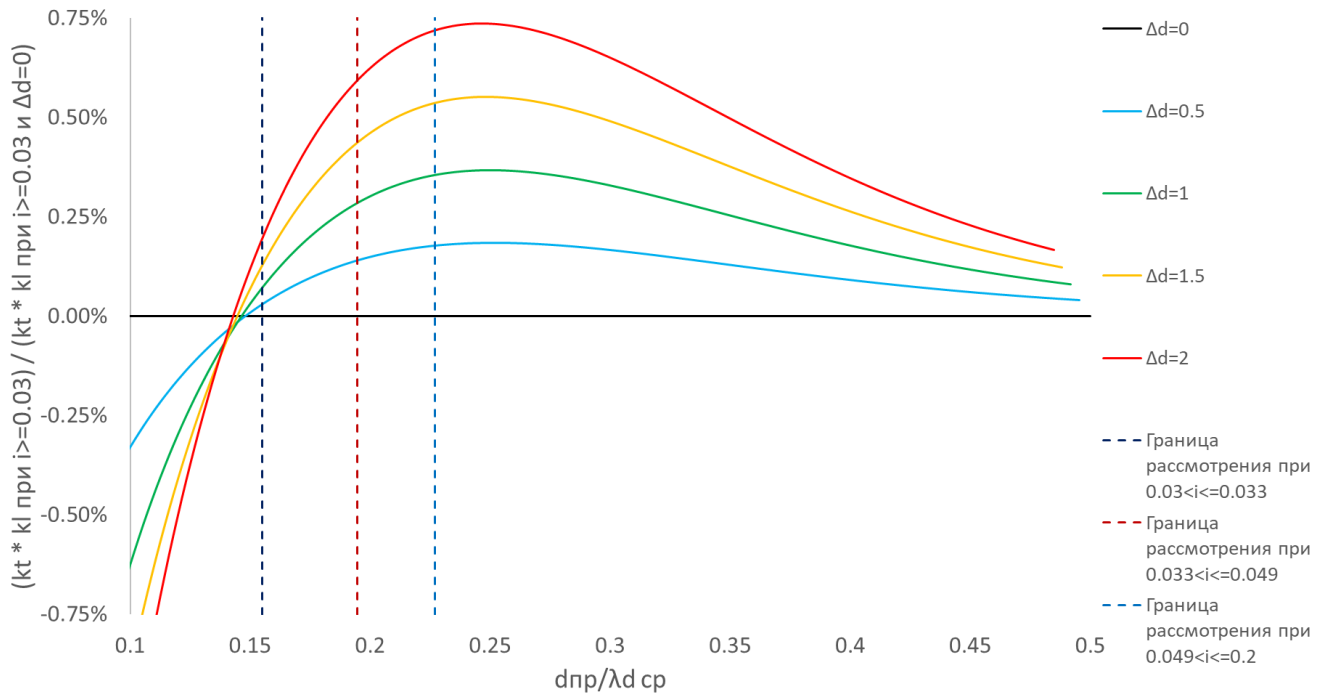


Рисунок 95 – Изменение кривой зависимости произведения обобщённого к-та потерь и к-та трансформации от отношения  $\frac{d_{пр}}{\lambda_d}$  при повышении уровня моря для заданной рассматриваемой точки в диапазоне  $\frac{d_{пр}}{\lambda_d} \in [0.1; 0.5]$  и  $i \geq 0.03$ .

Получим следующие значения изменения коэффициента трансформации при повышении уровня режима акватории (см. Таблица 9).

Таблица 9 - Изменение коэффициента трансформации при повышении уровня режима акватории

$\Delta d$ , м	0.0	0.5	1.0	1.25	1.5	2.0
$\frac{k_{t.прогнозный}}{k_{t.проектный}} - 1$ , %	0.00	0.18	0.37	0.46	0.55	0.74

### 3.2.4. Трансформация волн при уклоне дна менее 0.03

При определении трансформации волн при уклоне дна менее 0.03 требуется оценка совокупного изменения коэффициента трансформации и обобщённого коэффициента потерь. Таблица 10 показывает определение значения обобщённого коэффициента потерь [т.4.1, 274].

Таблица 10 - Определение значения обобщённого коэффициента потерь при различных уклонах дна и отношениях  $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$  [Т.4.1, 274].

Относительная глубина $\frac{d_{cr}}{\lambda_d}$	Значения коэффициента $k_1$ при уклонах дна $i$	
	0.025	0.02...0.002
0.01	0.82	0.66
0.02	0.85	0.72
0.03	0.87	0.76
0.04	0.89	0.78
0.06	0.90	0.81
0.08	0.92	0.84
0.1	0.93	0.86
0.2	0.96	0.92
0.3	0.98	0.95
0.4	0.99	0.98
0.5 и более	1.00	1.00

Используя данные Таблица 10 были получены зависимости изменения обобщённого коэффициента потерь при различных повышениях уровня акватории: для  $i \leq 0.02$  и для  $i \leq 0.025$  (см. Рисунок 96 и Рисунок 97 соответственно).

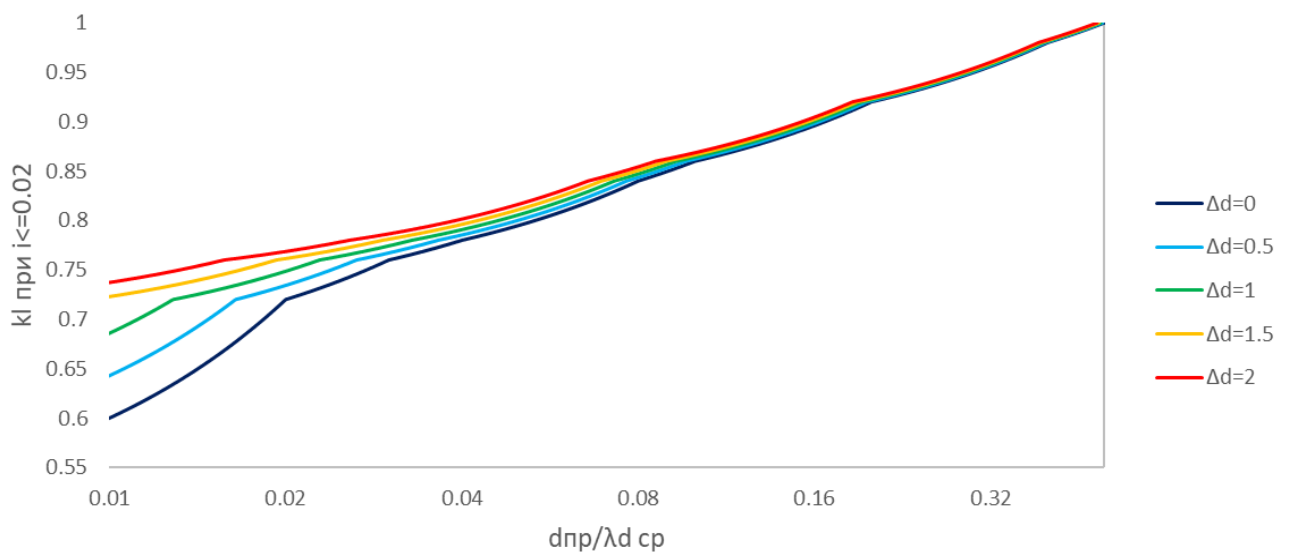


Рисунок 96 – Кривые зависимости обобщённого коэффициента потерь от отношения  $\frac{d_{пр}}{\lambda_d}$  в условиях повышении уровня моря при  $i \leq 0.02$ .

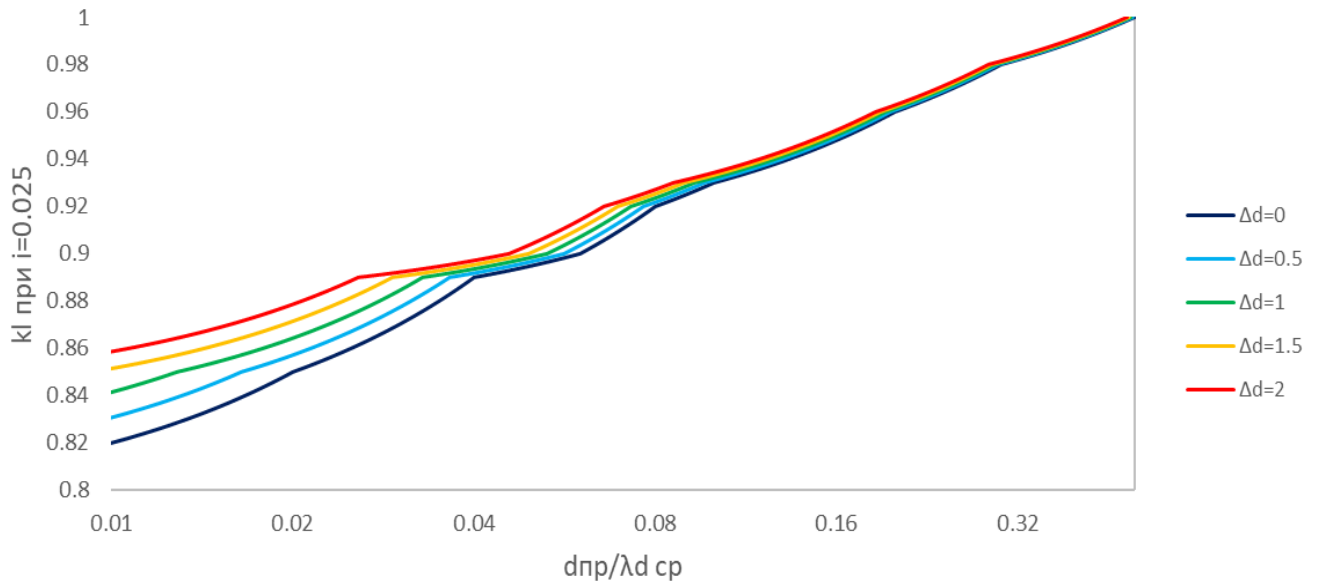


Рисунок 97 – Изменение кривой зависимости обобщённого коэффициента потерь от отношения  $\frac{d_{np}}{\lambda_d}$  в условиях повышения уровня моря при  $i = 0.025$ .

Результаты проведённой количественной оценки изменения обобщённого коэффициента потерь при повышении уровня моря относительно базового периода, т.е. периода получения гидрометеорологических данных об уровне моря акватории для  $i \leq 0.02$  и для  $i = 0.025$  представлена на (см. Рисунок 98 и Рисунок 99 соответственно).

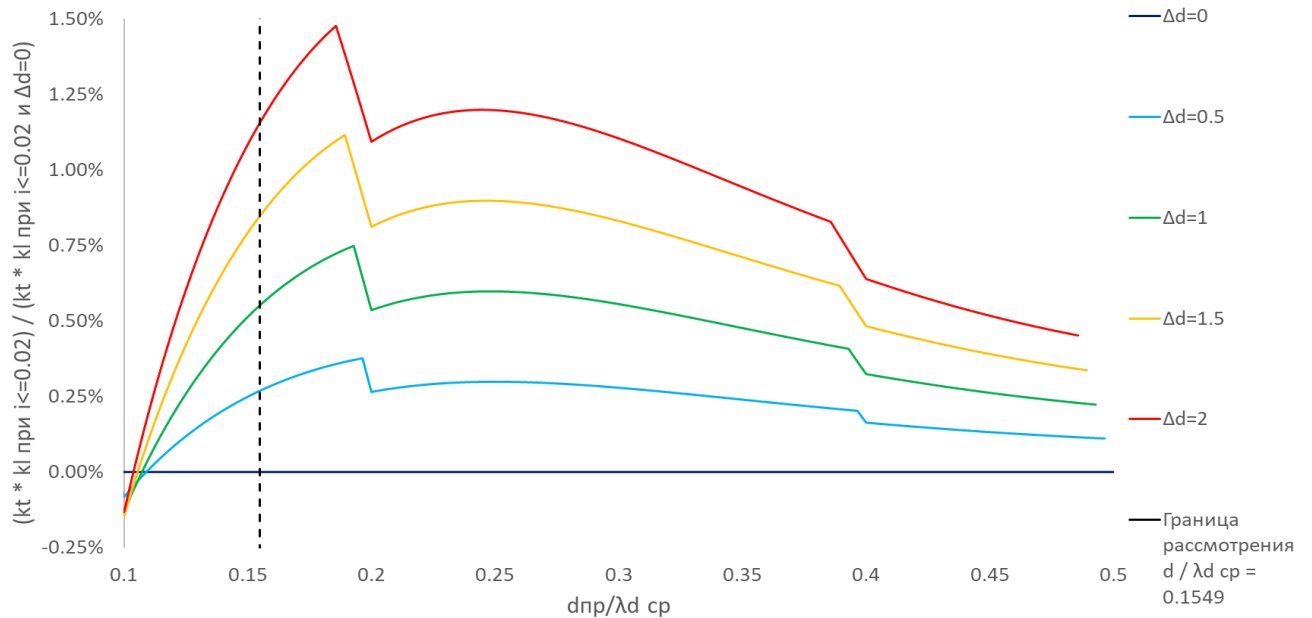


Рисунок 98 – Изменение кривой зависимости произведения обобщённого к-та потерь и к-та трансформации от отношения  $\frac{d_{np}}{\lambda_d}$  при повышении уровня моря для заданной рассматриваемой точки в диапазоне  $\frac{d_{np}}{\lambda_d} \in [0.1; 0.5]$  и  $i \leq 0.02$ .



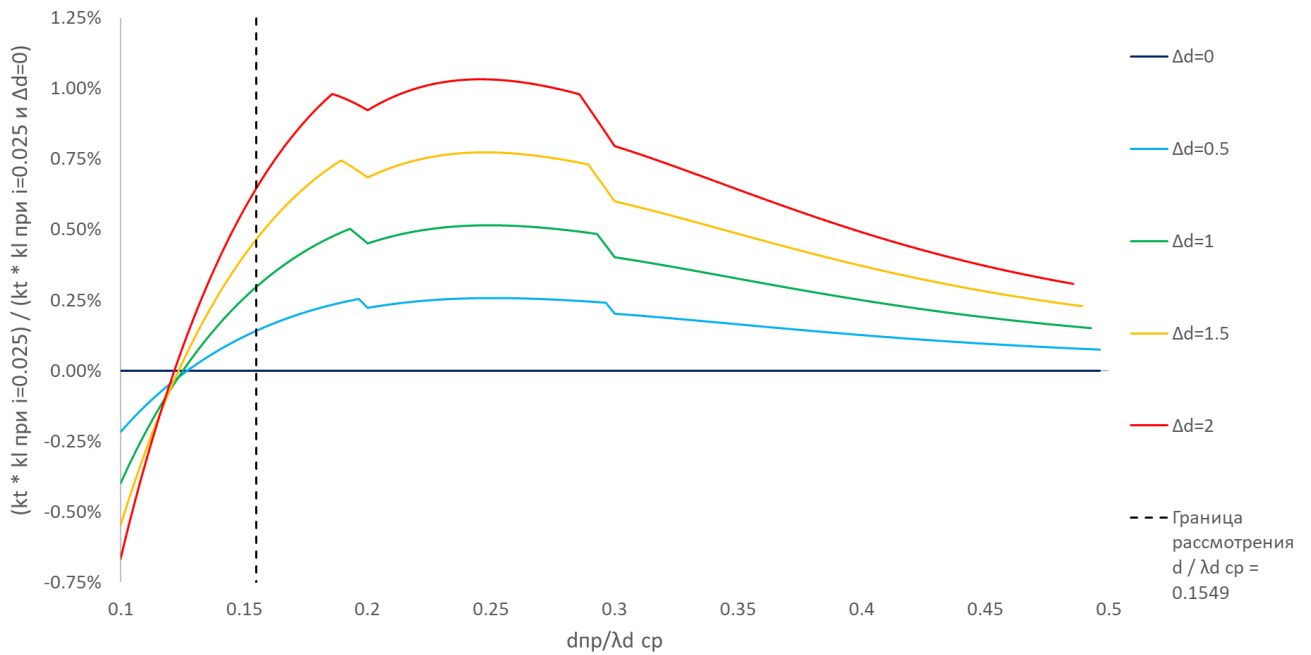


Рисунок 99 – Изменение кривой зависимости обобщённого к-та потерь и к-та трансформации от отношения  $\frac{d_{пр}}{\lambda_d}$  при повышении уровня моря для заданной рассматриваемой точки в диапазоне  $\frac{d_{пр}}{\lambda_d} \in [0.1; 0.5]$  и  $i = 0.025$ .

Получим следующие значения изменения коэффициента трансформации при повышении уровня режима акватории (см. Таблица 11).

Таблица 11 - Изменение коэффициента трансформации при повышении уровня режима акватории.

$\Delta d$ , м	0.0	0.5	1.0	1.25	1.5	2.0
$i \leq 0.02$						
$\frac{k_{t.прогнозный} \cdot k_{l.прогнозный}}{k_{t.проектный} \cdot k_{l.проектный}} - 1, \%$	0.00	0.38	0.75	0.93	1.11	1.48
$i = 0.025$						
$\frac{k_{t.прогнозный} \cdot k_{l.прогнозный}}{k_{t.проектный} \cdot k_{l.проектный}} - 1, \%$	0.00	0.26	0.52	0.64	0.77	1.03

### 3.2.5. Совокупное изменение высоты волны при трансформации и рефракции волн

В условиях не горизонтального профиля береговой линии и/или значения угла между лучом волны и береговой линией, отличного от  $90^\circ$ , возникает явление рефракции волн в мелководной зоне. Для определения значения коэффициента

рефракции необходимо построить план рефракции волн для рассматриваемого участка. Для этого задаются параметром « $a_d$ » – расстоянием между смежными волновыми лучами в глубоководной зоне. Значение параметра « $a_d$ » определяется между рассматриваемыми лучами в зоне  $d = \frac{\bar{\lambda}_d}{2}$ , т.е. на границе перехода от глубоководной к мелкоководной зоне.

В дальнейшем, используя план глубин рассматриваемого участка, выполняется построение средних линий между имеющимися изобатами глубин. Далее в соответствии с [рис.А.6, 276] по участкам от одной средней линии до другой получают направление распространения волны (поворота волновой линии). Таким образом, волновая линия будет стремиться, начиная с глубины  $d = \frac{\bar{\lambda}_d}{2}$ , поменять направление своего движения так, чтобы подходить перпендикулярно к линии берега (см. Рисунок 100 [276]).

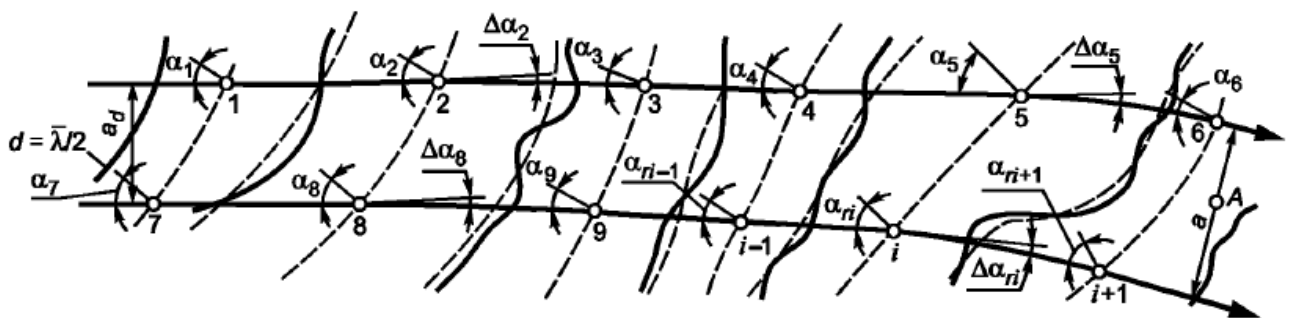


Рисунок 100 – Схема для построения плана рефракции [276].

Благодаря построенному плану рефракции можно определить в каждой точке акватории высоты волн и глубины. При этом построенный план рефракции позволяет в заданной точке определить расстояние между волновыми линиями мелкоководной зоны – « $a$ ». Отношение расстояния между волновыми линиями в заданной точке и в глубоководной зоне позволяет получить коэффициент рефракции по формуле (40) [274, 276]:

$$k_r = \sqrt{\frac{a_d}{a}} \quad (40)$$

В зоне выступа берега (мыс) волны будут концентрироваться и  $k_r > 1$ , а в зоне углубления берега (бухты)  $k_r < 1$ , предельным случаем является абсолютно прямой берег и дно с постоянным уклоном по всей своей протяженности, в таком

случае  $k_r = 1$ . Данное явление хорошо проиллюстрировано в [92] (Рисунок 101 [92]). В связи с тем, что проектирование портов в Арктическом и Дальневосточном регионах часто связано с расположением акватории в заливах и лиманах, то достаточно распространённым является случай  $k_r < 1$ .

Как уже было показано ранее, повышение уровня моря приводит к изменению створа начала трансформации и рефракции волн, т.е. к изменению положения начала мелководной зоны. По мере повышения уровня акватории, происходит смещение границы мелководной зоны к проектному положению береговой линии. При приближении створа начала трансформации волн к проектной береговой линии рассматриваемый участок сооружения окажется ближе к створу начала трансформации, а значит  $a \rightarrow a_d$ , следовательно,  $k_r \rightarrow 1$ .

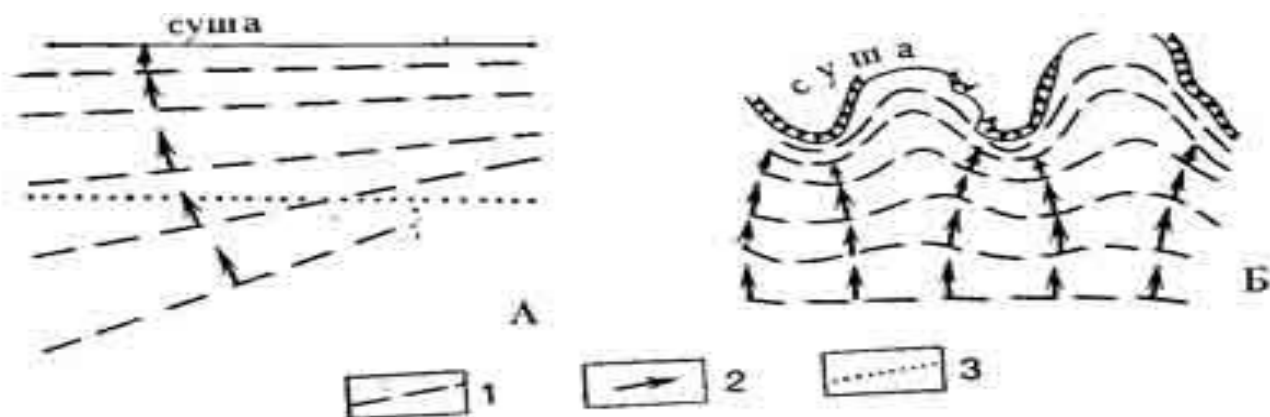


Рисунок 101 – Схема рефракции волн у ровного (А) и бухтового (Б) берегов (по В.П. Зенковичу): 1 – фронты волн; 2 – лучи волн; 3 – основание подводного склона [92].

Поскольку рефракция волн в мелководной зоне наиболее зависит от батиметрии дна и очертаний береговой линии, и в меньшей степени от глубины акватории, то оценка изменения коэффициента рефракции является очень индивидуальной для каждого конкретного участка строительства. В связи с этим в данной работе изменение коэффициента рефракции не будет оценено количественно точно. Однако в общем случае можно сделать следующий вывод: при повышении уровня режима акватории наблюдается смещение створа начала трансформации и рефракции волн к заданному участку ПГТС, расположенному в мелководной зоне, в связи с чем:

- При расположении в мелководной зоне в условиях  $k_r > 1$  будет наблюдаться уменьшение коэффициента рефракции;

- При расположении в мелководной зоне в условиях  $k_r < 1$  будет наблюдаться увеличение коэффициента рефракции;

- При расположении в глубоководной зоне или нормальном подходе фронта волн к сооружению в мелководной зоне, при котором  $k_r = 1$ , коэффициент рефракции останется неизменным.

Таким образом, совокупное изменение высот волн может оказаться различным в зависимости от условий конкретного района строительства, и может быть разделено на несколько случаев, представленных в Таблица 12. Трансформация волн, которая в нормативной методике учитывается с помощью произведения коэффициента трансформации и коэффициента потерь (каждый из которых увеличивается при смещении створа мелководья), и рефракция волн, которая, в свою очередь, учитывается с помощью коэффициента рефракции (который может изменяться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения), происходят одновременно в реальных условиях воздействия волн.

В данной работе выполнена оценка влияния повышения уровня режима акватории на трансформацию высоты волны в мелководной зоне и укрупнённо может быть описана следующим образом:

а) Для сооружений в глубоководной зоне – высота волн не изменятся;

б) Для сооружений в мелководной зоне при  $k_r \geq 1$  – высота волн увеличится;

в) Для сооружений в мелководной зоне при  $k_r < 1$ :

1) При  $(k_l + \Delta k_l) \cdot (k_t + \Delta k_t) \cdot (k_r + \Delta k_r) / k_l \cdot k_t \cdot k_r > 1$  – высота волн

увеличится;

2) При  $(k_l + \Delta k_l) \cdot (k_t + \Delta k_t) \cdot (k_r + \Delta k_r) / k_l \cdot k_t \cdot k_r = 1$  – высота волн

останется неизменной;

3) При  $(k_l + \Delta k_l) \cdot (k_t + \Delta k_t) \cdot (k_r + \Delta k_r) / k_l \cdot k_t \cdot k_r < 1$  – высота волн

уменьшится.

Таблица 12 - Качественная оценка совокупного влияния повышения уровня режима акватории на изменение параметров волн.

Расположение сооружений	Уклон дна	К-т трансформации – $k_t$	К-т рефракции – $k_r$	К-т потерь – $k_l$	Совокупное изменение высоты волн
В глубоководной зоне	Не оказывает влияния	Без изменений	Без изменений	Без изменений	Не окажет влияния
В мелководной зоне при нормальном подходе фронта волн к сооружению, при котором $k_r=1$	$i \geq 0.03$	Увеличится	Без изменений	Без изменений	Увеличится
	$i < 0.03$	Увеличится	Без изменений	Увеличится	
В мелководной зоне при $k_r < 1$ (в бухте)	$i \geq 0.03$	Увеличится	Увеличится	Без изменений	Увеличится
	$0.03 > i > 0.02$	Увеличится	Увеличится	Увеличится	
	$0.02 \geq i$	Увеличится	Увеличится	Увеличится	
В мелководной зоне при $k_r > 1$ (в области мыса)	$i \geq 0.03$	Увеличится	Уменьшится	Без изменений	Три варианта*
	$0.03 > i > 0.02$	Увеличится	Уменьшится	Увеличится	
	$0.02 \geq i$	Увеличится	Уменьшится	Увеличится	

\*Возможно увеличение, уменьшение и отсутствие изменений.

Таким образом, для мелководных участков в условиях прямолинейного или вогнутого очертания береговой линии ( $k_r \geq 1$ ) произойдёт увеличение высот в мелководной зоне, т.е. в зоне восприятия стоячих и разбивающихся волн, представляющих наиболее значимые формы волн, оказывающих наибольшую волновую нагрузку на ПГТС. Для участков выпуклых форм рельефа береговой линии ( $k_r < 1$ ), в которых происходит концентрация волновых лучей, влияние роста высоты волны вследствие изменения коэффициентов трансформации и потерь ( $k_t \cdot k_l$ ) может как усиливаться ростом коэффициента рефракции  $k_r$  или его не изменением, так и наоборот - нивелироваться снижением  $k_r$ .

### 3.3. Обобщённая оценка изменения высот волн при трансформации в условиях повышения уровня режима акватории

Результаты, приведённые в предыдущих разделах, призваны показать качественно общий механизм изменения параметров волнения в мелководной зоне при трансформации волны и, количественно на частном случае, однако для наиболее полной оценки требуется рассмотреть всё многообразие расчётных случаев.

Для этой цели использовалась авторская программа для ЭВМ (см. Приложение А), позволившая рассмотреть всё многообразие вариантов условий трансформации волн в мелководной зоне в соответствии с нормативной методикой при повышении уровня режима акватории. Задавались следующие параметры моделирования:

- а) Повышение уровня режима акватории от 25 до 200 см с шагом 25 см;
- б) Были рассмотрены такие глубины, чтобы  $\frac{d}{\lambda_d}$  изменялся от 0.0001 до 0.5 с шагом 0.0001, при этом для оценки результатов учитывались только значения совокупного изменения коэффициентов потерь и трансформации при  $d \geq d_{cr}$  и  $\frac{d + \Delta d_{\text{перспективное}}}{\lambda_d} \leq 0.5$ ;
- в) Уклон дна:
  - 1)  $i \in [0.002; 0.02]$  с наибольшими совокупными потерями и наименьшей критической глубиной;
  - 2)  $i = 0.025$ , позволяющее рассмотреть и  $i \in (0.02; 0.025) \cup (0.025; 0.03)$  со «средними» совокупными потерями и наименьшей критической глубиной;
  - 3)  $i \in [0.03; 0.033]$  с условными отсутствием потерь и наименьшей критической глубиной;
  - 4)  $i \in (0.033; 0.049]$  с условными отсутствием потерь и «средней» критической глубиной;
  - 5)  $i \in (0.049; 0.2]$  с условными отсутствием потерь и наибольшей критической глубиной;

г) Скорость ветра и длина разгона, аналогично п.3.2.2.

При расчётах критической глубины по нормативной методике в условиях постоянного уклона дна, был получен следующий характер изменения критической глубины (на примере рассмотренного в прошлом разделе случая) (см. Рисунок 102).

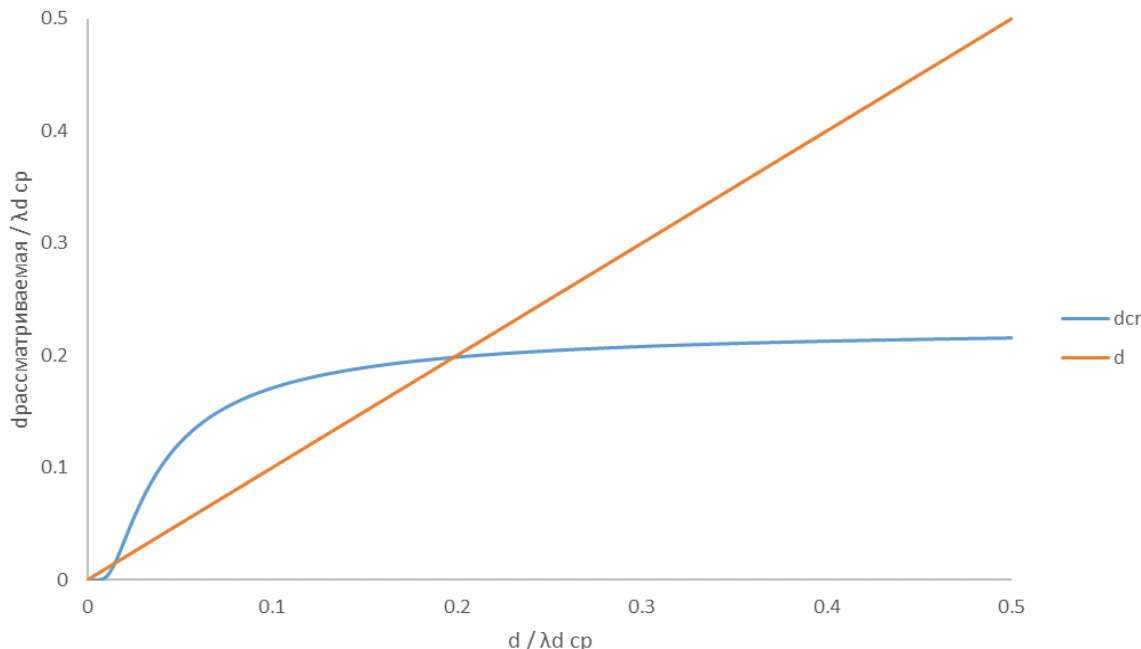


Рисунок 102 – График для определения глубины первого обрушения волн по нормативной методике.

В данном разделе рассматривается только мелководная зона, т.е.  $d_{cr} < d \leq \frac{\overline{\lambda_d}}{2}$ . В случае достижения значения  $d = d_{cr}$ , волна считается обрушившейся, а мелководная зона сменяется зоной прибойной. Анализ только максимальных значений изменения высоты волны на участке  $d \geq d_{cr}$ , позволяет рассматривать для заданной длины разгона волн, скорости ветра и уклона дна вместо 5000 значений только одно, благодаря чему анализ многообразия вариантов становится реализуемым, и для заданного уклона дна рассматривается не 54.5 млн значений, а лишь 10900. Описанные выше варианты были подробно изучены, и на основе полученных данных построены номограммы, позволяющие определить максимальный рост высоты волны для заданной скорости ветра и высоты волн в глубоководной зоне [Приложение Б].

Выявлены устойчивые зависимости величины изменения высоты волн от исходных характеристик, заданных при моделировании волнения:

- Относительное изменение высоты расчётной волны тем больше, чем ближе располагается сооружение к глубине первого обрушения волн;

- Относительное изменение высоты расчётной волны тем больше, чем меньше скорость ветра;

- Относительное изменение высоты расчётной волны тем больше, чем меньше уклон дна (имеется ввиду переход от одной группы уклонов дна к другой, в рамках одной группы уклонов дна, например при  $i < 0.02$  такой зависимости наблюдаться не будет);

- Относительное изменение высоты расчётной волны тем больше, чем меньше расчётная высота волн в глубоководной зоне.

Таким образом, максимальное относительное изменение высоты волн составило от  $\approx 0.7$  до  $\approx 24.0\%$  при максимальном рассматриваемом повышении уровня моря в 2 метра и от  $\approx 0.11$  до  $\approx 10.0\%$  для минимального рассматриваемого повышения уровня моря в 0.25 м. Само по себе значение максимального возможного изменения уровня моря не даёт представления о конкретном расчётном случае, а позволяет лишь оценить порядок значений. Так, для каждого конкретного случая требуется производить расчёты, описанные в предыдущем разделе, с целью определения величины роста высоты волны для конкретной глубины расположения рассматриваемой точки сооружения.

Как уже было ранее показано, существует неоднородность в полученных результатах и в существенно большем изменении высоты расчётной волны небольшой высоты. Чтобы оценить характер описанных выше изменений, с помощью авторской программы для ЭВМ [146, прил.3] были проанализированы данные для группы уклонов при росте уровня моря на максимальное рассматриваемое значение 2 метра. Для одного конкретно взятого уклона дна при  $d \geq d_{cr}$  и заданной величине прогнозного изменения уровня режима акватории было получено 10900 рассматриваемых точек, по которым были построены графики зависимости максимального относительного изменения высоты расчётной волны от её значения при  $0.001 < i \leq 0.2$  (см. Рисунок 103 - Рисунок 107 соответственно).



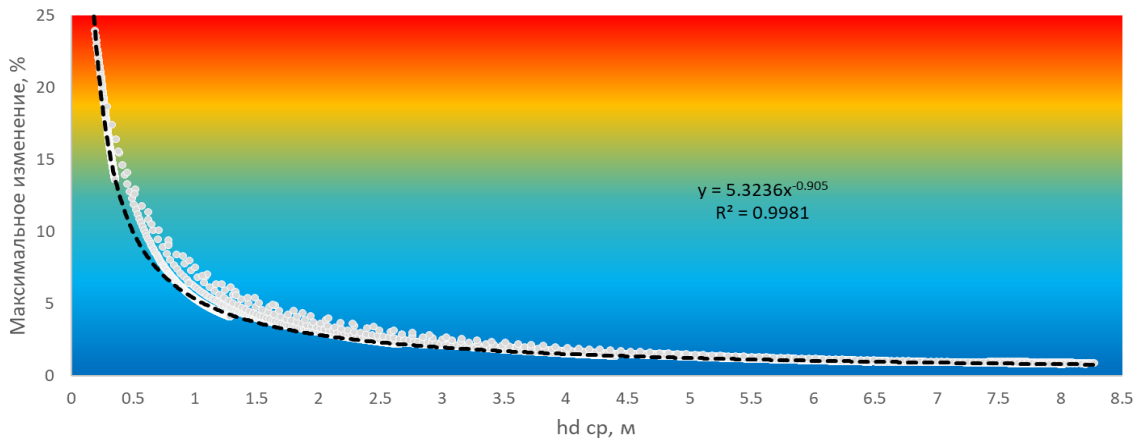


Рисунок 103 – График зависимости максимального относительного изменения высоты волны при трансформации в мелководной зоне от  $\overline{h_d}$  при  $i \leq 0.02$  и  $\Delta d = 2.0$  м.

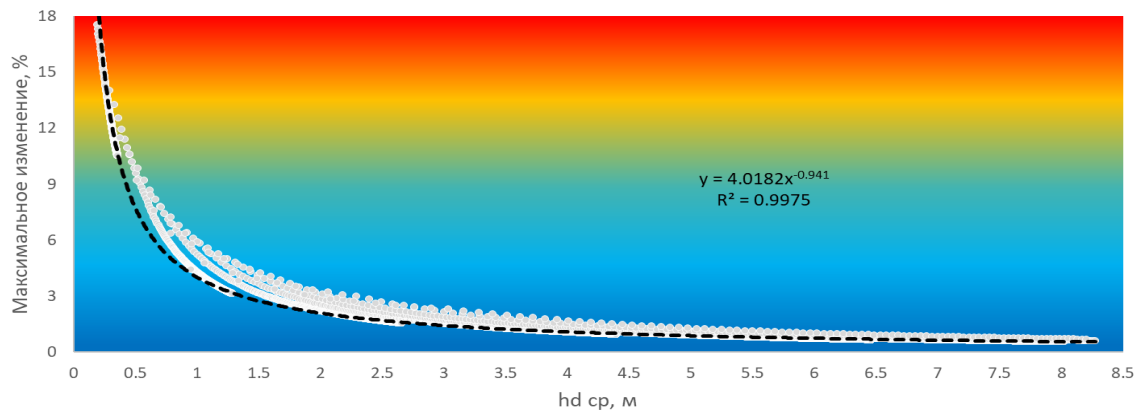


Рисунок 104 – График зависимости максимального относительного изменения высоты волны при трансформации в мелководной зоне от  $\overline{h_d}$  при  $i = 0.025$  и  $\Delta d = 2.0$  м.

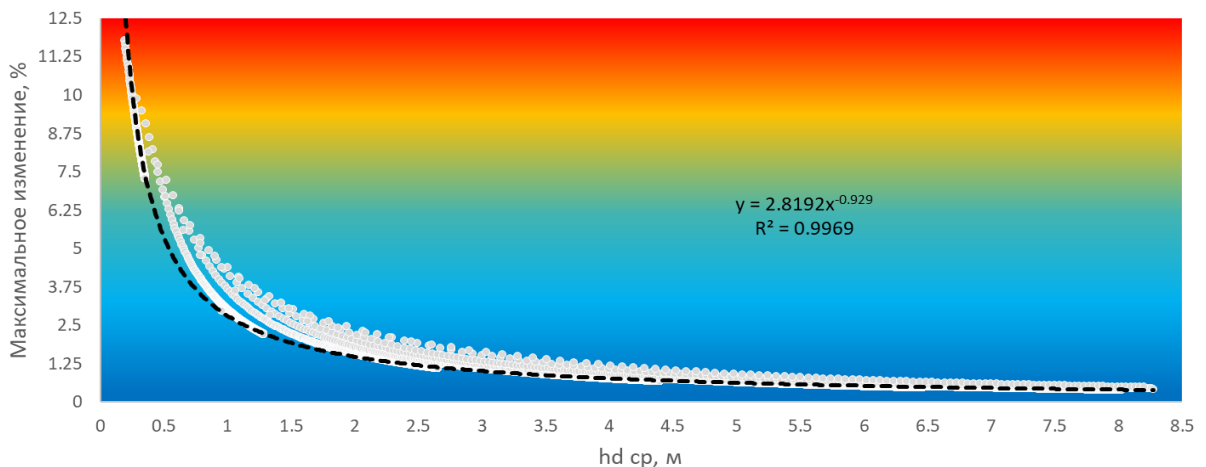


Рисунок 105 – График зависимости максимального относительного изменения высоты волны при трансформации в мелководной зоне от  $\overline{h_d}$  при  $i \in [0.03; 0.033]$  и  $\Delta d = 2.0$  м.

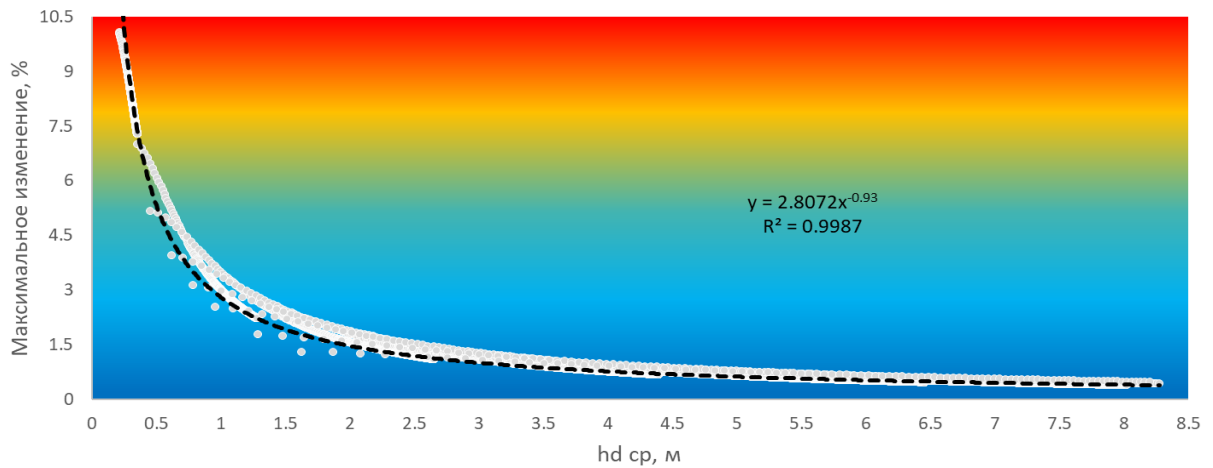


Рисунок 106 – График зависимости максимального относительного изменения высоты волны при трансформации в мелководной зоне от  $\overline{h_d}$  при  $i \in (0.033; 0.049]$  и  $\Delta d = 2.0$  м.

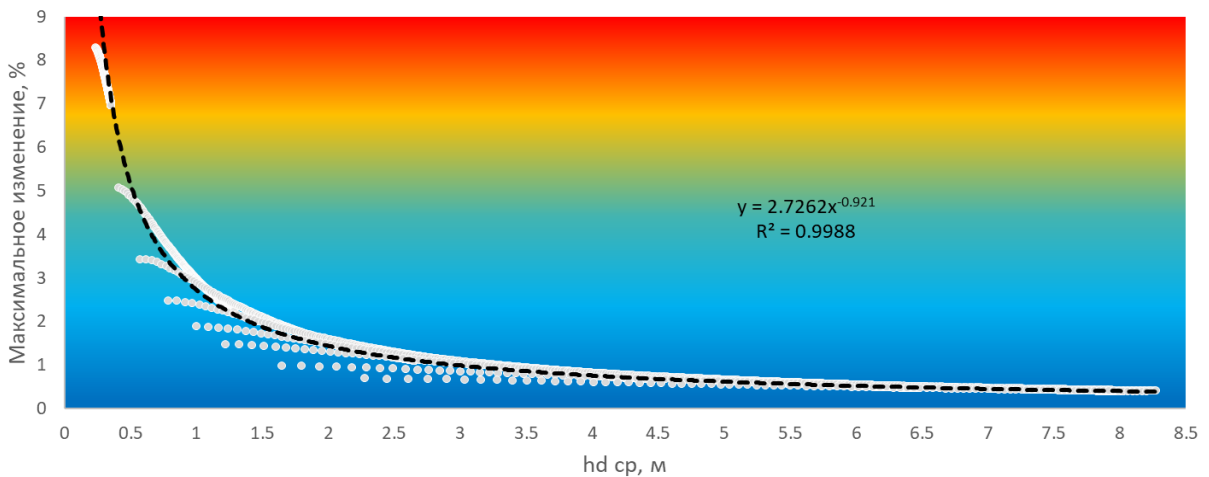


Рисунок 107 – График зависимости максимального относительного изменения высоты волны при трансформации в мелководной зоне от  $\overline{h_d}$  при  $i \in (0.049; 0.2]$  и  $\Delta d = 2.0$  м.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что относительное изменение высоты трансформируемой волны в мелководной зоне при повышении уровня режима акватории для различных высот волн на глубокой воде хорошо описывается степенной функцией вида (41):

$$y = \frac{a}{x^b} \quad (41)$$

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  $V_w \in [5; 50]$ ).

При этом степенная функция (см. формулу (41)) достоверно описывает ( $R^2 > 0.99$ ) распределение множества точек для  $V_w \in [5; 50]$ , однако при рассмотрении конкретного значения  $V_w$ , степенной закон изменения хорошо описывает получаемые значения только при малых уклонах дна и скоростях ветра, а с ростом уклона дна и/или скорости ветра кривая зависимости выполаживается до практически прямолинейной функции. При наибольшем рассматриваемом уклоне дна и скорости ветра  $V_w=50$  м/с график становится практически горизонтальной прямой, а с уменьшением скорости ветра начинает в области малых высот волн стремиться к вертикальной прямой, создавая описанную выше функцию степенного типа.

#### 3.4. Изменение величины волновой нагрузки на ПГТС при учёте прогнозного повышения уровня моря

При рассмотрении задачи определения волновой нагрузки на ПГТС воспользуемся методикой, представленной в СП 38.13330. В соответствии с данной методикой для построения эпюры волнового давления на вертикальную стену требуется получить значения в пяти точках, каждое из которых определяется как произведение гидростатического давления воды ( $\rho gh$ ) на коэффициент  $k_i$ , определяемый по номограммам и зависящий от отношения  $\frac{\bar{\lambda}_s}{d}$  и  $\frac{h_i}{\bar{\lambda}_s}$ .

Далее рассмотрен пример с использованием следующих данных: волнообразование осуществляется при длине разгона волн 200 км, времени расчётного шторма 2 ч. и скорости ветра 25 м/с, глубине рассматриваемого створа 15 метров, постоянном уклоне дна  $i=0.025$ , тогда:

- На момент строительства:

$\bar{h}_d \approx 2.565$  м,  $\bar{T} \approx 6.673$  с,  $\bar{\lambda}_d \approx 69.522$  м,  $\bar{\lambda}_s \approx 65.046$  м,  $d_{cr\ d=15\text{м}} \approx 13.931$  м,  $k_i \approx 2.140$ ,  $k_t \approx 0.900$ ,  $k_l \approx 0.960$ ,  $k_r = 1$  и получим  $h_{i,\%} = 4.739$  м;

- На момент рассматриваемого перспективного роста уровня моря:

$\overline{h_d} \approx 2.565$  м,  $\overline{T} \approx 6.673$  с,  $\overline{\lambda_d} \approx 69.522$  м,  $\overline{\lambda_s} \approx 66.375$  м,  $d_{cr\ d=17\text{м}} \approx 14.145$  м,  $k_i \approx 2.172$ ,  $k_t \approx 0.912$ ,  $k_l \approx 0.961$ ,  $k_r = 1$  и получим  $h_{i,\% \text{перспективное}} = 4.884$  м.

Таким образом, для рассматриваемого перспективного роста уровня моря относительно момента строительства, рост высоты волны составил 3.05%. С помощью номограмм были построены и сопоставлены эпюры волнового давления для обоих случаев [прил. Г, 276] (см. Рисунок 108). Полученные данные свидетельствуют о том, что при росте уровня моря и неизменных параметрах волнения на глубокой воде  $\frac{\overline{\lambda_d}}{d}$  уменьшается и  $\frac{h_i}{\overline{\lambda_d}}$  растёт, а при такой динамике этих двух параметров волновое давление в заданных точках эпюры будет иметь меньшее значение (см. Таблица 13).

Таблица 13 - Данные для построения эпюр волнового давления.

Номер точки	d		d + Δd	
	Заглубление точек z, м	Значение волнового давления p, кПа	Заглубление точек z, м	Значение волнового давления p, кПа
1	4.82	0.00	6.51	0.00
2	0.00	33.46	2.00	32.63
3	-3.75	21.93	-2.25	20.40
4	-7.50	19.06	-6.50	17.32
5	-15.00	14.75	-15.00	12.70

Полученный характер эпюр показывает, что при росте уровня моря акватории площадь эпюры практически не изменяется, однако следует ожидать смещения центра её тяжести в связи с тем, что форма эпюры, близкая к криволинейной трапеции с малым основанием снизу и двукратно большим основанием сверху, приводит к более высокому расположению центра тяжести. При проведении расчётов установлено, что для рассматриваемого примера площадь эпюры при росте уровня моря акватории увеличилась на 1.51%, при этом центр тяжести стал расположен выше относительно поверхности дна на

12.20% (центр тяжести при  $d=15$  м располагался на 10.139 м от поверхности дна, а при  $d=17$  м на 11.377 м).

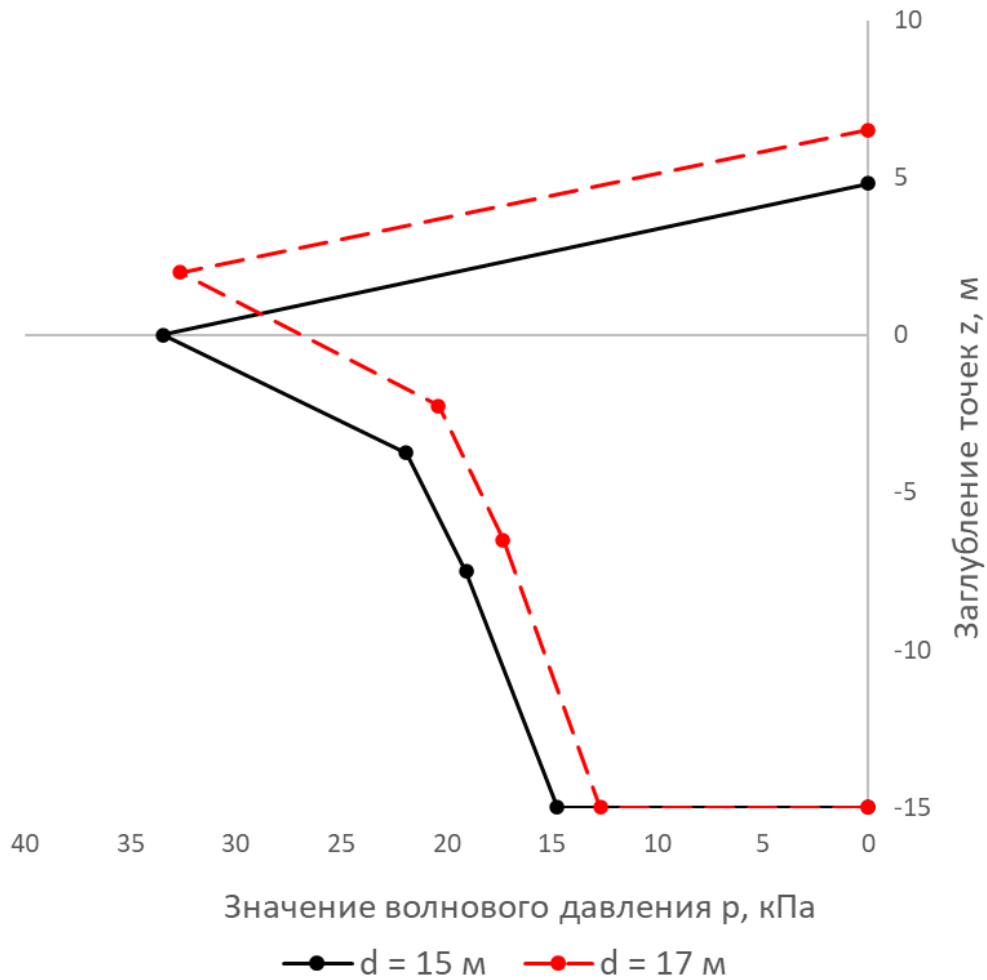


Рисунок 108 – Эюра волнового давления, построенная для начального момента времени, и наложенная на неё эюра волнового давления при росте уровня моря на 2 метра.

По результатам определения величины момента от действия волнового давления установлено, что оно (значение) увеличилось на 13.90%. Таким образом, при расчёте устойчивости и прочности сооружения показан общий принцип изменения эюры волнового давления, которая в своём максимальном значении практически не изменится. Однако повышение уровня режима акватории имеет негативный эффект, выражающийся в снижении устойчивости сооружения на опрокидывание и сдвиг, а также в повышении нормальных контактных напряжений из-за увеличения значения величины момента от действия волнового давления, вызванного, в свою очередь, смещением точки приложения нагрузки от дна (центра тяжести эюры волнового давления).

### 3.5. Выводы по третьей главе

Несмотря на широкое распространение методов математического моделирования, позволяющих достоверно моделировать параметры ветровых волн на глубокой воде и в прибрежной зоне, отсутствие учёта долгосрочных климатических изменений уровня режима может привести к занижению параметров расчётной волны и, как следствие, снизить безопасность и надёжность проектируемого сооружения. В Российском секторе Арктики и Дальнего востока наблюдается и прогнозируется повсеместное повышение уровня режима, которое не учитывается в действующих методиках проектирования ПГТС. Отсутствие учёта долгосрочных климатических изменений увеличивает возможные эксплуатационные риски объекта и потенциально повышает в будущем величину затрат на модернизацию существующих проектных решений собственником объекта [41, 43].

В данной главе были даны качественная и количественная оценки изменениям условий трансформации ветровых волн в мелководной зоне, которые показали, что при любых уклонах дна и параметрах волнения, будет наблюдаться повышение высоты волны при подходе к сооружению относительно высот, определённых по гидрометеорологическим данным на момент проектирования ПГТС.

Количественная оценка показала, что для сооружений I и II классов ответственности с расчётным сроком эксплуатации 100 лет относительное повышение высот волн у сооружения на момент через 100 лет составит для рассматриваемого примера ( $V_w=25$  м/с,  $L=200$  км и рост уровня моря 1.25 метра) от 0.46% (для уклонов дна  $i \geq 0.03$ ) до 1.93% (при уклоне дна  $i \leq 0.02$ ).

При рассмотрении множества расчётных случаев при  $d > d_{cr}$ ,  $i \in [0.001; 0.2]$ ,  $\Delta d \in [0.25; 2.00]$  и  $V_w \in [5; 50]$  установлено, что максимальное относительное изменение высоты волн составило от  $\approx 0.69\%$  до  $\approx 23.93\%$  при максимальном рассматриваемом повышении уровня моря в 2 метра, и от  $\approx 0.11\%$  до  $\approx 9.97\%$  при минимальном рассматриваемом повышении уровня моря в 0.25 метра. Установлено, что при рассмотрении фиксированного уклона дна и величины

повышения уровня моря, зависимость максимального относительного изменения высоты волн от их значений подчиняется степенному закону.

Получена качественная оценка совместного относительного изменения высот волн при трансформации и рефракции в мелководной зоне, которая показала, что учёт рефракции 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 условии значения коэффициента рефракции волн более 1 на момент проектирования ПГТС (например, выпуклость рельефа береговой линии в области мыса).

Таким образом доказано, что при нормальном подходе волн к прямолинейному или вогнутому (например, вогнутость рельефа береговой линии бухты или лимана) рельефу, относительный 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, а при учёте условий рефракции потенциально может превысить 25%. В связи с уникальностью батиметрии каждой конкретной акватории, в данной работе приводится лишь качественная оценка относительного изменения высоты волны для заданной точки у сооружения при одновременной трансформации и рефракции волн в мелководной зоне.

Разработана методика для оценки относительного изменения параметров расчётной волны при трансформации в мелководной зоне акватории с учётом климатических изменений её уровня режима. Полученные по разработанной методике высоты волн при прогнозном повышении уровня режима акватории рекомендованы автором к применению для оценки изменения волновой нагрузки в соответствии с нормативной методикой, приведённой в СП 38.13330. При этом стоит отметить, что при росте уровня режима акватории отношение  $\frac{\overline{\lambda_d}}{d}$  уменьшится, а  $\frac{h_i}{\lambda_s}$  увеличится, что в соответствии с методикой СП 38.13330 в абсолютном большинстве случаев для волн обеспеченностью 1% приведёт к незначительному уменьшению максимального волнового давления от стоячих волн.

Однако, несмотря на незначительное изменение максимального волнового давления, доказано наличие значимого увеличения величины момента от действия волнового давления ввиду существенного смещения центра тяжести, что отразится на снижении устойчивости сооружения к опрокидыванию и сдвигу, а также на повышении значений нормальных контактных напряжений [47]. Таким образом, показан эффект влияния учёта долгосрочных климатических изменений уровня режима акватории на параметры волнения, величину волновой нагрузки, устойчивость и прочность сооружения.



#### **ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВЕННОГО РЕЖИМА АКВАТОРИИ НА ОТСЧЁТНЫЕ УРОВНИ, НАВИГАЦИОННЫЕ ГЛУБИНЫ, ЗАПЛЕСК И НЕЗАТОПЛЯЕМОСТЬ ПГТС**

В соответствии с СП 350.1326000 «Нормы технологического проектирования морских портов»: «С учетом перспективного значения порта, естественных условий и других факторов в проекте должны быть определены максимальные размерения судов, которые в перспективе могут быть приняты и обслужены портом, загружены и разгружены у причалов, запроектированных на расчетный период и намечаемых на перспективу. В расчете на указанные суда для каждого терминала определяются следующие параметры: перспективная глубина акватории и ее общие размеры, перспективная глубина и длина причальных сооружений» [п. 4.1.8, 275].

В связи с указанным выше положением СП можно сделать вывод, что оценка перспективных изменений условий эксплуатации порта уже учитывается при проектировании ПГТС и прочно вошла в практику, однако данное положение касается только учёта размерений судов. Перспективные климатические изменения тоже требуют учёта при проектировании ПГТС, т.к. во многом именно внешние воздействия определяют тип и параметры эксплуатируемых конструкций, а их изменение может привести к нарушению требований безопасности и надёжности.

Также СП 350.1326000 устанавливает, что «При компоновке терминалов следует использовать следующие исходные данные, получаемые как от заказчика, так и от разработчиков других разделов проектной документации:

- характеристику естественных условий района и площадки строительства (данные инженерно-геодезических, инженерно-геологических, инженерно-гидрометеорологических изысканий)» [п.4.2.5.1, 275].

Иными словами, изменение гидрометеорологических условий приведёт к изменению исходных данных, которые использовались при проектировании ПГТС, что в свою очередь может привести к необходимости изменения параметров сооружения.

В соответствии с СП 350.1326000 параметрами, подлежащими расчёту и обоснованию для всех типов причалов, являются [п.4.3.1.2, 275]:

- количество причалов;
- глубина у причала;
- длина причала;
- возвышение кордона причала;
- нормативные (базовые значения) нагрузки на причальные сооружения.

Таким образом, в условиях климатических изменений уровня режима необходимо оценить влияние данного фактора на изменение:

а) Для всех ПГТС:

- отсчётного уровня морского порта, получаемого на основании инженерно-гидрометеорологических изысканий;

б) Для причальных ПГТС:

- глубины у причала;
- возвышения кордона причала;

в) Для оградительных ПГТС:

- отметки гребня.

#### **4.1. Влияние климатических изменений уровня режима акватории на отсчётный уровень морского порта**

Для решения задачи проектирования портовых гидротехнических сооружений одним из наиболее важных критериев является назначение отсчётного уровня акватории, расчётных глубин у сооружений, а также отметки кордона. Определённые параметры подвергаются постоянному воздействию природных факторов, в связи с чем являются постоянно изменяющимися, но возвращающимися в проектное положение либо по естественным причинам, либо с помощью проведения специальных мероприятий силами эксплуатирующей организации порта.

Нормативные требования по обеспеченности уровня акватории при определении нагрузок и воздействий на ПГТС различных классов ответственности устанавливаются требованиями п.5.9 СП 38.13330 и изменяются от 1% до 10% для

1 и 4 классов ответственности соответственно. Назначение отметки кордона является критически важным и экономически значимым параметром при проектировании портовой территории. В данном разделе рассмотрим действующую в РФ нормативную методику и влияние на получаемые результаты климатических изменений уровня режима акватории.

В настоящее время при проектировании морских портов в РФ нормами СП 444.1326000 устанавливается, что «отсчетный уровень воды: Уровень воды в районе порта или морского терминала заданной обеспеченности, предназначенный для определения отметки дна морского канала, фарватера или зоны маневрирования» [п. А.35, 282] и «Отсчетный уровень воды для каналов, фарватеров и зон маневрирования в приливных и неприливных морях, а также в портах, расположенных на участках рек с морским режимом судоходства, где влияние моря является преобладающим, следует определять по многолетнему графику обеспеченности ежедневных уровней воды за навигационный период (включая время ледовой навигации)» [п.8.7, 282].

Однако неясным остаётся насколько продолжительным должен быть период наблюдений, чтобы в соответствии с методикой СП считаться многолетним. ГОСТ 18452-73 «Океанология. Уровень моря» устанавливает, что «Средний уровень моря – Величина, полученная в результате осреднения наблюдаемых значений уровня за определенный интервал времени» [п.23, 253]. Для различных целей этот «интервал времени» будет отличаться, так, для управления ледовой обстановкой в Арктике устанавливается, что «средний многолетний уровень моря: Величина, полученная в результате осреднения наблюдаемых значений уровня за многолетний интервал времени, или полученная путем осреднения данных гидродинамического моделирования колебаний суммарного уровня и течений для данной акватории, выполненного для достаточно продолжительного периода времени (не менее 10 лет)» [п.3.59, 259].

Наиболее полно на поставленный вопрос применительно к ПГТС отвечает СП 287.1325800: «средний многолетний уровень моря: Величина, полученная в результате осреднения наблюдаемых значений уровня за многолетний интервал

времени или полученная путем осреднения данных гидродинамического моделирования колебаний суммарного уровня и течений для данной акватории, выполненного для достаточно продолжительного периода времени (не менее 40 лет)» [п.3.4, 280].

Таким образом, для целей построения кривой обеспеченности уровенного режима были использованы данные за период не менее 40 лет. Для построения кривых обеспеченности в гидрологических расчётах используются различные типы вероятностного распределения однородных и стационарных данных: нормальное, логарифмически – нормальное, Джонсона, Фишера – Типпета I типа, Фишера – Типпета III типа, Пирсона III типа (непрерывная биномиальная функция (или просто биномиальная функция), или гамма – распределение), Крицкого-Менкеля (трехпараметрическое степенное гамма – распределение) и т.д. [27, 152].

Опираясь на данные многолетних наблюдений, для построения кривой обеспеченности уровенного режима в соответствии с требованиями СП 277.1325800, используют распределение Пирсона III типа, которое имеет положительный многолетний опыт применения в РФ и мире. Для построения кривой распределения Пирсона III типа определяют среднемноголетнее значение ряда наблюдений  $\bar{N}$ , коэффициент вариации  $C_v$  и коэффициент асимметрии  $C_s$ , благодаря которым становится возможным использование гамма – распределения, или таблицы Фостера-Рыбкина "Отклонения ординат биномиальной кривой обеспеченности" [прил. А, 279 и прил. Б, 112].

В данном разделе на основе «долгосрочных» (30 лет) временных рядов наблюдений за уровнем моря (использованы данные NASA [325]), полученных с помощью альтиметрических спутников миссий TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3 (см. Рисунок 109), были построены кривые обеспеченности средних уровней моря (см. Рисунок 110), аппроксимируемые распределением Пирсона III типа. Данные спутниковых наблюдений позволили рассмотреть динамику аномалии уровня моря в регионе расположения порта Индига ( $68^\circ \text{ N}$ ;  $47^\circ \text{ E}$ ) в период с октября 1992 года по сентябрь 2022 года [52, 47].

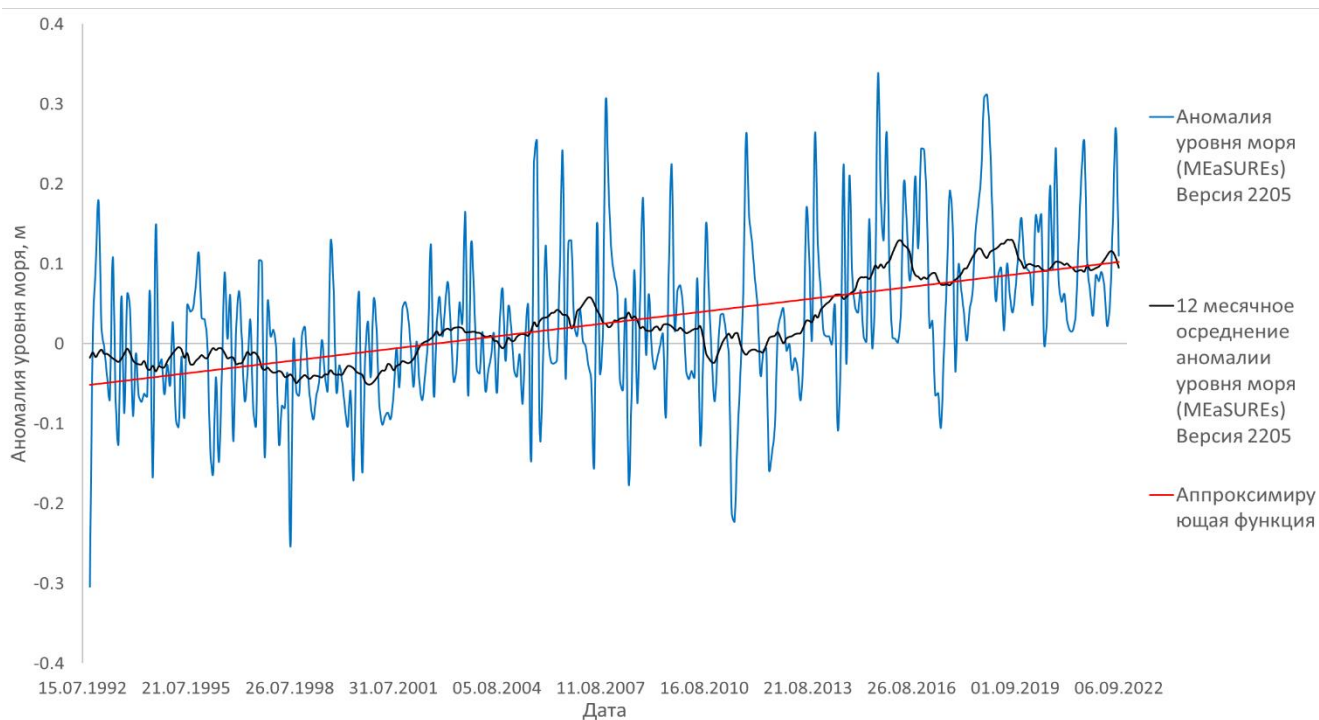


Рисунок 109 – График изменения аномалии уровня моря для точки ( $68^{\circ}$  N;  $47^{\circ}$  E) в период с октября 1992 года по сентябрь 2022 года.

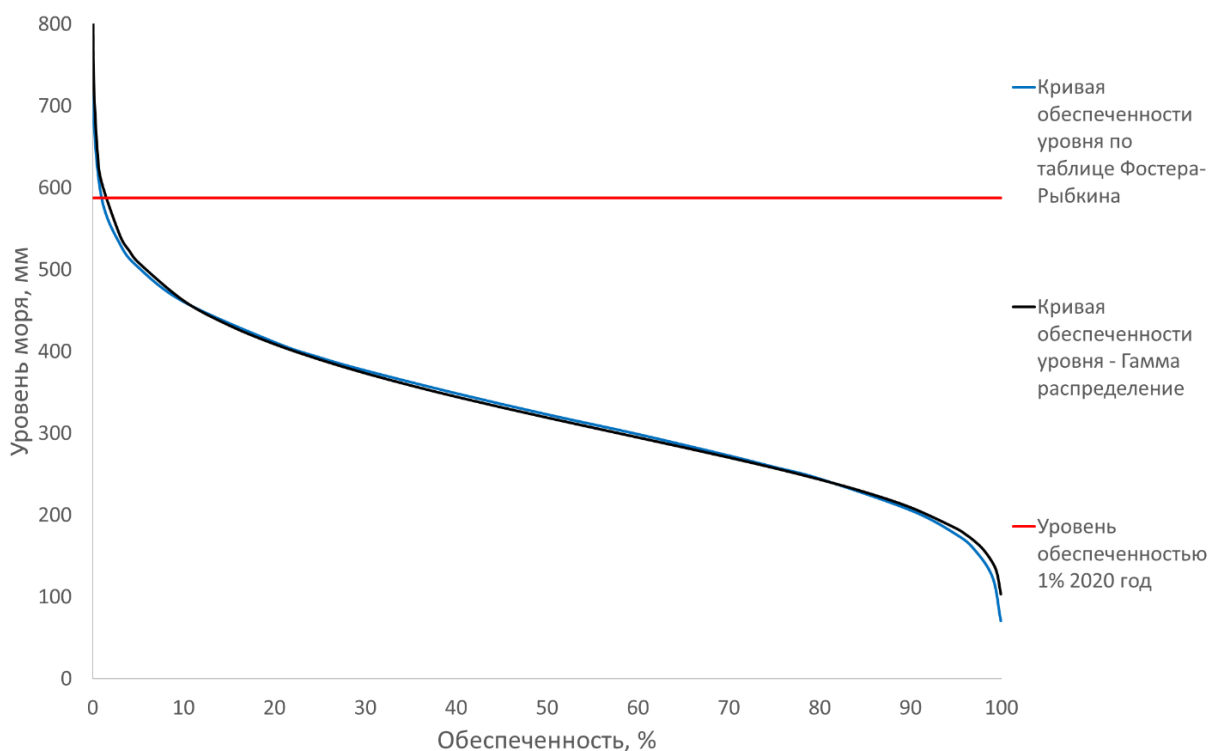


Рисунок 110 – Кривая обеспеченности среднего уровня моря в точке ( $68^{\circ}$  N;  $47^{\circ}$  E).

Однако в действующей нормативной документации применяется методика определения гидрологических параметров, которая основывается на предположении о стационарности ряда наблюдений, имеющего заранее

определённые границы изменения значений рассматриваемого параметра несмотря на межгодовую изменчивость. В связи с этим рассмотрение условного статичного случая полностью исключает применение существующей методики для нестационарных условий задачи.

Наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения среднего уровня мирового океана и региональные проявления этого процесса позволяют сделать вывод о наличии устойчивого положительного тренда к повышению уровня моря, которое для рассматриваемого участка Арктического региона имеет повсеместный характер. Таким образом, фактически наблюдаемые данные опровергают гипотезу о возможности применения методики определения гидрологических характеристик, базирующейся на условии стационарности рядов наблюдений, что подтверждается мнением специалистов гидрологов [74, 75, 152].

Кривая распределения среднего уровня моря показана на Рисунок 110, а уровень с обеспеченностью 1% – 587.37 мм принят по таблице Фостера-Рыбкина. Повышение уровня моря происходит не линейно во времени и имеет ускорение [195], но даже при допущении линейного изменения уровня моря в соответствии с трендом, полученным по данным наблюдений с 1992 года, рост уровня моря составит 504 мм.

Полученный уровень акватории 1% обеспеченности будет использоваться в проектировании при определении нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения. Однако, как было показано на Рисунок 109, для рассматриваемого района порта Индига наблюдается устойчивый положительный многолетний тренд к повышению уровня моря, следовательно решение задачи об определении расчётного уровня моря заданной обеспеченности в условиях стационарности ряда данных является некорректным и приведёт к получению результатов, которые потеряют свою актуальность уже к моменту завершения строительства гидротехнического сооружения.

В результате решения данной задачи, исходя из допущения о достоверности данных климатического моделирования, приведённых в 6 оценочном отчёте МГЭИК для 50% перцентиля по каждому из рассматриваемых сценариев – Shared

Socioeconomic Pathways (SSPs) [194, 235], и из допущения неизменности параметров ветрового и волнового нагона, для рассматриваемого района были получены следующие значения повышения уровня моря при различных сценариях изменения климата [335]:

- SSP1-1.9 (Очень низкие будущие выбросы парниковых газов): 748 мм;
- SSP2-4.5 (Промежуточные будущие выбросы парниковых газов): 919 мм;
- SSP3-7.0 (Высокие будущие выбросы парниковых газов): 1062 мм;
- SSP5-8.5 (Очень высокие будущие выбросы парниковых газов): 1195 мм.

Данные результаты существенно превышают диапазон рассматриваемых значений, используемый в методе построения по таблице Фостера – Рыбкина, который подразумевает обеспеченность от 0.01 до 99.9, и наглядно демонстрируют нелинейность тренда изменения уровня моря.

Полученные на основе многолетнего ряда наблюдений значения для уровня моря 1% обеспеченности не могут быть надёжно применены для практических целей, так как даже при линейном изменении уровня моря его рост превысит разницу между уровнями обеспеченности 1% и 99% по построенной на момент проектирования кривой обеспеченности, не говоря уже о сценариях SSP, которые даже для самого оптимистичного сценария подразумевают повышение уровня моря на 748 мм.

Как можно было бы учесть прогнозные климатические изменения уровня моря при проектировании портовых гидротехнических сооружений? Если рассмотреть кривую обеспеченности уровня моря на основе предположения о неизменном значении коэффициента асимметрии  $C_s$ , то при определении обеспеченности уровня моря для самого оптимистичного сценария SSP1-1.9, с помощью построенной на основе многолетних данных кривой вероятности установления уровня моря  $H_{1\%2120}$ , равного сумме  $H_{1\%2020}$  и  $\Delta H_{персп.}$ , уровень составляет 1335.37 мм.

Полученное значение уровня моря будет иметь повторяемость, равную 1% при принятых допущениях, однако использование проектной кривой обеспеченности приведёт к тому, что обеспеченность данного уровня составит 5.8 ·

$10^{-10}$ , что соответствует повторяемости 1 раз в 1.724 млрд. лет, т.е. лишь в 2.64 раза меньше возраста Земли ( $\approx 4.54$  млрд. лет). Показанный выше пример демонстрирует некорректность использования данных многолетних наблюдений за уровнем моря, при наличии положительного восходящего тренда, исходя из условия их стационарности.

Использование данных численного климатического моделирования позволяет построить кривые обеспеченностей уровней на периоды, равные установленному сроку капитального ремонта сооружения на протяжении всего жизненного цикла. Разбивка жизненного цикла сооружения на этапы, для каждого из которых определяется максимальный расчётный уровень с учётом климатических изменений, позволит не оказаться в условиях чрезмерно завышенных отметок сооружения в первые годы эксплуатации, и при этом выполнить требования надёжности и безопасности сооружения.

Таким образом, введение требований к повышению отметок верхней части сооружения в связи с прогнозным ростом уровня моря на этапе проектирования, незначительно увеличит капитальные затраты при проектировании и строительстве, однако введённый запас позволит в будущем уменьшить затраты средств и времени на необходимые работы по повышению отметки кордона и верхних строений оградительных сооружений в будущем.

Открытым остаётся вопрос: какой из сценариев повышения уровня моря рассматривать как базовый при оценке прогнозного повышения уровня моря. По мнению автора, так как в соответствии с климатическими прогнозами график повышения уровня моря выглядит нелинейно, то есть на ранних этапах (первые несколько десятилетий) разница в абсолютных значениях между сценариями не столь существенна, то сооружения можно проектировать с использованием агрессивных сценариев SSP5-8.5.

При очередном плановом капитальном ремонте было бы целесообразным организовать научное сопровождение с целью сравнения темпов роста уровня моря, использованных при проектировании и наблюдаемых на тот момент для адаптации к фактическому сценарию изменения климата в рассматриваемом



районе. С использованием указанных ранее допущений, был построен график кривой обеспеченности для сценария SSP5-8.5, при котором изменение уровня моря с 2020 по 2120 года составит 1195 мм (см. Рисунок 111). При таком построении кривой обеспеченности, она естественным образом будет включать в себя и значения, соответствующие менее агрессивным сценариями.

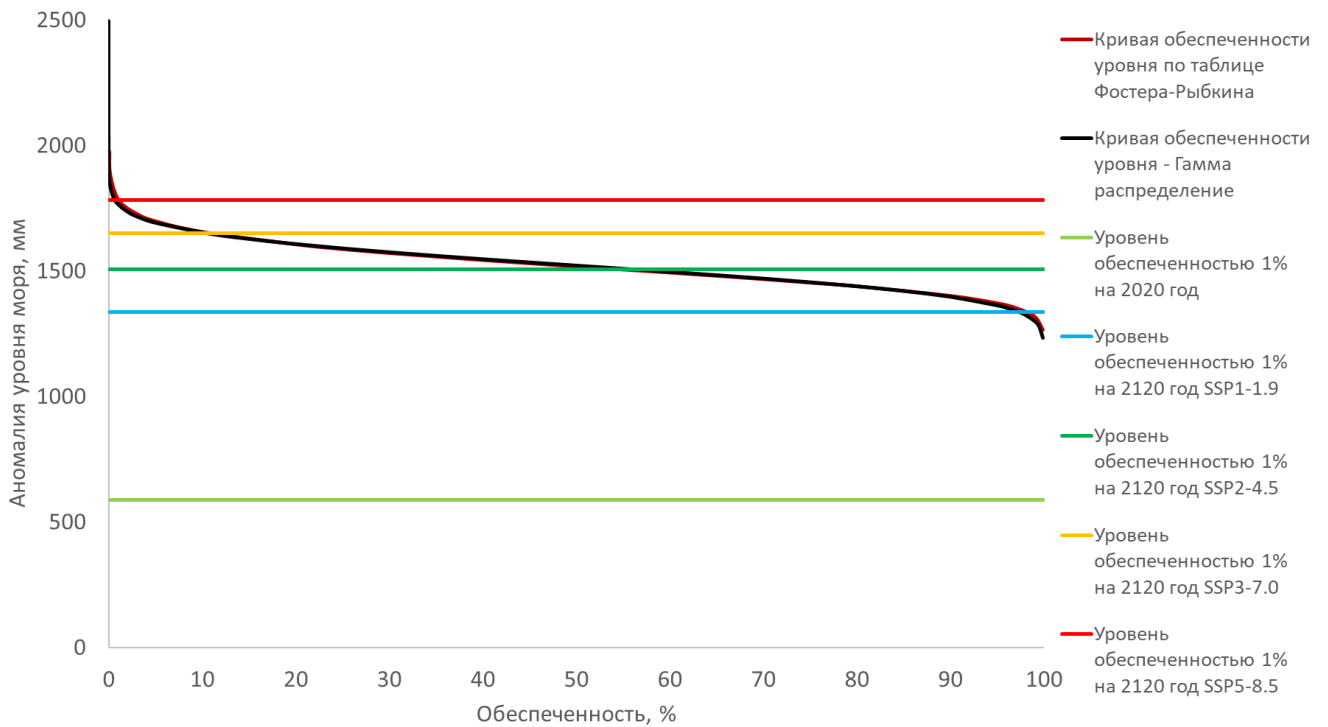


Рисунок 111 – Кривая обеспеченности среднего уровня моря, в точке (68° N; 47° E) с поправкой на повышение уровня моря в соответствии со сценарием SSP5-8.5.

Ряд авторов утверждает, что даже наиболее агрессивный сценарий SSP5-8.5 при рассмотрении 50% квантиля не обеспечивает достоверное моделирование процесса повышения уровня моря, и в реальности оно может оказаться большим. Однако рассмотрение на начальных этапах жизненного цикла сооружения агрессивных сценариев при квантиле 95% может привести к необоснованному завышению стоимости строительства и экономической неэффективности. Наиболее рациональным видится использование 50% квантиля сценария SSP5-8.5, как достаточного достоверно описывающего потенциальные негативные последствия изменений климата, но достаточно вероятного, для использования в практических целях.

Рассмотрение глобального процесса изменения уровня моря, в контексте необходимости проектирования надёжных и безопасных портовых

гидротехнических сооружений, показывает, что повышение уровня морского режима приведёт к увеличению повторяемости экстремальных уровней моря. В [107] утверждается: «экстремальные события, которые исторически происходили раз в столетие, становятся более распространёнными в связи с повышением уровня моря» (см. Рисунок 112 [107]).

Таким образом, рассмотренные данные спутниковых наблюдений показывают наличие положительного устойчивого тренда к повышению уровня моря для исследуемого района вблизи порта Индига [46]. Полученный результат является локальным проявлением глобального процесса повышения уровня моря, преимущественно связанного с изменением теплосодержания морских вод и с вкладом таяния ледников.

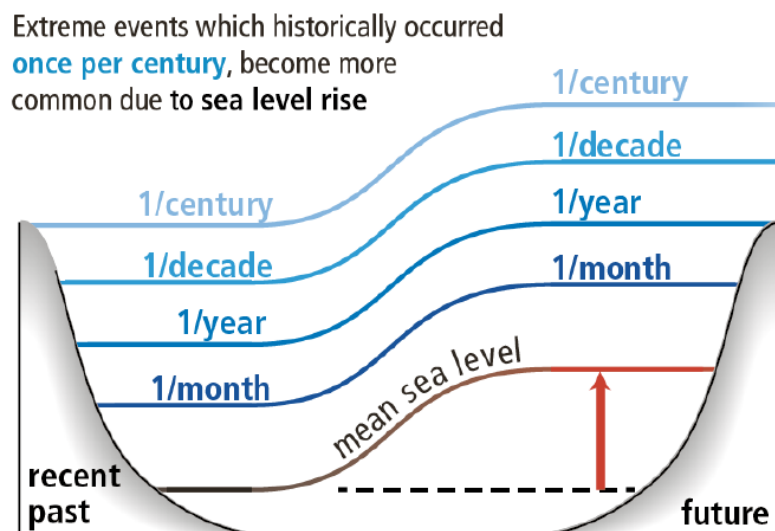


Рисунок 112 – Влияние повышения уровня моря на экстремальные уровни моря [107].

Применяемая в РФ методика определения расчётных уровней акватории порта для расчёта параметров нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения базируется на стационарности ряда наблюдений, используемого для построения кривых обеспеченности. В условиях наличия постоянного повышения уровня моря применение данной методики приведёт к получению недостоверных значений расчётного уровня моря уже при завершении строительства сооружения.

Для обеспечения выполнения требований надёжности и безопасности во время эксплуатации ПГТС при проектировании требуется учитывать прогнозные

климатические изменения в соответствии с уровнем ответственности и продолжительности жизненного цикла сооружения и/или использовать методики, учитывающие однородные, но не стационарные ряды данных наблюдений за уровнем моря в условиях климатических изменений уровня режима мирового океана. Некорректное определение расчётного уровня моря для оградительных и причальных сооружений может привести к возникновению неучтённых при проектировании нагрузок на этапе эксплуатации, возникающих как от невзволнованной акватории, так и в условиях расчётного шторма [48, 247].

#### 4.2. Заплеск волн для ПГТС вертикального профиля

Как уже описывалось ранее, в данной работе рассматриваются причалы – молы вертикального типа. Для таких конструкций, как и для причальных сооружений, существенное значение играет незатопляемость, или иначе недопущение перелива воды при восприятии волновой нагрузки через парапет (см. Рисунок 113 [143]), устраиваемый, как правило, у фронтальной грани причала – мола.

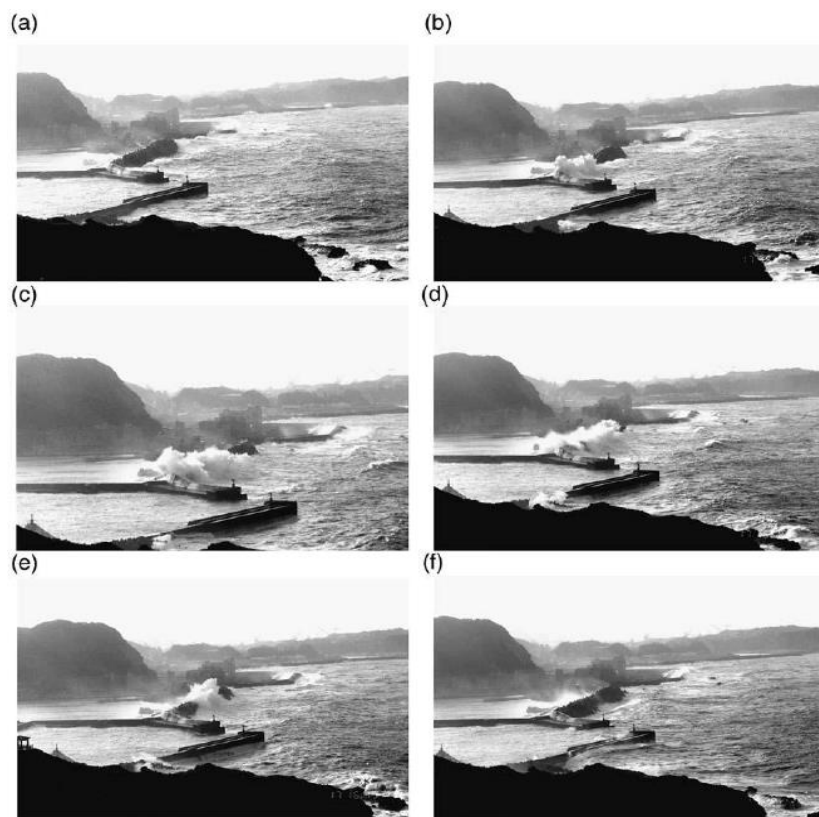


Рисунок 113 – Последовательность фотографий волны, перехлестывающей восточный волнорез рыбацкой гавани Виса во время тайфуна Хайнань [143].

Необходимость устройства парапета широко освещалась научной общественностью и в СССР. Так, Н.Н. Джунковский отмечал: «...при конструировании надстройки морской стенки следует предусмотреть защиту территории причала от переплеска воды при волнении» [стр.125, 138]; «Расположение причалов вдоль оградительных сооружений удобнее при вертикальном типе молв, но требует увеличения высоты парапета во избежание повреждения территории высокими волновыми всплесками» [стр.154, 137]; «Возвышение парапета над гребнями стоячих волн при недопустимости перелива принимается 0.5 м» [стр.94, 138 и стр.220, 31]; «Если по надстройке предусматривается движение транспорта или швартовка судов у сооружения, то по условию незаливаемости отметка верха плиты должна быть выше гребня максимальных волн, наблюдающихся на акватории» [стр.94, 138].

Таким образом, с целью обеспечения безопасных условий эксплуатации молв, а именно «недопущения переливания больших масс воды» [стр.526, 135], устраиваются парапеты. В данном разделе будут рассмотрены конструкции парапетов и методика определения расхода заплеска волн на вертикальные ПГТС. Парапет выполняется в виде сборно–монолитного или монолитного элемента, входящего в состав надстройки, и шириной поверху, как правило, не менее 1.5-2 метров [стр.220, 31] (см. Рисунок 114 [291], Рисунок 115 [адаптировано из рис.324, 135] и Рисунок 116 [адаптировано из 31 и 135]).



Рисунок 114 – Производство работ по возведению монолитного парапета у ПГТС газового терминала «Газпром СПГ Портовая» (Выборгский залив) [291].

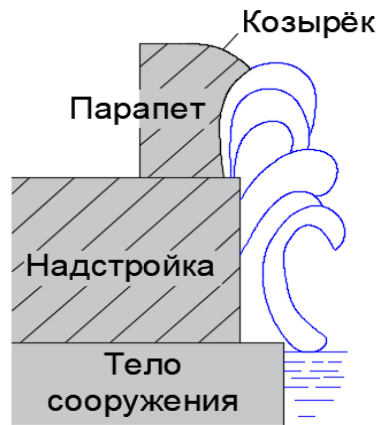


Рисунок 115 – Схематичное расположение основных элементов оголовка ограждающего сооружения.

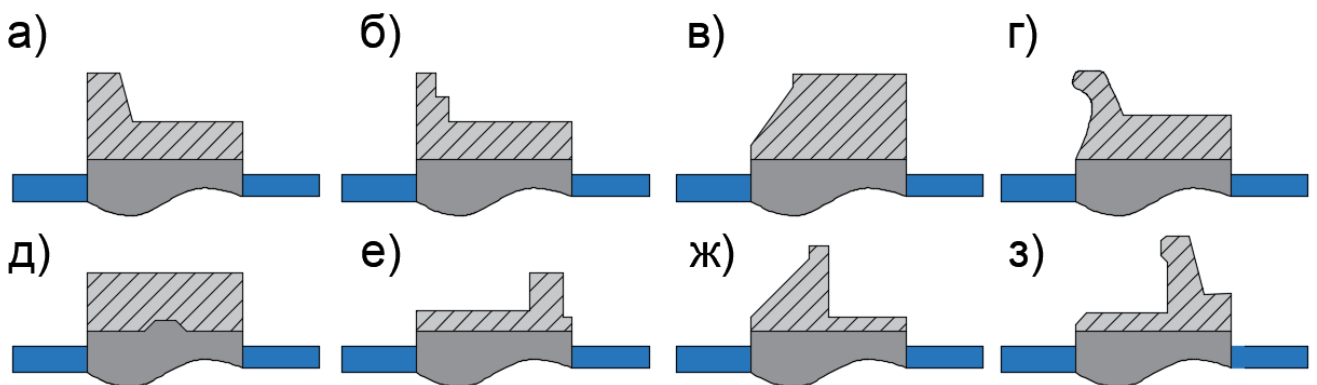


Рисунок 116 – Варианты реализации парапета: а) и б) простые формы парапета трапецевидной/прямоугольной и ступенчатой формы; в) парапет с наклонной лицевой гранью; г) парапет с криволинейной лицевой гранью «бычий нос»; д) парапет при реализации мола из крупных фасонных массивов; е) парапет со смещённой лицевой гранью; ж) парапет с наклонной лицевой гранью и уменьшенным расходом бетона; з) смешанный тип парапета с непрямолинейной и смещённой лицевой гранью.

Наибольшее распространение получили парапеты вертикального профиля без уклона в сторону от акватории (угол между водной поверхностью и фронтальной гранью парапета более  $90^\circ$ ) или с наличием такового, а также криволинейные парапеты типа «бычий нос». В практике отечественного портового строения широкое распространение получили прямолинейные парапеты с углом заложения фронтальной грани относительно поверхности акватории примерно от  $90^\circ$  до  $120^\circ$  и выполненные в поперечном разрезе в виде прямоугольника, сужающейся кверху трапеции или ступенчатого очертания. В данной работе будет

рассмотрен вертикальный парапет, как наиболее «опасный» с точки зрения обеспечения незатопляемости префронтальной зоны мола – причала.

Методика определения высоты заплеска отсутствует, однако в связи с тем, что для обеспечения безопасности и эксплуатационной пригодности наиболее значимым параметром является незатопляемость, то для обеспечения условия незатопляемости требуется определить расход перелива, который отразит удельный расход вод заплеска, пересекающих фронтальную грань сооружения. Однако для расчёта расхода перелива необходимо определить используемый вид каменной постели.

ПГТС гравитационного типа в общем случае состоят из постели, подводной и надводной частей. Постель служит для выравнивания дна, защиты грунта основания от размыва ввиду образования значительных придонных скоростей, а также для более равномерного распределения напряжений в основании сооружения [12]. В зависимости от грунтов, слагающих основание, и их реологических свойств различают несколько классификаций постелей в основании оградительных сооружений, подробно рассмотренных в [31] и укрупнённо подразделяемых на:

- Расположенные на скальных грунтах;
- Расположенные на нескальных плотных грунтах;
- Расположенные на слабых илистых грунтах.

Для определения влияния каменной постели на воспринимаемые сооружением волновые воздействия первостепенное значение имеет положение каменной постели относительно естественной поверхности дна. Виды каменной постели более укрупнённо рассматриваются в [83, 135] (см. Рисунок 117 [83]).

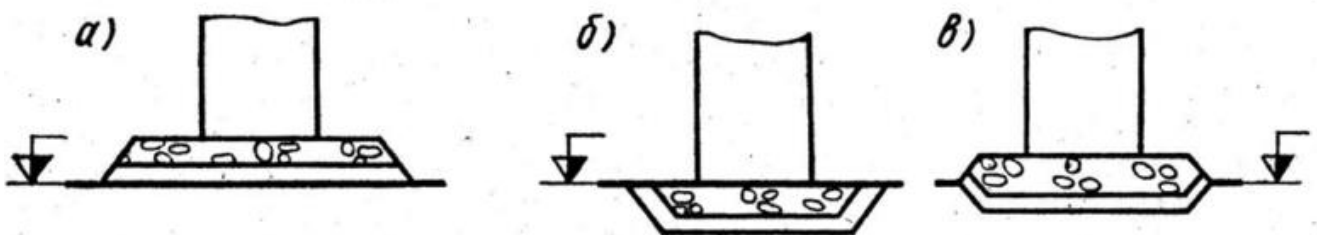


Рисунок 117 – Виды каменной постели: а - отсыпка на грунт; б - верх постели на уровне дна; в - частичное погружение в грунт [83].

При этом для целей, преследуемых в данной работе, эту классификацию можно дополнительно обобщить до двух видов подготовки основания для ПГТС:

- 1) Постель или её отсутствие, при котором обеспечивается нахождение основания ПГТС на отметке естественной поверхности дна;
- 2) Постель, обеспечивающая нахождение основания ПГТС на более высокой отметке по сравнению с естественной поверхностью дна.

Далее будет использоваться методика [223, 232] для определения удельного расхода перелива для вертикальных ПГТС, в которой рассматривается два случая:

- I.  $\frac{d_{br}}{d_b} \geq 0.6$  – берма не оказывает влияния на подходящие волны (Рисунок 118 а) [223]);
- II.  $\frac{d_{br}}{d_b} < 0.6$  – берма оказывает влияния на подходящие волны (Рисунок 118 б) [223]).

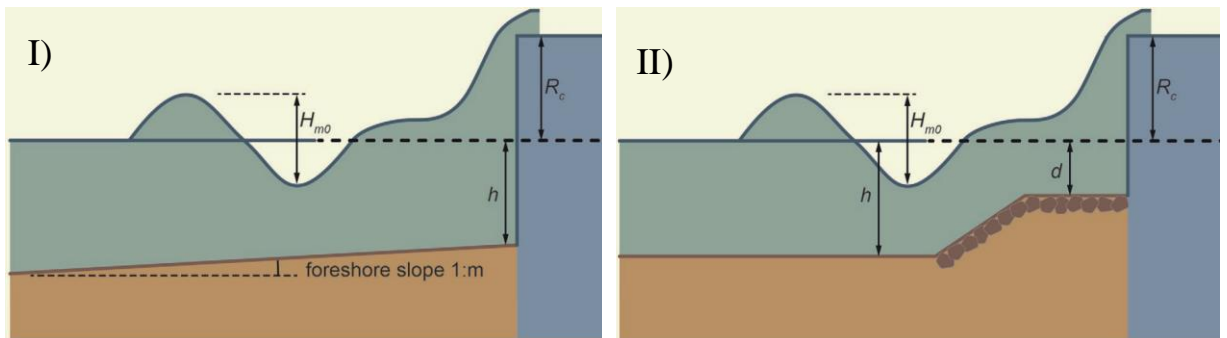


Рисунок 118 – Схема к методике определения удельного расхода заплеска волн на ПГТС. I) без бермы или берма не оказывает влияния на подходящие волны; II) у которых берма оказывает влияния на подходящие волны. Где  $H_{m0} = h_{i,\%}$ ,  $h = d_b$ ,  $d = d_{br}$ ,  $R_c$  – разница отметок верха парапета и невзволнованного уровня акватории [223].

После установления условий подхода волн к сооружению определяется тип условий взаимодействия волн с сооружением, которые подразделяют на:

1) Для случая I):

a)  $\frac{d_b^2}{h_{i,\%} \cdot \lambda_d} > 0.23$  – не импульсные условия;

b)  $\frac{d_b^2}{h_{i,\%} \cdot \lambda_d} \leq 0.23$  – импульсные условия;

2) Для случая II):

$$c) \frac{d_{br} \cdot d_b}{h_{i,\%} \cdot \lambda_d} > 0.65 \text{ – не импульсные условия;}$$

$$d) \frac{d_{br} \cdot d_b}{h_{i,\%} \cdot \lambda_d} \leq 0.65 \text{ – импульсные условия.}$$

Расчёт удельного расхода заплеска выполняется для двух случаев:

1) вероятностный расчёт или для сравнения с измерениями (средний прогноз со стандартным отклонением в  $\sigma$ . При принятом гауссовом распределении, этот вариант охватывает 68.3% случаев, однако при рассмотрении результата с поправкой  $\pm 5\%$  охват составит 90% случаев или не  $+\sigma$ , а  $+1.64\sigma$ );

2) детерминированный расчёт или для оценки безопасности (включает коэффициент безопасности на одно стандартное отклонение выше среднего прогноза, т.е.  $+2\sigma$ , что охватывает 95.5% случаев).

При этом для не импульсных условий а) и с) подразумевается одинаковая методика определения удельного расхода заплеска  $q$  по формулам (42) – (43) [223]:

- Вероятностный расчёт:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 0.05 \exp\left(-2.78 \frac{R_c}{h_{i,\%}}\right) \quad (42)$$

- Детерминированный расчёт или оценка безопасности:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 0.062 \exp\left(-2.61 \frac{R_c}{h_{i,\%}}\right) \quad (43)$$

В импульсных условиях типа б) по формулам (44) – (47) [223]:

а) при  $\frac{R_c}{h_{i,\%}} < 1.35$ :

1) Вероятностный расчёт:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 0.011 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{d_b}} \cdot \exp\left(-2.2 \frac{R_c}{h_{i,\%}}\right) \quad (44)$$



2) Детерминированный расчёт или оценка безопасности:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 0.0155 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{d_b}} \cdot \exp\left(-2.2 \frac{R_c}{h_{i,\%}}\right) \quad (45)$$

б) при  $\frac{R_c}{h_{i,\%}} \geq 1.35$

1) Вероятностный расчёт:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 0.0014 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{d_b}} \cdot \exp\left(\frac{R_c}{h_{i,\%}}\right)^{-3} \quad (46)$$

2) Детерминированный расчёт или оценка безопасности:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 0.0020 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{d_b}} \cdot \exp\left(\frac{R_c}{h_{i,\%}}\right)^{-3} \quad (47)$$

В импульсных условиях типа d) по формулам (48) – (51) [223]:

в) при  $\frac{R_c}{h_{i,\%}} < 1.35$

1) Вероятностный расчёт:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 1.3 \cdot \sqrt{\frac{d_{br}}{d_b}} \cdot 0.011 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{d_b}} \cdot \exp\left(-2.2 \frac{R_c}{h_{i,\%}}\right) \quad (48)$$

2) Детерминированный расчёт или оценка безопасности:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 1.3 \cdot \sqrt{\frac{d_{br}}{d_b}} \cdot 0.0155 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{d_b}} \cdot \exp\left(-2.2 \frac{R_c}{h_{i,\%}}\right) \quad (49)$$

г) при  $\frac{R_c}{h_{i,\%}} \geq 1.35$

1) Вероятностный расчёт:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 1.3 \cdot \sqrt{\frac{d_{br}}{d_b}} \cdot 0.0014 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{d_b}} \cdot \exp\left(\frac{R_c}{h_{i,\%}}\right)^{-3} \quad (50)$$

2) Детерминированный расчёт или оценка безопасности:

$$\frac{q}{\sqrt{gh_{i,\%}^3}} = 1.3 \cdot \sqrt{\frac{d_{br}}{d_b}} \cdot 0.0020 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{d_b}} \cdot \exp\left(\frac{R_c}{h_{i,\%}}\right)^{-3} \quad (51)$$

При этом расчёты безопасности особо ответственных сооружений или сооружений причалов – молов с недопустимостью перелива могут включать в себя не только 2 стандартных отклонения, т.е. 95.5% случаев, а 3 стандартных отклонения, т.е. 99.7% случаев (см. Рисунок 119, при  $h_{i,\%} = 6\text{м}$ ).

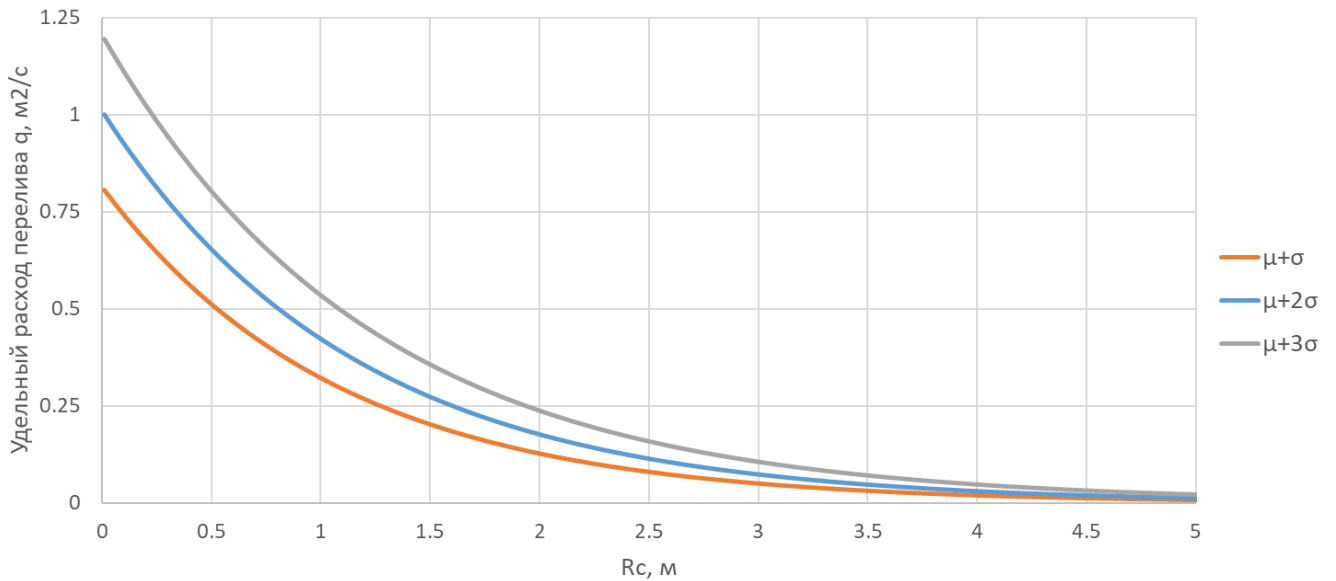


Рисунок 119 – График зависимости удельного расхода перелива через парпет от  $R_c$  для различных вариантов расчёта, использующих от 1 до 3 стандартных отклонений.

Используя полученную выше методику, нетрудно получить для заданных параметров волнения требуемое из условия незатопляемости значение  $R_c$ . Рассмотрев данное утверждение на примере не импульсных условий перелива, основываясь на формуле (43), была выражена величина  $R_c$  (52):

$$R_c = \frac{h_{i,\%} \cdot \ln\left(\frac{q}{0.062 \sqrt{gh_{i,\%}^3}}\right)}{-2.61} \quad (52)$$

Однако тот факт, что, после выражения из указанных ранее уравнений  $R_c$  было получено уравнение, в котором необходимо вычислять натуральный логарифм от удельного расхода, приводит к ситуации, в которой рассмотрение  $q=0$

становится невозможным и требуется задание значения допустимого перелива для поиска оптимального значения возвышения оголовка парапета относительно невзволнованной акватории.

Наибольшая эффективность подобного решения может быть достигнута путём рассмотрения зависимости удельного расхода перелива от высоты парапета, или потенциального ущерба от высоты парапета и зависимости высоты парапета от его стоимости. Представленный подход можно считать каноническим, однако в данной работе будет показана только общая концепция (см. Рисунок 120) ввиду отсутствия достоверных данных, по которым можно было бы оценить величину потенциального ущерба и связанные с его страхованием риски, а также достоверный уровень затрат на сооружение.

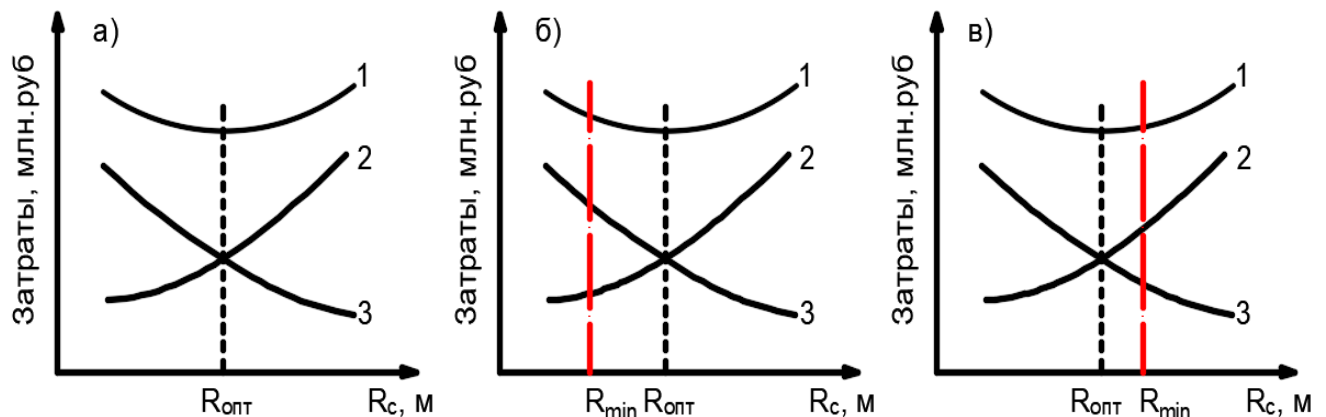


Рисунок 120 – Схема для определения оптимальной высоты парапета исходя из стоимостной оценки и условия обеспечения безопасности персонала. а)

Идеализированная схема без минимально заданной высоты парапета  $R_{\min}$ ; б)

Схема с заданной  $R_{\min}$ , не мешающая подбору оптимального значения; в) Схема с заданной  $R_{\min}$ , исключающая подбор оптимального значения. 1 – совокупные затраты; 2 – затраты на строительство и эксплуатацию парапета; 3 – затраты на страхование рисков.

#### 4.3. Влияние климатических изменений уровня режима акватории на навигационную глубину порта и возвышение кордона причалов

В соответствии с СП 350.1326000 «Нормы технологического проектирования морских портов»: «Компоновка акватории порта выполняется в соответствии с нормами СП "Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон

маневрирования" содержащими требования к элементам акватории порта» [п.4.2.1.7, 275]. В связи с этим рассмотрим требования СП 444.1326000 [282].

Назначение навигационной глубины порта осуществляется в соответствии с методикой, представленной в СП 444.1326000. Навигационная глубина определяется по формуле (53) [282]:

$$d_{\text{н}} = T_{\text{с}} + \Delta T + z_1 + z_2 + z_3 + z_0 \quad (53)$$

где  $T_{\text{с}}$  – максимальная осадка в грузу расчётного судна, м;  $\Delta T$  – поправка на изменение осадки расчётного судна при плотности воды  $\rho$  в проектируемом районе, отличающейся от стандартной  $\rho=1025 \text{ кг/м}^3$ , м;  $z_1$  – минимальный навигационный запас, учитывающий естественные неоднородности грунта, погрешности измерения глубины фарватера, возможные ошибки расчёта осадки судна, м;  $z_2$  – запас от волновых воздействий (на погружение оконечности судна при волнении), м;  $z_3$  – скоростной запас на изменение осадки судна на ходу в тихой воде по сравнению с осадкой без хода, то есть на динамическую просадку, м;  $z_0$  – запас на крен судна, возникающий от воздействия расчётного ветра и гидродинамических сил на повороте, м.

Проектная глубина определяется по формуле (54) [282]:

$$d_{\text{пр}} = d_{\text{н}} + z_4 \quad (54)$$

где  $z_4$  – запас на заносимость, м.

Таким образом, проектная глубина в действующей нормативной документации определяется без учёта влияния климатических изменений уровня режима. При этом рост уровня режима акватории приведёт к более благоприятным условиям с точки зрения обеспечения навигационной глубины для судов. В начальный период эксплуатации запас на заносимость является важной составляющей, и для обеспечения надлежащих условий судовождения требуется регулярное дноуглубление с целью недопущения заносимости акватории порта. Однако с течением времени рост уровня режима акватории будет компенсировать заносимость, в результате чего интервал между

дноуглубительными работами увеличится, и таким образом будет получен положительный экономический эффект для эксплуатирующей организации порта.

Для оценки влияния климатических изменений уровня режима акватории на обеспечение безопасности эксплуатации причальных ПГТС необходимо оценить изменение возвышения отметки кордона относительно расчётного уровня акватории. В соответствии с СП 287.1325800 кордон – «Линия пересечения верхней горизонтальной плоскости причального сооружения и его лицевой (морской) грани» [п. 3.1, 280].

Изменение отметки кордона влечёт за собой существенное увеличение объёма земляных работ для портов, не использующих ступенчатую организацию территории с повышением отметки территории при удалении от причального фронта. В связи с этим данный параметр является значимым и требует оценки в разрезе климатических изменений уровня режима акватории.

Возвышение кордона причала  $\Delta H_{\text{кордона}}$  определяется в соответствии с требованиями СП 350.1326000 [п.4.3.5, 275]:

- Для неприливных морей:  $\max \left\{ \begin{array}{l} \text{СМУ} + 2,0 \\ \text{УВ}_{\text{Н}2\%} + 1,0 \end{array} \right.$ , где СМУ – средний многолетний уровень акватории;  $\text{УВ}_{\text{Н}2\%}$  – наивысший годовой уровень обеспеченностью в многолетнем ряду 2%;

- Для приливных морей:  $\max \left\{ \begin{array}{l} \text{УВ}_{\text{Н}50\%} + 2,1 \\ \text{УВ}_{\text{Н}1\%} + 1,0 \end{array} \right.$  где  $\text{УВ}_{\text{Н}50\%}$  – уровень обеспеченностью 50%;  $\text{УВ}_{\text{Н}1\%}$  – уровень обеспеченностью 1%.

При этом «По основной норме устанавливается возвышение кордона причала относительно уровня отсчета из условия обеспечения удобства стоянки судов у причала и проведения погрузочно-разгрузочных работ при средних уровнях воды, а по поверочной норме — возвышение кордона относительно уровня отсчета, обеспечивающее незатопляемость территории причала при максимальных уровнях» [п.4.3.5, 275]. Из данного утверждения можно сделать вывод, что в нормативной документации прямо указывается на недопустимость затопления территории причала при максимальных уровнях, однако максимальные уровни, в

условиях климатических изменений уровня режима акватории, являются не постоянной величиной.

В связи со всем вышеизложенным будем рассматривать отметку возвышения кордона относительно проектного дна, определяемую по формуле (55):

$$H_{\text{кордона}} = d_{\text{пр}} + \Delta H_{\text{кордона}} = T_c + \Delta T + z_1 + z_2 + z_3 + z_0 + z_4 + \Delta H_{\text{кордона}} \quad (55)$$

Наглядно рассматриваемую величину иллюстрирует Рисунок 121 [адаптировано из рис.3, 273 и рис.8.4, 282].

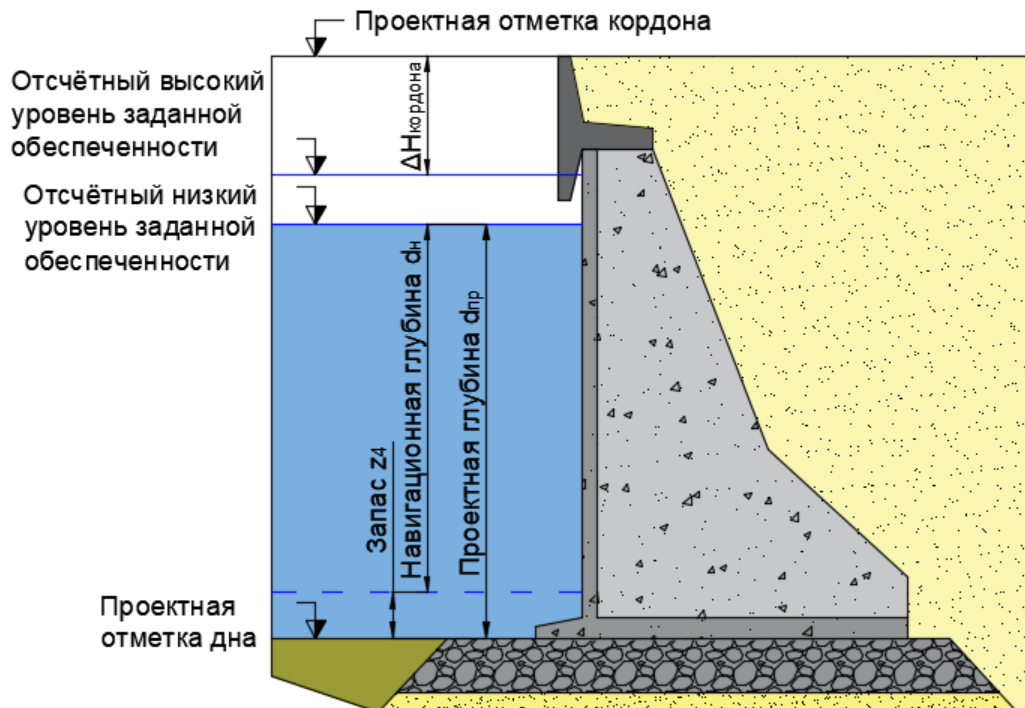


Рисунок 121 – Схематичная иллюстрация рассматриваемой разницы между проектными отметками дна и кордона.

Однако при повышении уровня режима акватории происходит постепенное уменьшение возвышения кордона относительно уровня невзволнованной поверхности, в связи с чем расход заплеска начинает увеличиваться. Для того чтобы оценить изменения удельного расхода заплеска были использованы граничные условия по характеристикам волнения на защищённой акватории, представленные в [прил.5, рис.1, 268] (см. Рисунок 122 [268]).

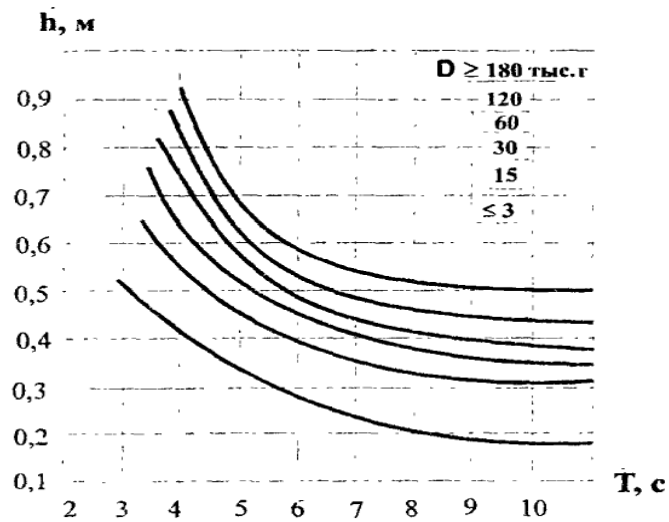


Рисунок 122 – Номограмма для определения элементов волн, допустимых при выполнении швартовных операций [268].

Для расчёта использовались высоты волн от 0.2 до 0.9 метров [131, 268] с шагом 0.1 метра и минимальное возвышение отметки кордона 2.1 метра относительно расчётного уровня обеспеченностью 50%. Для определения удельного расхода заплеска следует установить тип условий волнения и возвышение кордона, т.е.  $\frac{d_b^2}{h_{i,\%} \cdot \lambda_d} \geq 0.23$  и  $\frac{R_c}{h_{i,\%}} \geq 1.35$ . Для этого была рассмотрена сетка унифицированных проектных значений глубин у причалов перегрузочных комплексов (ПК) [т.13.3, 271], в соответствии с которой глубины изменяют от 5 метров для ПК лихтеров до 24 метров для ПК нефтепродуктов и прочих наливных грузов. По результатам рассмотрения минимальной глубины равной 5 метрам и  $R_c=2.1$  м, и опираясь на Рисунок 122, были получены вариации параметров волнения (см. Таблица 14).

Таким образом, выявлено, что  $\frac{d_b^2}{h_{i,\%} \cdot \lambda_d} > 0.23$  и  $\frac{R_c}{h_{i,\%}} \geq 1.35$ , т.е. рассматриваются не импульсные условия волнения и высокий кордон. Согласно формуле (43), установлено, что удельный расход заплеска при повышении уровня режима акватории растёт по степенному закону (см. Рисунок 123). При этом даже для волн 0.9 м при  $R_c=2.1$  м, на начальный период времени удельный расход заплеска  $q = 3.76 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^2/\text{с]}$ .

Таблица 14 - Вариации параметров волнения для причала при  $R_c=2.1$  м и  $d_b=5$  м.

$\bar{T}, c$	$h_{i,\%}, m$	$\bar{\lambda}_d, m$	$\frac{d_b^2}{h_{i,\%} \cdot \bar{\lambda}_d}$	$\frac{R_c}{h_{i,\%}}$
3	0.52	14.05	3.42	4.04
4.5	0.35	31.62	2.26	6.00
4.5	0.90	31.62	0.88	2.33
7	0.23	76.50	1.42	9.13
7	0.55	76.50	0.59	3.82
10	0.50	156.13	0.32	4.20
10	0.18	156.13	0.89	11.67

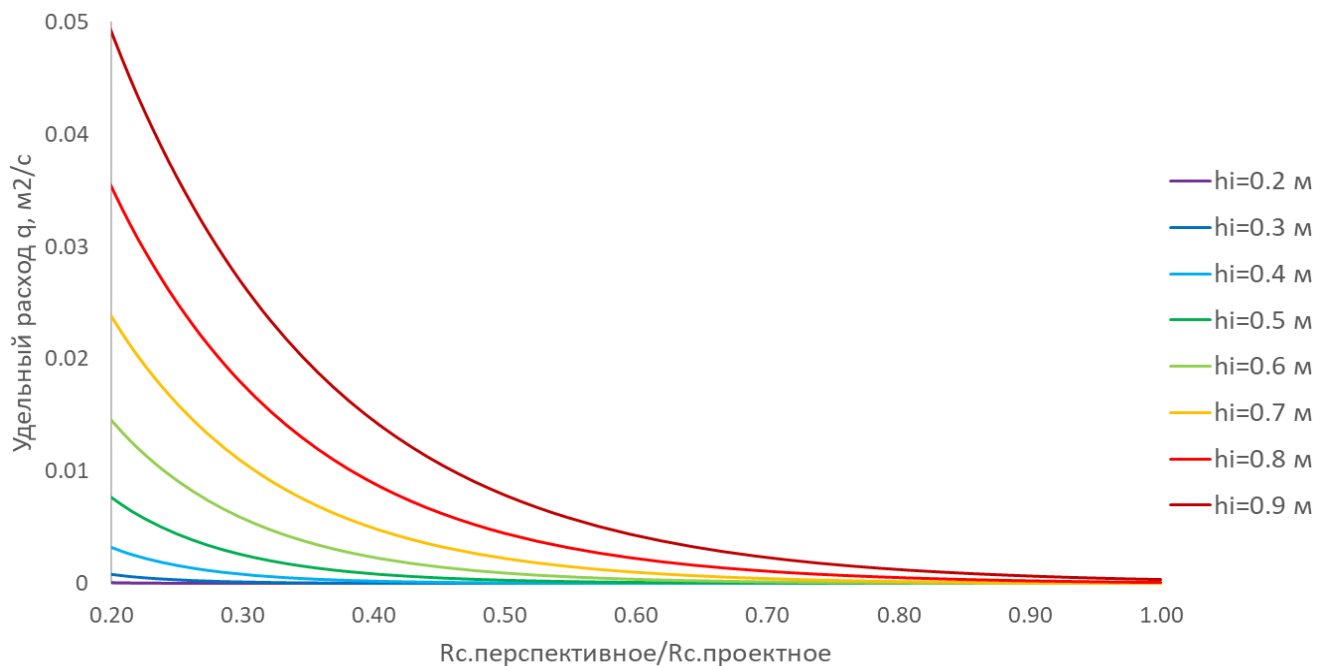


Рисунок 123 – Зависимость удельного расхода заплеска от отношения перспективного возвышения кордона к проектному для различных высот волн при  $R_c=2.1$  м.

Таким образом, при проектировании причалов морских портов для выполнения условия незатопляемости причального фронта требуется оставлять возвышение кордона относительно поверхности акватории равным не менее минимально допустимого, в связи с этим отметка кордона должна определяться с учётом прогнозного повышения уровня режима акватории по формуле (56):

$$H_{\text{кордона}} = d_{\text{пр}} + \Delta H_{\text{кордона}} + \Delta H_{\text{перспективное}} \quad (56)$$

где  $\Delta H_{\text{перспективное}}$  – перспективное (прогнозное) повышение уровня режима акватории.



В таком случае отметка кордона для сооружения со сроком эксплуатации 100 лет на примере порта Певек при сценарии SSP3-7.0 и квантиле 50% (рост 100.6 см), будет выглядеть следующим образом (см. Рисунок 124).

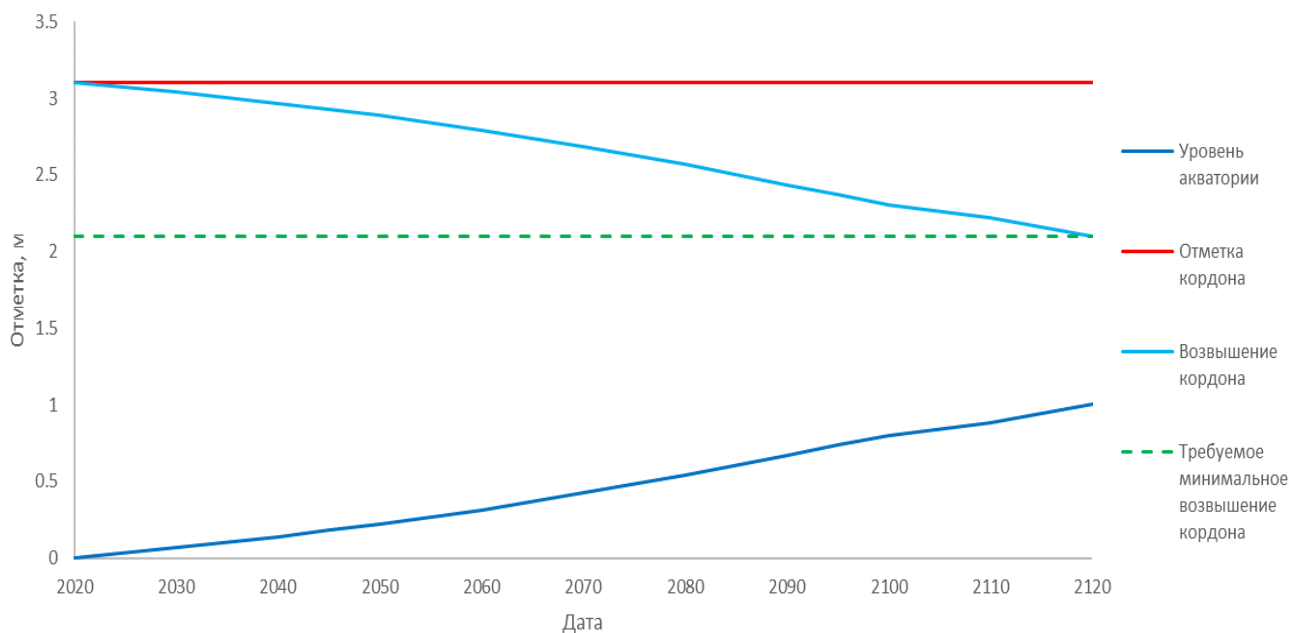


Рисунок 124 – Динамика уровня акватории, отметки кордона и возвышения кордона по предлагаемой методике на примере порта Певек при сценарии SSP3-7.0, квантиле 50%.

Для терминалов, специализированных для накатных судов, при невозможности установки аппарели на причал в положение, удобное для проведения погрузочно-разгрузочных работ в течение всего периода обработки судна, в местах сопряжения аппарели с причалом устраивается береговой пандус или мост-рампа, параметры которых рассчитываются, опираясь на габариты и осадку расчётного судна [п.4.3.5.7, п.4.3.5.8, 275].

Однако возвышение кордона может быть ограничено не только для терминалов, специализированных для накатных судов, и в ряде случаев целесообразным было бы предусмотреть поэтапное повышение отметки кордона в префронтальной части порта с заблаговременным расположением основных объектов портовой инфраструктуры на перспективной отметке. Тогда возвышение относительно дна в префронтальной части будет определяться по формуле (57):

$$H_{\text{кордона}} = d_{\text{пр}} + \Delta H_{\text{кордона.перспективное}} + \sum \Delta H_i \text{ этапа} \quad (57)$$

где  $\Delta H_{\text{кордона.перспективное}}$  – возвышение кордона, определённое с учётом повышения уровня моря до первого повышения отметок;  $\Delta H_{i \text{ этапа}}$  – повышение уровня моря по прошествии  $i$ -го этапа (периода) между повышениями отметок.

Для рассмотренного ранее случая – сооружения со сроком эксплуатации 100 лет, на примере порта Певек при сценарии SSP3-7.0, квантиле 50% и количестве этапов (периодов)  $i = 3$  шт, возвышение отметки кордона будет изменяться следующим образом (см. Рисунок 125).

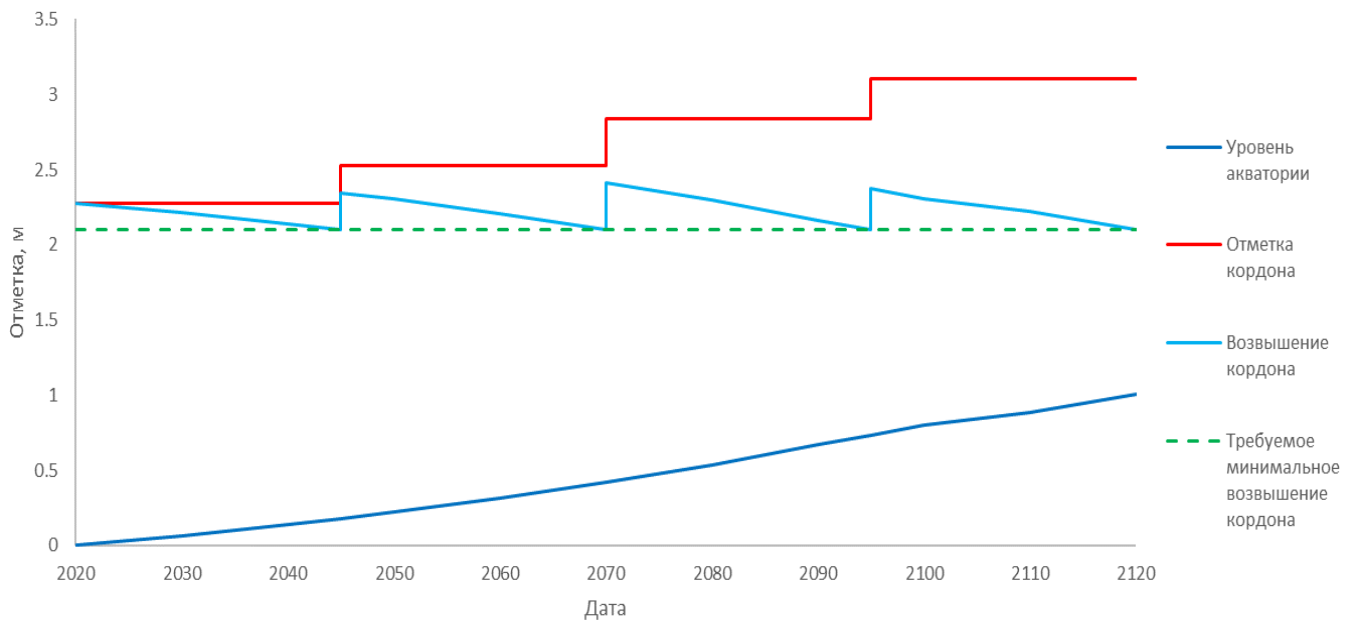


Рисунок 125 – Динамика уровня акватории, отметки кордона и возвышения кордона по предлагаемой методике на примере порта Певек при сценарии SSP3-7.0, квантиле 50% и количестве этапов (периодов)  $i = 3$  шт.

Описанные ранее нормативные требования касаются минимальной высоты возвышения кордона, ряд авторов же предлагает методики определения требуемого возвышения кордона относительно поверхности воды из условия обеспечения не только незатопляемости, но и учёта конструктивных требований (58) [12]:

$$\begin{cases} H > УБ + h_k + h_{пл} + t_{пл} \\ H > УВ_{Hi\%} + |n_{dif\ max}| + a \end{cases} \quad (58)$$

где  $h_k = 0.9$  м – высота каналов инженерных сетей;  $t_{пл} = 0.2 - 0.3$  м – толщина плиты, перекрывающей каналы инженерных сетей;  $h_{пл} > 1.0$  м – толщина плиты

надстройки;  $a$  – запас по высоте, равный 0.25 – 0.5 м;  $\eta_{dif\ max}$  – максимальное возвышение свободной волновой поверхности дифрагированных волн над расчётным уровнем, определяемое по формуле (59) [12]:

$$\eta_{dif\ max} = \frac{h_{dif}}{2} + \frac{k \cdot h_{dif}^2}{8} cth(k \cdot d) \quad (59)$$

где  $h_{dif}$  – высота дифрагированных волн.

Описанная методика назначения отметки кордона из условия незатопляемости причала не учитывает климатических изменений и должна рассматриваться в предположении о прогнозируемом повышении уровня моря, тогда к полученным значениям необходимо будет добавить величину прогнозируемого повышения уровня режима акватории  $\Delta H_{перспективное}$ . Тогда для определения возвышения кордона относительно расчётного уровня акватории необходимо воспользоваться формулой (60):

$$H_{кордона} > \left| \frac{h_{dif}}{2} + \frac{k \cdot h_{dif}^2}{8} cth(k \cdot d) \right| + a + \Delta H_{перспективное} \quad (60)$$

#### **4.4. Влияние климатических изменений уровня режима акватории на незатопляемость ограждающих ПГТС**

Назначение отметки гребня ограждающих сооружений является одним из наиболее значимых параметров, обеспечивающих нормальную эксплуатацию сооружения. Для ограждающих сооружений назначаются две отметки: отметка оголовка (кордона) и отметка парапета. Исчерпывающие сведения о назначении отметки оголовка ограждающих сооружений откосного типа приведены в [252], подробно описывающем существующие методики для морских гидротехнических сооружений, включая ограждающие сооружения.

Для ограждающих сооружений вертикального профиля не приведено методик определения отметок гребня сооружения, однако для откосных сооружений такая методика содержится в [п.5.2.11, 252]. Также в указанном документе при применении этой методики рассматриваются сооружения

смешанного профиля с вертикальной надстройкой, но не даются подробные указания для сооружений данного типа.

Возвышение  $z_c$  (м) гребня сооружения над расчетным максимальным уровнем воды (см. Рисунок 126 [рис.5.1, 252]), когда не допускается перелив волны через верх сооружения, определяется по формуле (61) [252]:

$$z_c = h_{run1\%} + \Delta h_{set} + a_3 \quad (61)$$

где  $h_{run,1\%}$  - высота наката (м) на откос волн 1% обеспеченности;  $\Delta h_{set}$  - высота ветрового нагона (м) определяемая по указаниям СНиП 2.06.04-82\* [278];  $a_3$  - запас высоты сооружения (м) 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.

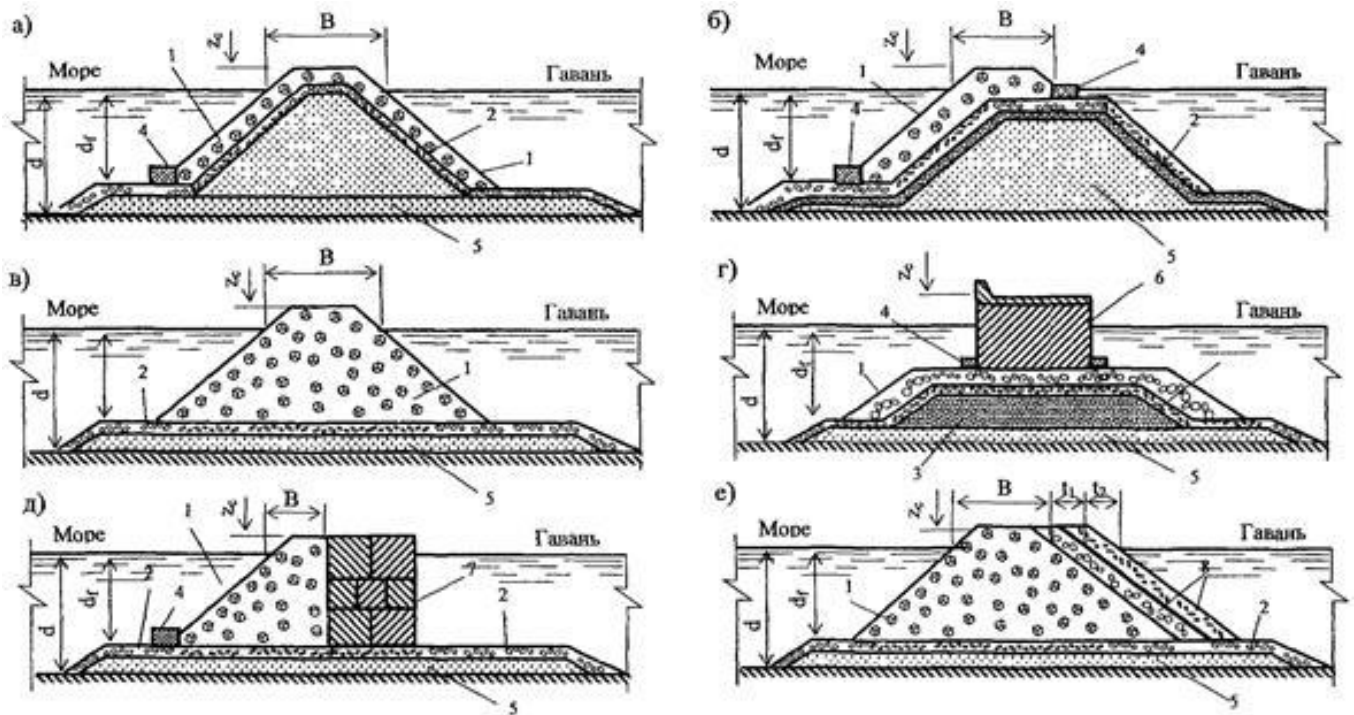


Рисунок 126 – Схемы поперечных профилей набросных оградительных сооружений откосного типа: а - с набросным каменным ядром; б - с высокой постелью; в - однородная наброска бетонных блоков или массивов; г - с бетонной надстройкой; д - с мористой наброской и тыловой вертикальной стенкой; е - однородная наброска с тыловыми наклонными кранами [рис.5.1, 252].

В соответствии с требованиями [п.5.9, 276]: «При определении нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения обеспеченности расчетных уровней должны быть не более: для сооружений I класса - 1%, II и III классов - 5%, IV класса

- 10% по наивысшим годовым уровням, определенным с учетом приливно-отливных явлений, сезонных колебаний, ветрового и волнового нагонов». Таким образом, методика, приведённая в ВСП 33-03-07, рассматривает возвышение гребня относительно невзволнованного уровня, а методика СП 38.13330 - относительно невзволнованного уровня с добавлением величины ветрового и волнового нагонов, в связи с чем в формуле (61) второй член не требуется учитывать.

Механики взаимодействия волн с оградительными сооружениями откосного и вертикального типов отличаются. Рассмотренная в разделе 3.1.2 механика образования у вертикальной преграды стоячих волн обуславливает необходимость рассмотрения стоячих волн при оценке незатопляемости портового гидротехнического сооружения ввиду удвоения высоты волны. Для корректного рассмотрения и оценки методики назначения отметки гребня ПГТС, а также допустимости заплеска, целесообразно провести обобщение опыта проектирования берегозащитных сооружений, где для каждого вида сооружений подробно даются методики назначения отметок гребня.

**Оградительные береговые дамбы** возводят для защиты территорий от волновых размывов и затоплений при повышении уровня моря (водоема). При проектировании данных сооружений нормативная документация содержит указания о том, что: «Наиболее эффективным является откосно-каменное покрытие, которое значительно гасит энергию волн, сокращает высоту наката и предотвращает возможность перелива через гребень дамбы» [п.7.6.8, 281]. Этот пункт претерпел изменения в СП 277.1325800 [279] и перестал содержать упоминание про предотвращение возможности перелива. При этом оба документа содержат указания п.7.6.11 [281] и п.9.6.10 [279]: «При проектировании оградительных дамб следует предусматривать мероприятия по отводу воды, попавшей за дамбу». Приведённый норматив можно трактовать таким образом, что случай перелива возможен, но достаточно редок (см. Рисунок 127 [рис.9.5, 279]).

В связи с этим даются указания о назначении отметки гребня незатопляемой оградительной дамбы исходя из высоты расчетной волны при расчетном уровне

моря. Возвышение гребня оградительной дамбы над расчетным уровнем моря следует определять по формуле (62) [279]:

$$H_{гр} = h_{run} + r \quad (62)$$

где  $r$  - запас высоты дамбы (м), который принимается не менее 1 м;  $h_{run}$  - высоты наката волн на откос оградительной дамбы.

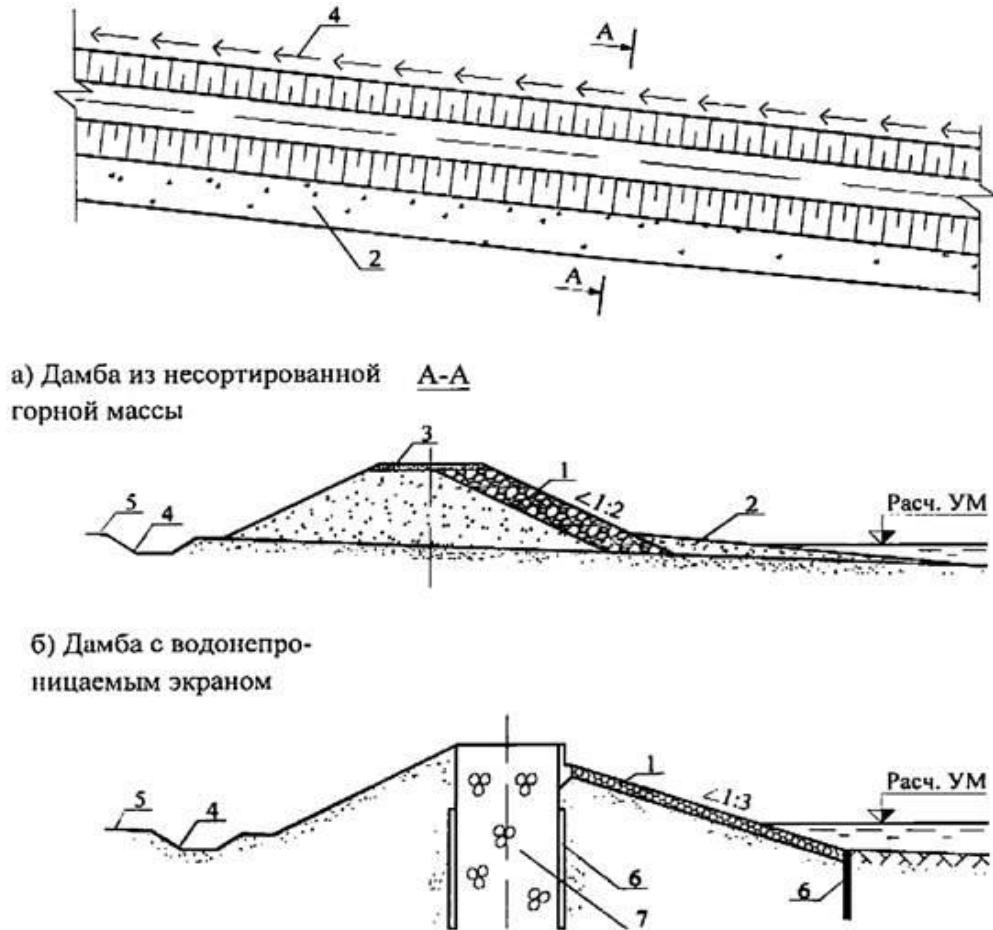


Рисунок 127 – Схемы оградительных дамб [рис.9.5, 279].

**При проектировании волноотбойных стен** для защиты от волнового воздействия береговых уступов нормативные документы указывают в [п.7.9.6, 281] и [п.9.8.6, 279]: «Для уменьшения высоты наката штормовых волн и устранения переливов воды через гребень волноотбойной стены ее морской части (лицевой грани) следует придать плавное криволинейное очертание с горизонтальным заложением». Возвышение гребня стены над расчетным уровнем (см. Рисунок 128 [рис.9.8, 279]) рекомендуется принимать по формуле (63) [279]:

$$ZV = 0.75h_{cr.u1\%} + r_c \quad (63)$$



(такой вывод сделан из-за отсутствия прямого запрета перелива через оградительное сооружение в нормативной документации), т.к. при переливе будет создано дополнительное, но незначительное волнение на защищаемой акватории.

В то же время при проектировании оградительного сооружения вертикального профиля, совмещённого с причалом со стороны акватории, перелив является недопустимым, а удельный расход заплеска должен быть минимизирован. В таком случае отметка гребня сооружения, запроектированного на расчётный уровень, определённый на момент проведения изысканий без учёта прогнозных климатических изменений уровня режима акватории, может не обеспечивать выполнение условия незатопляемости. Рассмотренные выше методики можно обобщить (Таблица 15).

Таблица 15 - Методики расчёта отметки гребня ПГТС

Тип сооружения		Методика расчёта	Допускается ли перелив
Общий	Частный		
Берегозащитное	Волноотбойные стены	$ZV = 0.75h_{cr.u1\%} + r_c$	нет
	Оградительные береговые дамбы	$H_{гр} = h_{run} + r$	да
	Искусственный свободный песчаный пляж	$\Delta H = H_n + h_{run1\%} + 0,1h_{cr.u1\%}$	нет
Оградительное	Откосного профиля	$z_c = h_{run1\%} + \Delta h_{set} + 0.1h_{1\%}$	нет
	Смешанного профиля	$z_c = h_{run1\%} + \Delta h_{set} + 0.2h_{1\%}$	нет
	Вертикального профиля	-	да
Причальное	На приливных морях	$\max \begin{cases} y_{B_{H50\%}} + 2.1 \\ y_{B_{H1\%}} + 1.0 \end{cases}$	нет
	На неприливных морях	$\max \begin{cases} cy_{B} + 2.0 \\ y_{B_{H2\%}} + 1.0 \end{cases}$	нет
Причальное и оградительное совмещённое		-	нет

Для сооружений вертикального профиля не существует такого понятия как «высота наката волн на откос», вместо этого аналогичным параметром является



наибольшее значение отметки волновой поверхности у стены при действии стоячей волны на вертикальную стену. При этом ВСП 33-03-07 устанавливает, что при наличии парапета у сооружений смешанного профиля делается увеличение запаса и используется запас, равный 20% от высоты расчётной волны.

Отметка гребня оградительных сооружений вертикального профиля с парапетом должна назначаться из условия недопустимости заплеска волн со стороны акватории, т.е. по формуле (60), а отметка парапета для ПГТС вертикального типа будет являться аналогом отметки гребня для ПГТС откосного профиля без парапета. Тогда для определения возвышения парапета относительно расчётного уровня акватории для оградительных сооружений вертикального профиля с учётом недопустимости перелива волн через верх сооружения и с учётом климатических изменений уровня режима акватории, предлагается использовать следующую формулу (65):

$$H_{\text{парапета}} = \eta_{\text{max},1\%} + 0.2h_{1\%} + \Delta H_{\text{перспективное}} \quad (65)$$

где запас следует принять равным  $0.2h_{1\%}$ , но не менее 0.5 метра [стр.94, 138 и п.5.2.11, 252];  $\eta_{\text{max},1\%}$  – наибольшее значение отметки волновой поверхности у стены при действии стоячей волны однопроцентной обеспеченности на вертикальную стену.

Наибольшее значение отметки волновой поверхности у стены при действии стоячей волны однопроцентной обеспеченности на вертикальную стену в СНиП 2.06.04-82\* определялось расчётом по формуле (66) [п.1.2, 278]:

$$\eta_{\text{max}} = h_{1\%} + \frac{\pi \cdot h_{1\%}^2}{\lambda_s} \operatorname{cth} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda_s} \right) \quad (66)$$

В действующей редакции СП 38.13330, в отличие от СНиП 2.06.04-82\*, данная формула заменена номограммой, представленной в [рис.Г.1, 276], и должна быть использована при проектировании новых ПГТС. Таким образом, описанная выше методика позволяет учесть при проектировании прогнозные климатические изменения уровня режима акватории и обеспечить выполнение условия

незатопляемости. Графически предлагаемую методику показывает Рисунок 130 [адаптировано из рис.5.1, 252].

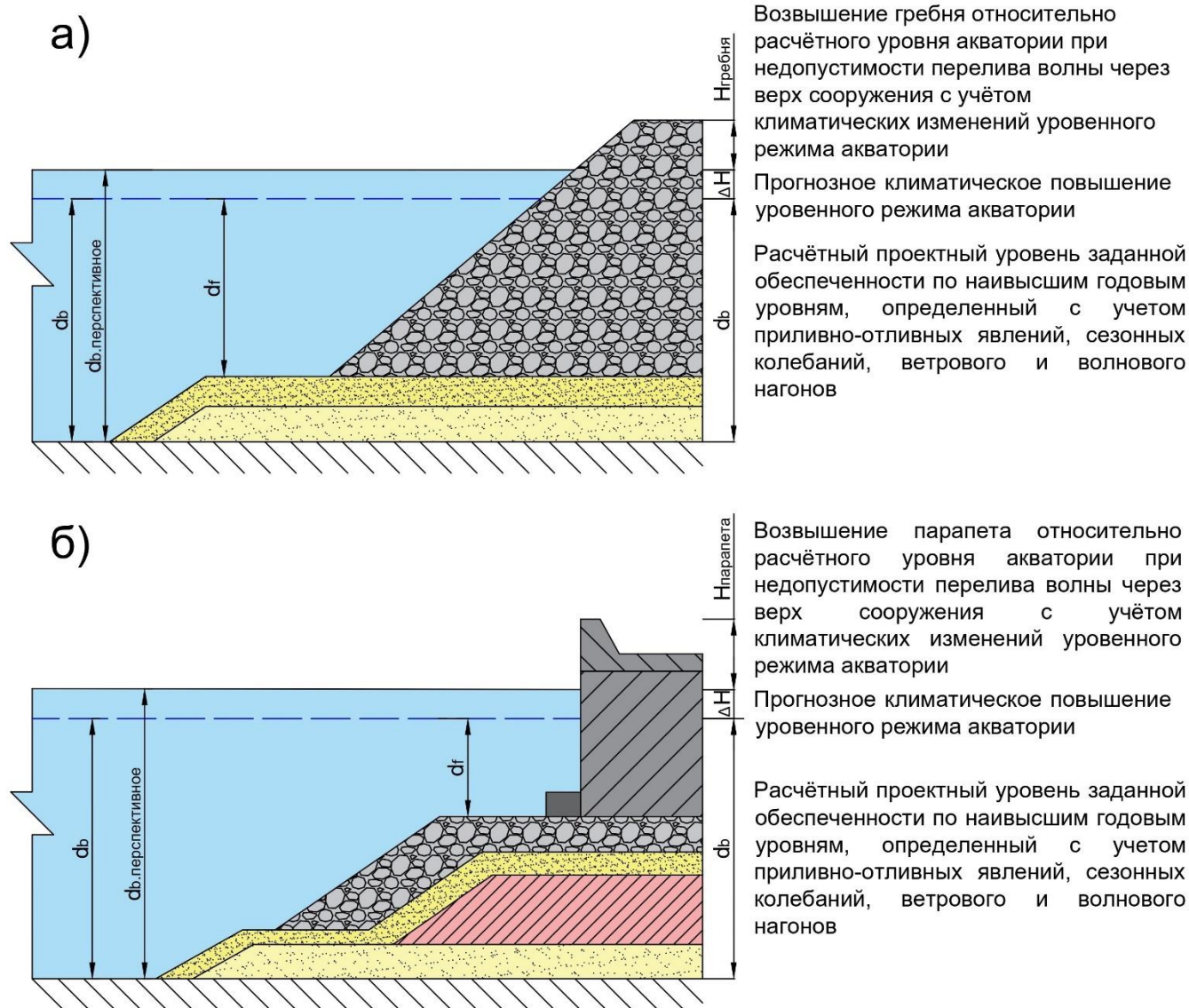


Рисунок 130 - Схема к определению отметки гребня и парапета для оградительных ПГТС: а) откосного профиля; б) смешанного или вертикального профиля.

#### 4.5. Моделирование ПГТС в условиях климатических изменений уровня режима акватории

При проектировании гидротехнических сооружений повышенной ответственности для верификации расчётов используется физическое и численное моделирование. В соответствии с СП 32-103-97 моделирование береговых процессов (в рамках данной работы такая классификация полностью применима) подразделяется на [п.3, 281]:

а) «гидравлическое, проводимое в волновых бассейнах и лотках, основанное на полном взаимном соответствии механических систем (явлений, процессов), при котором результаты исследования одной из них могут быть вполне достоверно распространены на другие. При этом необходимо соблюдать условия геометрического, кинематического и динамического подобия»;

б) «математическое моделирование, заключающееся в описании какой-либо физической системы (процесса, явления) математическими символами в виде функциональной зависимости (уравнения), связывающей переменные величины, характеризующие некоторое состояние данной системы, с переменными, характеризующими проявления воздействующих на нее факторов».

При этом в практике гидротехнического строительства в последние годы помимо классического численного и физического моделирования [33, 103, 115, 166], получил распространение метод «композитного моделирования» (или «гибридного моделирования») ПГТС, базирующийся на «интегрированном и сбалансированном совместном использовании гидравлического и численного моделирования» [163]. Сама по себе идея использования «гибридного» моделирования как одновременного применения численного и гидравлического моделирования не является чем-то новым и описана ещё советской научной школой [96], однако развитие численных методов моделирования гидрофизических процессов значительно расширило возможности такого метода моделирования [32].

В данной работе проведено моделирование причала – мола Г-образной формы ячеистой конструкции прямоугольного профиля из трубошпунта, предназначенного для постоянной швартовки плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» электрической мощностью 70 МВт в городе Певек Чукотского автономного округа Российской Федерации (см. Рисунок 131 [316]). Выбор данного объекта обусловлен тем, что, как уже отмечалось ранее, сектор восточной Арктики потенциально подвержен существенному потенциальному росту уровня режима, и порт Певек входит в тройку портов с наибольшим прогнозным ростом уровня режима при сроке

эксплуатации 100 лет (см. раздел 2.5), а научное сопровождение проекта данного сооружения разрабатывалось при непосредственном участии проф. И.Г. Кантаржи на кафедре ГиГС НИУ МГСУ [90].



Рисунок 131 - Фотография реализованного причала – мола для ПАТЭС «Академик Ломоносов» г. Певек (объект – аналог) [316].

В связи с тем, что причал – мол в данном случае является сооружением, обеспечивающим швартовку и защиту от волнового воздействия атомной электростанции, то при разработке проекта рассматривались волны 1% обеспеченности в системе шторма повторяемостью один раз в 10000 лет. Данный пример не является показательным, поэтому для проведения моделирования рассматривались волны 1% обеспеченности в системе шторма повторяемостью один раз в 100 лет, в соответствии с требованиями СП 38.13330.

В связи с тем, что рассматривается уже реализованный проект оградительного сооружения, то выбранный ранее временной интервал с 2030 по 2130 год не является подходящим, поскольку превысит 100-летний период жизненного цикла сооружения. ПАТЭС «Академик Ломоносов» была запущена в эксплуатацию в 2020 году, поэтому рассматриваемым периодом будет 2020 – 2120 гг., за который для данного региона рост уровня режима акватории при квантиле 50% по сценарию SSP5-8.5 составит 122.6 см [335]. Для проведения модельных испытаний принято решение рассматривать угол подхода волн к

сооружению с волноопасных направлений, равный  $90^\circ$  к оси ограждающего сооружения.

#### 4.5.1. Условия для проведения физического эксперимента

Для физического моделирования волнового воздействия на причал – мол для ПАТЭС «Академик Ломоносов» (далее по тексту – Сооружение) был выбран ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (прежнее название – Черноморское отделение ЦНИИТ), расположенный в г. Сочи (далее по тексту – Лаборатория). Данная Лаборатория обладает требуемой материально – технической базой и опытом проведения физических испытаний гидротехнических сооружений, достаточными для целей данной работы.

Моделирование Сооружения базируется на необходимости достоверного воспроизведения физики процесса волнового воздействия на модели заданного масштаба. При физическом моделировании воздействий на ПГТС «главным образом используется линейное соответствие между моделью и натурой» [96], которое может быть описано формулой (67):

$$X_M = m_L \cdot X_N \quad (67)$$

где  $X_M$  – параметр модели;  $X_N$  – параметр моделируемого объекта (натуры);  $m_L$  – коэффициент пропорциональности (линейный масштаб).

Моделируемая конструкция и расчётные волны имеют следующие параметры:

- $d = 10.91$  м;
- $h_{d,1\%} = 3.162$  м;
- $T_{1\%} = 6.396$  с;
- $\lambda_{d,1\%} = 63.866$  м.

Для целей физического моделирования воздействия расчётной волны на портовое ограждающее сооружение вертикального типа целесообразно использовать гидравлический лоток со стационарным волнопродуктором, т.е. гидроволновой лоток. Под термином «гидроволновой лоток» в [260] подразумевается «Экспериментальная установка, позволяющая изучать плоские

задачи гидротехники». В соответствии с классификацией, содержащейся в [35] волнопродукторы подразделяют на щитовые возвратно – поступательные, щитовые колеблющиеся, плунжерные и пневматические (см. Рисунок 132 [35]).

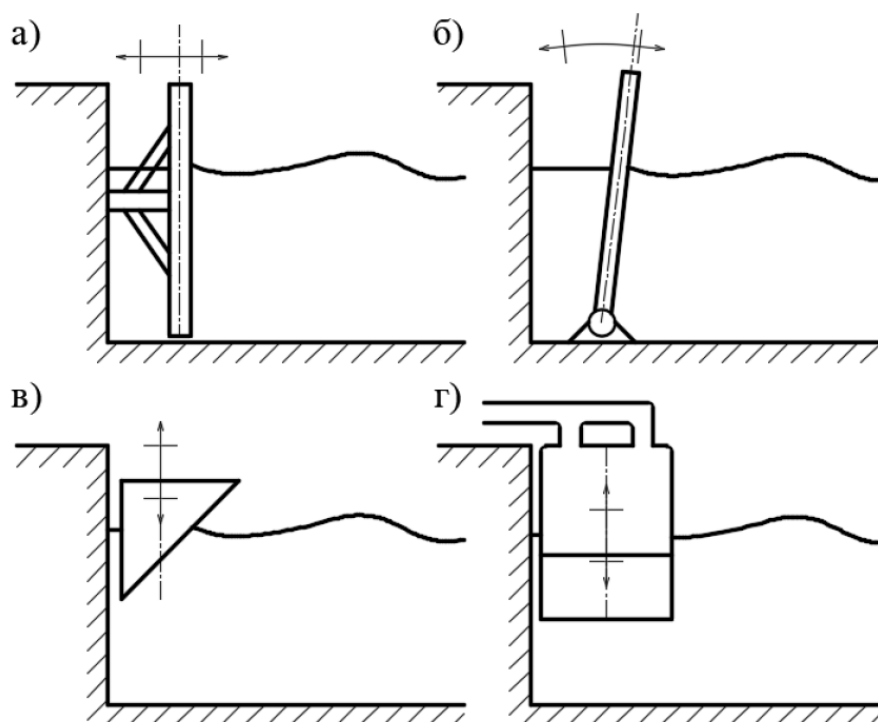


Рисунок 132 - Типы генераторов волн: а) щитовой возвратно-поступательный; б) щитовой колеблющийся; в) плунжерный; г) пневматический [35].

Подобная практика является классической для такого рода задач и положительно зарекомендовала себя за десятилетия использования, так в [стр.144, 117] отмечено, что для строительства крупного порта в Средиземном море «Проектные решения по оградительному сооружению были проверены на модели в гидравлическом лотке, а компоновочные решения по расположению причалов – на крупномасштабной модели».

В Лаборатории располагается гидроволновой лоток (см. Рисунок 133), включающий в себя:

- Гидравлический лоток длиной 20 метров, шириной 0.6 метра и высотой стенок 1 метр (см. Рисунок 134), состоящий из отсеков шириной 0.8 метра со смотровым окном шириной 0.7 метра;

- Щитовой колеблющийся волнопродуктор, установленный в прямке у одной из торцевых стенок, позволяющий генерировать периоды волн примерно от

1 секунды и более в зависимости от параметров волн и глубины, а также высоты волн примерно от 3 до 25 см в зависимости от подводного рельефа и т.д.



Рисунок 133 - Гидроволновой лоток для гидравлического моделирования.

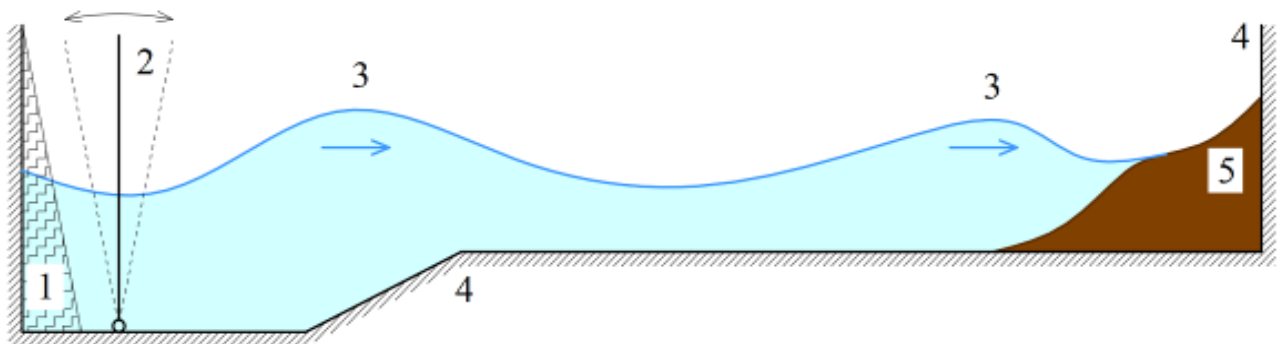


Рисунок 134 - Схема гидроволнового лотка, где 1 – волногаситель; 2 – волнопродуктор; 3 – волна; 4 – стенка лотка; 5 – модель.

В связи с имеющимися ограничениями лотка, связанными с высотой стенок равной 100 см, выбор масштаба будет определяться из условия не превышения моделируемой волной стенок волнового лотка, т.е. недопущения перелива. Поскольку в лотке моделируются условия мелководья, то на удалении примерно 9 метров от волнопродуктора устроено повышение поверхности дна, выполненное из бетона (далее по тексту – Рельеф) (см. Рисунок 135).

При этом в соответствии с ГОСТ [260] расположение модели сооружения в экспериментальной установке выполняется на расстоянии от волнопродуктора равном не менее 5 длин волн, т.е. для выполнения данного условия сооружение придётся расположить на рельефе. Таким образом, для моделируемого участка исходная высота стенок, равная 100 см, уменьшается на высоту Рельефа и глубину спокойного уровня воды в лотке.



Рисунок 135 - Гидроволновой лоток для гидравлического моделирования с рельефом.

Требования нормативной документации [260] устанавливают, что физическая модель – это «изделие, являющееся пространственным воспроизведением объекта, сооружения или его элемента в установленном масштабе», а «при выполнении физического моделирования волновых воздействий на портовые гидротехнические сооружения должно быть обеспечено механическое подобие объекта и модели». Под термином «механическое подобие» в [260] понимается «совокупность геометрического, кинематического и динамического подобий», где в соответствии с [260]:



- Геометрическое подобие – это подобие, при котором обеспечивается форма и одинаковые пропорции линейных размеров между объектом и моделью;

- Кинематическое подобие – это подобие, при котором при выполнении геометрического подобия обеспечивается одинаковое направление скоростей течения, а величины скоростей во всех сходных точках объекта и модели различаются в одинаковое число раз;

- Динамическое подобие – это подобие, при котором обеспечивается равное направление и соотношение сил, действующих на объект, в натуре и на модели.

Геометрическое подобие обеспечивается выполнением соотношения в формуле (67), позволяя определять линейные размеры (геометрические размеры сооружений и их элементов, глубины, высоты и длины волн и т. п.), которые принимаются в линейных масштабах (вертикальном и горизонтальном) и могут быть равными или нет. В данной работе рассматривается случай равенства вертикального и горизонтального масштабов в связи с отсутствием необходимости в искажении масштабов.

Для выполнения кинематического и динамического подобий требуется соблюдение ряда критериев подобия. При проведении модельного эксперимента в океанологии рассматривается 16 критериев подобия [145], которые учитывают как «течение жидкости, вызванное движением в нем тела» [145], так и «свободные движения жидкости, вызванные различием плотности или температуры в разных её частях» [145]. Однако для моделирования волнового воздействия на гидротехнические сооружения достаточно выполнение 4 критериев подобия [96, 128, 145] (безразмерные коэффициенты, полученные при нормировании уравнений Навье – Стокса [96]):

- Критерий Струхалия (или критерий гомохронности) – характеризует отношение гидродинамических инерционных сил, зависящих от времени, к силам инерции, связанным с конвективными ускорениями. Определяется по формуле (68):

$$Sh = \frac{v \cdot t}{L} \quad (68)$$

- Критерий Фруда – характеризует отношение сил тяжести к силам инерции. Определяется по формуле (69):

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot L} \quad (69)$$

- Критерий Эйлера (или коэффициент давления) – характеризует отношение сил давления к силам инерции. Определяется по формуле (70):

$$Eu = \frac{P}{\rho \cdot v^2} \quad (70)$$

- Критерий Рейнольдса – характеризует отношение сил вязкости к силам инерции. Определяется по формуле (71):

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (71)$$

где  $v$  – характерная скорость;  $t$  – время (период волны);  $L$  – характерный линейный размер (длина волны);  $P$  – давление жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

При этом стоит отметить, что «невозможно совместить наиболее существенные условия гидравлического подобия при одинаковых свойствах жидкости на модели и в натуре» [96], а «несовместимость критериев подобия определяет необходимость для реального осуществления моделирования отступить от строгого подобия явлений, но так, чтобы не утратить в результатах исследования наиболее существенное, не получить больших искажений искомых величин» [96]. В связи с этим будет реализовано приближенное подобие, т.е. «такое подобие, которое обеспечивает определение прогнозируемых функций с заданной степенью точности при нарушении некоторых условий подобия» [96]. ГОСТ [п.4.2.2., 260] устанавливает необходимость обеспечить  $Fr = idem$ , т.е. «равенство масштабов сил тяжести и инерции» [96].

«Явление, развивающееся во времени, называется автомодельным, если распределения его характеристик в разные моменты времени получаются одно из другого преобразованием подобия» [10], в гидравлике «автомодельная область

определяется как такой диапазон изменения критериев, в пределах которого для достижения подобия явления достаточно подобия граничных условий» [96]. Выполнение условия автомодельности, или иначе нахождение в зоне автомодельности, по одному или нескольким критериям подобия позволяет существенно упростить проведение физического эксперимента. При использовании масштаба более крупного чем 1:50, турбулентном режиме волнения, высоте волн более 10 мм и длине волн более 170 мм можно не учитывать действие сил капиллярного (поверхностного) натяжения (критерий Вебера), также в зоне автомодельности будет находиться критерий Рейнольдса, а при моделировании по критерию Фруда будет обеспечено выполнение условий Эйлера и Струхала [128].

Подобная позиция отражена в [260], где указывается, что «В качестве основного критерия подобия следует использовать число Фруда  $Fr$ , то есть необходимо обеспечить равенство чисел Фруда объекта и модели», и в [72], где указывается, что «для портовых гидротехнических сооружений моделирование удастся чаще всего выполнять по критерию Фруда». Научным сообществом было неоднократно показано, что моделирование по Фруду в масштабах крупнее 1:50 позволяет обеспечить выполнение критериев подобия при модельных экспериментальных исследованиях ПГТС [170]. Чтобы обеспечить равенство по числу Фруда линейных размеров, использовался линейный масштаб, а масштаб времени и периода волн определялся по формуле (72) [п.4.2.6, 260]:

$$m_T = \frac{T_M}{T_H} = \sqrt{m_L} \quad (72)$$

В связи со всеми вышеизложенным требованиями масштаб модели был принят равным 1:30, что соответствует:

- $d = 364$  мм;
- $h_{d,1\%} = 105$  мм;
- $T_{1\%} = 1.17$  с;
- $\lambda_{d,1\%} = 2.13$  м.

При принятом масштабе минимальное расстояние до волнопродуктора составило 8.75 метров, что теоретически позволило бы разместить модель и на участке без рельефа, однако такое размещение нецелесообразно. В выбранном для расположения сооружения отсеке расстояние до волнопродуктора превышает 9 длин волн, т.е. соответствует нормативным требованиям ГОСТа [260]. В рассматриваемом участке гидроволнового лотка высота рельефа составляет чуть более 20 см, в связи с этим с учётом уровня невзволнованной воды до верха лотка остаётся около 40 см, что для стоячей волны высотой 21 см является достаточным для недопущения перелива волны при подходе к сооружению. При этом масштаб 1:25 уже не обеспечил бы выполнение данного требования, в связи с этим принятый масштаб модели 1:30 является рациональным и соответствует нормативным требованиям.

Нормами [п.5.3, 260] устанавливается, что «Для гашения волн, распространяющихся в тыловую часть бассейна или лотка, а также для исключения отражения волн от границ модели следует устанавливать волногасители». При проведении экспериментальных исследований с целью исключения отражения волн в торцевой части лотка отсыпалась волногасящая берма (волногасящее покрытие из фасонных массивов) (см. Рисунок 136). Гашение отраженных волн от волнопродуктора не было реализовано, в связи с этим рассматривался пакет волн (до влияния отраженных волн от волнопродуктора). Пакет волн включал порядка 10 волн, при этом за рассматриваемую волну была принята шестая.

ГОСТ [п.4.1.3, 260] устанавливает следующие основные задачи, решаемые при проведении экспериментальных исследований в гидроволновом лотке:

- оценка устойчивости элементов сооружений;
- оценка волноотражающей и волногасящей способности элементов конструкций;
- определение волновых нагрузок на элементы конструкций;
- оценка заплесков (переливов) на сооружения и (или) территорию;
- иные задачи (при необходимости).



Рисунок 136 - Волногасящее покрытие из фасонных массивов в гидроволновом лотке для гидравлического моделирования. а) Вид по направлению от волнопродуктора; б) Вид по направлению к волнопродуктору.

В данной работе проведение физического эксперимента преследовало две задачи: определение волновых нагрузок на вертикальную грань сооружения и оценку заплесков (переливов) на сооружения и (или) территорию. Причём оценка заплесков (переливов) осуществлялась не только по критерию их наличия или отсутствия, а также включила и определение объёма заплесков (переливов) с последующим вычислением удельного расхода заплесков (переливов).

Для решения оговоренных выше задач проведение эксперимента было разделено на несколько серий:

а) Определение волновых нагрузок на вертикальную грань сооружения:

- Сооружение подвергается воздействию стоячих волн;
- Сооружение подвергается воздействию разбивающихся волн;

б) Оценка заплесков (переливов) на сооружения и (или) территорию:

- Сооружение подвергается воздействию стоячих волн;
- Сооружение подвергается воздействию разбивающихся волн.

Сначала рассматривался наиболее простой и соответствующий объекту – аналогу случай воздействия на сооружение стоячих волн. Для определения волновых нагрузок использовались поверяемые датчики давления Keller PR-41X: два датчика с диапазоном измерений  $0 \div 0.03$  бар и три датчика с диапазоном измерений  $0 \div 0.1$  бар. Для моделирования стоячей волны в проекте были предусмотрены все необходимые условия и не требовалось внесение каких – либо изменений. Измерения давления проводились в характерных точках в соответствии с методикой СП 38.13330, которая устанавливает расчётные точки при построении эпюры волнового давления с заглублением  $d$ ,  $0.5d$ ,  $0.25d$ ,  $0$  и  $\eta_c$  от уровня водной поверхности. В условиях проведения физического эксперимента невозможно установление датчика давления с заглублением оси равным  $d$ , в связи с этим была использована глубина равная примерно  $0.9d$ . Также в связи с изменением уровня режима в лотке, возникла проблема динамичности данных глубин на модели, решение которой описано далее.

Для определения заплесков (переливов) на сооружения и (или) территорию требуется определить рассматриваемые значения роста уровня режима акватории и разработать методологию, позволяющую оценить количественно заплески (переливы) на сооружение. Для определения удельного расхода заплесков необходимо знать возвышение отметки парапета над невзволнованной акваторией. Эта величина присутствует в проекте, однако, поскольку проект подразумевал использование расчётной волны 1% обеспеченностью в системе шторма повторяемостью 1 раз в 10000 лет, а в работе используется волна 1% обеспеченностью в системе шторма повторяемостью 1 раз в 100 лет, то возникла необходимость переназначить высоту возвышения парапета над невзволнованной поверхностью акватории.

В соответствии с методикой, выраженной в формуле (65), требуется задать значение параметра  $\Delta H_{\text{перспективное}}$ . В связи с этим перед переназначением отметки кордона необходимо описать методику физического моделирования роста уровня режима акватории. Обобщённо можно подразделить возможные подходы на две группы:

- Установление фиксированной высоты сооружения (разница отметок кордона и дна) и постепенное повышение уровня режима в лотке;
- Установление фиксированного уровня режима в лотке и изменение возвышения отметки парапета относительно уровня невзволнованной поверхности, т.е. параметра  $R_c$ .

При установлении фиксированной высоты сооружения и повышении уровня режима в лотке будет наблюдаться процесс, аналогичный происходящему в реальности, однако такая постановка задачи не позволяет отделить вклад в изменение объёма заплеска (перелива) от изменения параметров волнения, вызванных повышением уровня режима и от изменением параметра  $R_c$ . В связи с тем, что изменение параметров волнения при росте уровня режима акватории уже было достаточно подробно описано в разделах 3.2 и 3.3, а нормативная методика для определения удельного расхода заплеска (перелива) в РФ отсутствует, то при проведении физического моделирования было принято решение использовать подход с установлением фиксированного уровня режима в лотке и изменением параметра  $R_c$ , что обеспечило удобство сравнения полученных результатов, поскольку параметры волнения не изменялись во всех реализациях в рамках серии опытов.

Принятый подход к моделированию роста уровня режима акватории не позволяет использовать датчики давления для определения изменения волнового давления при росте уровня режима в гидроволновом лотке, в связи с этим описанная выше методика применялась при исследовании заплеска (перелива), а для исследования изменения давления производилось повышение уровня режима. Таким образом, было обеспечено использование наиболее подходящей методики для каждой из групп серий реализаций.

При принятых подходах к моделированию роста уровня режима акватории, а равно уменьшению параметра  $R_c$ , было принято  $\Delta H_{\text{перспективное}} = 0$ , тогда для определения возвышения кордона относительно уровня невзволнованной акватории использовалась формула (73), объединяющая формулы (65) и (66):

$$H_{\text{парапета}} = h_{1\%} + \frac{\pi \cdot h_{1\%}^2}{\lambda_s} \operatorname{cth} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda_s} \right) + 0.2h_{1\%} + \Delta H_{\text{перспективное}} \quad (73)$$

$$H_{\text{парапета}} = 3.162 + \frac{\pi \cdot 3.162^2}{52.460} \operatorname{cth} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot 10.91}{52.460} \right) + 0.2 \cdot 3.162 + 0 = 4.488 \text{ м}$$

По результатам выполненного расчёта было принято  $H_{\text{парапета}} = 4.5$  м, что в заданном масштабе  $m_L = 1/30$  соответствует  $H_{\text{парапета.модели}} = 150$  мм и  $\eta_{\text{max.модели}} = 128.51$  мм. Тогда при  $d = 364$  мм и  $H_{\text{парапета.модели}} = 150$  мм полная высота модели от дна до верха «парапета» составила 514 мм.

ГОСТом [260] устанавливается, что «Исследования проводятся только при фронтальном подходе волн. При этом модель должна занимать всю ширину лотка» [п.5.2, 260], в связи с этим во всех сериях экспериментов была обеспечена реализация модели, перекрывающей лоток по всей его ширине (595 мм при ширине лотка 600 мм) с герметизацией участков стыков модели со стенками лотка и рельефом с помощью прозрачного силиконового герметика.

Для расчётов волнового давления требуется значение величины ускорения свободного падения, которое для региона проведения физического моделирования было принято равным 9.803, а также плотность воды. Для определения плотности жидкости, используемой при физическом моделировании, была взята проба (см. Рисунок 137) и определена её плотность при температуре окружающего воздуха 20-22°C, соответствующей условиям проведения эксперимента, а также 29°C, 31°C и 34°C. По результатам проведённых измерений плотность жидкости была принята равной одной тонне на метр кубический (с точностью до тысячных).





Рисунок 137 - Проба воды из гидроволнового лотка.

Систематические погрешности измерений периодов, длин и высот волн практически исключались путем независимого контроля с помощью секундомера и методом цифрового фотографирования и видеосъемки. После необходимого увеличения кадров цифровой видеосъемки длина и высота волн определялась по шкалам дальности и высот, нанесенных на стенки ограждения модели. Период волн определялся по секундомеру путем отсчета  $n$ -го количества волн, проходящих через определенную отметку шкалы дальности в течение времени  $t$ . Тарировка датчиков осуществлялась до и после измерений. Погрешности измерений не превышали 5%. Абсолютная погрешность результатов измерений средней высоты волн не превышала  $\pm 1$  мм, а периодов –  $\pm 0,1$  с. Для чистоты экспериментов исходный волновой режим в лотке подбирался без сооружений. Каждый опыт повторялся не менее трех раз.

#### 4.5.2. Эксперименты для определения волновых нагрузок

При принятом возвышении парапета для определения волновых нагрузок требуется определить положение датчиков волнового давления. Поскольку при повышении уровня в гидроволновом лотке для точного совпадения точек измерения с расчётными точками, установленными СП 38.13330, требуется изменение положения датчиков давления, было принято упрощение, подразумевающее фиксированное расположение точек на проектном (наименьшем из рассматриваемых) уровне воды или ниже, и переменное положение датчика давления над уровнем воды. Таким образом, была получена следующая схема расположения датчиков давления (см. Рисунок 138) и её практическая реализация (см. Рисунок 139).

Для физического моделирования волнового воздействия на сооружение в условиях роста уровня режима акватории было решено реализовать 5 моделируемых уровней: +0 см (проектный), +1.5 см, +3.0 см, +4.5 см, +6.0 см. (см. Рисунок 140), соответствующих уровням в натуральных величинах: +0 см, +45 см, +90 см, +135 см, +180 см. Принятые уровни позволяют моделировать рост уровня режима в порту Певек вплоть до прогнозного значения 83 перцентиля сценария SSP5-8.5, которому соответствует рост уровня режима равный 168.9 см.

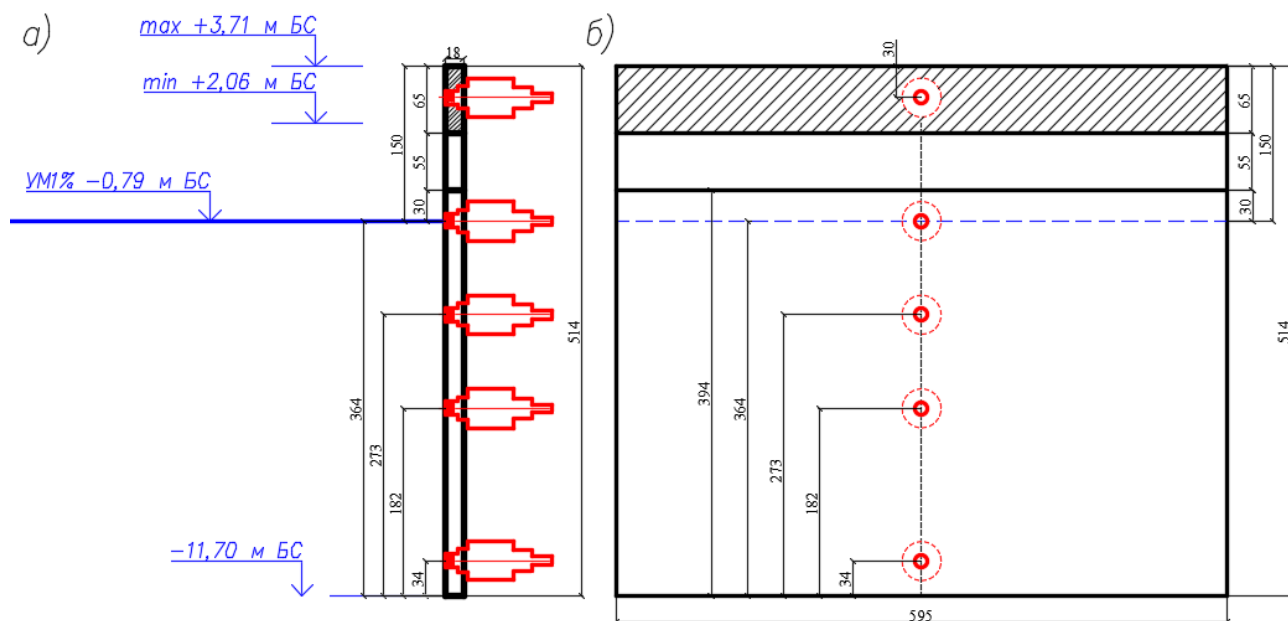


Рисунок 138 - Схема расположения датчиков волнового давления на модели сооружения без бермы: а) разрез вдоль гидроволнового лотка; б) разрез поперёк гидроволнового лотка.

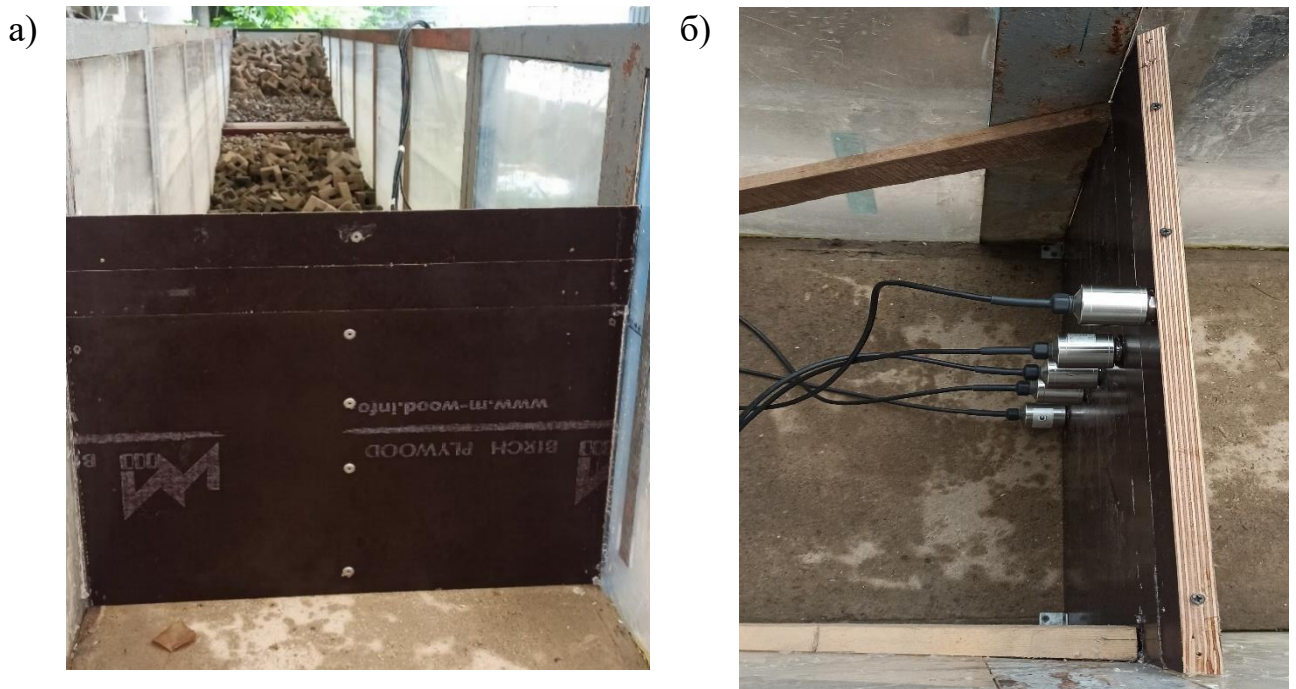


Рисунок 139 - Расположение датчиков волнового давления на модели сооружения без бермы: а) вид по направлению от волнопродуктора; б) вид сверху.

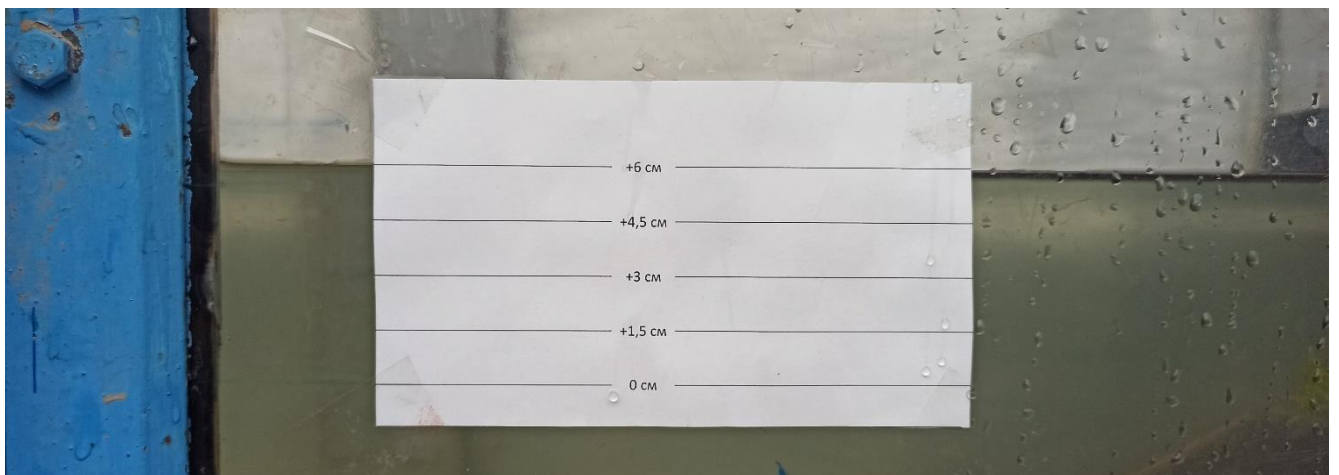


Рисунок 140 - Фотография опытного лотка с урочным режимом +6.0 см (в модельных величинах).

Для моделирования воздействия разбивающихся волн было принято решение не переносить модель на другой участок гидроволнового лотка, а реализовать её в том же месте с устройством бермы из материала сооружения (фанера толщиной 18 мм), благодаря чему было минимизировано влияние волногасящих свойств бермы на параметры волнения. Реализация модели с бермой на том же участке гидроволнового лотка позволила исключить появление погрешностей, связанных с изменением параметров волнения и рельефа.

Для создания условий образования разбивающихся волн были приняты следующие габариты модели бермы: высота 290 мм, ширина по основанию 550 мм, ширина по гребню 100 мм. Датчики давления были расположены аналогично модели без бермы (см. Рисунок 141 и Рисунок 142).

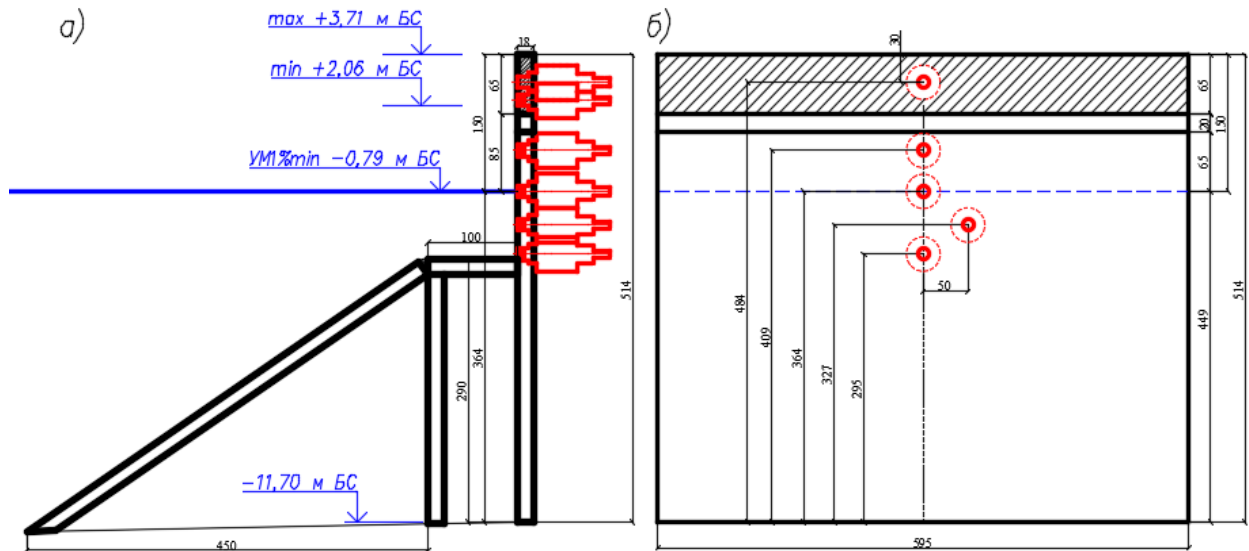


Рисунок 141 - Схема расположения датчиков волнового давления на модели сооружения с бермой: а) разрез вдоль гидроволнового лотка; б) разрез поперёк гидроволнового лотка.



Рисунок 142 - Фотографии расположения датчиков волнового давления на модели сооружения с бермой: а) вид по направлению к волнопродуктору; б) вид по направлению от волнопродуктора.

Рисунок 84 показывает, что максимальное давление разбивающихся волн относительно стоячих будет наблюдаться при  $\frac{d_{br}}{h} \approx 0.7$ , в связи с этим высота бермы была принята равной 290 мм для обеспечения выполнения данного условия. При принятой высоте бермы  $\frac{d_{br}}{h} = \frac{364-290}{105} \approx 0.705$ . Рисунок 143 показывает реализованные модели сооружения, которые были применены в группе опытов по определению волновых нагрузок на сооружение. Датчики были установлены в строгом соответствии со схемами, представленными на Рисунок 138 и Рисунок 141 (см. Рисунок 144).

Данные с датчиков волнового давления Keller PR-41X (см. Рисунок 145) обрабатывались в сертифицированном программном обеспечении, которое позволило визуализировать полученные данные по давлению в каждом из датчиков (см. Рисунок 146) и сохранить полученные результаты в табличном виде.

а)



б)



Рисунок 143 - Фотографии моделей сооружения и измерительного оборудования: а) вид поперёк гидроволнового лотка на модель без бермы и уровнем +3.0 см; б) вид поперёк гидроволнового лотка на модель с бермой и уровнем +0.0 см.

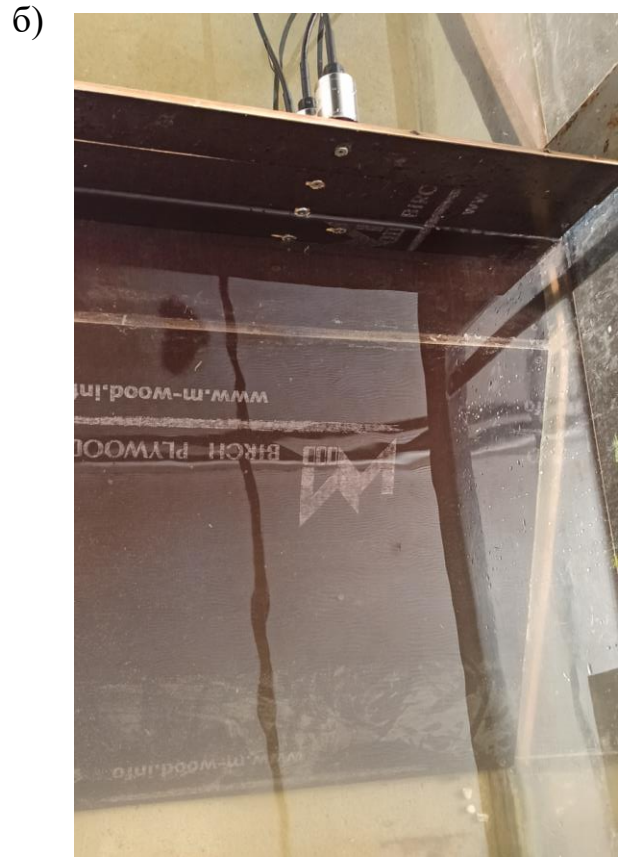


Рисунок 144 - Фотографии моделей сооружения и измерительного оборудования:  
 а) модель без бермы с уровнем +0.0 см; б) модель с бермой и уровнем +0.0 см.



Рисунок 145 - Фотографии модели 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.

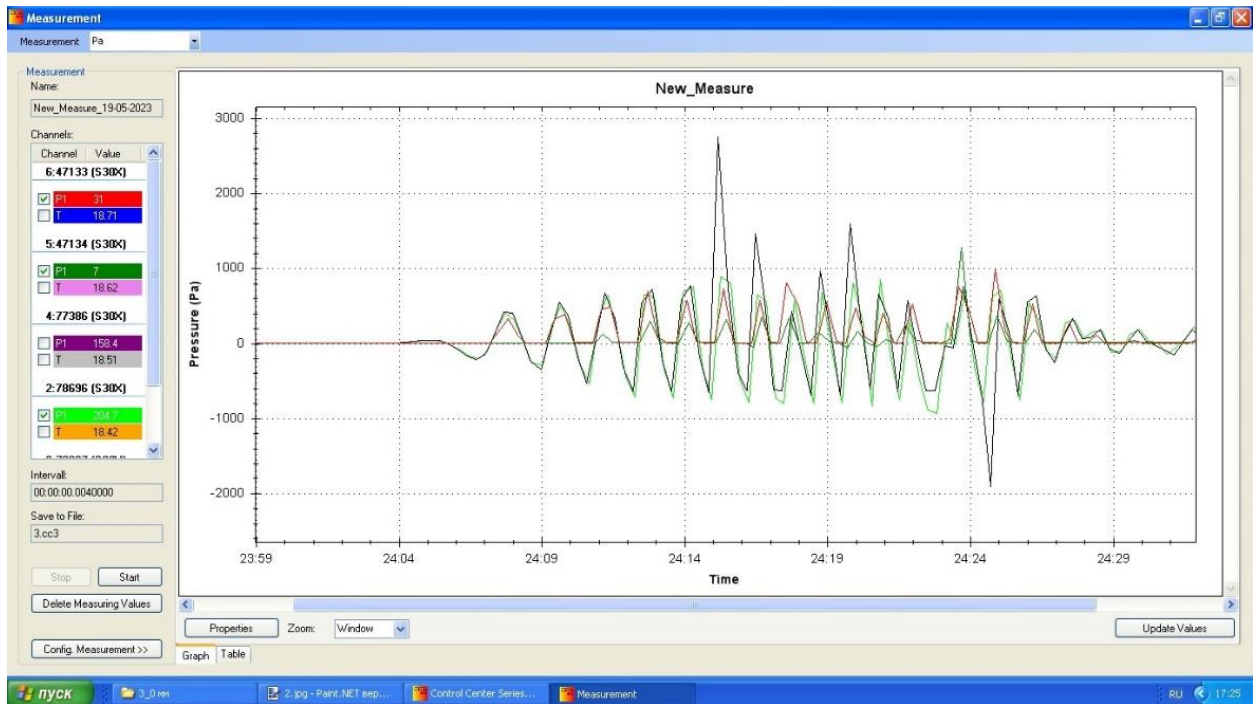


Рисунок 146 - Пример волнограммы, полученной с помощью датчиков для измерения волнового давления Keller PR-41X для одной из реализаций при моделировании разбивающейся волны (указания по оси абсцисс «N:M» следует трактовать, как N минут и M секунд).

В связи с особенностями настроек волнопродуктора было принято решение моделировать 5 рассматриваемых уровней акватории при одинаковой вынуждающей силе (настройках), которая соответствует проектному уровенному режиму +0.0 см. Увеличение объёма воды в гидроволновом лотке при неизменных настройках волнопродуктора приводит к понижению высоты моделируемой волны при повышении уровенного режима. Описанный эффект не совпадает с тем эффектом, который должен наблюдаться в реальности, а именно рост высоты волны при повышении уровенного режима, однако данные изменения не значительны и при максимальном уровенном режиме +6.0 см отклонение высоты волны от моделируемой составляет не более 3.8%.

Подобранные параметры волнения при проектном уровне обеспечили среднюю (по реализациям) высоту стоячей волны  $\approx 105.66$  мм, т.е. отличие от моделируемой  $\approx 0.6\%$ , и  $T_{1\%} = 1.17$  с. Для стоячих волн было проведено 25 реализаций. Высоты замоделированных стоячих волн и их отличие от требуемых по расчёту показывает Рисунок 147. Проведение моделирования с увеличением

высоты волн между сериями экспериментов равным от 0.97 см до 1.23 см (рост высоты волны, вызванный повышением уровня режима акватории) в натуральных величинах соответствует изменению высоты моделируемой волны от 0.32 мм до 0.41 мм, что является плохо реализуемым в условиях эксперимента.

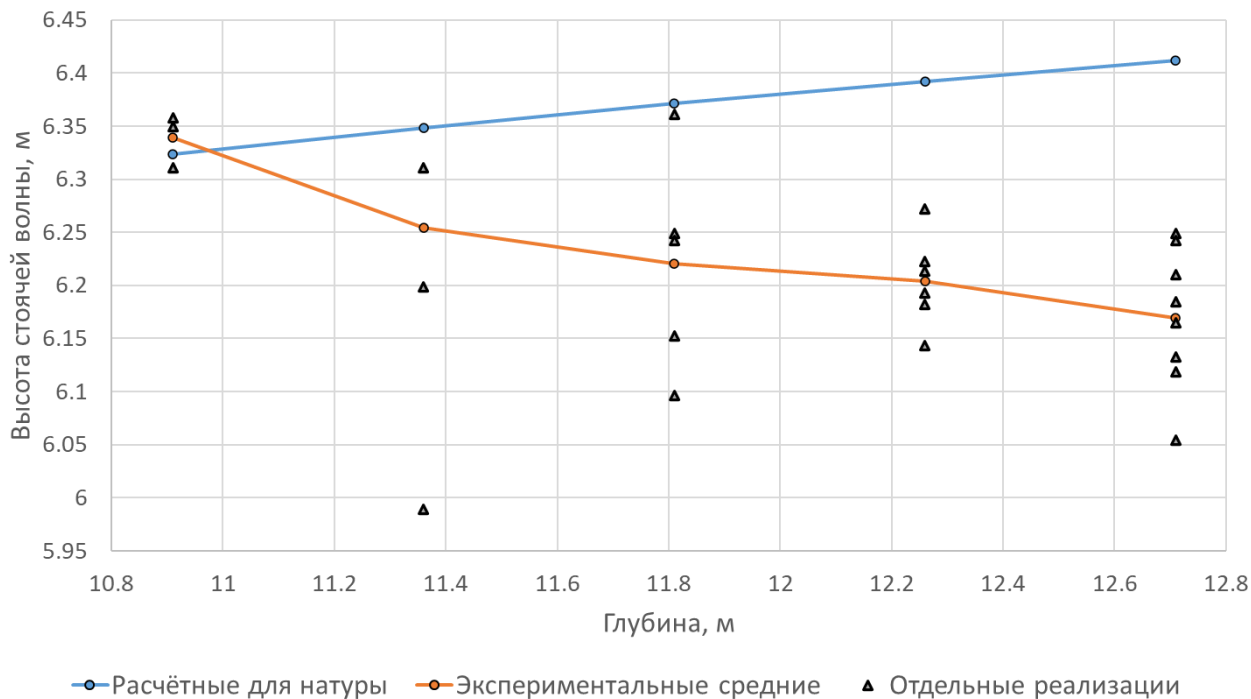


Рисунок 147 - Анализ высот замоделированных стоячих волн.

В связи с этим было проведено сопоставление полученных результатов расчётов и физического моделирования высот волн. Во всех сериях испытаний использовались 5 датчиков волнового давления, а полученные значения достраивались до эпюр с помощью следующих предположений:

- В точке с возвышением от уровня воды равным  $\eta_c$  волновое давление равно нулю;
- Величина волнового давления в точке с глубиной  $d_f$  вычисляется экстраполяцией значений в наиболее глубокой и следующей над ней точках с датчиками давления;
- Измерения проводятся с невысокой частотой  $\approx 0.3$  с, поэтому давление от волны в момент максимального воздействия может не попасть в набор измеренных значений. В связи с этим требуется проводить не менее трёх замеров с целью получения «пика» давления, соответствующего максимальному значению, на каждом из датчиков;



- При непопадании «пика» давления в измеренные датчиком данные проводятся дополнительные реализации до получения «пика».

В связи с принятой методикой проведения эксперимента было получено разное количество реализаций для каждой из серий испытаний, от 3 до 8. По результатам проведённого физического моделирования было выполнено 56 реализаций для различных уровенных режимов в лотке и при различных видах волновых нагрузок. По причине большого объёма полученных данных приводить их в табличном виде или в виде фотографий не целесообразно, в связи с чем далее показаны результаты обработки и анализа полученных данных. В соответствии с рекомендациями приложения Г [276] были рассмотрены эпюры волнового давления при максимальном значении горизонтальной волновой нагрузки на стену.

Также было проведено измерение волнового давления при воздействии разбивающихся волн в условиях неизменных настроек волнопродуктора, но при пониженной высоте стенки на 20 мм (соответствующих для объекта 0.6 м), для того чтобы оценить изменение эпюры волнового давления при наличии переливов (заплесков). Эта дополнительная часть эксперимента проводилась для уровенных режимов +0, +1.5 и +3 см. Проведённые физические испытания показали, что для стоячих волн (см. Рисунок 148) наблюдается хорошая сходимость полученных величин волнового давления (для максимумов эпюры  $\leq 10\%$ ) (см. Рисунок 149) и максимального возвышения уровня свободной волновой поверхности у лицевой грани сооружения (в среднем  $\leq 5\%$ ) (см. Рисунок 150), полученных в ходе моделирования и при расчёте по методике СП 38.13330.



Рисунок 148 - Фотография замоделированной стоячей волны в момент перелива через модель вертикального ПГТС ( $R_c = 2.7$  м, уровень +0.0 см) при  $\frac{R_c}{h_i} \cong 0.426$ .

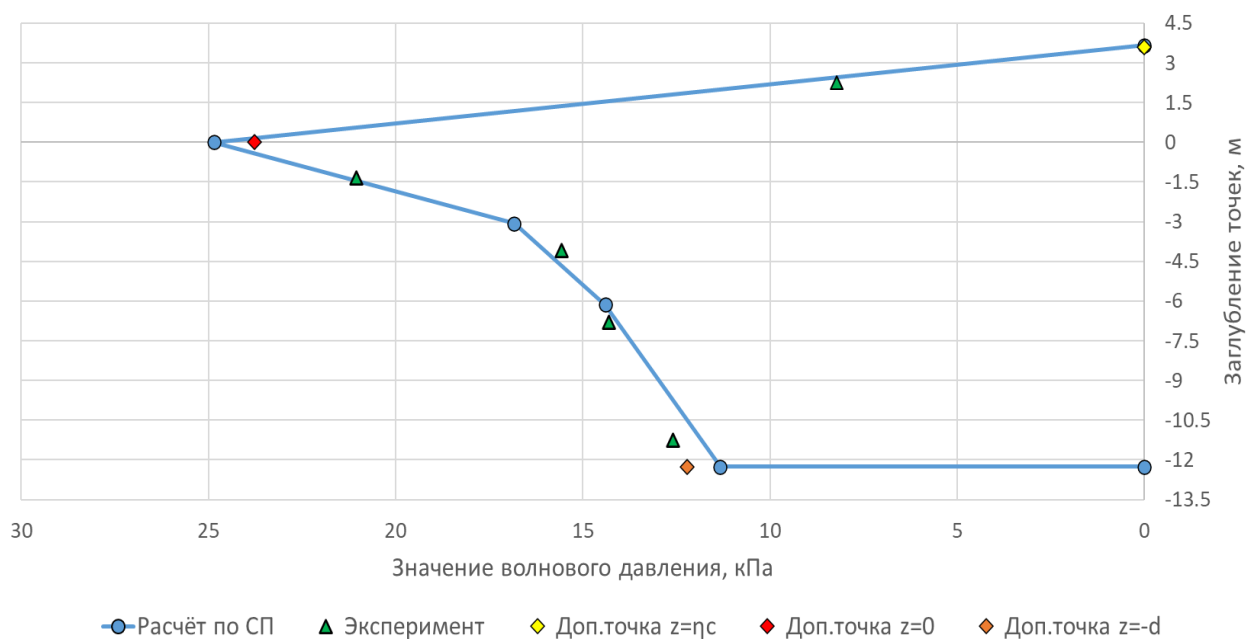


Рисунок 149 - Сопоставление данных проведённого моделирования волнового давления для стоячей волны (на примере серии +4.5 см).

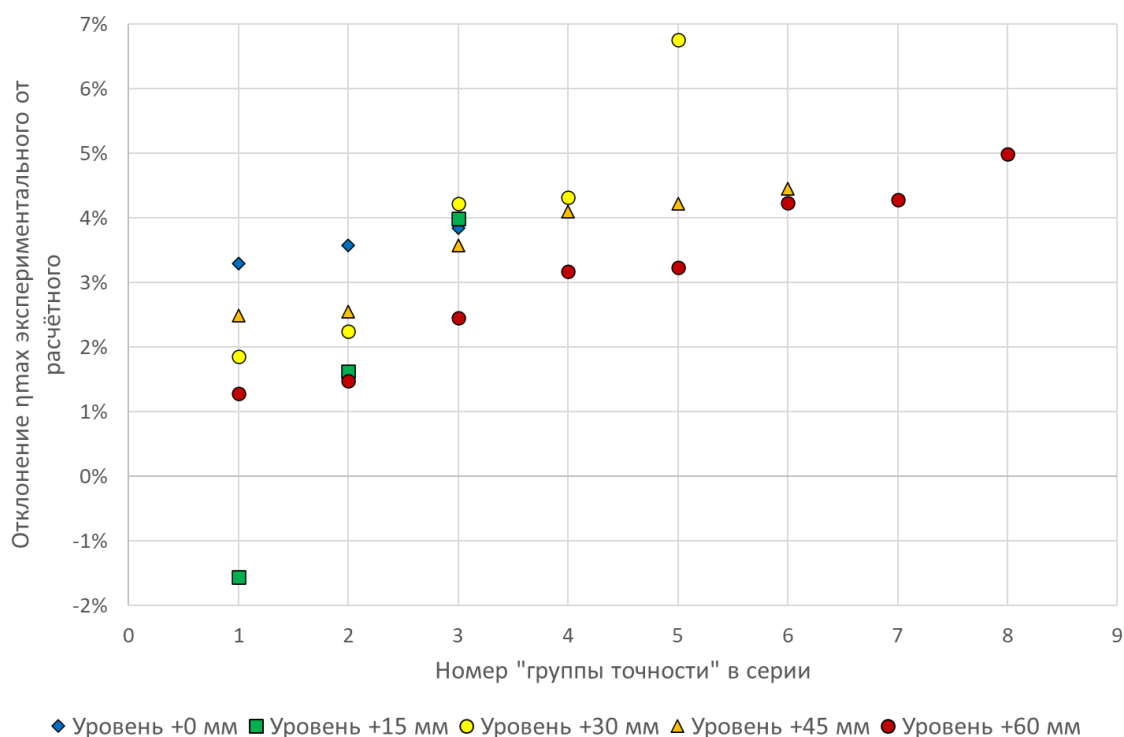


Рисунок 150 - Сопоставление данных проведённого моделирования максимального возвышения свободной волновой поверхности стоячей волны у лицевой грани сооружения.

Назначение высоты бермы 290 мм, т.е.  $\frac{d_{br}}{h} \approx 0.7$ , позволило добиться образования разбивающихся волн (см. Рисунок 151). Проведённые физические испытания для разбивающихся волн показали менее точное совпадение с расчётами. Максимум эпюры волнового давления, в отличие от методики СП

38.13330, наблюдался не на уровне невзволнованной волновой поверхности, а ниже данного уровня на глубине равной примерно  $\frac{1}{2} d_{br}$  (см. Рисунок 152).

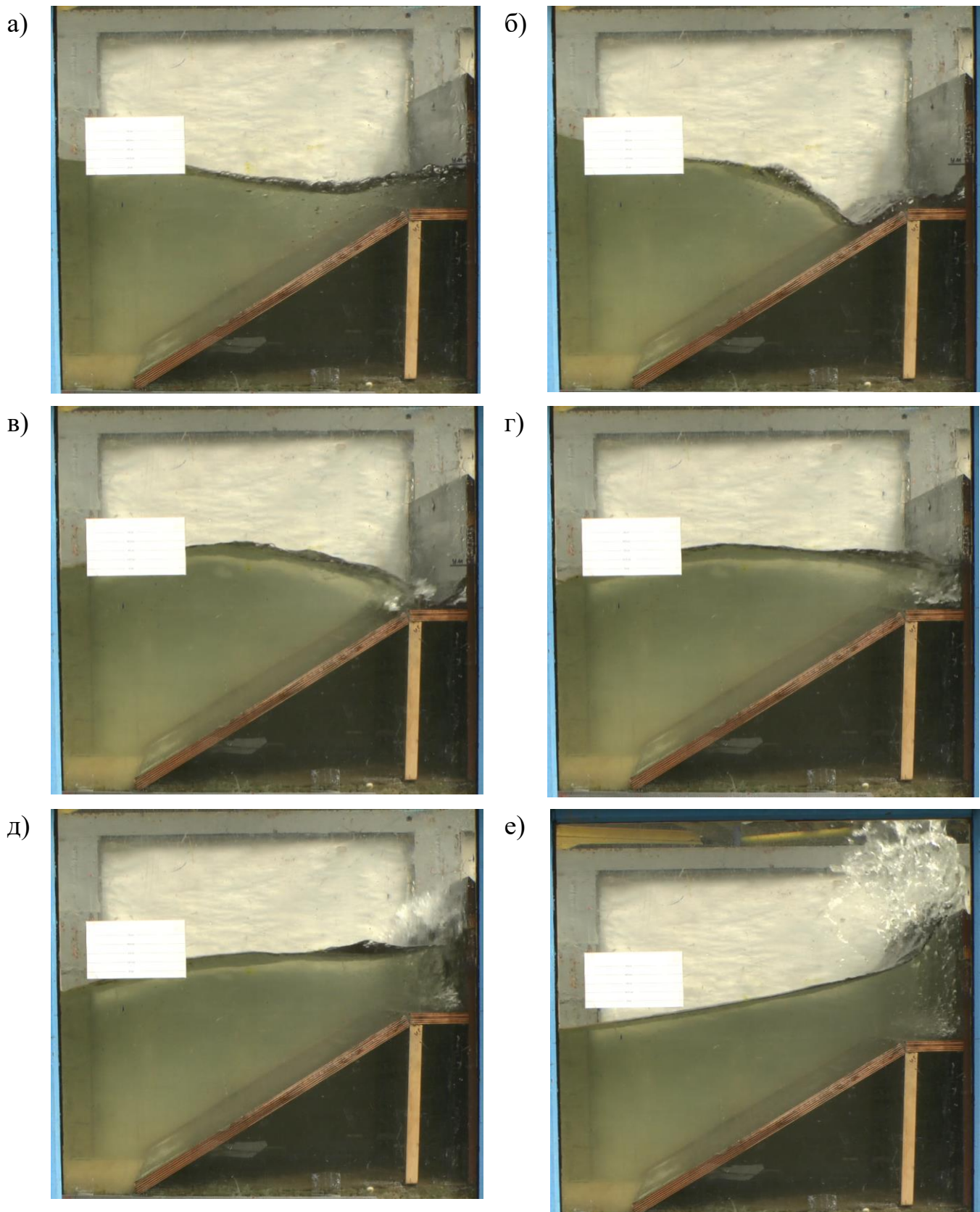


Рисунок 151 - Последовательные фотографии процесса обрушения разбивающейся волны на модель ПГТС с бермой.

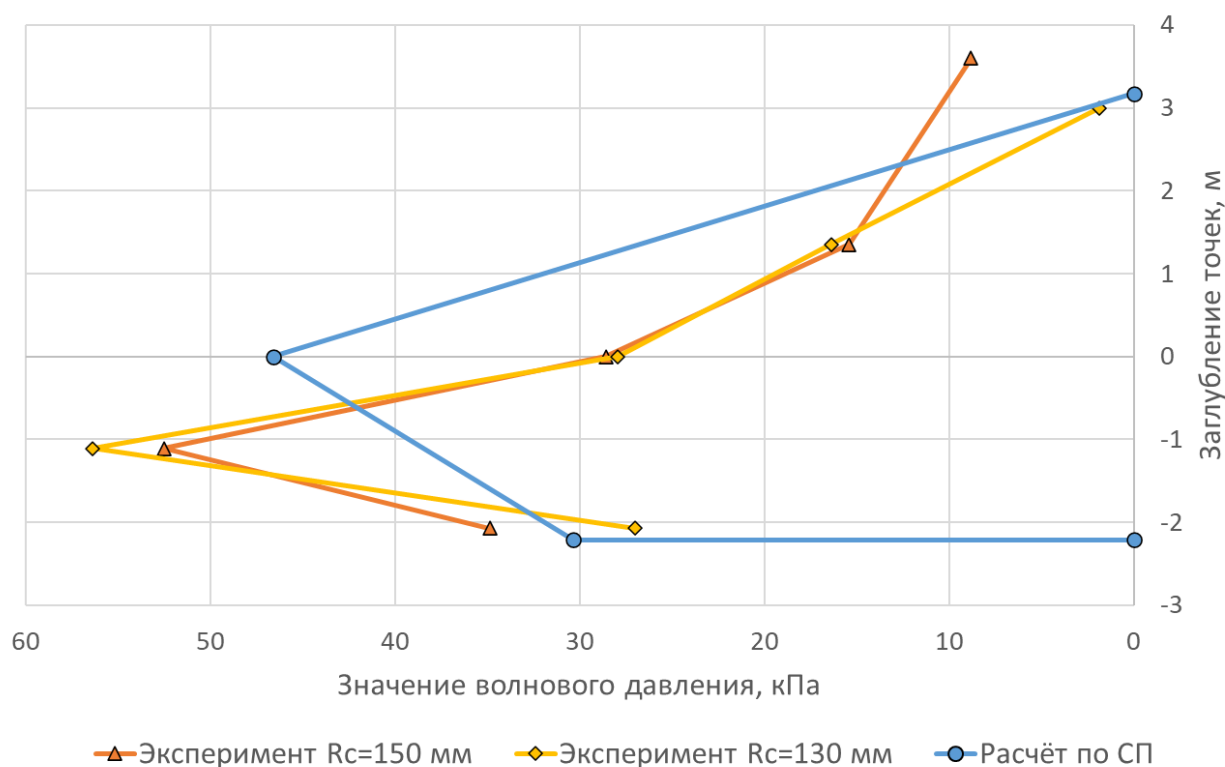


Рисунок 152 - Сопоставление данных проведённого моделирования волнового давления от разбивающейся волны у лицевой грани сооружения (на примере серии +0.0 см).

При этом реализация дополнительной серии с пониженным возвышением сооружения над уровнем акватории позволила сопоставить эпюры волнового давления и выявить снижение волнового давления в области эпюры, соответствующей её верхней точке ( $z=h$ ), которое может быть объяснено влиянием более высокого удельного расхода заплеска и, как следствие, изменением условий для динамического процесса обрушения разбивающихся волн. Также было установлено наличие противоречий между расчётом, выполненным по методике СП 38.13330, результатами физического эксперимента и ожидаемыми значениями в соответствии с Рисунок 84 [31, 138] (см. Рисунок 153).

Методика СП 38.13330 подразумевает, что максимум волнового давления находится на уровне невзволнованной поверхности и для одних и тех же условий строительства (расположение и плотность воды) зависит только от высоты подходящей волны. При этом Рисунок 84 [31, 138] указывает на наличие зависимости максимального давления не только от высоты волны, но и от глубины над бермой.

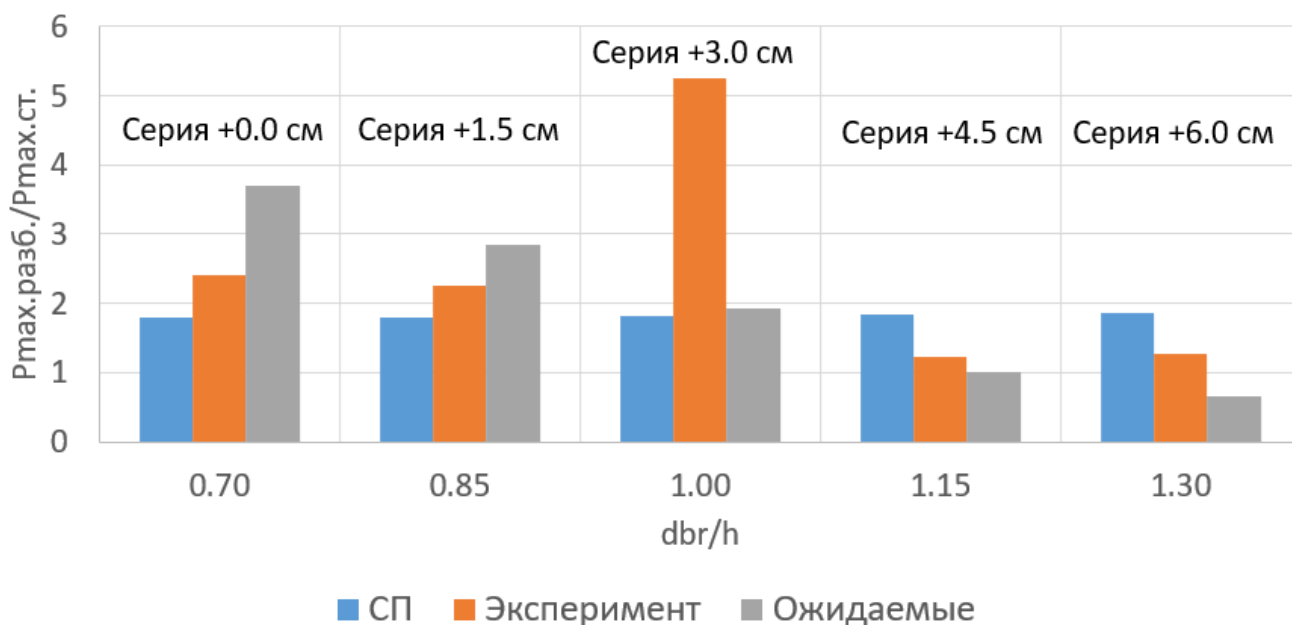


Рисунок 153 - Сопоставление данных проведённого моделирования волнового давления от разбивающейся волны у лицевой грани сооружения и Рисунок 84.

Методика СП 38.13330 подразумевает, что отношение максимального давления (на отметке 0) от разбивающихся волн к максимальному давлению от стоячих волн составляет:  $\frac{P_{max.разб.}}{P_{max.ст.}} = \frac{1.5 \cdot \rho \cdot g \cdot h}{k_2 \cdot \rho \cdot g \cdot h} = \frac{1.5}{k_2}$ , где  $k_2$  определяется по рис. Г.2 СП 38.13330 [276]. Для условий малых глубин над бермой условная расчётная глубина существенно снижается, что приводит к повышению значения  $k_2$ , и, следовательно, к снижению отношения  $\frac{P_{max.разб.}}{P_{max.ст.}}$ , что противоречит механике, которую описывает Рисунок 84 [31, 138], подразумевающей создание условий при  $\frac{d_{br}}{h} \cong 0.7$ , когда  $\frac{P_{max.разб.}}{P_{max.ст.}} \cong 3.7$ .

Хотя результаты физического эксперимента и превысили расчётные значения по методике СП 38.13330 в зоне  $\frac{d_{br}}{h} \geq 1$ , тем не менее наблюдается существенное отклонение и от методики СП 38.13330 и от механики, которую описывает Рисунок 84 [31, 138]. Полученные отличия объясняются особенностями проводимого физического моделирования. Согласно принятой методологии проведения физического моделирования использовались датчики волнового давления Keller PR-41X, с помощью которых были получены ряды измеренных величин волнового давления с невысоким шагом измерений (частотой). В связи с динамичностью процесса обрушения разбивающихся волн на лицевую грань

сооружения, при имеющемся шаге по времени измерение максимального значения волнового давления при воздействии расчётной волны не гарантировано, поскольку «пик» волнового давления может произойти в промежуток времени между измерениями.

Для получения «пиков» волнового давления использовалась описанная ранее методика, подразумевающая не менее 3 реализаций в каждой серии и проведение дополнительных реализаций в случае неполучения «пика» в рядах измерений. Однако периодически происходит ошибка, связанная с ложной идентификацией «пика» давления, например в реализациях №2-5 серии с уровнем +3.0 см ( $\frac{d_{br}}{h} = 1$ ) были получены следующие волнограммы воздействия разбивающихся волн (см. Рисунок 154).

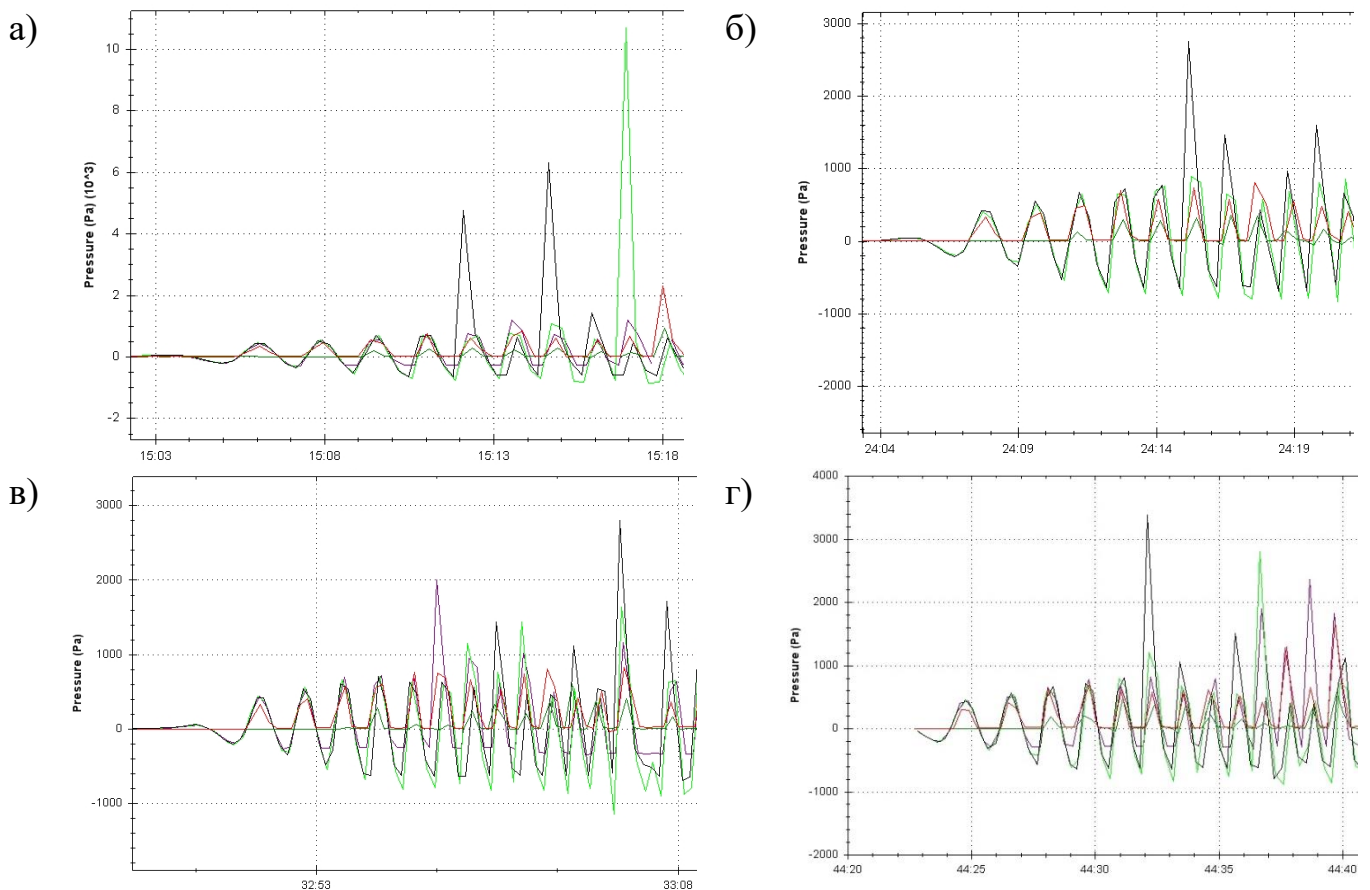


Рисунок 154 - Волнограммы разбивающихся волн в серии +3.0 см: а) реализация №2; б) реализация №3; в) реализация №4; г) реализация №5.

Изучая волнограмму (см. Рисунок 154 б), можно сделать вывод о том, что максимальное давление у шестой волны, однако у пятой и седьмой волн «пик» давления меньше, что ложно, поскольку высота волны от пятой к седьмой

увеличивается, а следовательно «пик» давления для седьмой волны не был измерен. Так, Рисунок 154 представляет четыре волнограммы, у которых давление расчётной волны отличается до 5.4 раз, что иллюстрирует описанную выше трудность при замерах волнового давления разбивающихся волн.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что отличие результатов проведённого физического моделирования от зависимости, которую показывает Рисунок 84 [31, 138], можно объяснить недостаточным количеством проведённых измерений, что в свою очередь позволяет сделать вывод о том, что для получения достоверных результатов при проведении физического эксперимента с целью измерения волнового давления разбивающихся волн, в отличие от моделирования стоячих волн, необходимо проводить множественные реализации (несколько десятков и более). В частности, увеличение числа реализаций может позволить отбрасывать резко отклоняющиеся значения («если число точек меньше четырех, то отбрасывать какую-либо из них неразумно» [169]).

Сконструированная берма для группы серий экспериментов с разбивающимися волнами  $\frac{d_{br}}{h} \approx 0.7$  создаёт условия, при которых всплеск от удара волны, обрушаясь и отступая от сооружения перед разбиванием следующей волны, вызывает частичное «осушение» вертикальной стенки (см. Рисунок 151 б), которое не предусмотрено методикой СП 38.13330, а условия волнообразования потенциально (исследование потребует проведения дополнительных испытаний) могли привести к образованию волн промежуточного типа между волнами разбивающимися и описываемыми теорией кноидальных волн Кортвега – де Фриза. Изучение данного процесса, несомненно, является сложной и заслуживающей внимания задачей, выходящей за границы области, рассматриваемой в данной диссертации, в связи с чем в дальнейшем смоделированные волны будут по-прежнему называться разбивающимися.

На основе проведённого физического эксперимента, включающего 56 реализаций, была показана хорошая сходимость результатов моделирования стоячих волн с результатами, полученными при расчёте замоделированных волн по методике СП 38.13330. Для разбивающихся волн получена удовлетворительная

сходимость результатов расчётов и физического моделирования. Показано наличие «пиков» давления, вызванных динамическим воздействием удара волны и превосходящих расчётные значения по методике СП 38.13330. При аналогичном характере эпюры волнового давления выявлено смещение точки максимума давления на глубину примерно  $\frac{1}{2}d_{br}$ , в зоне  $\frac{d_{br}}{h} \leq 1$  (серии +0.0, +1.5 и +3.0 см) максимум давления значительно превосходит расчётное значение (в  $1.25 \div 2.88$  раз), а в зоне  $\frac{d_{br}}{h} > 1$  (серии +4.5 и +6.0 см) максимум составляет примерно 67-69 % от расчётного.

В результате проведения модельного эксперимента было установлено, что использованная измерительная система имела недостаточно высокую частоту опроса датчиков для достоверного измерения волнового давления от воздействия разбивающихся волн. В связи с возможным увеличением погрешностей измерений, полученные результаты значений волнового давления от воздействия разбивающихся волн требуют в дальнейшем уточнения на основе дополнительных экспериментов.

Таким образом, проведённые измерения волнового давления показали хорошую сходимость результатов расчётов и физического моделирования для стоячих волн, и, следовательно, модель портового гидротехнического сооружения в масштабе 1:30, реализованная в гидроволновом лотке, достоверно воспроизводит реальные условия. В связи с этим можно сделать вывод о том, что полученные результаты достоверны, имеют достаточную точность и могут быть использованы для оценки нагрузок и воздействий на ПГТС в условиях климатических изменений уровня акватории.

#### **4.5.3. Эксперименты для определения заплесков (переливов)**

Поскольку созданные условия для проведения физического эксперимента позволяли с достаточной точностью и достоверностью моделировать воздействие расчётных волн на рассматриваемое ПГТС, определение удельных расходов заплесков и переливов проводилось с использованием тех же моделей и при тех же



настройках волнопродуктора, которые были реализованы в сериях опытов для определения волнового давления.

Для проведения эксперимента и дальнейшего анализа результатов были определены термины «заплеск» и «перелив» волн для ПГТС:

- Перелив – попадание жидкости за лицевую грань сооружения, вызванное превышением возвышения свободной волновой поверхности над его наивысшей отметкой;

- Заплеск – попадание жидкости за лицевую грань сооружения при ударе подходящей волны, вызванное кратковременным подъёмом воды над его наивысшей отметкой.

Перелив наиболее характерен для стоячих волн, а заплеск - для разбивающихся волн, однако при недостаточном возвышении отметки верха лицевой грани сооружения может наблюдаться и смешанная форма: одновременное возникновение заплеска и перелива. В условиях проводимого эксперимента при воздействии стоячих волн планировалось возникновение перелива, а при воздействии разбивающихся волн – образование заплеска.

По результатам анализа отечественной нормативно – технической документации в области гидротехнического строительства не выявлено наличие методики определения удельного расхода перелива и заплеска волн на морские ПГТС. В связи с этим для проведения экспериментальных исследований была разработана методика проведения физического моделирования ПГТС, с помощью которой можно определить удельный расход перелива и заплеска при воздействии расчётных волн.

В связи с особенностями работы щитовых колеблющихся волнопродукторов, в группе (пакете) сгенерированных волн только одна является моделируемой, а другие волны являются меньшими (до моделируемой) и большими (после моделируемой) по высоте. Поэтому устройство ниши в пространстве гидроволнового лотка за створом устройства модели сооружения не позволит оценить удельный расход переливов и заплесков, так как из всех волн в серии только одна является моделируемой.

Для определения удельного расхода заплесков и переливов моделируемой волны объём перелива измерялся только для моделируемой волны. Таким образом с помощью объёма перелива или заплеска и периода волны вычислялся расход. Для измерения объёма перелива только моделируемой волны была реализована система «отсекания» предшествующих и последующих после расчётной волн, с помощью создания физического барьера между переливающейся или заплёскивающейся жидкостью и ёмкостью для наполнения. В роли данного барьера выступал деревянный щит с ручкой, а в роли ёмкости – «сосуд» с вертикальными стенками и «воронкой» в верхней части (см. Рисунок 155).

Однако у предложенной схемы было два существенных недостатка. Во-первых, используемая ёмкость обладала большим количеством стыкующихся граней, которые требовалось загерметизировать до состояния абсолютного водонепропускания, что являлось проблематичным при реализации поверхностей из фанеры. Водостойкие герметики на силиконовой основе имеют долгий срок высыхания и требуют нанесения нескольких слоёв герметизирующего состава с интервалом не менее суток, что существенно увеличивает срок изготовления модели и повышает вероятность нарушения герметичности и, следовательно, непригодности получаемых результатов. Во-вторых, выполненный из фанеры деревянный щит хоть и является физическим препятствием для волн, но может не обеспечивать требуемой герметичности ёмкости при попадании более высоких удельных расходов заплесков и переливов от волн, следующих за расчётной, а следовательно, также существует вероятность нарушения герметичности ёмкости и искажения результатов.



Рисунок 155 - Реализованная модель с ёмкостью в виде сосуда с «воронкой» и деревянным щитом.

В связи с перечисленными выше причинами было решено изменить методику и предусмотреть использование герметичной ёмкости заводского изготовления со съёмной крышкой, обеспечивающей защиту от жидкости, попадающей на неё. Реализация данной ёмкости из металла была бы чрезмерно трудоёмкой, а крышка была бы слишком тяжёлой для реализации идеи «отсечения» волн предшествующих и последующих за расчётной. Материалом для исполнения ёмкости был выбран пластик, изделия из которого с требуемыми габаритами и свойствами широко распространены в продаже (см. Рисунок 156).



Рисунок 156 - Реализованная модель с ёмкостью из пластика с герметичной крышкой.

Таким образом, была разработана методика проведения физического эксперимента с целью измерения удельного расхода заплеска и перелива от воздействия волн на портовые гидротехнические сооружения, которая может быть описана следующей последовательностью действий для 3-х работников:

- 1) Подбор настроек волнопродуктора в гидроволновом лотке, соответствующих моделируемой волне, без установки модели;
- 2) Установка модели ПГТС в гидроволновой лоток;
- 3) Установка ёмкости для сбора вод заплеска или перелива за моделью ПГТС вплотную к её тыльной грани на высоте, обеспечивающей создание уклона от сооружения при установке щита;
- 4) Укладка грузов в ёмкость в количестве, достаточном для компенсации выталкивающей силы жидкости;

- 5) Проверка и корректировка при необходимости уровня воды в гидроволновом лотке до требуемого для реализации;
- 6) Направление работника №1 на управление волнопродуктором, работника №2 на закрытие щитом ёмкости в период прохождения волн до расчётной, работника №3 с крышкой для закрытия ёмкости после прохождения расчётной волны;
- 7) Проведение реализации и устранение перелившихся вод с крышки ёмкости;
- 8) После прекращения волнения в гидроволновом лотке снятие с ёмкости крышки;
- 9) Последовательное изъятие грузов из ёмкости с аккуратным удалением в эту ёмкость жидкости с их поверхности;
- 10) Калибровка измерительного оборудования (весов) и приведение показаний к нулю с учётом веса тары;
- 11) Переливание собранной жидкости из ёмкости в тару измерительного оборудования;
- 12) Взвешивание собранной жидкости;
- 13) Занесение результатов взвешивания и других значимых параметров в журнал проведения лабораторных исследований.

Полученные в результате моделирования удельные расходы перелива для стоячих и разбивающихся волн были обработаны и переведены в натуральный масштаб с помощью формул (67) и (72). Переведённые в натуральный масштаб удельные расходы для заплесков и переливов через ПГТС показывает Рисунок 157.

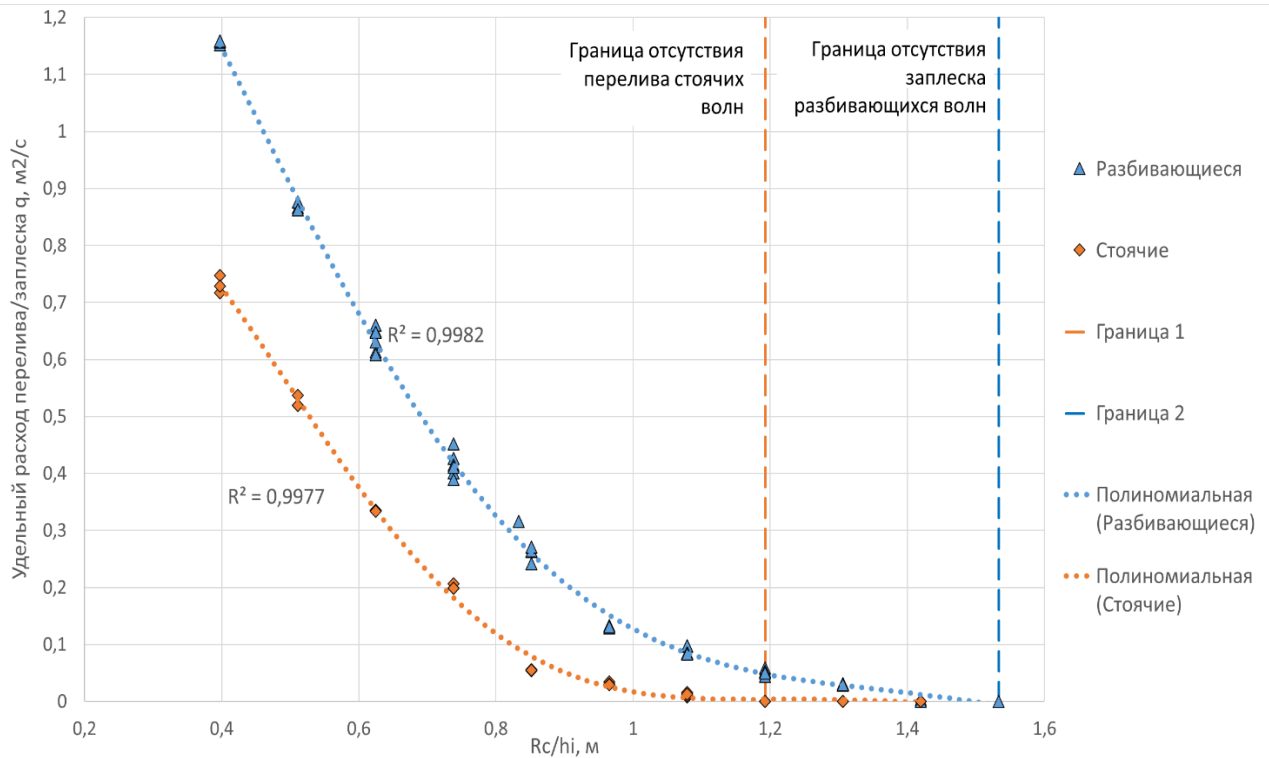


Рисунок 157 - Переведённые в натуральный масштаб результаты физического моделирования удельных расходов заплесков и переливов через ПГТС.

Полученные и переведённые в натуральный масштаб результаты физического моделирования были сопоставлены с результатами расчётов, выполненных в соответствии с методикой представленной в [223] (см. Рисунок 158).

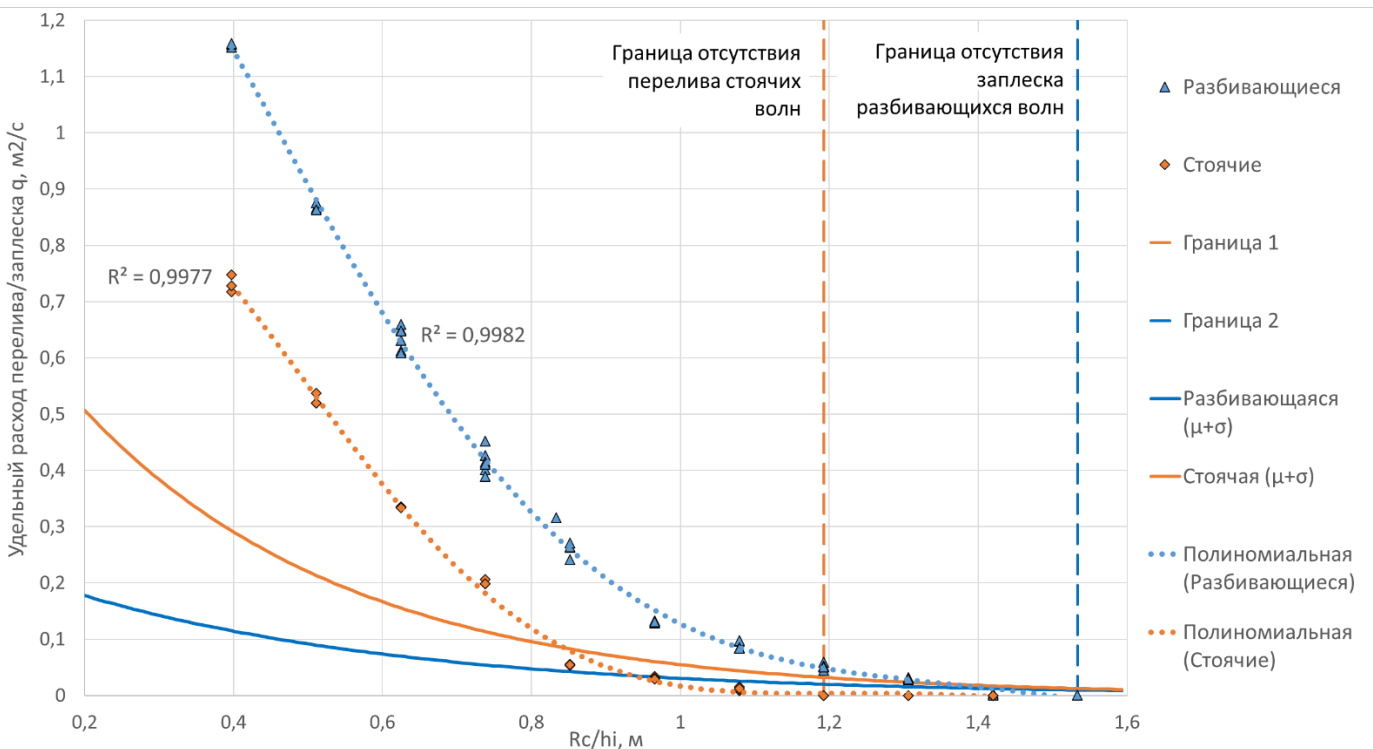


Рисунок 158 - Сопоставление результатов расчётов и физического моделирования удельных расходов заплесков и переливов через ПГТС.

Полученные в результате физического моделирования данные (81 реализация) соответствуют ожидаемому характеру кривой зависимости удельного расхода от отношения  $\frac{R_c}{h_i}$ , а именно нелинейному росту удельного расхода с уменьшением отношения  $\frac{R_c}{h_i}$ , однако, как показывает Рисунок 158, выявлено различие между полученными экспериментальными данными и результатами, рассчитанными по методике [223]. Анализ методики [223] показал, что наиболее часто реализуемым случаем будет больший удельный расход заплеска/перелива для разбивающихся волн по сравнению со стоячими, однако в рассматриваемой области изменения  $\frac{R_c}{h_i}$ , а именно от 0.4 до 1.6, методика допускает, что расход от стоячих волн может быть больше расхода от разбивающихся волн (см. Рисунок 159 [223]).



Рисунок 159 - Рассматриваемая в эксперименте область и ожидаемый характер зависимости удельного расхода  $\frac{R_c}{h_i}$  по методике [223].

Таким образом, полученное расхождение между результатами расчётов и физических экспериментов, в части того, какому типу волн соответствует

максимальный удельный расход заплеска, может быть объяснено особенностями методики проводимых расчётов. Однако это не объясняет полученные различия в абсолютных величинах удельного расхода перелива и в характере кривой изменения удельного расхода от  $\frac{R_c}{h_i}$  для обоих типов волн, а особенно для стоячих волн, которые были замоделированы наиболее достоверно, что подтверждается хорошей сходимостью результатов измерения волнового давления, высоты волны и максимального возвышения свободной волновой поверхности с расчётами по методике СП 38.13330.

Тем не менее, полученные экспериментальные результаты превосходят расчётные величины по абсолютным значениям и подтверждают, что повышение уровня режима акватории, которое приведёт к уменьшению отношения  $\frac{R_c}{h_i}$  за счёт уменьшения  $R_c$  и увеличения  $h_i$ , и как следствие, к многократному росту удельного расхода перелива, что является негативным последствием влияния климатических изменений уровня режима акватории на условия эксплуатации портовых гидротехнических сооружений. При возвышении отметки парапета, определённой по предлагаемой автором методике, не наблюдалось значимого расхода заплеска или перелива, следовательно физическое моделирование подтвердило её эффективность.

#### **4.6. Влияние климатических изменений уровня режима на вероятность аварии ПГТС**

В соответствии с [п.3.1.2, 255] термин «критерии безопасности портового гидротехнического сооружения» означает: «Предельные значения количественных и качественных показателей технического состояния портового гидротехнического сооружения и условий его эксплуатации, соответствующие допустимому уровню риска аварии». Под «допустимым уровнем риска аварии гидротехнического сооружения» понимается [ст.3, 263] – «значение риска аварии гидротехнического сооружения, установленное нормативными документами».

В настоящей работе, критерии безопасности рассматривались, как предельные значения количественных и качественных показателей условий

эксплуатации ПГТС, соответствующие допустимому уровню риска аварии. Иными словами, в условиях изменения (повышения) уровня режима акватории, сопряжённого с изменением условий трансформации волн в мелководной зоне, приводящим при определённых рассмотренных ранее условиях к увеличению высот волн, к повышению величины изгибающего момента и центра тяжести приложения волновой нагрузки, а также к повышению удельного расхода заплеска (перелива) на оградительных и причальных сооружениях, требуется оценить изменение уровня риска аварии в соответствии с установленными нормативными документами.

В данной работе использовался ряд терминов, представленных в ГОСТ Р 22.2.09-2015 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» [254, 262]:

- «Авария ГТС – Опасное техногенное происшествие, создающее угрозу жизни и здоровью людей, приводящее к разрушению зданий, сооружений, оборудования и коммуникаций, нарушению производственных и транспортных процессов, нанесению ущерба окружающей природной среде»;

- «Опасность (при оценке возможности аварии на ГТС) - процессы, протекающие в ГТС и зоне их влияния и представляющие угрозу для жизни или условий жизнедеятельности людей, объектов хозяйства или окружающей среды»;

- «Уязвимость - свойство ГТС терять способность к выполнению заданных функций в результате негативных воздействий»;

- «Риск аварии ГТС - мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии гидротехнического сооружения и тяжесть её последствий для здоровья, жизни людей, имущества и окружающей природной среды»;

- «Оценка риска аварии ГТС - процесс, используемый для определения частоты (вероятности) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий ГТС для здоровья, жизни людей, имущества и окружающей природной среды».

Таким образом, для оценки влияния климатических изменений уровня режима на риск аварии ПГТС требуется произвести количественную оценку опасности и уязвимости ПГТС, см. Рисунок 160. Оценка риска в ГОСТ Р 22.2.09-



2015 подразумевает определение риска аварии используя коэффициента риска, и оценку потенциального ущерба. Методика, представленная в данном нормативном документе основана на экспертных оценках и в связи с этим имеет оценочный характер.



Рисунок 160 - Схема формирования риска от внешней опасности [рис.1, 262].

Коэффициента риска определяется по формуле (74):

$$D_a = \lambda \cdot \nu \quad (74)$$

где  $\lambda$  – коэффициент опасности для ГТС;  $\nu$  – коэффициент уязвимости ГТС.

Интегральная оценка уязвимости ГТС складывается из показателей:

- 1) Состояние ГТС по данным инструментальных и визуальных наблюдений;
- 2) Состояние окружающей среды в зоне влияния ГТС;
- 3) Организация эксплуатации ГТС (соблюдение требований безопасной эксплуатации);
- 4) Готовность объекта к локализации и ликвидации ЧС.

При рассмотрении влияния повышения уровня режима акватории на уязвимость ПГТС основное изменение приходится на показатель №2 – состояние окружающей среды в зоне влияния ГТС, включающий в себя [п.6.3, 254]:

- «Оценку соблюдения современных нормативных и (или) проектных показателей по доле мелководных зон в площади водохранилища»;

- «Состояние флоры и фауны в зоне влияния ГТС, в том числе с оценкой изменения этого состояния во времени (состояние и условия жизнедеятельности растений и животных, численность, видовой состав, преобладающие виды, смена биоценозов и т.п.)».

Теоретически повышение уровня режима может благоприятно сказаться на количестве мелководных зон при условии неизменности частоты проведения дноуглубительных работ в сравнении со случаем отсутствия климатических изменений; состояние флоры и фауны может претерпеть трансформацию под воздействием климатических изменений. Однако эти аспекты не рассматриваются в данной работе и, в связи с этим, им не будет дана количественная или качественная оценка.

Интегральную оценку опасности ГТС составляют показатели:

- 1) Опасность превышения природных нагрузок и воздействий (учтённых);
- 2) Обоснованность и соответствие проектных решений современным нормативным требованиям;
- 3) Соответствие проекту конструкций сооружения, технологии их возведения и свойств материалов конструкций и основания;
- 4) Соответствие проекту условий эксплуатации сооружения и условий проведения мониторинга его состояния и безопасности.

Для определения коэффициента опасности ГТС используется формула (75) [ф.1, 254]:

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot (0.3 \cdot a_1 + 0.2 \cdot a_2 + 0.3 \cdot a_3 + 0.2 \cdot a_4) \quad (75)$$

При рассмотрении проектируемого ПГТС было принято предположение об исполнении проектной организацией требований современной нормативно – технической документации, подрядной организацией – точным следовании проекту и технологии при возведении сооружения, а эксплуатирующей организацией – выполнении требований по мониторингу состояния и безопасности

ПГТС и соответствии контрольно – измерительной аппаратуры всем предъявляемым к ней требованиям.

В связи с этим в контексте оценки влияния климатических изменений уровня режима было принято допущение, что показатели №2-4 остаются неизменными во времени и не оказывают влияния на изменение коэффициента риска ПГТС. Показатель №1 «Опасность превышения природных нагрузок и воздействий» (учтённых) является наиболее чувствительным к климатическим изменениям уровня режима, в связи с этим он был рассмотрен более подробно.

На момент ввода в эксплуатацию значение данного показателя принимается равным ноль баллов по четырёхбалльной шкале, что соответствует тому, что: «Показатели возможных нагрузок и воздействий на ГТС не отличаются от расчетных значений, принятых при проектировании». Однако по мере повышения уровня режима акватории, как было показано ранее, нагрузки на ПГТС будут возрастать и значение показателя опасности ГТС №1 ( $a_1$ ) будет изменяться в соответствии с оценкой, см. Таблица 16 [адаптировано из т.2, 254].

Для оградительного ПГТС 1 класса ответственности крупного транспортного терминала превышение высоты расчётной волны окажет существенное влияние по параметру заплеска и перелива только в случае объединения в данном сооружении функций причала и мола, однако даже в этом случае не возникнет существенной угрозы возникновения чрезвычайной ситуации. Воздействие волн в системе расчётного шторма и в условиях повышенного уровня режима акватории (на позднем этапе жизненного цикла), как уже показывалось ранее, в ряде случаев может привести к потере устойчивости оградительного ПГТС. В условиях расчётного шторма это может создать угрозу жизни и здоровью работников порта, сохранности судов, наземных коммуникаций, оборудования и грузов. Таким образом может возникнуть чрезвычайная ситуация федерального уровня.

Таблица 16 - Оценка показателя опасности ГТС №1 ( $a_1$ ).

Уровень опасности по показателю $a_1$	Код балл	Отличительные признаки
Опасность отсутствует	$\frac{0}{0}$	Показатели возможных нагрузок и воздействий на ГТС не отличаются от расчётных значений, принятых при проектировании. Отсутствует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера.
Малая опасность	$\frac{1}{0 < a_1 \leq 1}$	Показатели возможных нагрузок и воздействий на ГТС превышают расчётные значения, принятые при проектировании, но при этом не возникает прямой угрозы разрушения ГТС и/или потери им основных качеств своего назначения. Возникает угроза возникновения чрезвычайной ситуации локального характера.
Средняя опасность	$\frac{2}{1 < a_1 \leq 2}$	Показатели возможных нагрузок расчётные значения, принятые при проектировании, но при этом не возникает прямой угрозы разрушения ГТС и/или потери им основных качеств своего назначения. Возникает угроза возникновения муниципальной и межмуниципальной чрезвычайной ситуации.
Большая опасность	$\frac{3}{2 < a_1 \leq 3}$	Показатели возможных нагрузок и воздействий на ГТС превышают расчётные значения, принятые при проектировании, в связи с чем возникает прямая угроза разрушения ГТС и/или потери им способности выполнять заданные функции. Возникает угроза возникновения региональной, межрегиональной и федеральной чрезвычайной ситуации.

Примером чрезвычайной ситуации федерального масштаба служит разлив дизельного топлива в Норильске 29.05.2020, в результате которого в экосистему попало около 20 тонн дизельного топлива (примерно 17.5 тыс. м<sup>3</sup>) [317]. Как уже отмечалось ранее, в грузообороте по Северному морскому пути наибольший объём занимает СПГ, для перевозки которого используются танкеры типа Yamalmax, обладающие вместимостью до 172.6 тыс. м<sup>3</sup> [324]. Значительные габариты судов транспортирующих СПГ способствуют созданию условий для возникновения чрезвычайных ситуаций при потере устойчивости оградительных ПГТС 1 класса ответственности в портах с судами типа Yamalmax.

В соответствии с требованиями [254] в зависимости от значения коэффициента риска определяется уровень безопасности ГТС (см. Таблица 17). При значении  $a_1$  равном 3 уровень безопасности принимается

неудовлетворительным. Для гидротехнических сооружений нормальным условиям эксплуатации соответствует величина коэффициента риска не более 0.15, что для гидротехнических сооружений первого класса ответственности соответствует вероятности аварии  $5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{год}}$  [табл. 15, 254 и табл. 8.1, 277].

Таблица 17 - Классификация уровня безопасности ГТС по значению коэффициента риска  $D_a$ .

Уровень безопасности (УБ) ГТС	Коэффициент риска $D_a$
Нормальный уровень безопасности	Не более 0.15
Пониженный уровень безопасности	Свыше 0.15, но не более 0.3
Неудовлетворительный уровень безопасности	Свыше 0.3, но не более 0.5
Опасный	Более 0.5

В результате рассмотрения 8 показателей, каждый из которых имеет значение от 0 до 3, было получено 65536 вариантов. Для оценки влияния изменения значения показателя уровня опасности  $a_1$  с помощью авторской программы для ЭВМ [147, прил.4] были на примере ПГТС 1 класса ответственности рассмотрены случаи при заданном значении показателя  $a_1$  и различных вариантах целых значений показателей  $a_2$ - $a_4$  и  $b_1$ - $b_4$ . В результате обработки полученного массива данных были построены кривые обеспеченности коэффициента риска  $D_a$  при заданном значении показателя  $a_1$  (см. Рисунок 161).

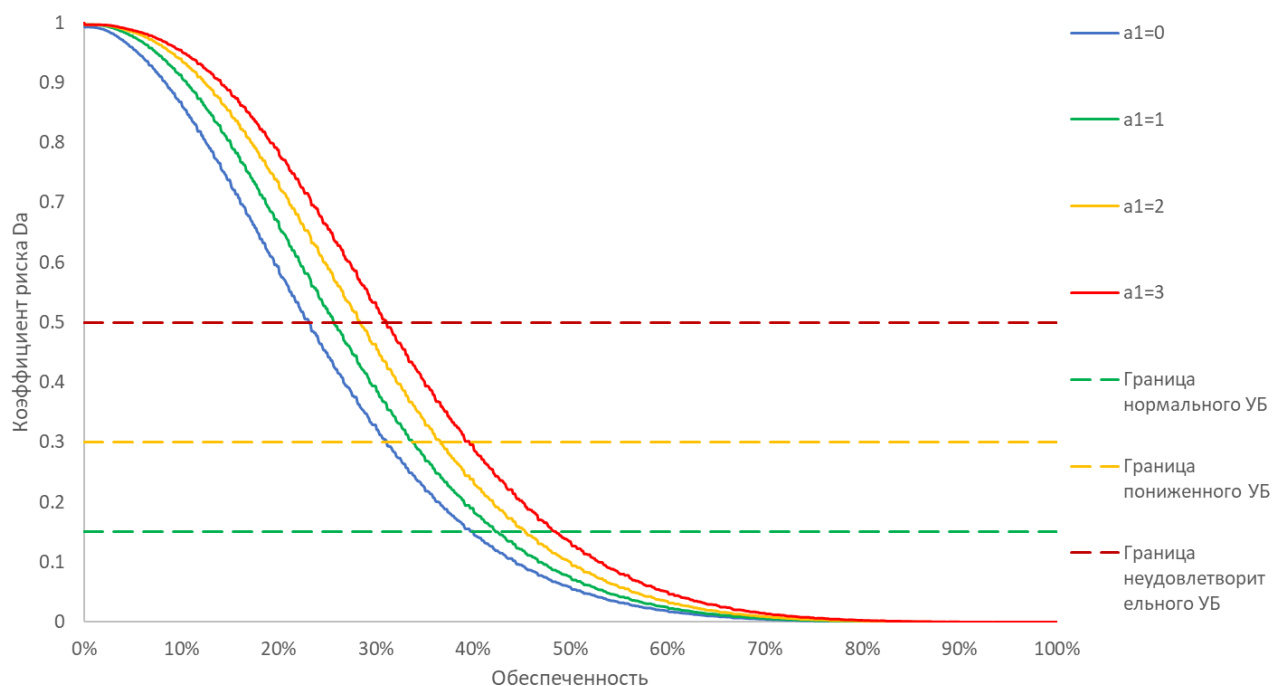


Рисунок 161 - Кривые обеспеченности коэффициента риска  $D_a$  при заданном значении показателя  $a_1$ .

Повышение уровня режима акватории увеличивает значения коэффициента риска и, следовательно, повышает вероятность аварии на гидротехническом сооружении. Далее была произведена оценка обеспеченности граничных значений коэффициента риска  $D_a$  (см. Рисунок 162, Рисунок 163 и Таблица 18).

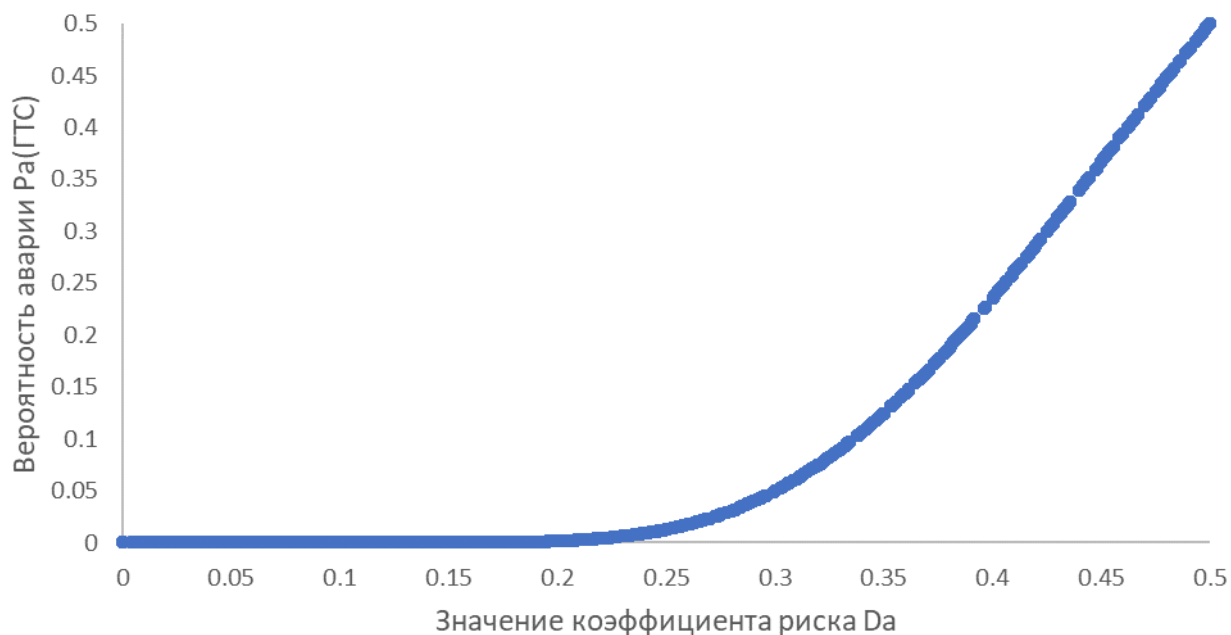


Рисунок 162 - График зависимости вероятности аварии ГТС от коэффициента риска при  $D_a \in [0; 0.5]$ .

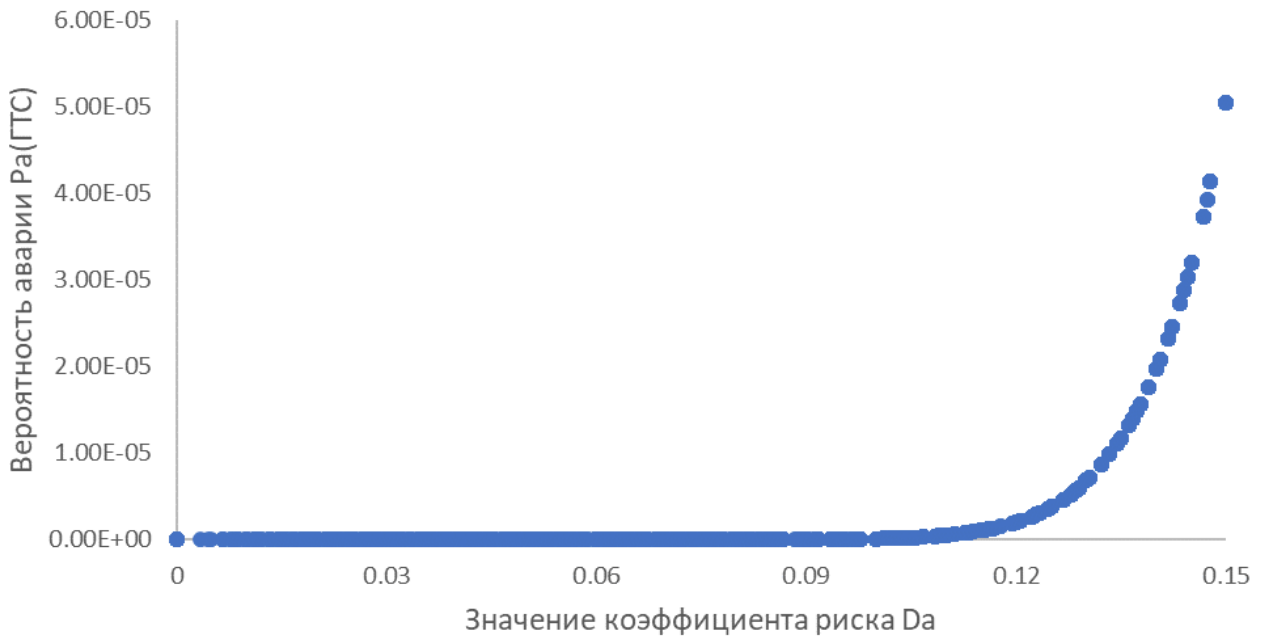


Рисунок 163 - График зависимости вероятности аварии ГТС от коэффициента риска при  $D_a \in [0; 0.15]$ .

Таблица 18 - Обеспеченность граничных значений коэффициента риска  $D_a$ , при различных целых значениях показателя  $a_1$ .

Коэффициент риска $D_a$	Обеспеченность коэффициента риска $D_a$ , %			
	$a_1=0$	$a_1=1$	$a_1=2$	$a_1=3$
0.15	73.27	80.32	85.32	88.71
0.3	32.86	39.33	46.34	53.29
0.5	5.88	7.60	10.07	13.46

Таким образом, на основании расчёта 65536 вариантов сочетаний показателей опасности и уязвимости установлено, что повышение уровня режима акватории, в случае отсутствия его учёта при проектировании ПГТС, увеличивает значение коэффициента риска сооружения, и, следовательно, повышает вероятность возникновения аварии на гидротехническом сооружении. Поэтому учёт изменений уровня режима акватории является обоснованной мерой для снижения вероятности возникновения аварии на портовых гидротехнических сооружениях в условиях прогнозных климатических изменений.

#### 4.7. Выводы по четвёртой главе

В данной главе была проанализирована действующая нормативная методика определения отсчётного уровня акватории порта, базирующаяся на распределении Пирсона III типа с использованием биномиального распределения по таблицам Фостера – Рыбкина и гамма – распределения. Установлена некорректность использования данной методики при допущении о стационарности ряда наблюдений, используемого для построения кривых обеспеченности. При условии постоянного повышения уровня моря использование данной методики приведёт к получению недостоверных значений расчётного уровня моря уже при завершении строительства сооружения.

Анализ зарубежной методики определения удельного расхода заплеска (перелива) для морских портовых гидротехнических сооружений позволил количественно и качественно оценить зависимость удельного расхода заплеска и перелива для расчётного сооружения от величины прогнозного климатического повышения уровня режима акватории. Проведённый анализ методики определения удельного расхода заплеска и методики определения навигационной и проектной глубин позволил предложить методику для определения отметки кордона причальных и гребня оградительных портовых гидротехнических сооружений в условиях климатического изменения уровня режима акватории.

По результатам проведённого анализа методик определения отметок гребня для морских гидротехнических сооружений различных видов была предложена методика для определения отметки верха парапета оградительного сооружения вертикального профиля с учётом климатических изменений уровня режима акватории и адаптирована к данным изменениям методика определения отметки гребня для оградительных сооружений откосного и смешанного профилей.

Проведённый физический эксперимент по определению волнового давления на сооружение позволил установить хорошую сходимость результатов расчётов и физических экспериментов для стоячих волн и удовлетворительную сходимость результатов для разбивающихся волн. Полученные данные физического эксперимента в совокупности с результатами расчётов доказывают 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.

Результаты физического моделирования позволили установить наличие границ отношения  $\frac{R_c}{h_i}$ , после достижения которых удельный расход будет равен нулю м<sup>2</sup>/с. Значимым является то, что для стоячих и разбивающихся волн данная граница не одинакова, и в проведённом эксперименте для стоячих волн при достижении  $\frac{R_c}{h_i} \approx 0.6$  не наблюдалось перелива волн через сооружение, т.е. удельный расход был равен нулю м<sup>2</sup>/с. То есть при предусмотренном проектом отношении  $\frac{R_c}{h_i} \cong 0.71$  удельный расход перелива будет отсутствовать, что подтверждается тремя проведёнными сериями экспериментов с  $\frac{R_c}{h_i}$  равным: 0.596, 0.653 и 0.710, в которых расход перелива не наблюдался.

Для разбивающихся волн расход заплеска наблюдался вплоть до проектного возвышения  $\frac{R_c}{h_i} \cong 0.71$ , однако незначительный  $= 3.75 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с. Проведение серии экспериментов с повышенной высотой моделируемого сооружения позволило установить, что при  $\frac{R_c}{h_i} \cong 0.767$  удельный расход заплеска составлял  $4.69 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. То есть дополнительное увеличение высоты сооружения сверх заложенного изначально позволило уменьшить удельный расход заплеска, однако в абсолютных величинах данным изменением можно пренебречь.

Результаты расчётов воздействия расчётного волнения на сооружения по методике [223] имеют низкую корреляцию с результатами физического моделирования, проведённого в гидроволновом лотке. При выполнении расчётов не была достигнута граница отсутствия расхода перелива и заплеска для стоячих и разбивающихся волн, хотя во время проведения физического моделирования для стоячих волн был достигнут нулевой расход перелива, подтверждённый несколькими сериями испытаний. Достижение границы отсутствия перелива расчётного волнения для стоячих волн является ожидаемым и логичным, а

выявленное противоречие с расчётной методикой требует проведения дальнейших исследований в данной области.

Таким образом, можно сделать вывод о корректности проведённых физических экспериментов и достоверном воспроизведении моделируемого сооружения и параметров волны. Предложенная методика проведения физического моделирования для определения удельного расхода заплесков и переливов позволила получить точные результаты, отражающие влияние климатических изменений уровня режима на условия эксплуатации морских ПГТС, и показала свою эффективность.

Разработанную методику проведения физического моделирования портовых гидротехнических сооружений типа вертикальная стенка рекомендуется использовать для определения удельного расхода заплеска от воздействия расчётного волнения для портовых гидротехнических сооружений. Разработанная методика определения изменения параметров расчётной волны в мелководной зоне может применяться без изменений для акваторий с простыми условиями волнообразования и с учётом требований приложения А СП 38.13330 для сложных условий волнообразования, не требующих рассмотрения спектра морского волнения в мелководной зоне акватории.

Доказано, что предлагаемая методика определения отметки возвышения парапета и кордона оградительных и причальных морских ПГТС обеспечивает защищённость тыловой части сооружения от воздействия переливов и заплесков расчётного волнения, и, следовательно, она эффективна и позволяет в условиях климатических изменений уровня режима не допустить повышения удельного расхода заплеска и перелива, который является значимым параметром для обеспечения требуемых нормативно – технического документацией условий эксплуатации. Методики определения отметок сооружений могут применяться в соответствии с назначением для вычисления отметки кордона причальных или оградительно – причальных сооружений, методики определения отметки гребня и парапета для оградительных сооружений.

Проведённый аналитический обзор публикаций показал убежденность некоторых авторов в том, что, что даже наиболее агрессивный сценарий SSP5-8.5 при рассмотрении 50% квантиля не обеспечивает достоверное моделирование процесса повышения уровня моря, и в реальности оно может оказаться большим. Однако рассмотрение на начальных этапах жизненного цикла сооружения агрессивных сценариев при квантиле 95% может привести к необоснованному завышению стоимости строительства и экономической неэффективности. В связи с этим рекомендуется использовать результаты не менее 50% квантиля и для сооружений 3 класса ответственности сценарий не менее SSP3-7.0, а для сооружений 1 и 2 класса ответственности сценарий SSP5-8.5.

Анализ нормативно - технической документации в области оценки безопасности и вероятности аварии на гидротехнических сооружениях позволил установить соответствие между параметром  $a_1$  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, напрямую связанного с вероятностью возникновения аварии на ГТС, и установить значительное увеличение коэффициента риска при изменении значения показателя  $a_1$ , т.е. при отсутствии учёта прогнозных климатических изменений уровня режима акватории.

Таким образом, на основании проведённых исследований показана необходимость изменения подхода к определению отсчётных уровней порта и построению кривых обеспеченностей, разработаны методики определения отметок кордона, гребня и парапета для причальных и оградительных сооружений, а также обоснована необходимость учёта прогнозных климатических изменений уровня режима акватории для обеспечения требуемого уровня безопасности ГТС и минимизации вероятности возникновения аварии.

Основные результаты, полученные за время подготовки и написания данного диссертационного исследования, были отражены в публикациях, указанных в приложении В, и были внедрены в практику проектирования портовых

оградительных и причальных гидротехнических сооружений ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» на объекте «Морская составляющая объекта “Криница”» (акт о внедрении представлен в приложении Г).

## 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 расчетных 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АЗРФ – Арктическая зона Российской Федерации;

ГКС – глобальная климатическая система;

ГСУМ – глобальный средний уровень моря;

ПГТС – портовые гидротехнические сооружения;

СЛО – Северный Ледовитый океан;

СМП – Северный морской путь.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**Статьи в рецензируемых научных изданиях, монографии, диссертации, учебные и методические пособия, а также прочие научные труды:**

1. Абузяров З. К. Морское волнение и его прогнозирование / З. К. Абузяров. Под ред. А. И. Дуванина. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1981. – 166 с.
2. Автоматизация предпроцессинговой обработки данных глобальных климатических моделей для проведения расчетов региональных климатических моделей для первого приоритетного периода программы CORDEX / Н. Р. Юничева, Д. Б. Нурсеитов, И. Б. Есеркепова [и др.] // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 2(97). – С. 96-104.
3. Агеев Н.П., Пашенко А.Ф. Комплексный подход к эксплуатации нефтяных месторождений на поздней стадии разработки // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. № 1 (16). С. 1-12.
4. Алюяров, Р. М. Исследование стерических колебаний в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным / Р. М. Алюяров, А. М. Федоров, Т. В. Белоненко // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018. – № 53. – С. 56-71.
5. Андреев В.Е., Дубинский Г.С., Куликов А.Н. Метотехнология увеличения нефтеотдачи и снижения обводненности продукции скважин // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2016. Том 21, №4(84). С. 70-80.
6. Анисимов О.А. Изменение климата в области криолитозоны северного полушария и оценка его последствий: специальность 11.00.09 «метеорология, климатология, агрометеорология»: диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Государственный гидрологический институт Росгидромета. Санкт-Петербург, 1998, 197 с.
7. Аржанов, М. М. Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI в. по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН / М. М.

Аржанов, А. В. Елисеев, И. И. Мохов // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 7. – С. 31-42.

8. Арктические транспортные магистрали на суше, акваториях и в воздушном пространстве / В. М. Грузинов, Ю. В. Зворыкина, Г. В. Иванов [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2019. – № 1(33). – С. 6-20.

9. Бабич С. В. Транспортно-логистический потенциал Северного морского пути в евроазиатском экономическом пространстве / С. В. Бабич, А. А. Яковлева // Российская Арктика. – 2019. – № 4. – С. 5-14.

10. Баренблат, Г. И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике / Г. И. Баренблат. – Издание 2-е, переработанное и дополненное. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. – 256 с.

11. Белов С. В. Особенности пространственного развития производственных комплексов минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых в Российской Арктике / С. В. Белов, В. А. Скрипниченко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 5-4(119). – С. 136-141.

12. Беляев Н. Д. Морские гидротехнические сооружения. Основы, содержание и методика курсового проектирования: учеб. пособие / Н. Д. Беляев, М. Е. Миронов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 118 с.

13. Большаков В. А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата / В.А. Большаков; МГУ им. М.В. Ломоносова. Геогр. фак. Лаб. новейших отложений и палеогеографии плейстоцена. - Москва: Б.и., 2003. - 256 с.: ил.; 20 см.; ISBN 5-85941-076-X: 300.

14. Борн М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. С. Н. Бреуса [и др.]; под ред. Г. П. Мотулевич. - 2-е изд., испр. - Москва: Наука, 1973. - 719 с.

15. Бояринов А.Ю. Перспективы освоения Арктического шельфа // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 2(104). С. 19-22.

16. Будыко Михаил Иванович. Избранные работы. – Санкт-Петербург: ООО «Америт»: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. 2020 – 206 с.: ил. ISBN 978-5-9500883-7-7.
17. Бышев В.И., Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы / В.И. Бышев; Отв. ред. Ю.А. Иванов. – М.: Наука, 2003. – 343 с., Адров Н.М. Трансформация водных масс Гольфстрима. Апатиты, 1993. 174 с.
18. В.Р. Душин, М.Н. Смирнова, В.В. Тюренкова. Распространение волн в сплошных средах. Монография. – Москва: Изд-во ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2020. – 111 с.
19. Вагущенко Л.Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности / Л.Л. Вагущенко, А.Л. Вагущенко, С.И. Заичко. - Одесса: Феникс, 2005. -274 с.
20. Валидация и оценка чувствительности климатической модели ИФА РАН с использованием блока общей циркуляции океана / К. Е. Мурышев, А. В. Елисеев, И. И. Мохов, Н. А. Дианский // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 4. – С. 448-466.
21. Васильев, К.П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состояния моря. - 2-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. - 231 с.
22. Васильевский Ю. И., Портовые береговые сооружения и их эксплуатация / Ю.И. Васильевский, В.А. Полухин, В.Г. Яковенко. – М.: Издательство «Транспорт»,1978. – 304 с.
23. Веземская П.С., Гулев С.К., Селиванова Ю.В., Тилинина Н.Д., Маркина М.Ю., Криницкий М.А., Шармар В.Д. Прогноз и анализ изменений климата в Российской части Баренцева моря. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2019. – 611 с.
24. Вернадский, В. И. Несколько слов о ноосфере / В. И. Вернадский // Ноосферные исследования. – 2013. – № 1(1). – С. 6-17.
25. Володин, Е. М. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX-XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН /

Е. М. Володин, Н. А. Дианский, А. В. Гусев // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 379. – DOI 10.7868/S000235151304010X.

26. Володин, Е. М. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0 / Е. М. Володин, Н. А. Дианский, А. В. Гусев // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 448-466.

27. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты: учеб.-метод. пособие / А. А. Волчек, П. С. Лопух, Ан. А. Волчек. – Минск: БГУ, 2019. – 316 с.: ил. ISBN 978-985-566-761-3.

28. Воронина, Е.П. Транспортное освоение арктических территорий: стратегические задачи и анализ рисков // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3 (27). С. 61-68.

29. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: В 3-х томах / Г. В. Алексеев, М. Д. Ананичева, О. А. Анисимов [и др.]; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Том 1. – Москва: Росгидромет, 2014. – 1008 с. – ISBN 978-5-9631-0322-7.

30. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 6. Баренцево море. Д.: Гидрометеоздат, 280 с.

31. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. Часть II. Порты и портовые сооружения / С. Н. Левачев, Е. А. Корчагин, С. И. Пиляев [и др.]. – Москва: АСВ, 2015. – 536 с. – ISBN 978-5-4323-0093-5.

32. Гиргидов, А. А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации / А. А. Гиргидов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 3(21). – С. 21-27.

33. Гиргидов, А. А. Исследования взаимодействия волн с морскими гидротехническими сооружениями / А. А. Гиргидов, В. И. Климович, В. А. Прокофьев // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 8. – С. 13-20.

34. Гистерезис зависимости площади приповерхностной вечной мерзлоты от глобальной температуры / А. В. Елисеев, П. Ф. Демченко, М. М. Аржанов, И. И. Мохов // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 444, № 4. – С. 444-447.

35. Гогин, А. Г. Взаимодействие нерегулярных волн с портовыми гидротехническими сооружениями: специальность 05.23.07 "Гидротехническое строительство": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гогин Александр Григорьевич. – Москва, 2022. – 204 с.

36. Гравитационно-капиллярные волны на поверхности жидкости: (учебно-методическое пособие издание второе) Б.П.Безручко, Т.В.Диканев, А.М.Захаревич. — Саратов, Издательство ГосУНЦ «Колледж», 2003. – 17 с.

37. Гумилёв В. Ю. Северный морской путь: характеристика, история освоения, перспективы развития и необходимость защиты / В. Ю. Гумилёв, В. С. Елистратов, А. Н. Рагозин // Концепт. – 2018. – № 8. – С. 139-158.

38. Дианский, Н. А. Моделирование процесса изменения климата и современного замедления глобального потепления с помощью модели INMOM / Н. А. Дианский, А. В. Гусев // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – Т. 1. – С. 96-118.

39. Дианский, Н. А. Численное моделирование общей циркуляции Мирового океана с помощью сигма-модели ИВМ РАН / Н. А. Дианский, А. В. Гусев // Труды Государственного океанографического института. – 2009. – № 212. – С. 26-47.

40. Дианский, Н. А. Численное моделирование циркуляции океанов и морей с помощью сигма-модели ИВМ РАН / Н. А. Дианский // Труды Государственного океанографического института. – 2011. – № 213. – С. 57-73.

41. 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.

42. Долгушев Т.В., Аншаков А.С., Кантаржи И.Г. Фильтрация частотно-направленного спектра волн навигационным каналом // Гидротехническое строительство. 2020. №2. С. 42-47.

43. Долгушев Т.В., Кантаржи И.Г. Влияние изменений климата на условия работы портовых сооружений // В книге: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. Сборник тезисов докладов IV Всероссийского научно-практического семинара. Москва, 2021. С. 28.

44. 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.

45. 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.

46. Долгушев, Т. В. Влияние климатических изменений уровня режима Баренцева моря на портовое гидротехническое строительство / Т. В. Долгушев // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 12. – С. 40-48.

47. Долгушев, Т. В. Влияние климатических изменений уровня режима 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.

48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. Дорохова Ирина. Стартовали регулярные рейсы между Россией и Китаем по Севморпути / Ирина Дорохова // Страна РОСАТОМ. – 2023. – № 26 (586). – С. 1. – 14.07.2023.

54. Елисеев, А. В. Влияние внеземных факторов на климат: возможные механизмы воздействия и результаты моделирования / А. В. Елисеев, И. И. Мохов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – Т. 1. – С. 119-132.

55. Елисеев, А. В. Влияние вулканической активности на изменение климата последних нескольких веков: оценки с климатической моделью промежуточной сложности / А. В. Елисеев, И. И. Мохов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 44, № 6. – С. 723-736.

56. Елисеев, А. В. Модельные оценки эффективности ослабления и предотвращения глобального потепления климата в зависимости от сценариев контролируемых аэрозольных эмиссий в стратосферу / А. В. Елисеев, И. И. Мохов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 232-244.

57. Елисеев, А. В. Оценки изменений климата XX-XXI веков с использованием версии климатической модели ИФА РАН, включающей модель общей циркуляции океана / А. В. Елисеев, И. И. Мохов, К. Е. Мурышев // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 2. – С. 5-16.

58. Елисеев, А. В. Предотвращение глобального потепления с помощью контролируемых эмиссий аэрозолей в стратосферу: глобальные и региональные особенности отклика температуры по расчетам с КМ ИФА РАН / А. В. Елисеев, И. И. Мохов, А. А. Карпенко // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 6. – С. 521-526.

59. Елисеев, А. В. Предотвращение изменений климата за счет эмиссии сульфатов в стратосферу: влияние на глобальный углеродный цикл и наземную биосферу / А. В. Елисеев // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 6. – С. 467-474.

60. Ефимов В. В. Динамика волновых процессов в пограничных слоях атмосферы и океана / В. В. Ефимов. – Киев: Наукова думка, 1981. – 256 с.

61. Ефимов В. В. Численное моделирование ветрового волнения / В. В. Ефимов, В. Г. Полников. Отв. Ред. Суворов А.М. – Киев: Наукова думка, 1991. – 240 с.

62. Зверев, Л. А. Типы морских волн, их характеристики и классификация при проектировании и возведении гидротехнических сооружений на шельфе Арктических и замерзающих морей / Л. А. Зверев // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2012. – № 1(17). – С. 60-66.

63. Зверев, Л. А. Типы морских волн, их характеристики и классификация при проектировании и возведении гидротехнических сооружений на шельфе Арктических и замерзающих морей / Л. А. Зверев // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2012. – № 1(17). – С. 60-66.

64. Изменения площади морских льдов северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования / Г. В. Алексеев, А. И. Данилов, В. М. Катцов [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 723-735.



65. Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование / И. И. Мохов, В. А. Семенов, В. Ч. Хон, Ф. А. Погарский // Лёд и снег. – 2013. – Т. 53, № 2. – С. 53-62.

66. Израэль, Ю. А. Нобелевская премия мира за 2007 год / Ю. А. Израэль // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2008. – № 4. – С. 8-10.

67. Израэль, Ю. А. Предел предсказуемости и стратегический прогноз изменений климата / Ю. А. Израэль, Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2009. – Т. 22. – С. 7-26.

68. К вопросу о цунамиопасности арктического региона / Е. А. Куликов, А. И. Иващенко, О. И. Яковенко [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2016. – № 3(23). – С. 38-49.

69. Кабатченко, И. М. Ветровое волнение. Курс Лекций. / И. М. Кабатченко. – М.: Альтаир-МГАВТ, 2015. – 98 с.

70. Кантаржи И.Г., Аншаков А.С. Влияние компоновки оградительных сооружений на волновой режим акватории порта // Гидротехническое строительство. 2018. № 9. С. 30-37.

71. Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 4 (48). С. 49-62.

72. Кантаржи, И. Г. Численное и физическое моделирование в МГСУ морских портовых гидротехнических сооружений / И. Г. Кантаржи, К. П. Мордвинцев // Наука и безопасность. – 2015. – № 2(15). – С. 2-16.

73. Каплин П. А. Фиордовые побережья Советского Союза. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 188 с.

74. Коваленко, В.В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата / В. В. Коваленко. - СПб: Изд-во. РГГМУ, 2009. - 100 с.

75. Коваленко, В.В. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся

климате / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, М. Н. Громова, В.А. Хаустов, Е. В. Шевнина. - СПб: Изд-во. РГГМУ, 2010. - 51 с.

76. Кожевников, М.П. Гидравлика ветровых волн / М.П. Кожевников. – М.: Энергия, 1972.–264 с.

77. Козьменко А.С. Отечественный и зарубежный опыт освоения Арктических ресурсов нефти: теория и практика // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2021. № 2(128). С. 138-142.

78. Козьменко А.С., Савельев А.Н., Тесля А.Б. Глобальные и региональные факторы промышленного освоения углеводородов континентального шельфа Арктики // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2019. № 3(117). С. 65-73.

79. Кондратьев, В. Б. Минеральные ресурсы и будущее Арктики // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 87-96.

80. Корзун В.А. Изменения климата: причины, прогнозы, возможные последствия для мировой экономики. – М.: ИМЭМО РАН, 2012 – 61 с. ISBN 978-5-9535-0360-0.

81. Корпачев В. П. Теоретические основы водного транспорта леса: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 25.04.01 - "Лесоинженерное дело". – Москва: Акад. естествознания, 2009. – 236 с.

82. Костин И. В. Генеральный план порта. Курс лекций. / И. В. Костин. – М.: Альтаир-МГАВТ, 2017. – 109 с.

83. Костин, И. В. Оградительные и берегозащитные сооружения: курс лекций: учебное пособие / Костин И. В. - 2-е издание. - Москва: РУТ (МИИТ), 2007. - 96 с. - Б. ц. - Текст: непосредственный.

84. Котов А.В. Проблема обоснования границ российского арктического шельфа // Пространственная экономика. 2017. № 1. С. 137-152.

85. Кочеткова Е.С., Козлов И.Е., Дайлидиене И., Смирнов К.Г. Спутниковые методы в океанографии. Учебное пособие. - СПб, изд. РГГМУ, 2014 - 92 с. ISBN 978-5-86813-380-0.

86. Лагуткин А.В. Северный морской путь - стратегическая составляющая экономического развития и национальной безопасности России // Образование и право. 2017. №8. С. 42-44.

87. Лаппо, Д. Д. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчёты / Д. Д. Лаппо, С. С. Стрекалов, В. К. Завьялов. – Ленинград: Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1990. – 433 с.

88. Ле Меоте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. / Б. Ле Меоте – Л.: Транспорт, 1974. – 367с.

89. Лебедев, С. А. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря / С. А. Лебедев, А. Г. Костяной. – Рос. акад. наук, Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова, Геофиз. центр, Федер. целевая науч.-техн. программа "Исслед. и разраб. по приоритет. направлениям развития науки и техники" на 2002-2006 гг. Минобрнауки РФ. – Москва: Изд. центр "МОРЕ" Междунар. ин-та океана, 2005. – 366 с. – ISBN 5-91094-002-3 : 400.

90. Левачев, С. Н. Исследования и проектирование портовых сооружений порта Певек / С. Н. Левачев, И. Г. Кантаржи // Наука и безопасность. – 2015. – № 2(15). – С. 17-33.

91. Ледовский И.В. Проблемы теории снеговых нагрузок на сооружения: специальность 05.23.17 «строительная механика»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». Санкт-Петербург, 2009, 292 с.

92. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология: Учеб. для студ. геогр. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 319 с.

93. Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем; перевод с англ. В.В. Жаринова; под ред. А.Б. Шабата. - Москва: Мир, 1977. - 622 с.

94. Литвиненко, Г. И. Теоретические основы и расчет гидрофизических параметров при разработке плана порта: учебное пособие / Г. И. Литвиненко, В. А. Цыкало. — Москва: Московская государственная академия водного транспорта,

2004. — 52 с. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/49241.html> (дата обращения: 17.07.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

95. Лопатухин Л.И. REFERENCE DATA ON WIND AND WAVE REGIME OF THE BARENTS AND KARA SEA SHELF. / Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, Е.С. Чернышева. Saint Petersburg: RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING, 2022. 355 стр.

96. Ляхтер, В. М. Гидравлическое моделирование / В. М. Ляхтер, А. М. Прудовский. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 392 с.

97. Макаров, А. С. Колебания уровня Арктических морей в голоцене: специальность 25.00.25 – геоморфология и эволюционная география: диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Макаров Александр Сергеевич. – Санкт-Петербург, 2017. – 309 с.

98. Малинин В.Н., Вайновский П.А. О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 53. С. 34-55.

99. Малинин, В. Н. Изменения уровня Мирового океана и климата / В. Н. Малинин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2015. – № 41. – С. 100-115.

100. Малинин, В. Н. Что происходит с уровнем мирового океана? / В. Н. Малинин // Общество. Среда. Развитие. – 2007. – № 4(5). – С. 97-102.

101. Мансуров М. Н. Инфраструктурное обеспечение освоения углеводородных месторождений арктического шельфа / М. Н. Мансуров, В. Б. Зак // Территория Нефтегаз. – 2009. – № 4. – С. 34-39.

102. Мансуров, М. Н. О перспективах газонефтеносности на шельфе морей Восточной Арктики / М. Н. Мансуров, Е. В. Захаров // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2015. – № 2(22). – С. 15-20.

103. Маркина, М. Ю. Изменчивость ветрового волнения в Северной Атлантике по данным численного моделирования атмосферы и океана / М. Ю. Маркина, А. В. Гавриков, С. К. Гулев // CITES 2017 : Международная молодежная

школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, Таруса - Звенигород, 28 августа – 07 2017 года. – Таруса - Звенигород: Томский центр научно-технической информации, 2017. – С. 94-97.

104. Марченко, А. В. Генерация волны цунами подвижкой ледника / А. В. Марченко, Е. Г. Морозов, С. В. Музылев // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. – 2012. – Т. 12, № 4. – С. 101-106.

105. Математическое моделирование Земной системы / Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др. Под ред. Яковлева Н.Г. — М.: МАКС Пресс, 2016 — 328 с. ISBN 978-5-317-05435-9.

106. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана / [Г. И. Марчук, В. П. Дымников, В. Б. Залесный и др.]. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. - 320 с., [1] л. ил.: ил.; 22 см.

107. МГЭИК, 2019 г.: Резюме для политиков. Содержится в: Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата [Х.-О. Пёртнер, Д.К. Робертс, В. Массон-Дельмотт, П. Чжай, М. Тигнор, Э. Положанска, К. Минтенбек, М. Николаи, Э. Окем, Я. Петцольд, Б. Рама, Н.М. Вейер (ред.)]. В печати.

108. Мелешко, В. П. К вопросу о предотвращении глобального потепления посредством рассеивания сульфатного аэрозоля в атмосфере / В. П. Мелешко, В. М. Катцов, И. Л. Кароль // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2010. – № 561. – С. 7-27.

109. Мелешко, В. П. Ответ на заметку А. Г. Рябошапко К вопросу о недопустимости исследований... / В. П. Мелешко, В. М. Катцов, И. Л. Кароль // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 8. – С. 99-101.

110. Мелешко, В. П. Является ли рассеяние аэрозоля в стратосфере безопасной технологией предотвращения глобального потепления? / В. П. Мелешко, В. М. Катцов, И. Л. Кароль // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 7. – С. 5-17.

111. Метод расчета эвстатического хода уровня моря в голоцене по локальным кривым / Н. И. Есин, А. А. Ляпин, Н. В. Есин, А. Е. Шлезингер // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2014. – Т. 89, № 2. – С. 52-60.

112. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. – Санкт-Петербург: Государственный гидрологический институт, 2005. – 103 с.

113. Милн-Томсон Л. Теоретическая гидродинамика. Пер. с англ. под ред. Н. Н. Моисеева. – М.: Мир, 1964. – 660 с.

114. Моделирование ветрового волнения в Балтийском море на прямоугольной и неструктурной сетках на основе реанализа NCEP/CFRSR / А. Ю. Медведева, С. А. Мысленков, И. П. Медведев [и др.] // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2016. – № 362. – С. 37-54.

115. Моделирование волнения в экстремальных штормах Черного моря / И. М. Кабатченко, А. Р. Введенский, Г. И. Литвиненко [и др.] // Труды Государственного океанографического института. – 2015. – № 216. – С. 209-220.

116. Моделирование осадки оттаивания многолетнемерзлых грунтов Северного полушария в XXI веке / М. М. Аржанов, П. Ф. Демченко, А. В. Елисеев, И. И. Мохов // Криосфера Земли. – 2010. – Т. 14, № 3. – С. 37-42.

117. Моделирование региональных особенностей сезонноталого слоя в зоне вечной мерзлоты на территории Сибири / И. М. Школьник, Е. Д. Надежина, Т. В. Павлова [и др.] // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16, № 2. – С. 52-59.

118. Моделирование эволюции ледяного покрова Мирового океана в XX и XXI веках / В. М. Катцов, Г. В. Алексеев, Т. В. Павлова [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43, № 2. – С. 165-181.

119. Монин, А. С. Введение в теорию климата / А. С. Монин. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. – 247 с.

120. Мохов, И. И. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и изменений глобальной приповерхностной температуры Земли / И. И. Мохов, Д. А. Смирнов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 44, № 3. – С. 283-293.

121. Мохов, И. И. Моделирование глобальных климатических изменений в XX-XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP / И. И. Мохов, А. В. Елисеев // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 443, № 6. – С. 732.

122. Мохов, И. И. Связь изменений глобальной приповерхностной температуры с различными естественными и антропогенными факторами: оценки на основе данных наблюдений / И. И. Мохов, Д. А. Смирнов, А. А. Карпенко // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2011. – Т. 24. – С. 71-82.

123. Мохов, И. И. Эмпирические оценки воздействия естественных и антропогенных факторов на глобальную приповерхностную температуру / И. И. Мохов, Д. А. Смирнов // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 426, № 5. – С. 679-684.

124. Носков, Б. Д. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. Часть III. Сооружения континентального шельфа / Б. Д. Носков, Ю. П. Правдивец. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 280 с. – ISBN 5-93093-260-3.

125. Оперативная океанология и технические средства в интересах Военно – Морского Флота: материалы совместного заседания командования Главного штаба Военно – Морского Флота и Секции океанологии, физики атмосферы и географии ОНЦ РАН (г. Санкт – Петербург, 5-6 октября 2018 г.) / [под ред. Акад. Г.Г. Матишова]. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. – 254 с. – ISBN 978-5-4358-0178-1.

126. Оценка климатических воздействий на природные системы России в середине XXI века / В. М. Катцов, В. П. Мелешко, Е. Д. Надежина [и др.] // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2011. – Т. 24. – С. 271-294.

127. Павлова, Т. В. Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5 / Т. В. Павлова, В. М. Катцов // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2013. – № 568. – С. 7-25.
128. Пиляев С.И. Волновые расчёты при проектировании портов / С.И. Пиляев, Н.А. Губина. – М.: МГСУ, 2010. – 96 с.
129. Повторяемость штормового волнения в Баренцевом море в условиях современного климата / С. А. Мысленков, М. Ю. Маркина, В. С. Архипкин, Н. Д. Тилинина // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2019. – № 2. – С. 45-54.
130. Понятовский, В. В. Основные технологические требования к морским портам / В. В. Понятовский. – М.: Издательство "ТрансЛит", 2014. – 288 с. – ISBN 978-5-94976-837-7.
131. Понятовский, В. В. Техническая эксплуатация гидротехнических сооружений и других объектов порта / В. В. Понятовский. – М.: [б. и.], 2010. – 668 с. – ISBN 978-5-85941-331-7.
132. Понятовский, В. В. Технический (энциклопедический) словарь - справочник по морским портам / В. В. Понятовский. – М.: МГАВТ, 2008. – 693 с. – ISBN 978-5-85941-272-3.
133. Понятовский, В. В. Технический надзор при строительстве гидротехнических сооружений в морских портах / В. В. Понятовский. – М.: [б. и.], 2011. – 347 с. – ISBN 978-5-85941-424-6.
134. Попов М.А., Петраков Д.Г. Исследование режимов эксплуатации газовых скважин в осложненных условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2021. Том 21, №1. С. 36-41.
135. Портовые гидротехнические сооружения. Часть I / В. Е. Ляхницкий, Н. А. Смородинский, В. К. Штенцель [и др.]. – Ленинград: Речной транспорт, 1955. – 624 с.
136. Порты и портовые сооружения / Г. Н. Смирнов, В. В. Аристархов, С. Н. Левачев [и др.]. – М.: Издательство АСВ, 2003. – 464 с. – ISBN 5-93093-160-7.



137. Порты и портовые сооружения. Часть I / Н.Н. Джунковский, А.А. Каспарсон, Г.Н. Смирнов [и др.]. – М.: Издательство литературы по строительству, 1964. – 342 с.

138. Порты и портовые сооружения. Часть II / Н.Н. Джунковский, А.А. Каспарсон, Е.В. Курлович [и др.]. – М.: Издательство литературы по строительству, 1967. – 447 с.

139. Преобразование энергии морских волн / С. Д. Чижиумов, В. М. Козин, И. В. Каменских, М. А. Синюкова, А. А. Гентова – Комсомольск на Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. – 173 с.

140. Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер (ред.). МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Женева, Швейцария, 2015, 163 с.

141. Репина, И. А. Изменение ледовых условий, режима ветра и морского волнения в Арктической зоне в условиях изменяющегося климата / И. А. Репина // Проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивое развитие арктических территорий : сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием II Юдахинские чтения, Архангельск, 24–28 июня 2019 года / Ответственный редактор И.Н. Болотов. – Архангельск: ОМ-медиа, 2019. – С. 28-32.

142. Ретроспективные расчеты циркуляции и ледяного покрова Охотского моря на основе современных технологий численного моделирования / Н. А. Дианский, В. В. Фомин, М. М. Чумаков, Д. В. Степанов // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2017. – № 4(32). – С. 82-93.

143. Родин, А. А. Динамика длинных волн в прибрежной зоне моря с учетом эффектов обрушения / А. А. Родин, Е. Н. Пелиновский. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 93 с. – ISBN 978-5-502-00451-0.

144. Рыскин Н. М. Нелинейные волны / Н. М. Рыскин, Д. И. Трубецков. – Москва: Ленанд, 2017. – 312 с.

145. Сазонов, К. Е. Модельный эксперимент в океанологии / К. Е. Сазонов. – Санкт-Петербург: изд. РГГМУ, 2011. – 93 с. – ISBN 978-5-86813-301-5.

146. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617974 Российская Федерация. Программа для расчёта изменения высоты трансформируемой волны в мелководной зоне при повышении уровня режима акватории: № 2023616958; Заявл. 11.04.2023; Оpubл. 17.04.2023; Бюл. №4 / Т. В. Долгушев. <https://elibrary.ru/item.asp?id=52300829>.

147. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660648 Российская Федерация. Программа для расчёта коэффициента риска и вероятности аварии гидротехнических сооружений при повышении уровня режима акватории: № 2023618348; Заявл. 28.04.2023; Оpubл. 23.05.2023; Бюл. №6 / Т. В. Долгушев. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54047442>.

148. Семенов В.А. Долгопериодные климатические колебания в Арктике и их связь с глобальными изменениями климата: специальность 25.00.29 «физика атмосферы и гидросферы»: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Москва, 2010, 268 с.

149. Семенов, В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике / В. А. Семенов // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 418, № 1. – С. 106-109.

150. Семенов, В. А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера - арктические льды - океан / В. А. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – Т. 1. – С. 232-248.

151. Серова, Н. А. Основные тенденции развития транспортной инфраструктуры российской Арктики / Н. А. Серова, В. А. Серова // Арктика и Север. – 2019. – № 36. – С. 42-56.

152. Сикан А.В. Вероятностные распределения в гидрологии. Специальные главы теории и практики гидрологических расчетов. - Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2020.; ISBN 978-5-86813-492-0

153. Система диагноза и прогноза термогидродинамических характеристик и ветрового волнения в западных морях российской Арктики и расчет параметров экстремального шторма 1975 г. в Баренцевом море с учетом ледовых условий / Н. А. Дианский, И. М. Кабатченко, В. В. Фомин [и др.] // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2018. – № 4(36). – С. 156-165.

154. Снакин, В. В. Глобальные изменения климата: прогнозы и реальность / В. В. Снакин // Жизнь Земли. – 2019. – Т. 41, № 2. – С. 148-164.

155. Сооружения портов и транспортных терминалов и их техническая эксплуатация. Часть 1. Устройство портов: Учебное пособие / Ю.А. Перевязкин. – С-Пб.: СПГУВК, 2006. –132с.

156. Т.Ф. Стокер, Д. Цинь, Дж.-К. Платтнер, М. Тигнор, С. К. Аллен, Дж. Бошунг, А. Науэлс, Ю. Ся, В. Бекс и П. М. Мидглей (редакторы). Изменение климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Кембридж юниверсити пресс, Кембридж, Соединенное Королевство, и Нью-Йорк, США, 2013, 222 с.

157. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научное издание, 2022. – 124 с.

158. Триккер Р. Бор, прибой, волнение и корабельные волны / Р. Триккер. – Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1969. – 285 с.

159. Условия стабилизации средней глобальной приповерхностной температуры на уровнях +2 и +1,5°C при использовании геоинженерного метода на основе стратосферных аэрозолей / В. А. Гинзбург, С. В. Кострыкин, А. Г. Рябошапка [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 5. – С. 66-76.

160. Учет вековой динамики климата Баренцева моря при планировании морской деятельности / Г. Г. Матишов, С. Л. Дженюк, В. В. Денисов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 1(14). – С. 56-71.

161. Формирование опорных зон в Арктике: методология и практика / О. О. Смирнова, С. А. Липина, Е. В. Кудряшова [и др.] // Арктика и Север. – 2016. – № 25. – С. 148-157.

162. Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа NCEP/NCAR и модели климата ИВМ РАН / М. Г. Акперов, М. Ю. Бардин, Е. М. Володин [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 764-772.

163. Хадла, Гунуа Моделирование движения наносов в районе береговых гидротехнических сооружений: специальность 05.23.07– Гидротехническое строительство: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хадла Гунуа. – Москва, 2021. – 140 с.

164. Хон, В. Ч. Оценки ветроволновой активности в Арктическом бассейне при возможных изменениях климата в XXI веке по модельным расчетам / В. Ч. Хон, И. И. Мохов, Ф. А. Погарский // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 452, № 4. – С. 445. – DOI 10.7868/S086956521329015X.

165. Чижиумов С. Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – 110 с.

166. Численное и физическое моделирование в МГСУ морских портовых гидротехнических сооружений / И.Г.Кантаржи, К.П.Мордвинцев // Наука и Безопасность. 2015. №2 С. 2-16.

167. Численное моделирование дрейфа айсберга в Баренцевом море / И. И. Панасенкова, В. В. Фомин, Н. А. Дианский, А. В. Марченко // Морские исследования и образование (MARESEDU-2017) : Труды VI Международной научно-практической конференции, Москва, 30 октября – 02 2017 года. – Москва: ООО "ПолиПРЕСС", 2017. – С. 125-128.

168. Шевчук, О. И. Межгодовая изменчивость уровня мирового океана в современных климатических условиях: специальность 25.00.28 "Океанология": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Шевчук Олег Игоревич. – Санкт-Петербург, 2009. – 19 с.

169. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – под редакцией чл.-корр. АН СССР Н. П. Бусленко. – Москва: Мир, 1972. – 381 с.
170. Шунько, Н. В. Волновой накат и устойчивость для сооружений откосного профиля с закрепленным и незакрепленным проницаемым покрытием: специальность 05.23.07 "Гидротехническое строительство»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шунько Наталья Владимировна. – Москва, 2015. – 186 с.
171. Ablain, M., Legeais, JF, Prandi, P. et al. Уровень моря на основе спутниковой альтиметрии в глобальном и региональном масштабах. *Surv Geophys* 38, 7–31 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9389-8>.
172. Adoption of the Paris Agreement FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 (UNFCCC, 2015).
173. Alcamo, J., Bouwman, A., Edmonds, J., Grubler, A., Morita, T., & Sugandhy, A. (1995). An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. In: *Climate Change 1994. Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC 1992 IS92 Emission Scenarios*. Eds. Houghton, J.T., Filho, L.G. Meira, Bruce, J.P., Lee, H., Callander, B.A., Haites, E.F., Harris, N., & Maskell, K., pp. 247-304 Cambridge, UK: Cambridge University Press. ISBN 0-521-55055-6.
174. Alley RB, Clark PU, Huybrechts P, Joughin I (2005) Ice-sheet and sea-level changes. *Science*, 310:456–460. doi: 10.1126/science.1114613.
175. Archer D., Brovkin. 2008 The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO<sub>2</sub>. – *Climate Change.*, vol. 90, No. 3, pp. 283-297.
176. B.P. Horton, S. Rahmstorf, S.E. Engelhart, A.C. Kemp, Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300, *Quaternary Science Reviews*, Volume 84, 2014, p.1-6, ISSN 0277-3791, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.002>.
177. Barnett, R.L., Kemp, A.C., and Gehrels, W.R., 2019. Late Holocene sea level. *PAGES Magazine* 27, Pg. 8-9.
178. Becker A., Inoue S., Fischer M. et al. Climate change impacts on international seaports: knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrators. *Climatic Change* 110, 5–29 (2012).

179. Behrendt, A., Sumata, H., Rabe, B., and Schauer, U.: UDASH – Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1119–1138, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1119-2018>, 2018.

180. Blunden, J., and D. S. Arndt, 2019: A Look at 2018: Takeaway Points from the State of the Climate Supplement. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 100, 1625–1636, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0193.1>.

181. Casas-Prat, Mercè & Wang, Xiaolan. (2020). Projections of Extreme Ocean Waves in the Arctic and Potential Implications for Coastal Inundation and Erosion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 125. 10.1029/2019JC015745.

182. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I combined with Supporting Scientific Material J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA, and Victoria, Australia 218 pp.

183. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment (1990) Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia 410 pp.

184. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

185. 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. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01625-6>.

186. 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. <https://doi.org/10.1063/5.0143492>.

187. Dolgushev, T.V., Kantarzhi, I.G. Physical Basis of Climate Change and its Impact on the Operating Conditions of Port Hydraulic Structures // *Power Technology*

Engineering, 2023, 56(5), страницы 648-653. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01568-y>.

188. Earle, S. (2019). *Physical Geology – 2nd Edition*. Victoria, B.C.: BCcampus. Retrieved from <https://opentextbc.ca/physicalgeology2e>.

189. Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L. et al. The causes of sea-level rise since 1900. *Nature* 584, 393–397 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>.

190. Friedlingstein, Pierre & Houghton, Richard & Marland, G. & Hackler, J. & Boden, TA & Conway, Thomas & Canadell, J. & Raupach, Michael & Ciais, Philippe & Le Quéré, Corinne. (2010). Update on CO2 emissions. *Nature Geoscience*. 3. 811-812. [10.1038/ngeo1022](https://doi.org/10.1038/ngeo1022).

191. Ganguly, Auroop & Steinhaeuser, Karsten & III, David & Branstetter, Marcia & Parish, Esther & Singh, Nagendra & Drake, John & Buja, Lawrence. (2009). Higher trends but larger uncertainty and geographic variability in 21st century temperature and heat waves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 106. 15555-15559. [10.1073/pnas.0904495106](https://doi.org/10.1073/pnas.0904495106).

192. Garner, A. J., Sosa, S. E., Tan, F., Tan, C. W. J., Garner, G. G., & Horton, B. P. (2023). Evaluating knowledge gaps in sea-level rise assessments from the United States. *Earth's Future*, 11, e2022EF003187. <https://doi.org/10.1029/2022EF003187>.

193. Geiges, A., Nauels, A., Parra, P. Y., Andrijevic, M., Hare, W., Pfliederer, P., Schaeffer, M., and Schleussner, C.-F.: Incremental improvements of 2030 targets insufficient to achieve the Paris Agreement goals, *Earth Syst. Dynam.*, 11, 697–708, <https://doi.org/10.5194/esd-11-697-2020>, 2020.

194. Gidden, Matthew J. et al. “Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century.” *Geosci. Model Dev. Dev.*, 12, 1443-1475, (2018) DOI:10.5194/gmd-12-1443-2019, 2019.

195. Grinsted, A. and Christensen, J. H.: The transient sensitivity of sea level rise, *Ocean Sci.*, 17, 181–186, <https://doi.org/10.5194/os-17-181-2021>, 2021.

196. Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S., Ruedy, R., Russell, G., and Stone, P. (1988), *Global climate changes as forecast by Goddard Institute for*

Space Studies three-dimensional model, *J. Geophys. Res.*, 93(D8), 9341–9364, doi:10.1029/JD093iD08p09341.

197. Harvey, T.C., Hamlington, B.D., Frederikse, T. et al. Ocean mass, steric effects, and vertical land motion largely explain US coast relative sea level rise. *Commun Earth Environ* 2, 233 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00300-w>.

198. Hirschfeld, D., Behar, D., Nicholls, R.J. et al. Global survey shows planners use widely varying sea-level rise projections for coastal adaptation. *Commun Earth Environ* 4, 102 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00703-x>.

199. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Summary for Policymakers. In *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (pp. 1-24). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157940.001.

200. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-32). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.001.

201. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Technical Summary. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35-144). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.002.

202. IPCC SAR WG1 (1995), Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Callander, B.A.; Harris, N.; Kattenberg, A.; Maskell, K. (eds.), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-56433-6.



203. IPCC, 2001: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.

204. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

205. IPCC, 2013: Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

206. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

207. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

208. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R.

Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

209. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

210. Jouzel, J., C. Lorius, J.R. Petit, C. Genthon, N.I. Barkov, V.M. Kotlyakov, and V.M. Petrov. 1987. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years). *Nature* 329:403-8.

211. Jouzel, J., C. Waelbroeck, B. Malaize, M. Bender, J.R. Petit, M. Stievenard, N.I. Barkov, J.M. Barnola, T. King, V.M. Kotlyakov, V. Lipenkov, C. Lorius, D. Raynaud, C. Ritz, and T. Sowers. 1996. Climatic interpretation of the recently extended Vostok ice records. *Climate Dynamics* 12:513-521.

212. Jouzel, J., N.I. Barkov, J.M. Barnola, M. Bender, J. Chappellaz, C. Genthon, V.M. Kotlyakov, V. Lipenkov, C. Lorius, J.R. Petit, D. Raynaud, G. Raisbeck, C. Ritz, T. Sowers, M. Stievenard, F. Yiou, and P. Yiou. 1993. Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period. *Nature* 364:407-12.

213. Julienne C. Stroeve, Mark C. Serreze, Marika M. Holland, Jennifer E. Kay, James Malanik, Andrew P. Barrett The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // *Climatic Change*. 2011. №Volume 110. C. 1005–1027.

214. Kiyoshi, Horikawa Coastal Engineering: An Introduction to Ocean Engineering / Horikawa Kiyoshi. – John Wiley & Sons, 1978. – 402 c. – ISBN 0470264497, 9780470264492.

215. Kopp R., Kemp A., Bittermann K., Horton B., Donnelly J., Gehrels W., Hay C., Mitrovica J., Morrow E., Rahmstorf S. (2016). Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 113. 201517056. 10.1073/pnas.1517056113.

216. Kopp, R.E., Horton, R.M., Little, C.M., Mitrovica, J.X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D.J., Strauss, B.H. and Tebaldi, C. (2014), Probabilistic 21st and 22nd

century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 2: 383-406. <https://doi.org/10.1002/2014EF000239>.

217. Le Quéré, C., Raupach, M., Canadell, J. et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geosci* 2, 831–836 (2009). <https://doi.org/10.1038/ngeo689>

218. Lim Hyung-Gyu. Importance of human-induced nitrogen flux increases for simulated Arctic warming / Lim Hyung-Gyu, Park Jong-Yeon, Dunne John P., Stock Charles A., Kang Sung-Ho, Kug Jong-Seong // *Journal of Climate*. – 2021. – № 34(10). – C. 3799-3819. – <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0180.1>

219. M. Pathak, R. Slade, P.R. Shukla, J. Skea, R. Pichs-Madruga, D. Ürgel, V. Eickhout, A. C. P. Costa, M. G. Meira, K. Riahi, A. Alkhateeb, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.002.

220. Manning, M., Edmonds, J., Emori, S. et al. Misrepresentation of the IPCC CO<sub>2</sub> emission scenarios. *Nature Geosci* 3, 376–377 (2010). <https://doi.org/10.1038/ngeo880>.

221. Mark Johnson, Andrey Proshutinsky, Yevgeny Aksenov, An T. Nguyen, Ron Lindsay, Christian Haas, Jinlun Zhang, Nikolay Diansky, Ron Kwok, Wieslaw Maslowski, Sirpa Häkkinen, Igor Ashik, Beverly de Cuevas Evaluation of Arctic sea ice thickness simulated by Arctic Ocean Model Intercomparison Project models // *Journal Of Geophysical Research*. 2012. №Volume117, IssueC8. C. 1-21.

222. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) / K. F. Hasselmann, T. P. Barnett, E. Bouws [et al.]. – Deutsches Hydrographisches Institut, 1973. – 95 p.

223. Meer, J.V., Allsop, N.W., Bruce, T., Rouck, J.D., Kortenhuis, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P.A., & Zanuttigh, B. (2016). *Eurotop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: an overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application* (2nd edition).

224. Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., Smith, S. J., van den Berg, M., Velders, G. J. M., Vollmer, M. K., and Wang, R. H. J.: The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3571–3605, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>, 2020.

225. Nakicenovic, Nebojsa & Swart, Rob. (2000). Special Report on Emissions Scenarios (SRES) – A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.11

226. National Academy of Sciences. 2020. Climate Change: Evidence and Causes: Update 2020. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25733>.

227. Nerem, Robert, Frederikse, T., Hamlington, B. (2022). Extrapolating Empirical Models of Satellite-Observed Global Mean Sea Level to Estimate Future Sea Level Change. *Earth's Future*. 10. <https://doi.org/10.1029/2021EF002290>.

228. O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461–3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>, 2016.

229. PAGES 2k Consortium. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nat. Geosci.* 12, 643–649 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0400-0>

230. Parris A. S., Bromirski P., Burkett V., Cayan D. R., Culver M. E., Hall J., ... & Weiss J. (2012). Global sea level rise scenarios for the United States National Climate Assessment.

231. Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delayque, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, and M. Stievenard.

1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436.

232. Pullen, T., Allsop, N.W., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., & Meer, J.V. (2007). EurOtop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual.

233. Qingxiang Liu, Alexander V. Babanin, Stefan Zieger, Ian R. Young, Changlong Guan Wind and Wave Climate in the Arctic Ocean as Observed by Altimeters // *Journal Of Climate*. 2016. №Volume 29, Issue 22. C. 7957-7975.

234. Robert Kopp, Michael Oppenheimer, Jessica L O'Reilly, et al. Communicating projection uncertainty and ambiguity in sea-level assessment. ESS Open Archive. June 18, 2022. doi: 10.1002/essoar.10511663.1.

235. Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V. et al. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Clim Change* 8, 325–332 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>

236. Santer, B.D., Bonfils, C.J.W., Fu, Q. et al. Celebrating the anniversary of three key events in climate change science. *Nat. Clim. Chang.* 9, 180–182 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0424-x>

237. Schaeffer, M., Hare, W., Rahmstorf, S. et al. Long-term sea-level rise implied by 1.5 °C and 2 °C warming levels. *Nature Clim Change* 2, 867–870 (2012). <https://doi.org/10.1038/nclimate1584>.

238. Schneider, T., Teixeira, J., Bretherton, C. et al. Climate goals and computing the future of clouds. *Nature Clim Change* 7, 3–5 (2017). <https://doi.org/10.1038/nclimate3190>.

239. Schwalm CR, Glendon S, Duffy PB. RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020 Aug 18;117(33):19656-19657. doi: 10.1073/pnas.2007117117.

240. Simpson M. C., Scott D., New M., Sim R., Smith D., Harrison M., ... & Overmas M. (2012). An overview of modelling climate change impacts in the Caribbean region with contribution from the Pacific Islands.

241. Simpson MC, Scott D, Harrison M, Silver N, O’Keeffe E, Sim R, ... & McSharry P (2010) Quantification and magnitude of losses and damages resulting from the impacts of climate change: modelling the transformational impacts and costs of sea level rise in the Caribbean (Summary Document). Barbados, West Indies.

242. Slater, T., Hogg, A.E. & Mottram, R. Ice-sheet losses track high-end sea-level rise projections. *Nat. Clim. Chang.* 10, 879–881 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0893-y>.

243. Solomon, Susan & Plattner, Gian-Kasper & Knutti, Reto & Friedlingstein, Pierre. (2009). Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 106. 1704-9. [10.1073/pnas.0812721106](https://doi.org/10.1073/pnas.0812721106).

244. Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report (Climate Change 2007): Summary for Policymakers. IPCC. 2007. ISBN 978-92-9169-122-7. Archived from the original on 2021-08-20. Retrieved 2021-08-12.

245. Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E.M., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J.A., O’Neill, B.C., Sanderson, B.M., van Vuuren, D.P., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z.R., Hurtt, G.C., Kriegler, E., Lamarque, J., Meehl, G.A., Moss, R.H., Bauer, S.E., Boucher, O., Brovkin, V.A., Golaz, J., Gualdi, S., Guo, H., John, J.G., Kharin, S., Koshiro, T., Ma, L., Olivière, D.J., Panickal, S., Qiao, F., Rosenbloom, N.A., Schupfner, M., Séférian, R., Song, Z., Steger, C.R., Sellar, A.A., Swart, N.C., Tachiiri, K., Tatebe, H., Voldoire, A., Volodin, E.M., Wyser, K., Xin, X., Xinyao, R., Yang, S., Yu, Y., & Ziehn, T. (2020). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6.

246. The Climate Change Initiative Coastal Sea Level Team. Coastal sea level anomalies and associated trends from Jason satellite altimetry over 2002–2018. *Sci Data* 7, 357 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00694-w>.

247. Timofey Dolgushev; Reliability of port hydraulic structures in the Arctic under climatic changes of global sea level. AIP Conference Proceedings 2 August 2023; 2791 (1): 030008. <https://doi.org/10.1063/5.0143492>.

248. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (1985) Port development: a handbook for planners in developing countries. United Nations Conference on Trade and Development, New York.

249. USGCRP, 2017: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, Chapter 1.

250. Voudoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Bianchi, A., Dottori, F., & Feyen, L. (2018). Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe. *Nature Climate Change*, 8(9), 776–780. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0260-4>.

251. Xiaolan L. Wang, Yang Feng, Val R. Swail, Andrew Cox Historical Changes in the Beaufort–Chukchi–Bering Seas Surface Winds and Waves, 1971–2013 // *Journal Of Climate*. 2015. №Volume 28, Issue 19. С. 7457–7469.

**Нормативно-техническая документация, законы и подзаконные акты:**

252. ВСП 33-03-07/МО РФ Инструкция по проектированию откосных и сквозных оградительных сооружений и специальных подводных стендов. – М.: ЦНИИ МО РФ, 2008. – 90 с.

253. ГОСТ 18452-73 Океанология. Термины и определения. ГОСТ 18541-73 - ГОСТ 18458-73. \ Гос. Ком. стандартов Совета Министров СССР. - Изд. офиц. - М.: Изд-во стандартов, 1973 г.

254. ГОСТ Р 22.2.09-2015 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Экспертная оценка уровня безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений. Общие положения (Переиздание): дата введения 01.06.2016. – М.: Стандартинформ, 2019. – 20 с.

255. ГОСТ Р 54523-2011 Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: дата введения 01.03.12. – М.: Стандартинформ, 2012. – 203 с.

256. ГОСТ Р 55561-2013 Внутренний водный транспорт. Портовые гидротехнические сооружения. Требования безопасности: дата введения 01.07.2014. –Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2015. – 41 с.

257. ГОСТ Р 57148-2016 (ИСО 19901-1:2015) Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Проектирование и эксплуатация с учетом гидрометеорологических условий: дата введения 01.06.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 151 с.

258. ГОСТ Р 57431-2017 (ИСО 16903:2015) Газ природный сжиженный. Общие характеристики (Переиздание) от 30.03.2017 № 57431-2017 // Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019.

259. ГОСТ Р 58112-2018 Нефтяная и газовая промышленность. Арктические операции. Управление ледовой обстановкой. Сбор гидрометеорологических данных: дата введения 01.11.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – 31 с.

260. ГОСТ Р 70023-2022 Физическое моделирование волновых воздействий на портовые гидротехнические сооружения. Требования к построению модели, проведению экспериментов и обработке результатов: дата введения 22.02.2022. – М.: ФГБУ "РСТ", 2022. – 7 с.

261. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации: Федеральный закон от 30.04.1999 N 81-ФЗ (ред. от 28.06.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.12.2022) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 03.05.99. – № 18. – Ст. 2207.

262. Методические рекомендации по оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях водного хозяйства и промышленности. – Согласовано МЧС России от 14 августа 2001 г., N 9-4/02-644. – 23 с.

263. О безопасности гидротехнических сооружений (с изменениями на 11 июня 2021 года): Федеральный закон от 21.07.97 N 117-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1997. – № 30. – Ст. 3589.

264. Об утверждении Плана адаптации к изменениям климата в области транспорта: Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 2 марта 2022 г. № 69 // Сайт Министерства транспорта Российской Федерации [mintrans.gov.ru](http://mintrans.gov.ru). – 2022.



265. Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г.: Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. N 2115-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2022. – № 32. – Ст. 5862.

266. Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути (с изменениями на 19 сентября 2022 года): Постановление Правительства РФ от 18.09.2020 N 1487 (ред. от 19.09.2022) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – № 39. – Ст. 6064.

267. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ 18.09.2008 N Пр-1969): Указ Президента РФ от 18.09.2008 N Пр-1969 // Российская газета. – 2009. – № 53п. – Разделы I-IV.

268. Р 31.3.07-01 «Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения». Дополнение и уточнение СНиП 2.06.04-82\*. М., 2001.

269. Распоряжение Правительства Российской Федерации "Об утверждении национального плана мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 г." от 11.03.2023 № 559-р // Официальное опубликование правовых актов [publication.pravo.gov.ru](http://publication.pravo.gov.ru). 2023 г. № 0001202303130019.

270. Распоряжение Правительства РФ от 25 декабря 2019 г. № 3183-р "Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года" // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. 2019 г.

271. РД 31.3.05-97 Нормы технологического проектирования морских портов. – / Министерство транспорта Российской Федерации. - М.: Минтранс РФ, 1998. – 102 с.

272. РД 31.31.25-85 Инструкция по проектированию причальных сооружений для условий Арктики. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1986. – 96 с.

273. РД 31.31.27-81 руководство по проектированию морских причальных сооружений. – / Министерство морского флота. - М.: В/О "Мортехинформреклама", 1984. – 400 с.

274. РД 52.10.865-2017 Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения. – М.: Артифекс, 2019. – 58 с.

275. Свод правил " СП 350.1326000.2018 Нормы технологического проектирования морских портов" от 01.09.2018 // Официальное издание. М.: Стандартиформ. 2018 г.

276. Свод правил "СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82\*" от 16.08.2018 // М.: Стандартиформ, 2019 г.

277. Свод правил "СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения. Основные положения СНиП 33-01-2003" от 16.12.2019 // М.: Стандартиформ. 2020 г.

278. СНиП 2.06.04-82\* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – Минстрой России - М.: ГП ЦПП, 1995. – 46 с.

279. СП 277.1325800.2016 Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования: дата введения 17.06.17. – М.: Стандартиформ, 2017. – 91 с.

280. СП 287.1325800.2016 Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства. – М.: Стандартиформ, 2017. – 201 с.

281. СП 32-103-97 Проектирование морских берегозащитных сооружений. – М.: Корпорация "Трансстрой", 1998. – 223 с.

282. СП 444.1326000.2019 Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон маневрирования. – М.: Стандартиформ, 2019. – 58 с.

283. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (с Изменением N 1). – М.: Стандартиформ, 2017. – 122 с.

284. СП 482.1325800.2020 Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – М.: Стандартинформ, 2020. – 42 с.

285. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2010. – № 1. – Ст. 5.

286. Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года" от 26.10.2020 № 645 // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. 2020 г.

287. Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 "О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года" от 07.05.2018 № 204 // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. 2018 г.

#### **Интернет-ресурсы:**

288. Астрономическое образование с сохранением традиций: Ю.К.Земцов, К.В.Бычков. Курс лекций по атомной физике: сайт. – URL: <http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Zemcov/> (дата обращения: 27.07.2023).

289. Большая российская энциклопедия: сайт: [Порт]. – URL: [https://bigenc.ru/technology\\_and\\_technique/text/3159941](https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/3159941) (дата обращения: 13.01.2023).

290. Большое будущее порта Корсаков: сайт. – URL: <https://morvesti.ru/analitika/1692/99822/> (дата обращения: 15.08.2023).

291. Газпром. Заводы XXI века. сайт. – <https://www.gazprom.ru/press/media/2019/888458/> (дата обращения: 06.04.2023).

292. Грузооборот морских портов России в 2022 году увеличился на 0,7% (детализация): сайт. – URL: <https://portnews.ru/news/341725/> (дата обращения: 15.08.2023).

293. Грузооборот морских портов России за 12 месяцев 2022 г: сайт. – URL: <https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskih-portov-rossii-za-12-mesyacev-2022-g> (дата обращения: 15.08.2023).

294. Грузооборот порта Анадырь (Чукотка) в 2022 году увеличился на 17,5% — до 1,4 млн тонн: сайт. – URL: <https://portnews.ru/news/339823/> (дата обращения: 15.08.2023).

295. Грузооборот порта Тикси (Якутия) в 2022 году вырос на 60% — до 670,8 тыс. тонн: сайт. – URL: <https://portnews.ru/news/337294/> (дата обращения: 15.08.2023).

296. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС): сайт. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/51479> (дата обращения: 06.04.2023). – Объем перевозок грузов в акватории Северного морского пути.

297. Инвестиционная привлекательность. О муниципальном образовании «Корсаковский городской округ Сахалинской области»: сайт. – URL: <https://invest-korsakov.ru/climate/attract/> (дата обращения: 15.08.2023).

298. Лукин Ю. Ф. Великий передел Арктики продолжается / Ю. Ф. Лукин. // narfu.ru: [сайт], 2010 — URL: [https://narfu.ru/en/research/journals/ann\\_new/news.php?ELEMENT\\_ID=97840](https://narfu.ru/en/research/journals/ann_new/news.php?ELEMENT_ID=97840) (дата обращения: 28.04.2021).

299. Михайлов А. Приращение Севером. Российская Арктика стала больше на 1,2 миллиона квадратных километров / А. Михайлов. // rg.ru: [сайт], 1998. — URL: <https://rg.ru/2019/10/22/reg-szfo/rossijskaia-arktika-stala-bolshe-na-12-milliona-kvadratnyh-kilometrov.html> (дата обращения: 28.04.2021).

300. Морской терминал по перегрузке СПГ (Камчатка): [сайт]. — URL: <https://energybase.ru/processing-plant/novatek-lng-terminal-kamchatka> (дата обращения: 16.08.2023).

301. Новые порты Северного морского пути: сайт. – URL: <https://geonovosti.terratech.ru/economy/novye-porty-severnogo-morskogo-puti/> (дата обращения: 16.08.2023).

302. Огородов С.А. и др. Атлас абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны Российской Арктики. Электронное издание. Версия 12.2020. Москва, НИЛ геоэкологии Севера географического ф-та МГУ, 2020, 69 стр., <https://arcticcoast.ru/>

303. П.-Камчатский порт развивает мощности и очищает акваторию: сайт. – URL: <https://morvesti.ru/exclusive/100564/> (дата обращения: 15.08.2023).

304. Певек с высоты — самый северный город России: сайт. – <https://gelio.livejournal.com/263816.html> (дата обращения: 07.03.2023).

305. Перечень морских портов Российской Федерации, в которых осуществляет деятельность ФГУП «Росморпорт»: сайт. – URL: <https://www.rosmorport.ru/services/seaports/> (дата обращения: 27.11.2022).

306. Порт Диксон прирастает терминалами: сайт. – URL: <https://morvesti.ru/analitika/1692/101831/> (дата обращения: 15.08.2023).

307. Порт Индига: сайт. – URL: <https://arctic-russia.ru/project/port-indiga/> (дата обращения: 15.08.2023).

308. Порты Приморья и Восточной Арктики наращивают обороты: сайт. – URL: <https://morvesti.ru/exclusive/103056/> (дата обращения: 15.08.2023).

309. Прогноз глобального потепления, сделанный 50 лет назад, по-прежнему точен // ClimateScience: сайт. – URL: <https://climatescience.ru/articles/5fc4fab53f56c40024a4c650> (дата обращения: 23.08.2023).

310. Развитие портов российской Арктики: сайт. – URL: [https://morproekt.ru/attachments//article//1116//arctic\\_projects\\_2020\\_plus.pdf](https://morproekt.ru/attachments//article//1116//arctic_projects_2020_plus.pdf) (дата обращения: 16.08.2023).

311. Росприроднадзор выдал положительное заключение по проекту Порт Эльга: сайт. – URL: <https://www.rusexporter.ru/news/detail/20481/> (дата обращения: 15.08.2023).

312. Сайт рабочей группы "Динамики берегов и дна Арктических морей" лаборатория геоэкологии севера: Атлас Абразионной и ледово-экзарационной

опасности прибрежно-шельфовой зоны российской Арктики: сайт. – URL: <https://rus.arcticcoast.ru/atlas/> (дата обращения: 23.07.2023).

313. Священная клюшка. Стоит ли верить в заговор климатологов // N + 1: сайт. – URL: <https://nplus1.ru/material/2020/01/24/not-hockey-stick-for-climate-change> (дата обращения: 23.08.2023).

314. Северный Морской Путь — Итоги 2020 года презентация Росатом. // arctic.gov.ru: [сайт]. — URL: <https://arctic.gov.ru/wp-content/uploads/2021/02/2020.pdf> (дата обращения: 19.11.2021).

315. Справочник по универсальной десятичной классификации (УДК): сайт. – URL: <https://www.teacode.com/online/udc/62/627.21.html> (дата обращения: 09.08.2023).

316. Страница концерна "Росэнергоатом" Госкорпорации "Росатом": сайт. – URL: [https://vk.com/rearu?w=wall-131845999\\_25928&z=photo-131845999\\_457252628/album-131845999\\_00/rev](https://vk.com/rearu?w=wall-131845999_25928&z=photo-131845999_457252628/album-131845999_00/rev) (дата обращения: 30.05.2023).

317. Фадеева, А. Заполярная утечка федерального масштаба / А. Фадеева, С. Бурмистрова, Л. Подобедова – Текст: электронный // rbc.ru: [сайт]. – 2020. – 4 июня. – URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2020/06/05/5ed7b3a19a79470f8a58995b> (дата обращения: 15.03.2023).

318. Филиал ФГБУ «АМП Охотского моря и Татарского пролива» в морском порту Магадан: сайт. – URL: <http://ampvanino.ru/magadan/> (дата обращения: 15.08.2023).

319. Что уже сделано и что планируется для развития инфраструктуры северных морских портов: сайт. – URL: <https://rg.ru/2023/04/17/reg-dfo/led-raskololsia.html> (дата обращения: 15.08.2023).

320. Яндекс Карты: сайт. – URL: [https://yandex.ru/maps/?l=sat%2Cskl&ll=33.473587%2C69.237593&source=entity\\_search&z=12](https://yandex.ru/maps/?l=sat%2Cskl&ll=33.473587%2C69.237593&source=entity_search&z=12) (дата обращения: 21.01.2023).

321. Argo. Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego: сайт. – URL: <https://argo.ucsd.edu/> (дата обращения: 23.07.2023).

322. Carbon Dioxide Information Analysis Center: сайт. – URL: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/ftp/trends/temp/vostok/vostok.1999.temp.dat> (дата обращения: 16.04.2023).

323. Charctic Interactive Sea Ice Graph // nsidc.org: [сайт]. — URL: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-ice-graph/> (дата обращения: 08.08.2023).

324. Christophe de Margerie Class Icebreaking LNG Carriers // ship-technology.com: сайт. – URL: <https://www.ship-technology.com/projects/christophe-de-margerie-class-icebreaking-lng-carriers/> (дата обращения: 15.03.2023).

325. Data Analysis Tool. сайт. – [sealevel.nasa.gov/data-analysis-tool/#b=ESRI\\_World\\_Imagery&l=OSMCoastlines\(1\)&vm=2D&ve=33.728933240573525,61.606100838234624,60.728933240573525,74.86000708823462&pl=false&pb=false&tr=false&d=2023-03-19&tlr=months](https://sealevel.nasa.gov/data-analysis-tool/#b=ESRI_World_Imagery&l=OSMCoastlines(1)&vm=2D&ve=33.728933240573525,61.606100838234624,60.728933240573525,74.86000708823462&pl=false&pb=false&tr=false&d=2023-03-19&tlr=months) (дата обращения: 22.03.2023).

326. Did global warming stop in 1998? // climate.gov: [сайт]. — URL: <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/did-global-warming-stop-1998> (дата обращения: 02.05.2021).

327. Global climate change. Vital signs of the Planet: сайт. – URL: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/> (дата обращения: 22.07.2023).

328. Gonzalo Aragonés. El gas ruso da un nuevo paso a través del hielo // lavanguardia.com: [сайт]. — URL: <https://www.lavanguardia.com/economia/20210128/6193859/rusia-gas-norte-artico-comercio-hielo.html> (дата обращения: 05.12.2021).

329. March 2022 compared to previous years. // nsidc.org: [сайт]. — URL: <http://nsidc.org/arcticseaicenews> (дата обращения: 16.04.2023).

330. nasa.gov: [сайт]. — URL: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif>. (дата обращения: 02.05.2021).

331. Queen Elizabeth впервые в Ялте: сайт. – URL: <https://mark0vich.livejournal.com/6189.html> (дата обращения: 07.03.2023).

332. RCP Database (Representative Concentration Pathways) - Version 2.0: сайт. – URL: <https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=compare> (дата обращения: 05.08.2023).

333. RealClimate Климатология от ученых-климатологов...: Последние тенденции выбросов CO<sub>2</sub>: сайт. – URL: <https://www.realclimate.org/index.php/archives/2010/06/recent-trends-in-co2-emissions/> (дата обращения: 29.07.2023).

334. Sea level change. Observations from Space: сайт. – URL: <https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/regional-sea-level/overview> (дата обращения: 06.08.2023).

335. Sea level projection tool. сайт. – [sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool](https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool). (дата обращения: 22.03.2023).

336. SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 2.0: сайт. – URL: <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=40> (дата обращения: 16.04.2023).

337. Temperature Change and Carbon Dioxide Change. // noaa.gov: [сайт]. — URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/global-warming/temperature-change> (дата обращения: 02.05.2022).

338. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. // noaa.gov: [сайт]. — URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html> (дата обращения: 04.08.2023).

339. Trends in Atmospheric Methane. // noaa.gov: [сайт]. — URL: [https://gml.noaa.gov/ccgg/trends\\_ch4/](https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/) (дата обращения: 04.08.2023).



## Приложение А

### Авторская программа для ЭВМ №1 и полученные с её помощью результаты

В приложении представлена информация о разработанной автором программе для ЭВМ, позволившей провести моделирование различных вариантов значений изменения уровня режима акватории и отобразить в рамках мелководной зоны наибольшее изменение высот волн при их трансформации. Программа для ЭВМ была зарегистрирована в ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» Роспатента Министерства экономического развития Российской Федерации (см. Рисунок А.1). Укрупнённый алгоритм работы основного блока авторской программы для ЭВМ показан на Рисунке А.2.



Рисунок А.1 - Свидетельство о регистрации автором программы для ЭВМ «Программа для расчёта изменения высоты трансформируемой волны в мелководной зоне при повышении уровня режима акватории».

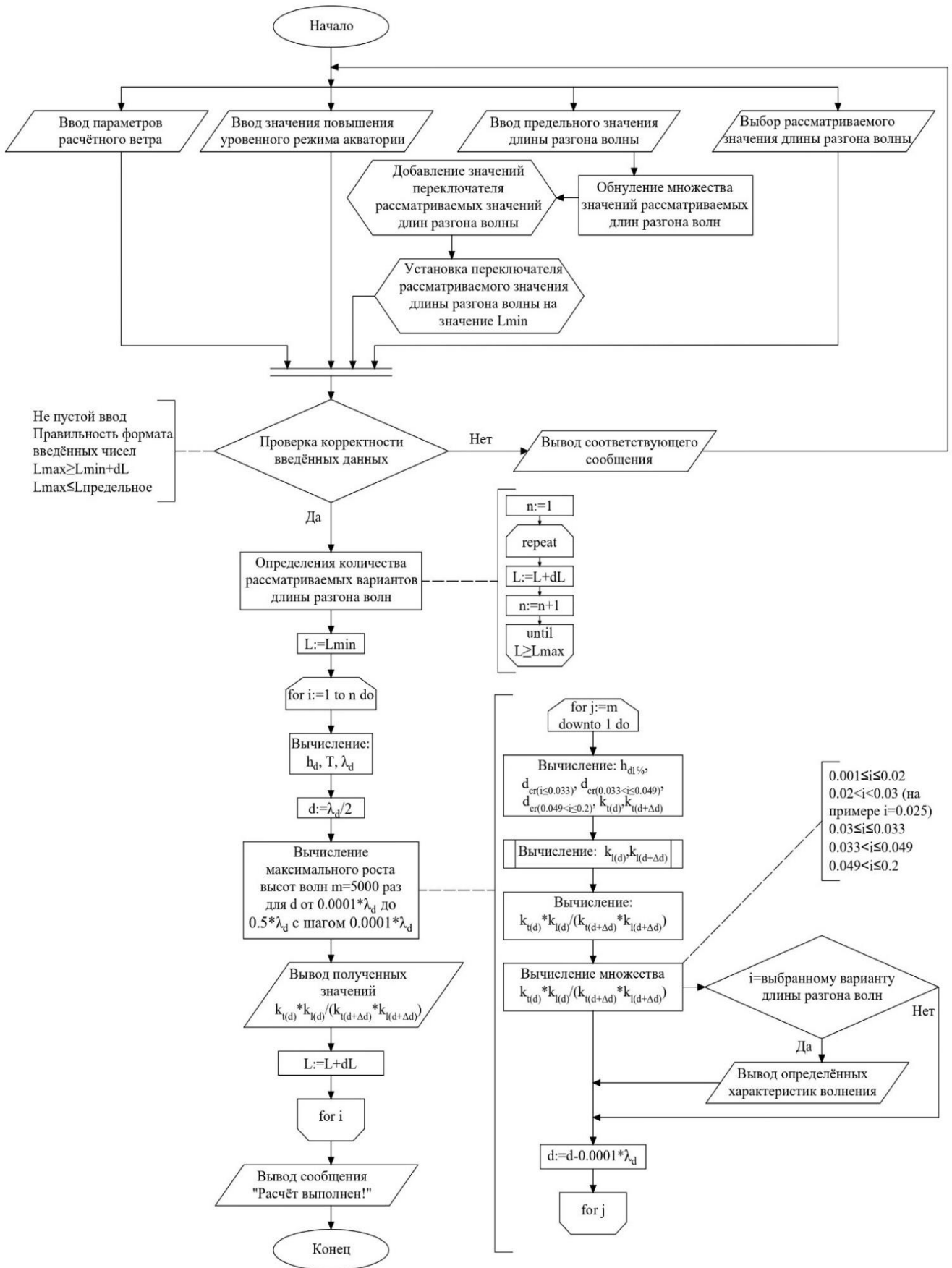


Рисунок А.2 - Укрупнённый алгоритм работы основного блока программы для ЭВМ «Программа для расчёта изменения высоты трансформируемой волны в мелководной зоне при повышении уровня режима акватории».

Благодаря использованию программы для ЭВМ удалось для заданных значений скорости ветра и повышения уровня режима акватории получить для максимальных длин разгона только максимальные значения изменения отношения коэффициентов трансформации и совокупных потерь при трансформации волн в мелководной зоне. В результате количество рассматриваемых значений снизилось с 54.5 млн до 10900 значений. Однако при рассмотрении 8 вариантов скоростей ветра при 5 вариантах уклона дна, получаем 40 расчётных случаев по 10900 значений, что усложняет анализ полученных данных и делает наиболее целесообразным представление результатов в графическом виде (см. Рисунок А.3 – А.42). Обилие графиков привело к необходимости вынесения результатов в приложение, что не умаляет значимости полученных данных.

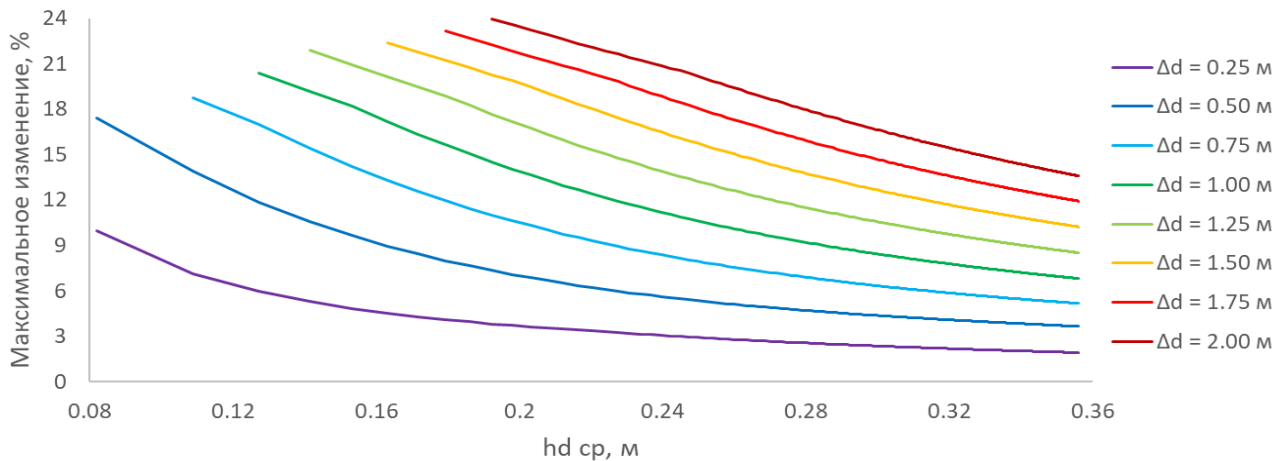


Рисунок А.3 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max} (k_t * k_l)$  при  $i \leq 0.02$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 5$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

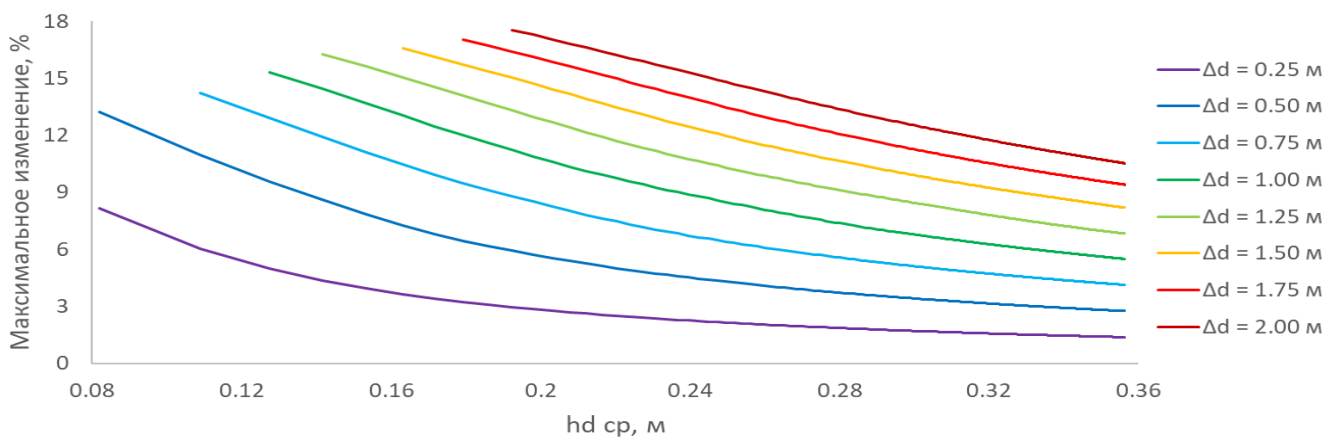


Рисунок А.4 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max} (k_t * k_l)$  при  $i = 0.025$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 5$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

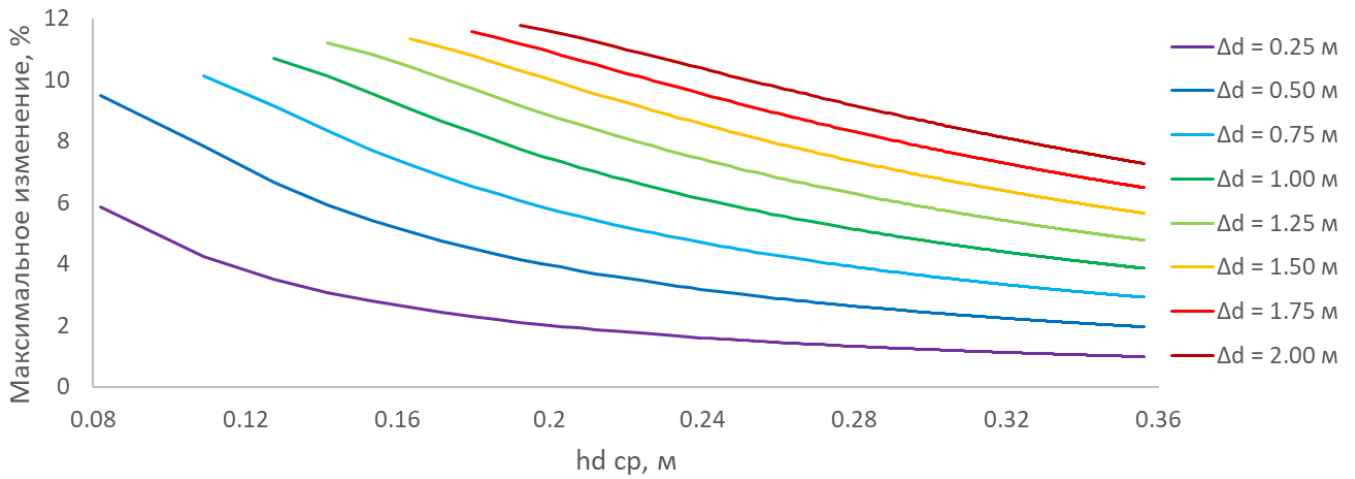


Рисунок А.5 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}(k_t * k_l)$  при  $i [0.03; 0.033]$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 5$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

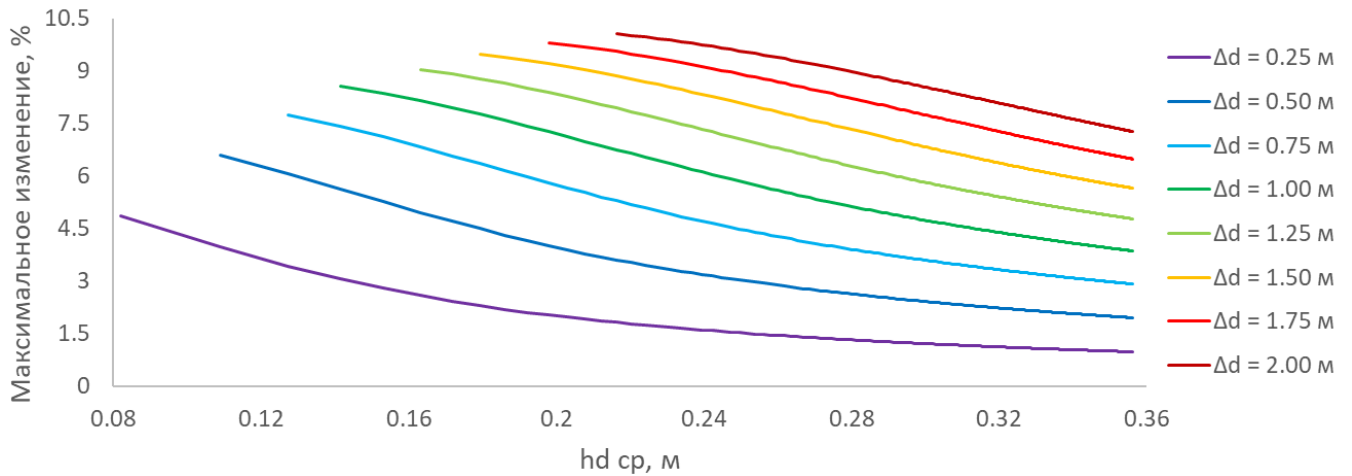


Рисунок А.6 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}(k_t * k_l)$  при  $i (0.033; 0.049]$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 5$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

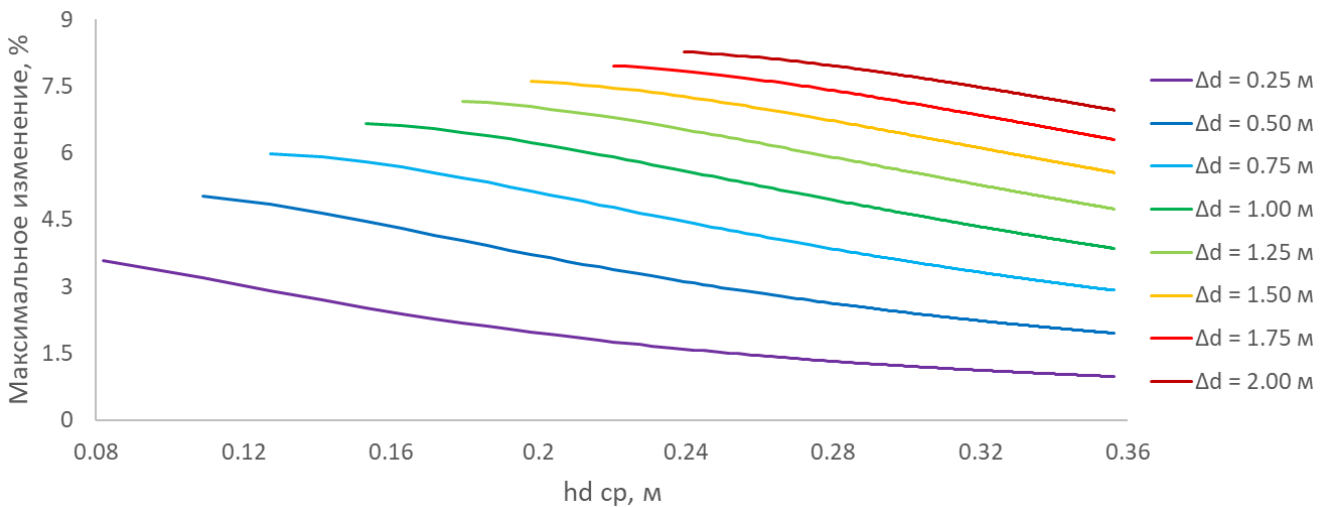


Рисунок А.7 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}(k_t * k_l)$  при  $i (0.049; 0.2]$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 5$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

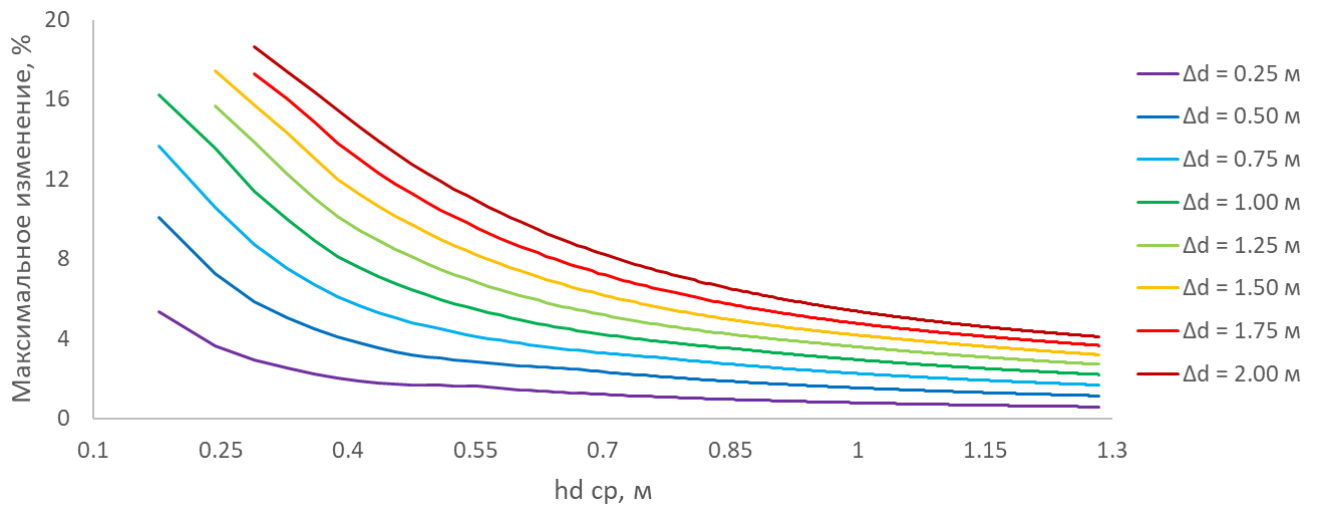


Рисунок А.8 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max} (k_t * k_l)$  при  $i \leq 0.02$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=10$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

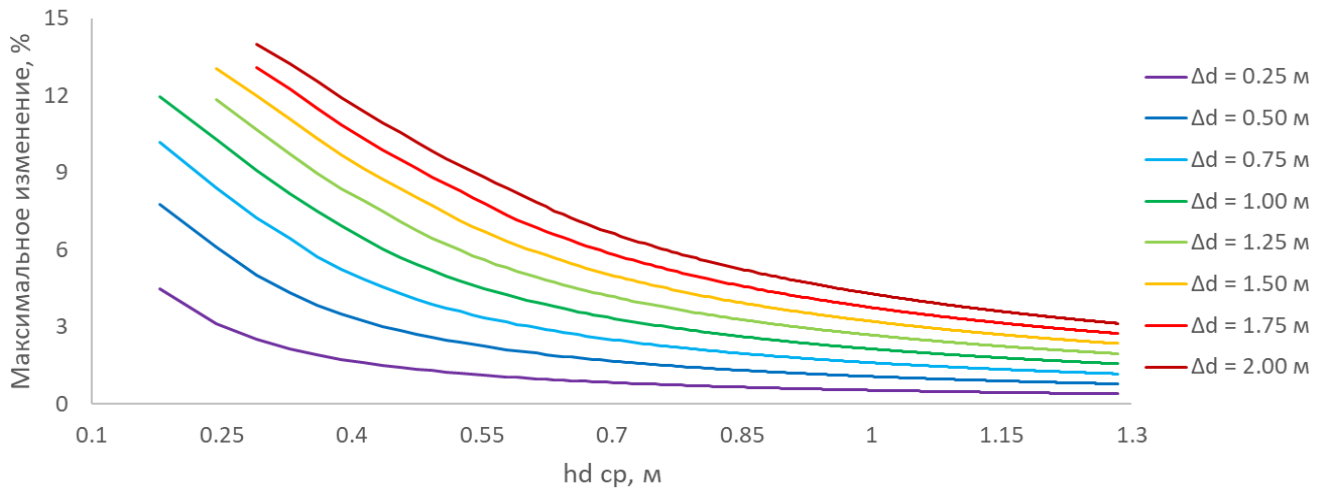


Рисунок А.9 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max} (k_t * k_l)$  при  $i=0.025$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=10$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

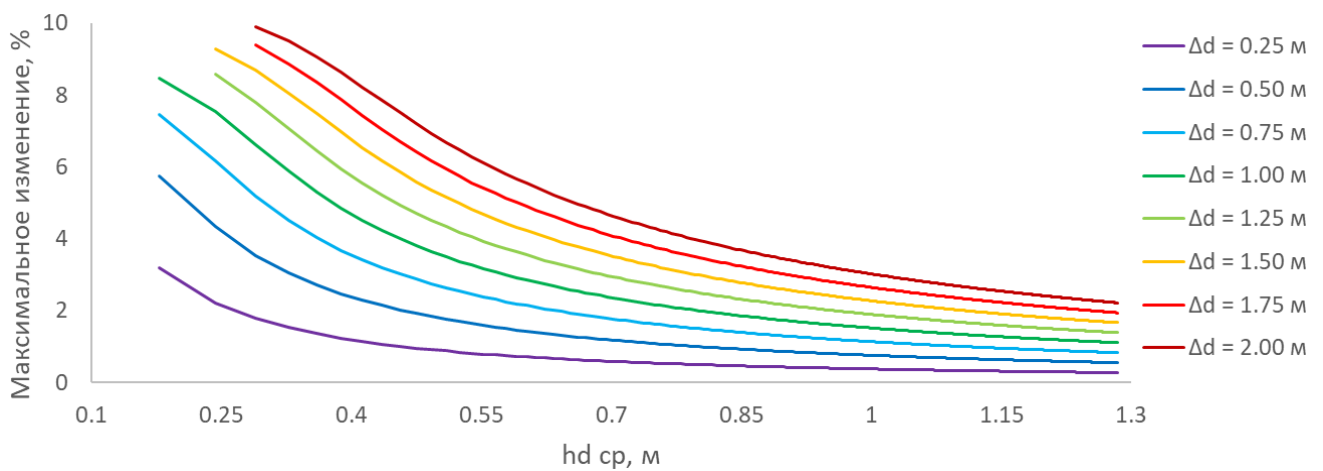


Рисунок А.10 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max} (k_t * k_l)$  при  $i [0.03; 0.033]$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=10$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

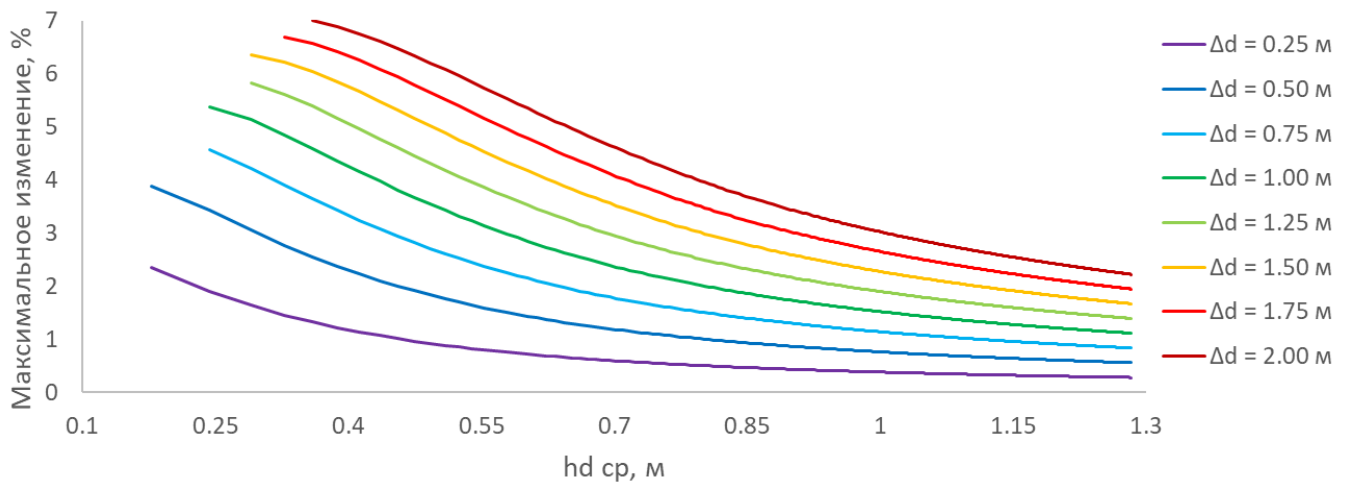


Рисунок А.11 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.033;0.049),  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=10$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

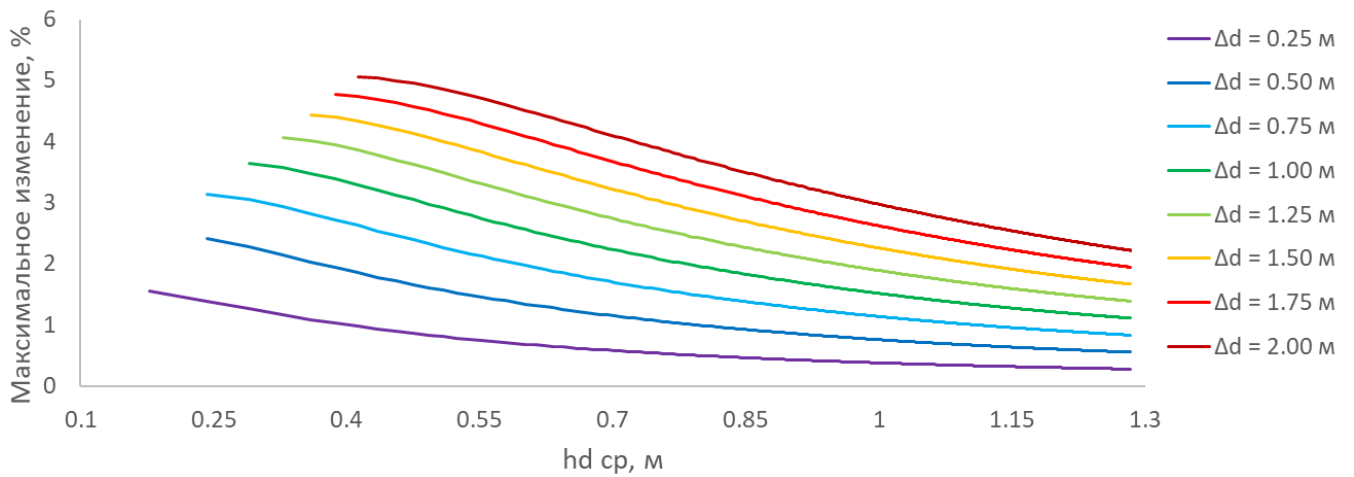


Рисунок А.12 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.049;0.2),  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=10$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

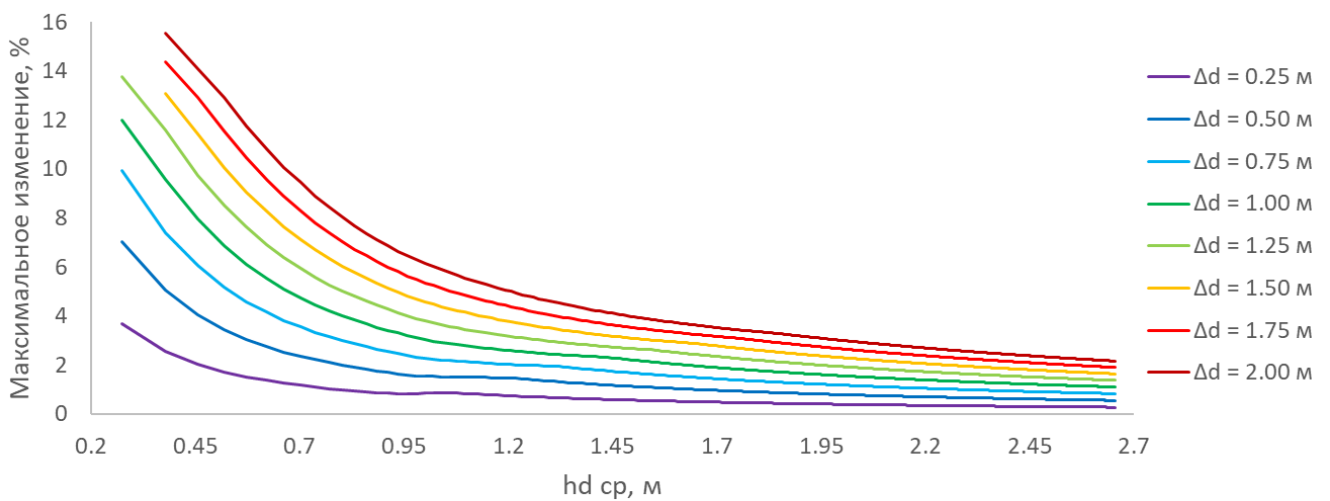


Рисунок А.13 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i \leq 0.02$ ,  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=15$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

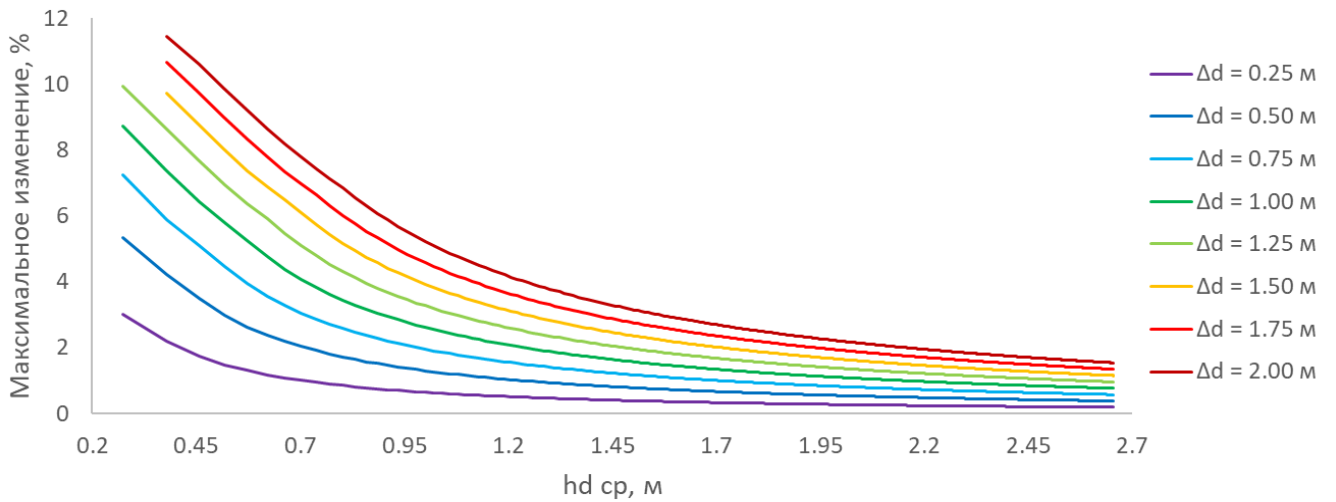


Рисунок А.14 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i=0.025$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=15$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

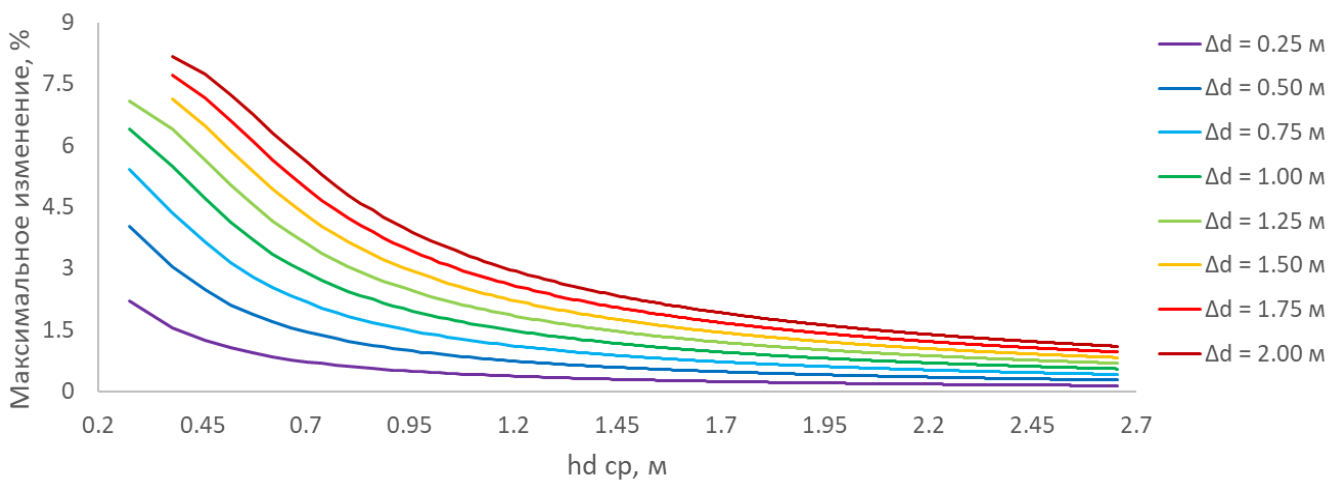


Рисунок А.15 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i [0.03; 0.033]$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=15$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

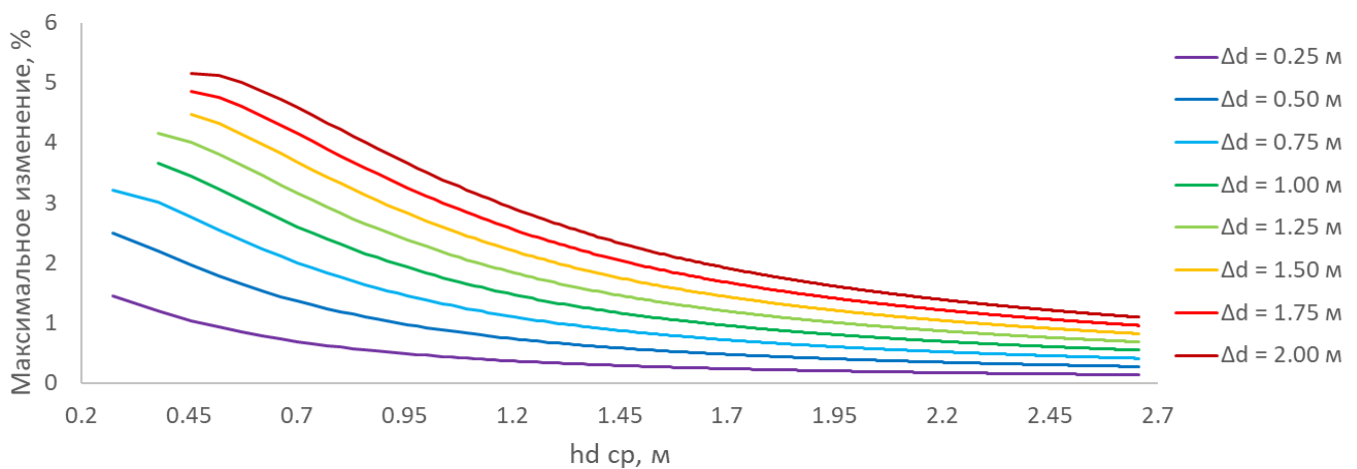


Рисунок А.16 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i (0.033; 0.049)$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=15$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

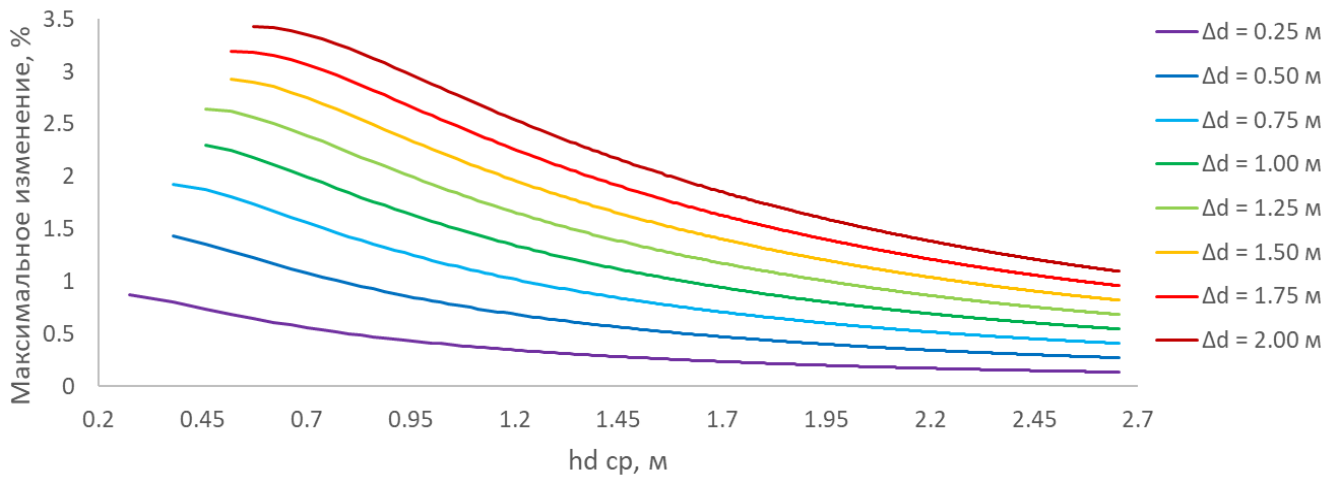


Рисунок А.17 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}(k_t * k_l)$  при  $i(0.049;0.2)$ ,  $d[d_{cr};0.5]$  и  $V_w=15$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

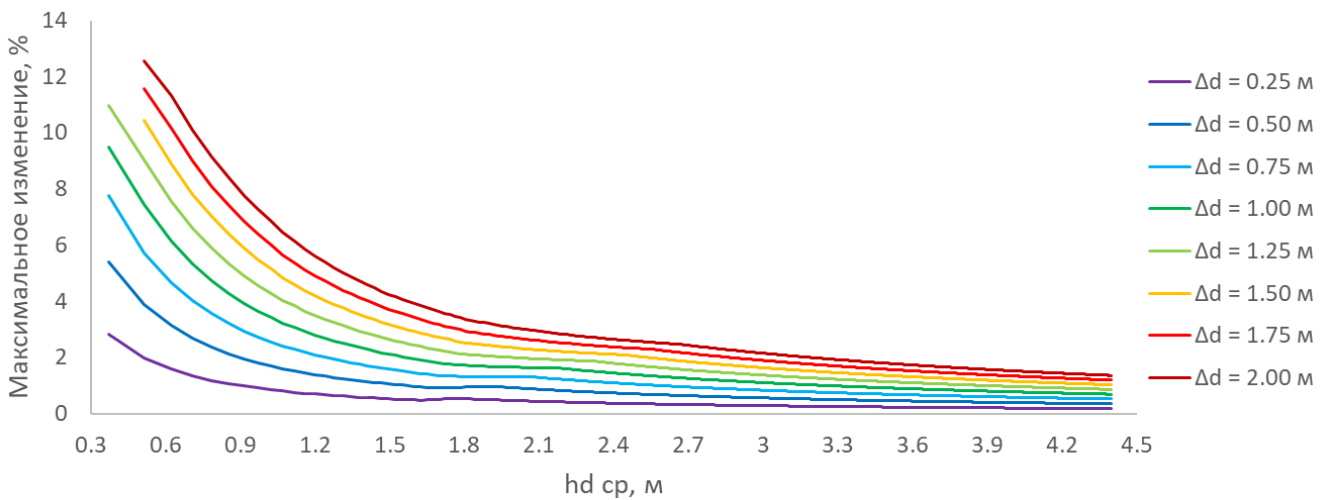


Рисунок А.18 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}(k_t * k_l)$  при  $i \leq 0.02$ ,  $d[d_{cr};0.5]$  и  $V_w=20$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

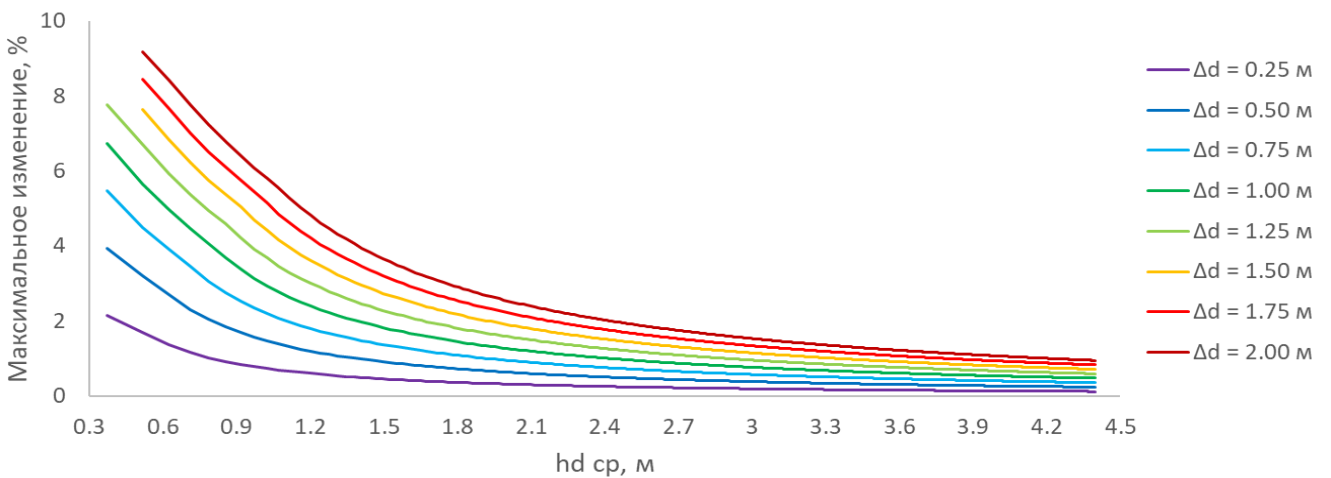


Рисунок А.19 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}(k_t * k_l)$  при  $i=0.025$ ,  $d[d_{cr};0.5]$  и  $V_w=20$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.



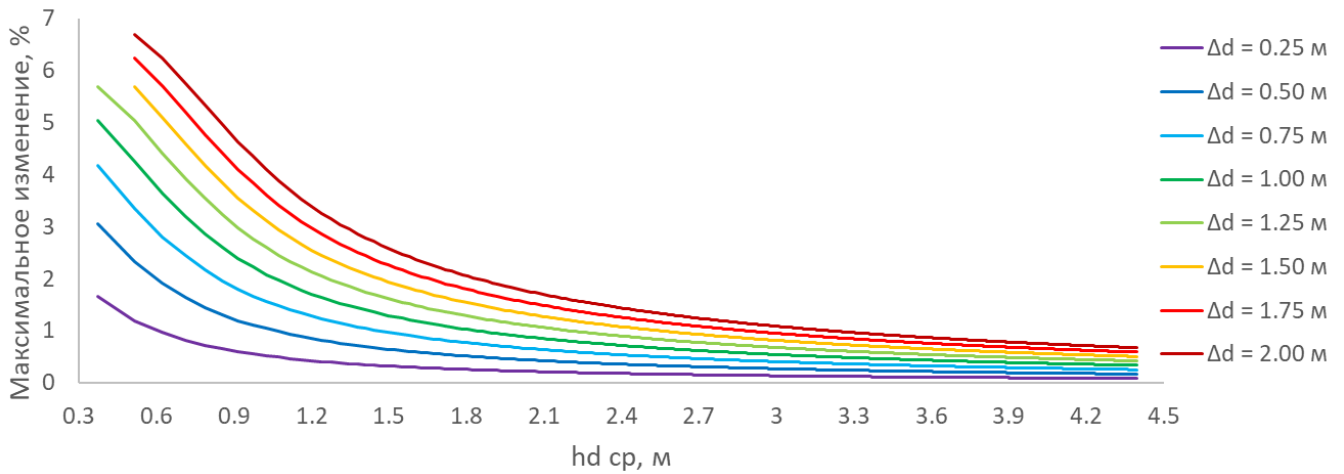


Рисунок А.20 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  [0.03;0.033],  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=20$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

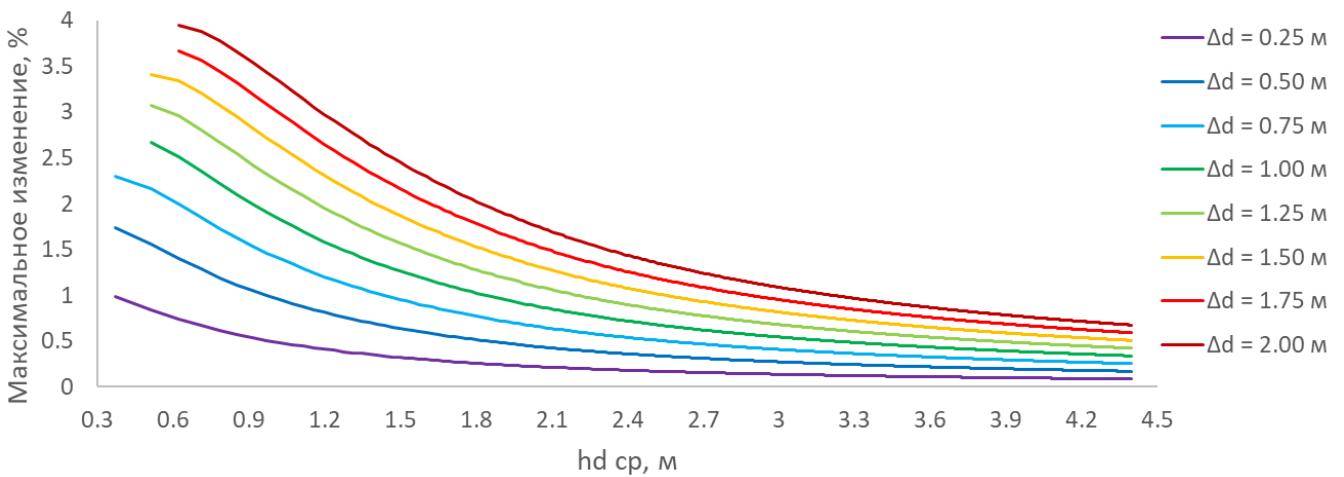


Рисунок А.21 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.033;0.049],  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=20$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

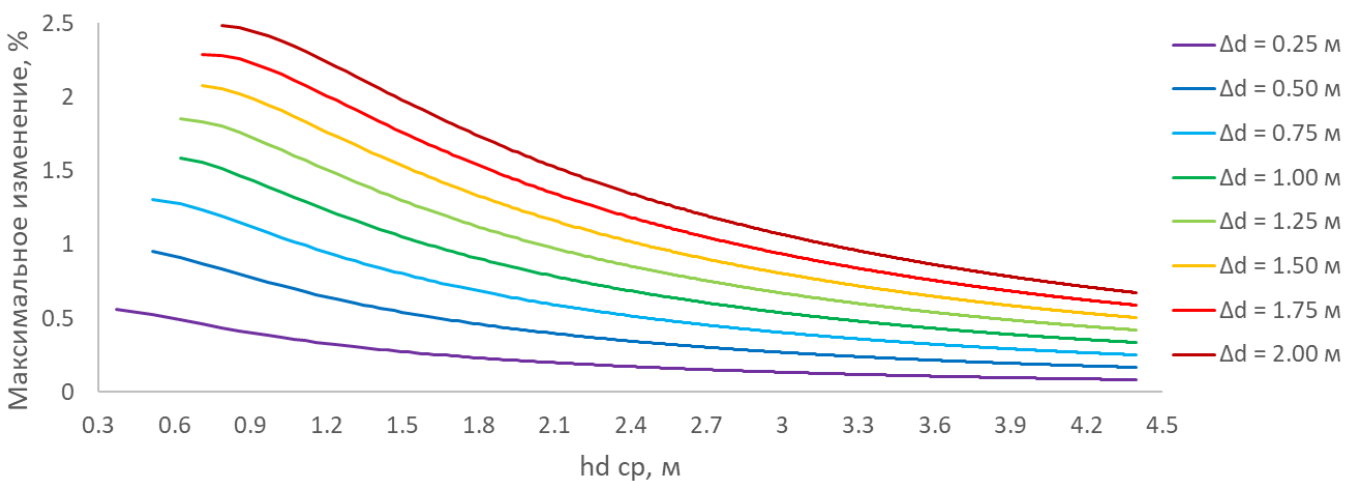


Рисунок А.22 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.049;0.2],  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=20$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

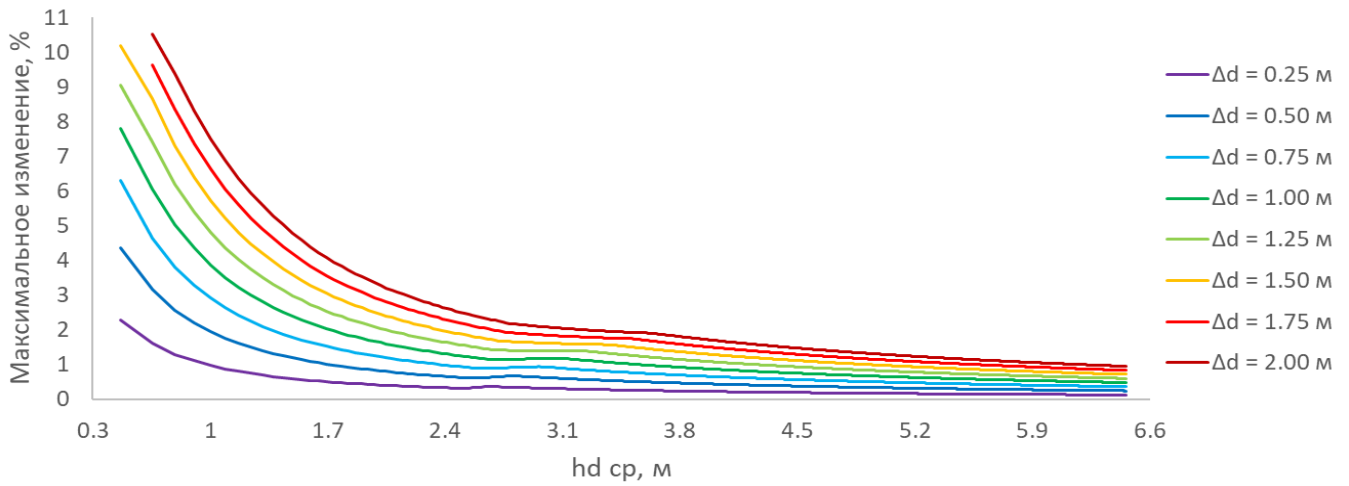


Рисунок А.23 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}(k_t * k_l)$  при  $i \leq 0.02$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 25$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

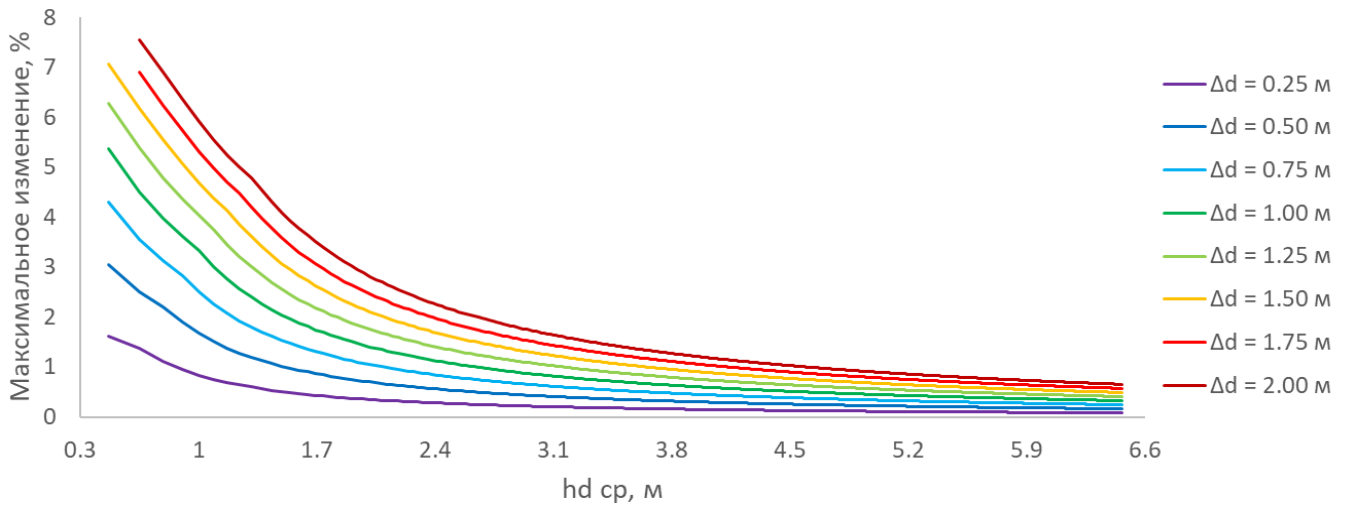


Рисунок А.24 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}(k_t * k_l)$  при  $i = 0.025$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 25$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

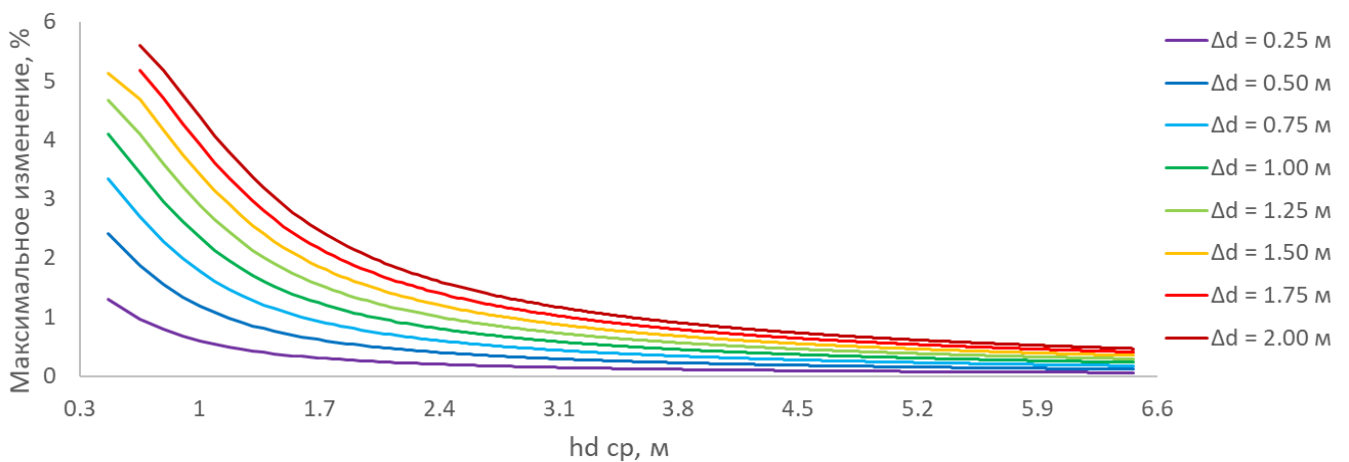


Рисунок А.25 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}(k_t * k_l)$  при  $i [0.03; 0.033]$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 25$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

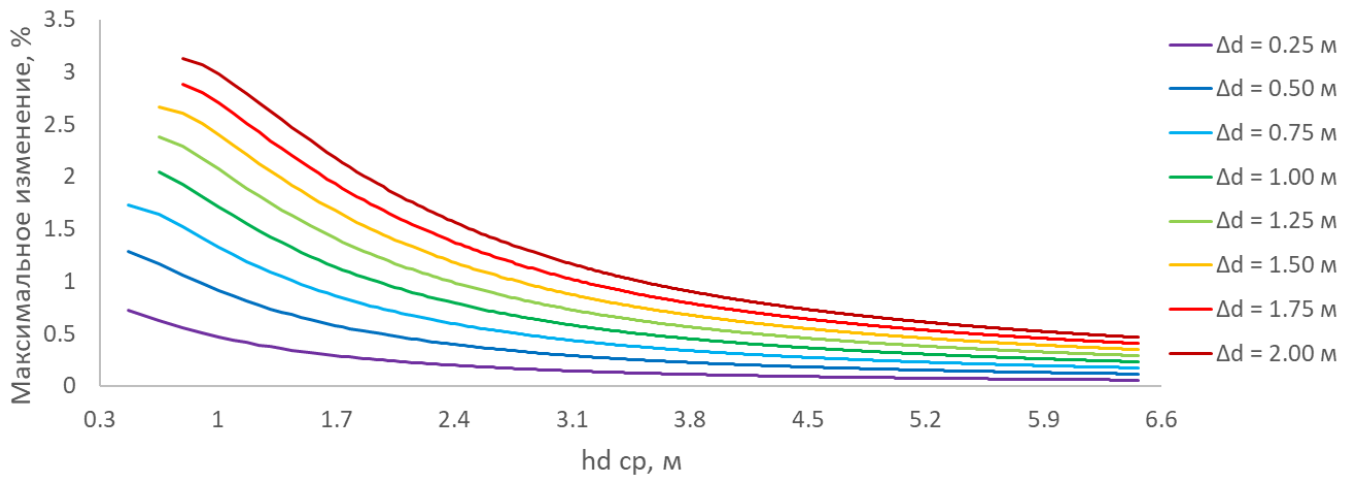


Рисунок А.26 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.033; 0.049],  $d$  [ $d_{cr}$ ; 0.5] и  $V_w = 25$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

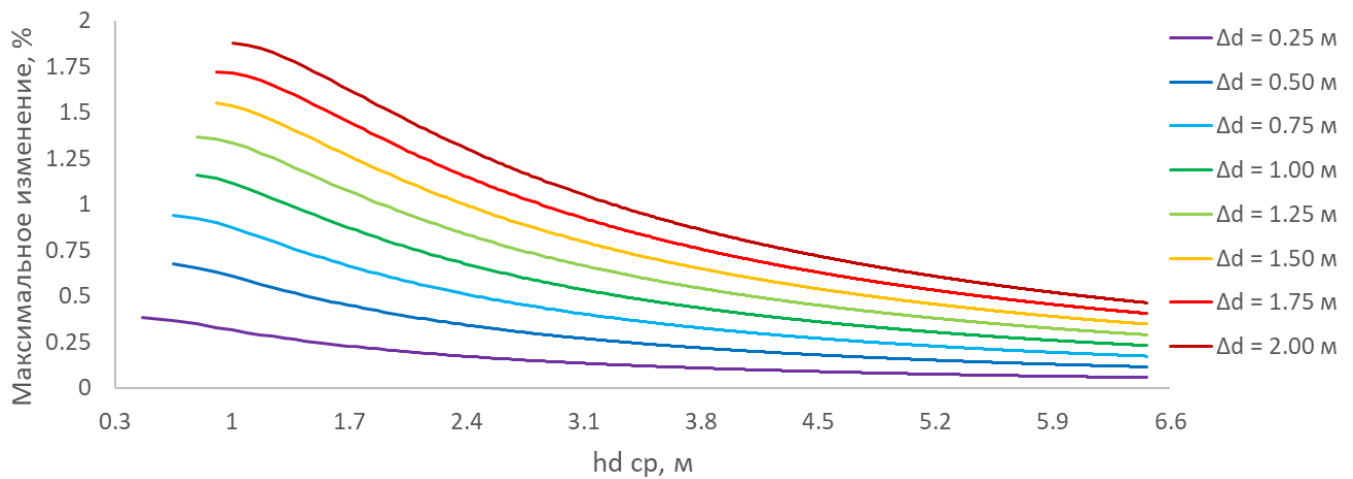


Рисунок А.27 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.049; 0.2],  $d$  [ $d_{cr}$ ; 0.5] и  $V_w = 25$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

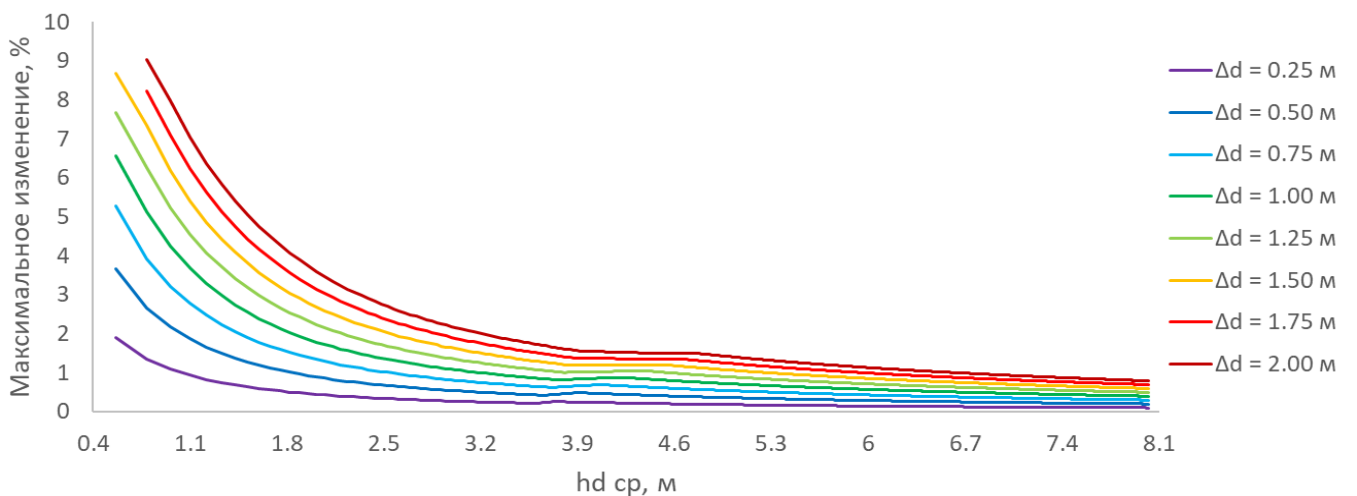


Рисунок А.28 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i \leq 0.02$ ,  $d$  [ $d_{cr}$ ; 0.5] и  $V_w = 30$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

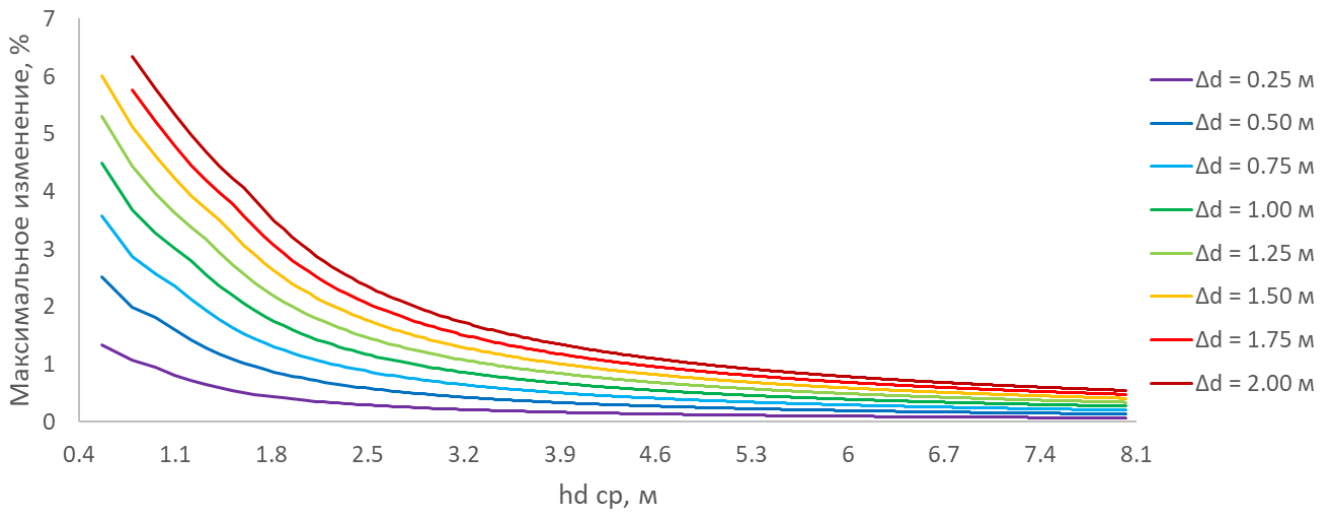


Рисунок А.29 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i=0.025$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=30$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

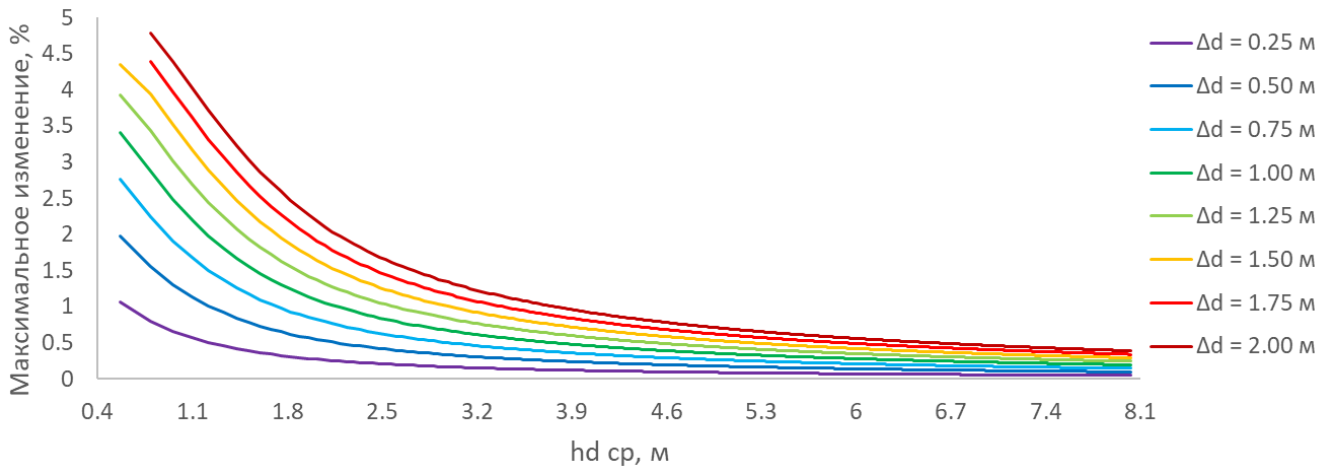


Рисунок А.30 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i [0.03; 0.033]$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=30$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

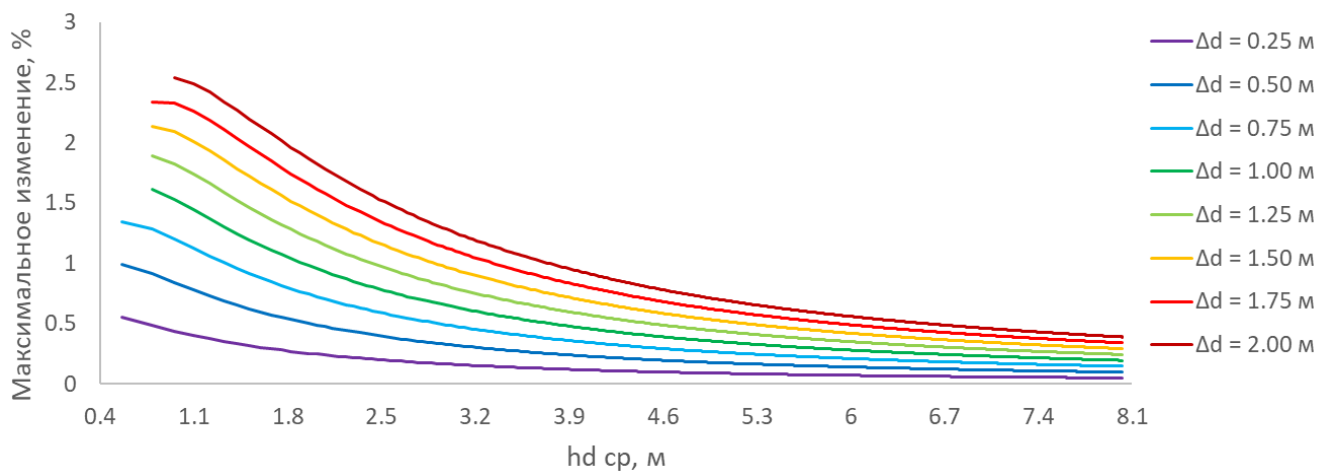


Рисунок А.31 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i (0.033; 0.049)$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w=30$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

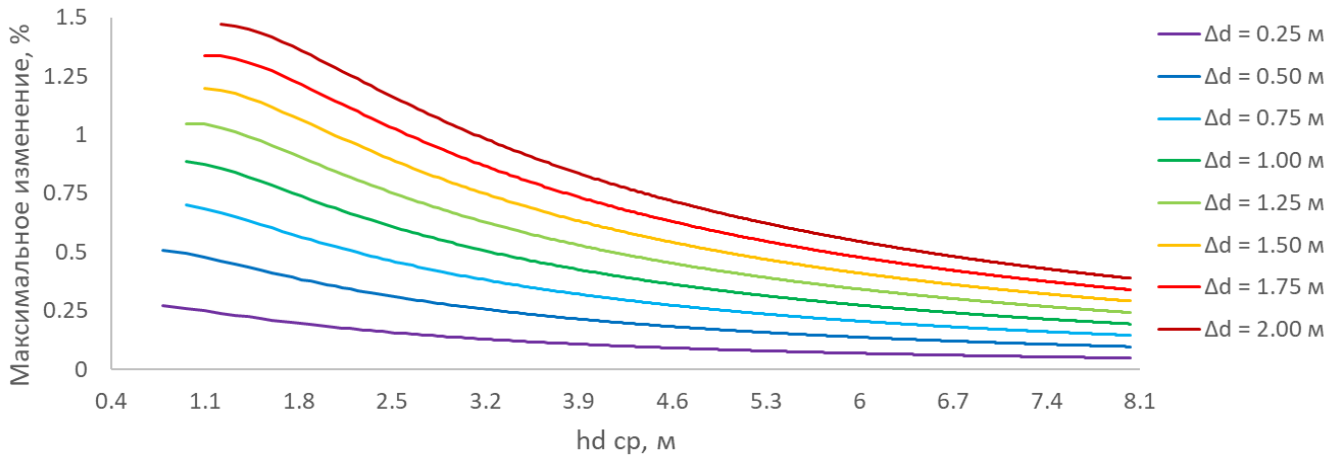


Рисунок А.32 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i (0.049; 0.2)$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 30$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

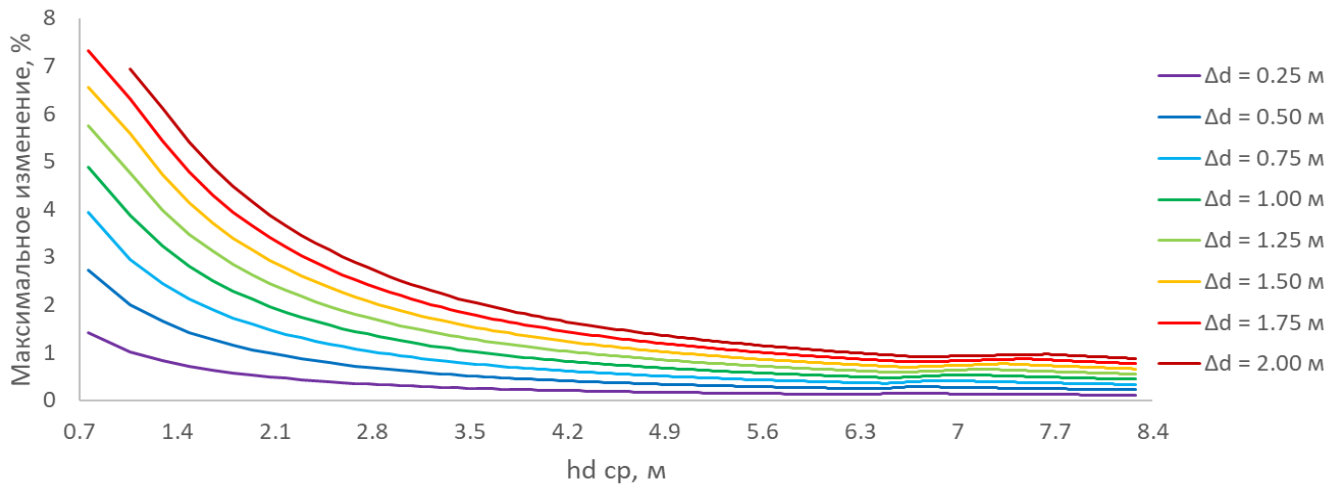


Рисунок А.33 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i \leq 0.02$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 40$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

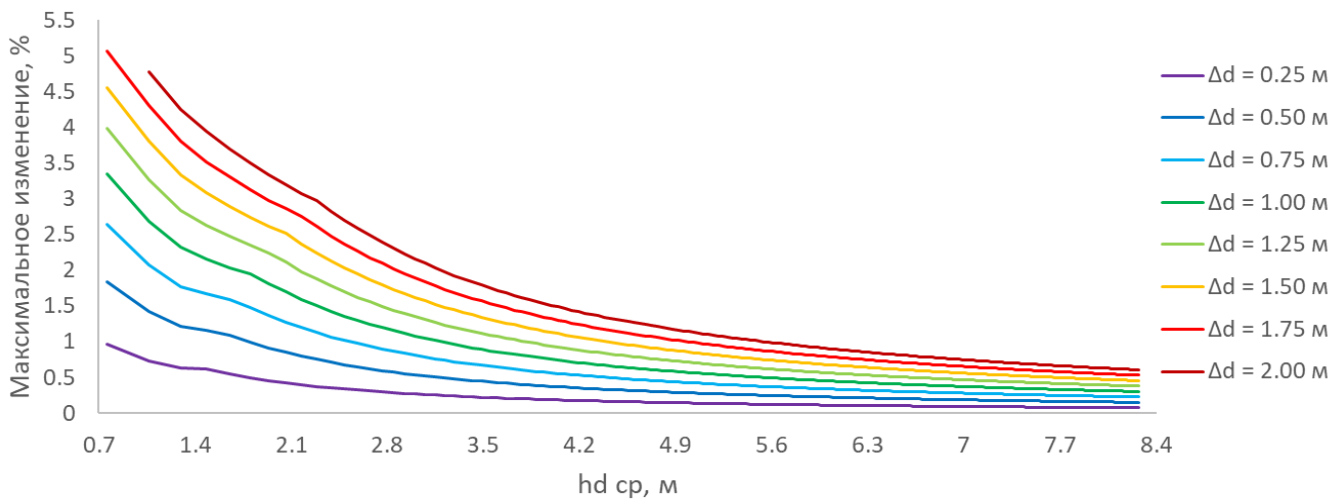


Рисунок А.34 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i = 0.025$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 40$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

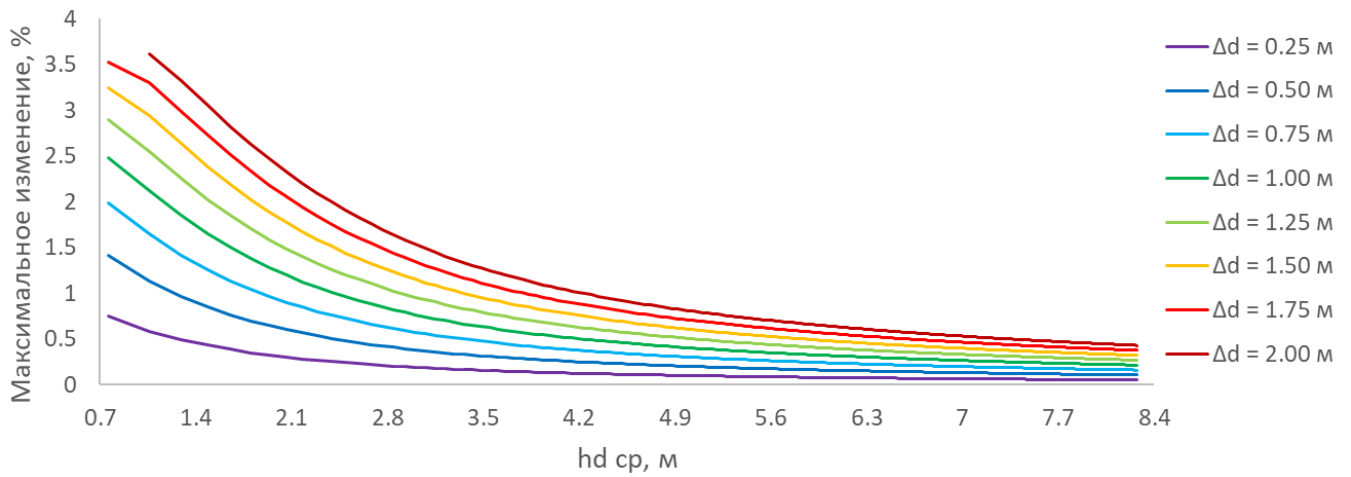


Рисунок А.35 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  [0.03;0.033],  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=40$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

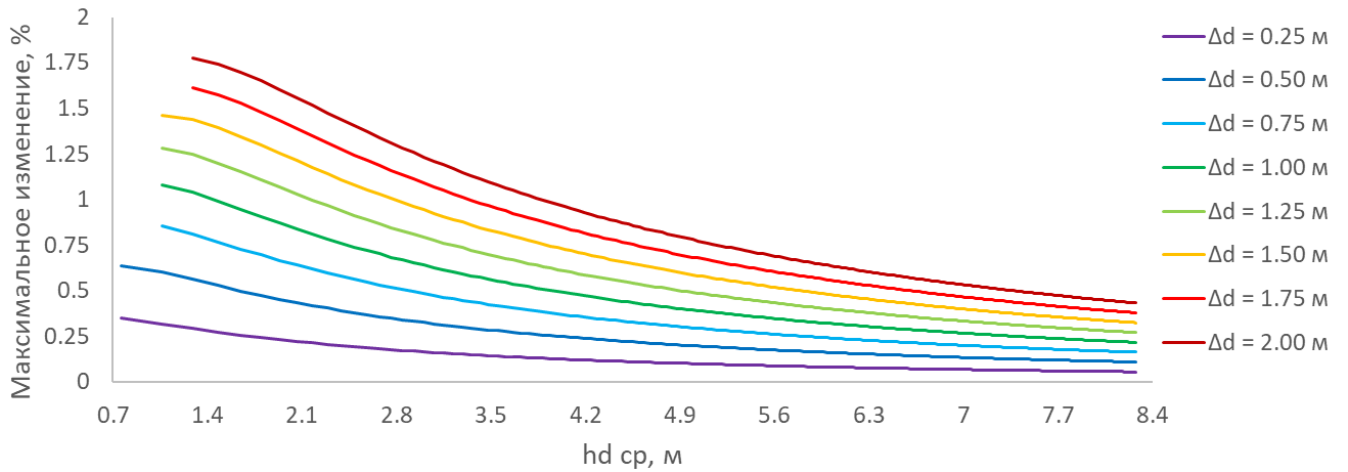


Рисунок А.36 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.033;0.049),  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=40$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

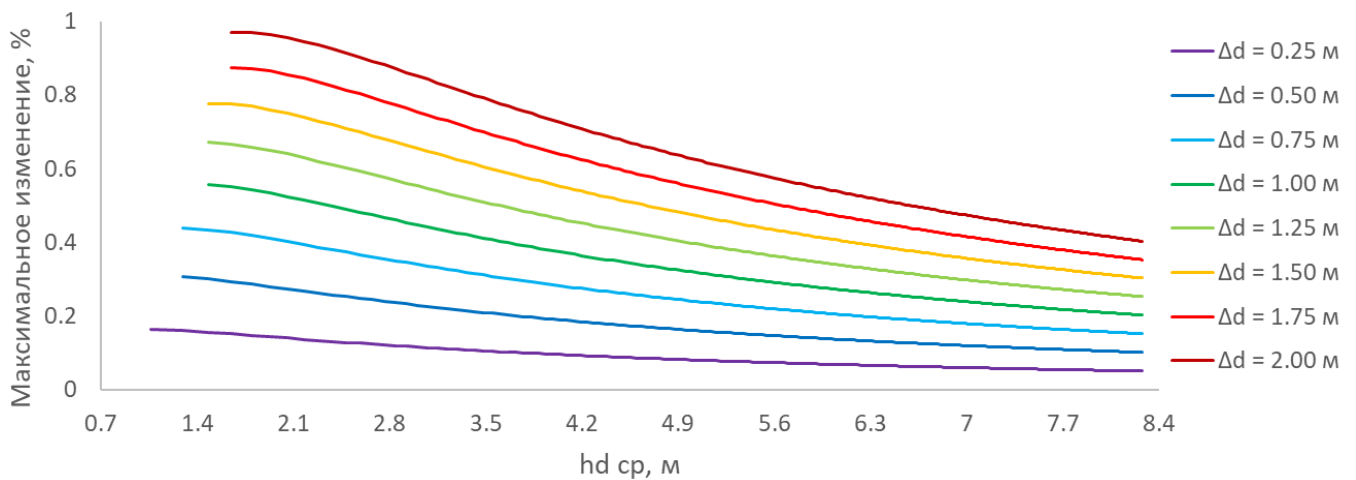


Рисунок А.37 - Номограмма зависимости  $\Delta_{\max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.049;0.2),  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=40$  м/с при различных значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

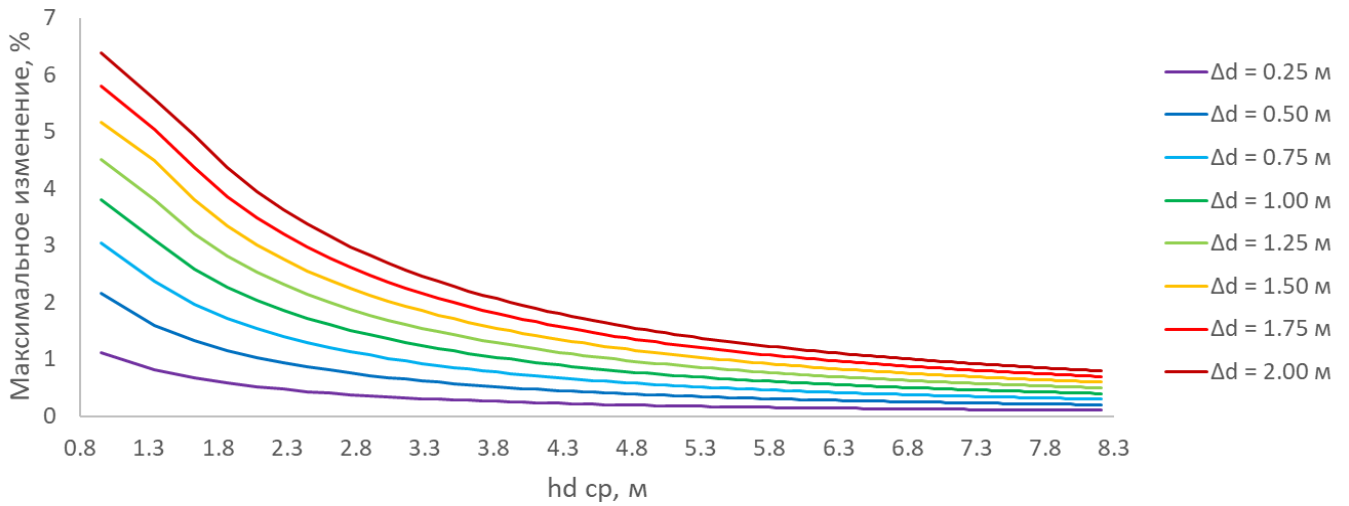


Рисунок А.38 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i \leq 0.02$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 50$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

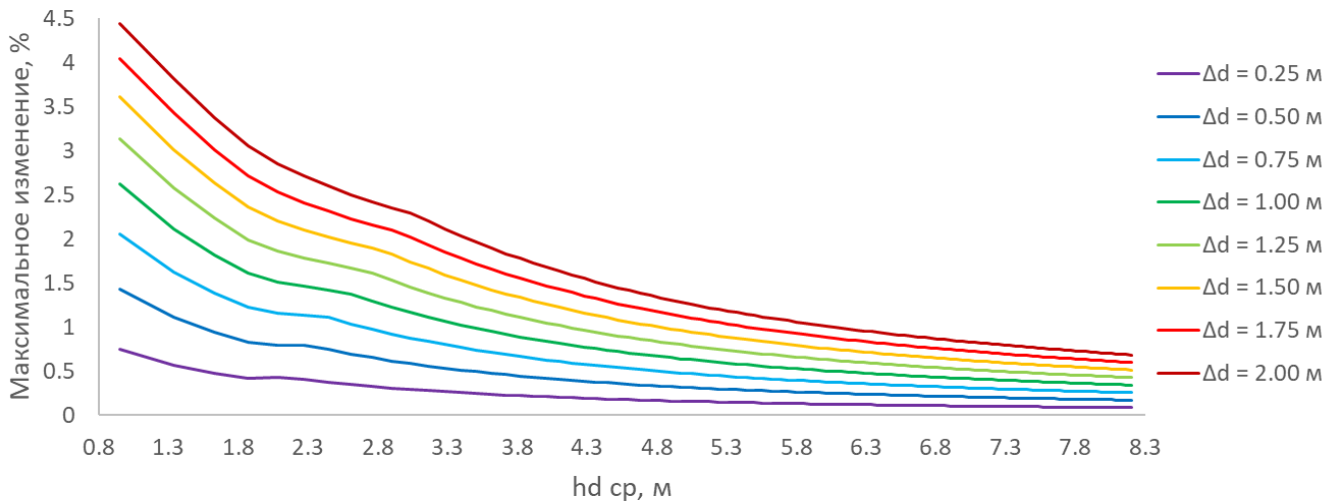


Рисунок А.39 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i = 0.025$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 50$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

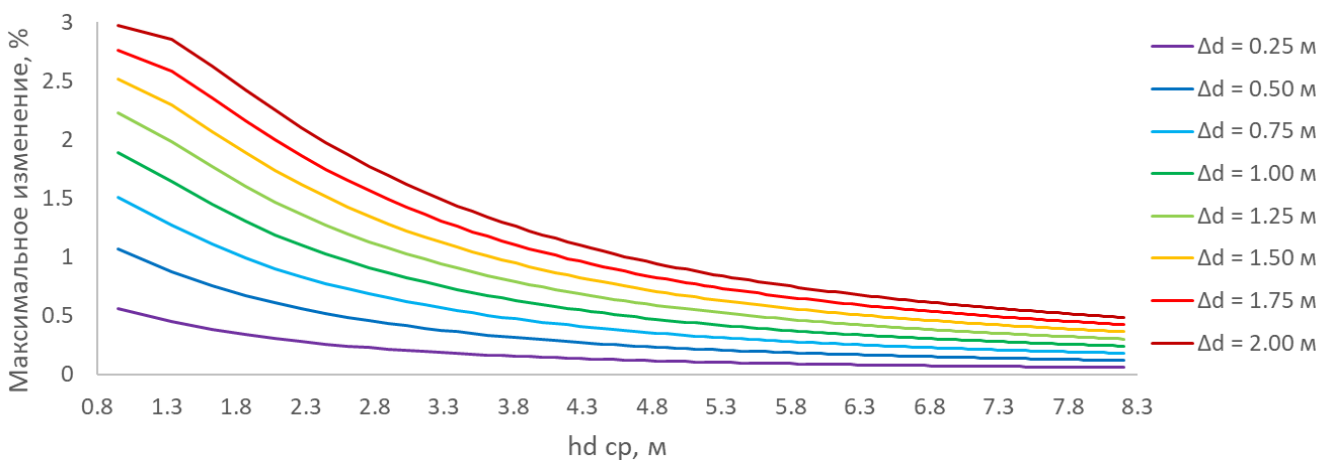


Рисунок А.40 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max} (k_t * k_l)$  при  $i [0.03; 0.033]$ ,  $d [d_{cr}; 0.5]$  и  $V_w = 50$  м/с при различных значениях роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

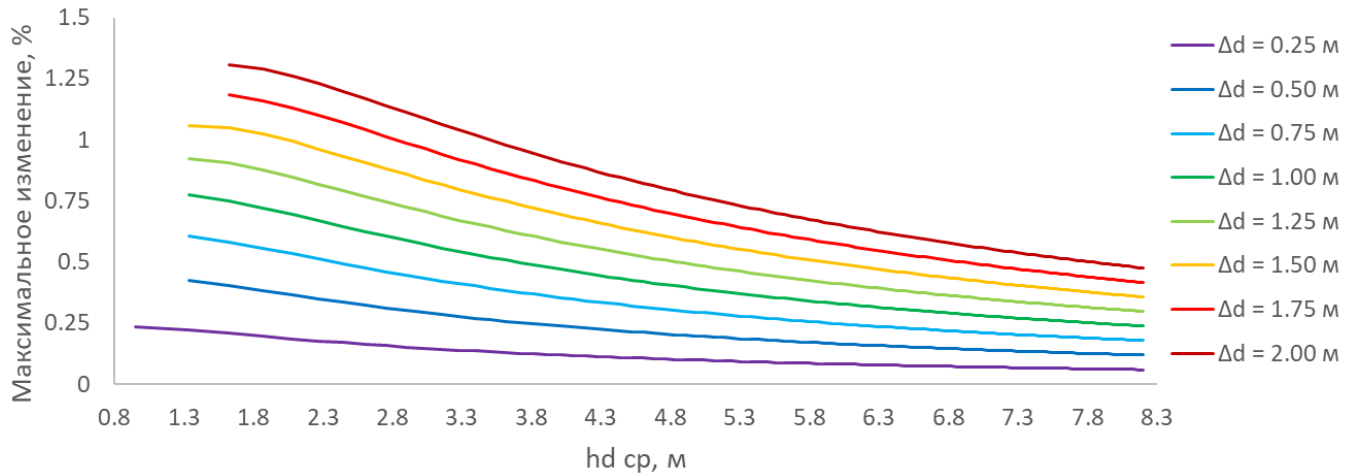


Рисунок А.41 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.033;0.049),  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=50$  м/с при различных значения значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.

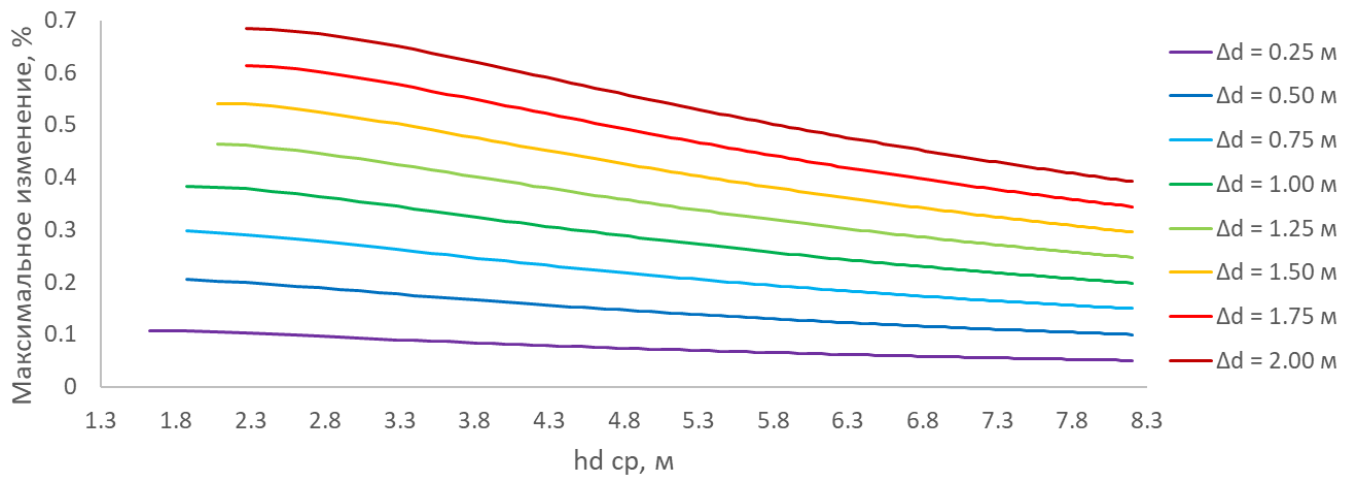


Рисунок А.42 - Номограмма зависимости  $\Delta_{max}$  ( $k_t * k_l$ ) при  $i$  (0.049;0.2),  $d$  [ $d_{cr}$ ;0.5] и  $V_w=50$  м/с при различных значения значения роста уровня моря  $\Delta d$ , м.



## Приложение Б

### Авторская программа для ЭВМ №2

В приложении представлена информация о разработанной автором программе для ЭВМ, позволившей провести моделирование различных вариантов значений показателей  $a_2$ - $a_4$  и  $b_1$ - $b_4$  при заданном значении показателя  $a_1$ , для оценки влияния изменения уровня режима акватории на коэффициент риска  $D_a$  и вероятность аварии  $P_a$  (ГТС). Программа для ЭВМ была зарегистрирована в ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» Роспатента Министерства экономического развития Российской Федерации (см. Рисунок Б.1).



Рисунок Б.1. Свидетельство о регистрации автором программы для ЭВМ  
«Программа для расчёта коэффициента риска и вероятности аварии  
гидротехнических сооружений при повышении уровня режима акватории».

## Приложение В

### Список публикаций автора по тематике диссертационного исследования

За время подготовки и написания данного диссертационного исследования основные результаты были опубликованы в следующих рецензируемых изданиях:

#### 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; Опубл. 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 режима 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.

## Приложение Г

### Акт о внедрении результатов диссертационной работы

Объектом внедрения результатов диссертационной работы (см. Рисунок Г.1) являлись проектируемые гидротехнические сооружения, расположенные на побережье Черного моря в 30 километрах к юго-востоку от города-курорта Геленджик Краснодарского края в с. Криница. Объект: «Морская составляющая объекта “Криница”», включающий в том числе: Западный оградительный мол с Причалом №1, Восточный оградительный мол с Причалами №2 и №3, Южный оградительный мол. Оградительные молы относятся ко 2 классу ответственности с  $h_{1\%}$  до 6 м в системе шторма 1 раз в 50 лет.



**Акт №1 от 18.05.2023 г. о внедрении результатов диссертационной работы Долгушева Тимофея Владимировича в практику проектирования и строительства портовых оградительных и причальных гидротехнических сооружений на объекте Морская составляющая объекта «Криница»**

ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (прежнее наименование – Черноморское отделение ЦНИИС) с 1945 г. ведет научно-исследовательские, проектно-испытательские работы, а также разработку нормативных документов в области берегозащиты. Постановлением Совета Министров от 17.01.1969 г. № 40 «О неотложных мерах по защите берегов Черного моря от разрушения и рациональному использованию территорий курортов черноморского побережья» Черноморское отделение ЦНИИС определено в качестве ведущей организации в области берегозащиты, а 29 января 1979 г. Постановлением Госстроя СССР, ЦНИИС в лице Черноморского отделения был назначен головной организацией страны в области защиты морских берегов, технологии организации и механизации берегозащитного строительства. 30 декабря 1993 г. Госстроем России утверждено Положение о выполнении головных функций Госстроя России по научным исследованиям, стандартизации и нормированию в области строительства в лице ЦНИИС.

ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» подтверждает, что результаты диссертационного исследования Долгушева Тимофея Владимировича «Влияние климатических изменений уровня режима акватории на условия эксплуатации портовых гидротехнических сооружений», отличаются высокой практической ценностью и позволят обеспечить требуемый уровень безопасности и надёжности портовых и берегозащитных гидротехнических сооружений в условиях климатического повышения уровня режима акватории.

Результаты исследований в полной мере учитывают влияние климатических изменений уровня режима акватории на процессы трансформации и рефракции расчётных волн при подходе к исследуемым участкам, а также на изменение расхода заплеска при принятых отметках парашета, гребня и кордона оградительных и причальных сооружений.

Разработанные методики определения отметок кордона, парашета и гребня оградительных и причальных сооружений, а также методика учёта изменения параметров расчётных волн при изменении уровня режима были учтены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках разработки проектной документации портовых оградительных и причальных сооружений на объекте Морская составляющая объекта «Криница».

Заместитель генерального директора  
Руководитель Научно-исследовательского  
центра «Морские берега»

Р.М. Тлявлин



*Согласовано, внесены подписанные:* *См. ил. 01. 2023*  
*Маслова Е. В.*

Рисунок Г.1 - Акт о внедрении результатов диссертационной работы.