

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Мартын Ирма Андреевна

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ В ЗАМКНУТЫХ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ**

Специальность 25.00.35 – Геоинформатика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Е.П.Истомин

Научный консультант:
кандидат юридических наук,
доцент В.Л.Михеев

Санкт-Петербург - 2022

Список сокращений и условных обозначений

ААНИИ – Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

БД – База данных

ВМО - Всемирная метеорологическая организация

ГИС – Геоинформационная система

ГМССБ - Глобальная морская система связи при бедствии

ИС – Информационная система

КПС – Комплекс программных средств

МГМО - морское гидрометеорологическое обеспечение

НМГС – Национальная метеорологическая и гидрологическая служба

ОЯ - Опасное явление

ПО – Программное обеспечение

РФ – Российская Федерация

СДН – Схема данных наблюдений

СМГМО – Специализированное морское гидрометеорологическое обеспечение

СОЛАС – Международная конвенция по охране человеческой жизни на море

СУДС - Система управления движением судов

ЭВМ – Электронная вычислительная машина

ЮНКТАД – Конференция ООН по торговле и развитию

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений	2
Введение	5
Глава 1 Анализ деятельности морского транспортного комплекса Российской Федерации в области оценки гидрометеорологического обеспечения безопасности	15
1.1 Анализ деятельности морского транспортного комплекса Российской Федерации.	15
1.2 Обеспечение транспортной безопасности России	23
1.2.1. Система гидрометеорологического обеспечения безопасности на замкнутой прибрежной акватории	23
1.2.2 Теоретико-правовые аспекты управления акваториями	29
1.3 Особенности влияния гидрометеорологических условий и климатических изменений на геополитическую обстановку и морские объекты	31
Выводы по главе	38
Глава 2 Математическая постановка комплексной задач геомоделирования гидродинамики и ее численная аппроксимация	39
2.1 Способы моделирования волнения	39
2.2 Основные уравнения и краевые условия	45
2.3 Численная аппроксимация уравнений	57
2.4 Разработка модели прогнозирования ветрового волнения на замкнутой прибрежной акватории	58
2.5 Результаты численного моделирования ветрового волнения на замкнутой прибрежной акватории в режиме реального времени с реализацией в системе пространственно-временной изменчивости	64
Выводы по главе	67
Глава 3 Методика обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях на основе стохастической модели	69
3.1 Методы оценки расчета георисков и анализ геоданных	69
3.2 Модели оценки рисков и математического ожидания времени ожидания наступления опасного явления	83
3.3 Реализация и верификация методики оценки риска в интересах обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях	89
Выводы по главе	98
Глава 4 Разработка практических рекомендаций по применению разработанных	

моделей и методики в геоинформационной системе управления морскими объектами для обеспечения безопасности на замкнутой прибрежной акватории	98
4.1 Геоинформационные системы управления	98
4.2 Структура геоинформационной системы управления морскими объектами	102
4.3 Практические рекомендации по применению разработанных моделей и методики в геоинформационной системе управления для обеспечения безопасности морских объектов на замкнутой акватории и их апробация	109
Выводы по главе	112
Заключение	113
Список литературы	116
Приложение А	121

Введение

Актуальность. В диссертационной работе рассматривается обеспечение безопасности при работе морского транспортного комплекса Российской Федерации в замкнутых прибрежных акваториях.

Интенсивное освоение морских территорий и стремление занять передовые позиции на морских территориях связано с появлением морских объектов новых архитектурно-конструктивных типов, предназначенных для решения сложных задач освоения Мирового океана. В целях обеспечения эффективности проектирования таких объектов, оптимизации проектирования, управленческих решений, безопасной эксплуатации мобильных объектов, гидрометеорологической безопасности необходимо прогнозировать воздействие морская среда на объекты территории максимально точно, что требует постоянного наблюдения за погодой: климатическими условиями, тенденциями изменения, которые особенно проявляются в высоких широтах Российской Федерации [1]. Данные мониторинга являются основой для оценки экстремальных свойств гидрометеорологических факторов для определения состояния окружающей среды, разработки сценариев действий, а также строительства объектов акватории [2]. Безопасность движения является важным аспектом морских операций для организации перевозок и эксплуатации транспортных узлов. Диссертация посвящена вопросам обеспечения безопасности морских объектов на акваториях, в закрытых прибрежных водах Российской Федерации. Сегодня морской транспортный комплекс успешно решает поставленные задачи в разных частях Мирового океана. Российский флот непрерывно решает задачи различного характера во многих районах Мирового океана. Происходит активное освоение и изучение Арктического сектора, повседневными стали проходы кораблей и судов флота на острова Новосибирского архипелага, Новой Земли и Земли Франца Иосифа, продолжается совершенствование системы прибрежной инфраструктуры на арктических островах. Активно ведется освоение новой техники флота [3].

В настоящее время эксплуатационную безопасность судов обеспечивает СУДС, мероприятия по ликвидации аварий проводятся всем экипажем корабля под наблюдением от командира корабля. Их основная функция заключается в контроле движения в этом районе. Задачи обеспечения внешнего мореплавания - изучения водной среды - создания благоприятных условий для безопасного плавания являются функциями гидрографических служб [4].

Функциональной основой служб флота является навигационная задача – задачи, связанные с определением координат (наблюдением) обслуживаемых объектов, анализом и планированием их траекторий, интерпретацией, визуализацией информации о движении

объектов и выработкой диспетчерских решений. Данной стороне обеспечения безопасности морских объектов посвящена диссертационная работа. В движение морских объектов ответственность лежит на судоводителе (капитане). Оператор гидрографической службы также несет ответственность за то, что происходит в зоне его контроля. Таким образом, управление морским объектом не может быть полностью автоматизировано. С другой стороны, постоянное увеличение трафика, размеры морских объектов, скорость увеличивают нагрузку на штурманов и операторов. Времени на принятие решений остается все меньше, что является важным фактором автоматизации управления навигацией для повышения безопасности морских объектов. Безопасность мореплавания судов представляет собой сложный, взаимосвязанный комплекс мероприятий, направленных на предотвращение навигационных происшествий, обеспечение живучести судна в условиях повседневной деятельности. Отсюда следует, что текущая задача навигационных служб флота — обеспечить большую автоматизацию процесса. Это требует разработки конкретных подходов и методов, обеспечивающих работу навигационных служб, прежде всего, как системы поддержки принятия решений.

Степень разработанности проблемы. В процессе исследования были проанализированы работы отечественных и зарубежных ученых рассматриваемой тематики, таких как Истомин Е.П., Царев В.А., Карташов Г.Д., Михеев В.Л., Соколов А.Г., Плинка Н.Л., Малинин В.Н., Бедрицкий А.И., Дядюченко В.Н., Фролова И.Е. и других.

Проведено изыскание научных трудов, нормативно-правовых документов, функционирования существующего программного обеспечения для области обеспечения безопасности морских объектов, а также дальнейшего развития инфраструктуры морских прибрежных акваторий России особенно в отдаленных и труднодоступных районах.

В настоящее время недостаточно разработана проблема автоматизации обеспечения гидрометеорологической безопасности объектов морского транспортного комплекса. Рассматриваются в основном вопросы погодных и климатических изменений, на основании которых определяются проблемы обеспечения гидрометеорологической безопасности в районах замкнутых прибрежных акваторий [5]. Авторами сформулированы требования, предъявляемые к экспертным системам, но практически не рассматривается задачи практического выполнения эти требований в условиях ограниченного объема гидрометеорологической информации. Гидрометеорологические поля имеют значительную пространственно-временную изменчивость, а объективная оценка проводится только в малочисленных точечных постах наблюдений, анализ степени гидрометеорологической безопасности проводится с недостаточным качеством, что приводит к снижению эффективности функционирования морского флота и

возможностям эксплуатации инфраструктуры и техники. В свою очередь результативность морской деятельности находится в зависимости от погодноклиматических условий, учет которых осуществляется лицом, принимающим решение на качественно-эмпирическом уровне [6]. Существующие алгоритмы и методики поддержки принятия метеозависимых решений не всегда учитывающие специфические погодноклиматические условия высоких широт РФ и не всегда позволяет в достаточной степени использовать информацию при разработке оптимальных рекомендаций по обеспечению деятельности морского транспорта или при создании инфраструктуры объектов акватории. С другой стороны сложность процессов взаимодействия системы природа-человек заставляет искать новые пути решения проблем.

В настоящее время недостаточно разработана проблема автоматизации обеспечения безопасности морских объектов на основе прогнозирования гидрометеорологических характеристик, влияющих на безопасность морских объектов, особенно данная проблема касается отдаленных районов Российской Федерации, где отсутствуют наблюдательные посты в том числе. Не в полной мере разработаны и внедрены разносторонние методы, модели и технологии прогнозирования и управления. Отсутствует единый центр хранения и управления распределенными геоданными морской поверхности.

Для обеспечения безопасности морских объектов при принятии управленческих решений важную роль играет гидрометеорологическая обстановка и возможное воздействие факторов внешней среды. В определение гидродинамических и динамических характеристик и их прогнозирование широко используются методы вычислительной гидродинамики, основанные на решении уравнений Навье-Стокса. Для разработки практических рекомендаций необходимо точно моделировать динамическое поведение гидрометеорологических характеристик, что повысит оценку обеспечения безопасности морских объектов, особенно в тех районах, где имеется существенный недостаток получения регулярной гидрометеорологической информацией, и в условиях экстремальных погодных условий. Заранее известное время наступления опасного явления играет ключевую роль для принятия управленческих решений, особенно в условиях стратегического планирования. ***Таким образом, актуальной является научная задача разработки и совершенствования моделей и методик обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях.***

Представленных информационных систем, в виде геоинформационных систем, для обеспечения безопасности морских объектов существует не много. ГИС для обеспечения навигации морских мобильных объектов на закрытых прибрежных акваториях не

известно. Современные разработки сводятся в основном к моделированию коллективного движения судов, воздействию волновых характеристик непосредственно на морские объекты. Но малое число реализаций модели совмещенных с ГИС, для обеспечения безопасности морских объектов. Очевидна необходимость в разработке и дальнейшем внедрении методик и моделей прогнозирования и управления морскими объектами на акватории морей, портов и замкнутых прибрежных акваториях определяет объект, предмет, цель и задачи диссертации.

Цель диссертационной работы – разработка методического аппарата информационного обеспечения безопасности морских объектов.

Объект исследования – замкнутая прибрежная акватория

Предмет исследования – модели и методика геоинформационного обеспечения безопасности деятельности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях.

Для достижения поставленных целей в работе решались следующие **основные задачи**:

1. Анализ современных замкнутых морских акваторий в интересах обеспечения деятельности морского транспортного комплекса.
2. Разработка модели прогнозирования ветрового волнения в интересах формирования геоданных.
3. Разработка методики и модели оценки георисков для морских объектов на основе геоданных
4. Разработка практических рекомендаций по применению полученных моделей и методики в геоинформационной системе управления морскими объектами в интересах обеспечения безопасности деятельности морского транспортного комплекса в замкнутых прибрежных акваториях.

Методы исследования. Решение сформулированной в диссертации научной задачи базируется на методах системного анализа, теории вероятности, математической статистики, методов численного анализа, математического моделирования.

Теоретические и методологические основы исследования. Теоретические основы диссертационной работы базируются на результатах исследований отечественных и зарубежных ученых в области прогнозирования состояния волновой поверхности акваторий, оценки будущего состояния системы, моделирование геоинформационных систем и технологий, связанные с обеспечением безопасности морских объектов за счет построения информационных систем. Методической основой работы является системный анализ и аналитические исследования, обобщение существующих научных трудов, связанных с формированием модели геоинформационной системы управления

обеспечением безопасности морских объектов, а также разработанной и используемой прогностической модели.

Достоверность результатов исследования, выводов и рекомендаций обеспечивается:

- использованием для достижения цели работы нормативных документов, касающихся обеспечения безопасности морских объектов на акватории, а также методик построения ГИС;
- применением принципов системного анализа и математического моделирования, аналитических исследований и других современных методов;
- непротиворечивостью результатов исследования и их соответствия теоретическим основам и гипотезам фундаментальных исследований в области гидрометеорологии и дальнейшего использования математического моделирования;
- апробацией результатов исследования на научно-практических конференциях и отражением основных результатов диссертации в открытой печати.

Результаты, выносимые на защиту:

1. ***Требования к методическому аппарату информационного обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях***, которые *отличаются* тем, что описываются на результатах анализа условий информационного обеспечения безопасности морских объектов геоданными в замкнутых прибрежных акваториях, что *позволяет* разрабатывать компоненты методического аппарата обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях.

2. ***Модель прогнозирования ветрового волнения в замкнутых прибрежных акваториях***, которая *отличается* тем, что в ней впервые представлена двухмерная нестационарная модель ветрового волнения на основе уравнений гидродинамики с допущениями для замкнутой прибрежной акватории, что *позволит* обеспечить точность краткосрочных прогнозов до 95%.

3. ***Методика оценки вероятности риска***, которая *отличается* тем, что строится на основе геоданных с использованием двухпараметрической вероятностной модели, которая впервые реализована на основе однопараметрической вероятностной модели, и определением времени ожидания наступления опасного явления при известных начальных значениях, что *позволяет* повысить достоверность оценки риска при влиянии волновых процессов на морские объекты на замкнутых мелководных акваториях с точностью до 90%.

4. **Практические рекомендации по применению полученных моделей и методики в геоинформационной системе управления морскими объектами в интересах обеспечения безопасности деятельности морского транспортного комплекса на замкнутых прибрежных акваториях**, которые отличаются тем, что основываются на разработанных моделях и методике обеспечения безопасности морских объектов на замкнутой прибрежной акватории, что позволит реализовать геопространственное представление информации для поддержки принятия решений для обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях.

Научная новизна. Впервые на основе уравнений гидродинамики с учетом топографии и ветровых характеристик разработана двухмерная нестационарная гидростатическая модель для расчета пространственно-временной изменчивости характеристик ветрового волнения и произведено прогнозирование характеристик ветрового волнения для замкнутых прибрежных акваторий. Впервые применена методика оценки риска на основе двухпараметрической вероятностной модели с использованием геоданных гидродинамического моделирования. Разработаны практические рекомендации по применению предложенных новых моделей и методики геоинформационного обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Представляемая работа соответствует паспорту специальности 25.00.35 – «Геоинформатика» по следующим пунктам:

1. Теоретические и экспериментальные исследования в области развития научных и методических основ геоинформатики
3. Геоинформационные системы (ГИС) разного назначения, типа (справочные, аналитические, экспертные и др.), пространственного охвата и тематического содержания
6. Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС
7. Геоинформационное картографирование и другие виды геомоделирования, системный анализ многоуровневой и разнородной геоинформации.

Практическая и научная значимость работы заключена в решении научно-технической задачи, относящейся к управлению морскими объектами в пределах замкнутых мелководных акваторий, в том числе портовых акваторий и их планировании, за счет применения разработанных моделей и методик обеспечения безопасности морских объектов.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что разработанные методические подходы для совершенствования обеспечения безопасности деятельности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях при учете гидрометеорологических условий, смогут повысить эффективность навигации в замкнутых прибрежных акваториях, снижая риски принятия решений в труднодоступных районах, повышая безопасность деятельности морских объектов.

Практическая значимость результатов исследований подтверждается реализацией полученных результатов в НИР ГЗ «Климат» № FSZU-20200009 от 31.08.2020г. и учебном процессе в рамках дисциплины «Управление геоинформационными системами», что подтверждено актами о внедрении результатов диссертационной работы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и были обсуждены на II Всероссийском конгрессе молодых ученых-географов (Тверь, 2017), VII Международной научно-практической конференции (Центр морских исследований МГУ им.М.В.Ломоносова, Москва, 2019), III международной научно-практической конференции молодых ученых (СПбГЛУ им.Кирова, Санкт-Петербург, 2019), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation,2020), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Saint Petersburg, Russian Federation,2020), "GraphiCon 2020 - Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision" (Saint Petersburg, Russian Federation,2020), "International Scientific and Practical Conference "Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and Abroad", DAIC 2020" (Saint Petersburg, Russian Federation,2020), V Всероссийской научной конференции молодых ученых (ИО РАН, Калининград, 2020), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science "International Scientific and Practical Conference "Ensuring Sustainable Development in the Context of Agriculture, Green Energy, Ecology and Earth Science" - Green Energy and Earth Science" (Saint Petersburg, Russian Federation,2021), Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (Российский государственный гидрометеорологический университет, Институт информационных систем и геотехнологий, Санкт-Петербург, 2021), INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ON ENSURING SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF AGRICULTURE, GREEN ENERGY, ECOLOGY AND EARTH SCIENCE, ESDCA 2021 (Smolensk, Russian Federation, 2021), Всероссийской научной конференции «Моря России: год науки и технологий в РФ –десятилетие наук об океане ООН» (г.Севастополь, Россия, 2021), 6-ой научно-практической конференция «Актуальные проблемы развития и эксплуатации ракетно-артиллерийского, специального вооружения и

морской техники» (г.Севастополь, Россия, 2021), НИР ГЗ «Климат» № FSZU-20200009 от 31.08.2020г.

Личный вклад автора. Участие на всех этапах исследований; непосредственное участие в получении исходных данных, разработке методике и моделей, личное участие в апробации результатов, подготовка основных публикаций по выполненной работе.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 14 статьях, из них 2 статьи опубликованы в рецензируемых из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ, 12 публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах данных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из списка используемых сокращений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 122 страницы, 37 рисунков, 2 таблицы, 144 формулы. Список использованной литературы составляет 90 источников.

Во **введении** приводится обоснование актуальности научной работы, определен объект, предмет, цели и задачи исследования, описана теоретическая и практическая значимость работы, представлено краткое содержание диссертации по разделам, перечислены основные научные результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматривается анализ деятельности морского транспортного комплекса Российской Федерации, в том числе в условиях Крайнего Севера, а так же гидрометеорологической обеспеченности. Проводится анализ современных исследований по обеспечению гидрометеорологической безопасности морских объектов для определения направлений их решения. Изучено влияние гидрометеорологических и климатических факторов на состояние и перспективы развития морского транспортного комплекса Российской Федерации. Исследованы и описаны состояние и направление развития России и в частности Арктического региона в области гидрометеорологического обеспечения, морского транспорта, прибрежной инфраструктуры и их взаимодействия. Показано влияние гидрометеорологических и климатических факторов и их изменчивости на геополитическую обстановку, национальную безопасность и условия функционирования морских объектов в условиях Крайнего Севера, обоснована важность определения гидрометеорологической обстановки. Указано на необходимость учета гидрометеорологических факторов в принятии управленческих решениях и пути модернизации научно-технического обеспечения.

Сделаны выводы о целесообразности построения математической модели состояния морской поверхности в замкнутых мелководных акваториях, создании методики обеспечения безопасности морских объектов на основе стохастической модели оценки рисков и оценки времени их наступления, и созданием на их основе практических

рекомендаций в геоинформационной системе управления. Выделен недостаток использования данных дистанционного зондирования на акваториях малого размера. В результате анализа гидрометеорологических факторов выявлены факторы, наиболее влияющие на возможности возникновения риска на замкнутых прибрежных акваториях и возможные риски для морских объектов.

Во **второй главе** проводится обзор существующих методов и моделей расчета и прогнозирования ветрового волнения с указанием характеристик, преимуществ и недостатков.

В результате изучения и анализа современных моделей моделирования ветрового волнения была представлена разработанная модель прогнозирования ветрового волнения для замкнутых мелководных акваторий на основе уравнений гидродинамики.

Разработана, апробирована и верифицирована разработанная гидродинамическая нестационарная двухмерная модель ветрового волнения с входными параметрами характеристики ветра и топографии. Верификация показала адекватность полученной модели и не выход ошибки оперативного (краткосрочного) прогноза за пределы 5%.

В **третьей главе** рассмотрены понятия и некоторые методики оценки риска в природных системах.

На основе анализа представлена методика оценки риска и математического ожидания времени наступления опасного явления на акватории. Представлена методика предварительного анализа геоданных. Реализована стохастическая модель оценки риска и математического ожидания времени на основе геоданных, полученных при гидродинамическом моделировании при известных параметрах в начальный момент времени. Апробация и верификация модели проводится на прогностических данных. Верификация модели показала не выход ошибки за пределы 10%.

В **четвертой главе** разработаны практические рекомендации по применению предложенных новых моделей и методики геоинформационного обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях.

Рассмотрены функциональные возможности геоинформационной системы управления.

Рассмотрены типовая структура геоинформационной системы управления.

Разработаны практические рекомендации по применению разработанных моделей и методики в геоинформационной системе управления для обеспечения безопасности кораблей на замкнутой акватории. Проведена апробация разработанных моделей и методики обработки пространственно-временных геоданных в ГИС на примере задачи

прогнозирования состояния волновой обстановки и оценки риска наступления опасного явления на акватории бухты Пяти Охотников.

В **заключении** представлены выводы и предложения, полученные из анализа результатов диссертационной работы, определены будущие направления развития исследования.

Глава 1. Анализ деятельности морского транспортного комплекса Российской Федерации в области оценки гидрометеорологического обеспечения безопасности

1.1 Анализ деятельности морского транспортного комплекса Российской Федерации

Россия является страной, которую омывают 3 мировых океана: Тихий, Атлантический и Северный Ледовитый. Для страны при такой значительной площади морских акваторий морской транспорт является важной стратегической сферой, которая сохраняет целостность территорий, реализует внешнеэкономические связи и укрепления позиций среди других стран, развитие морских объектов и территорий.

Для Крайнего Севера, Дальнего Востока и других регионов России большую роль в массовых перевозках грузов играет морской транспорт. В Обзоре морского транспорта ЮНКТАД за 2012 год морской транспорт рассматривается как краеугольный камень международной торговли и мировой экономики. На долю глобальных портовых перевозок приходится около 80% мировой торговли по объему и более 70% мировой торговли по стоимости [7].

На сегодняшний день морское портовое хозяйство Российской Федерации включает 67 морских портов мощностью порядка 1003,6 млн.тонн в год и протяженностью причального фронта 148 тыс. погонных метров. В связи с уходом части портов в частное владение, планируется, что совместная работа государства и частного сектора обеспечит продолжение положительной динамики развития морской отрасли России, что будет выгодно как для государства, так и инвесторам. Данный прирост производственных мощностей российских портов планируется обеспечить за счет наиболее крупных проектов инфраструктуры, предполагающих привлечение капиталов частных инвесторов.

Развитие морских портов России осуществляется в рамках реализации мероприятия подпрограммы « Морской транспорт» ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010-2020гг.)», в цели которой входит повышение доступности услуг транспортного комплекса для населения, повышение конкурентоспособности транспортной системы РФ и реализации транзитного потенциала страны и повышение комплексной безопасности и устойчивости транспортной системы. Из анализа важнейших целевых показателей федерального проекта «Морские порты России» выделим, что доля объема перевалки российских грузов в портах сопредельных государств снизилась с 20.6% (2007г.) до 5.2% (2019г.) Несмотря на замедление темпов экономического роста, наблюдаемое с 2012г., и прогнозируемую отрицательную динамику по ряду отраслей, грузооборот морских портов

увеличился. В 2016г. была выполнена цель по увеличению производственной мощности российских морских портов на 32млн.тонн. Объем перевалки грузов в российских морских портах за 2019г. увеличился на 3% по сравнению с 2018г. и составил 865.5млн.тонн и продолжает расти (рис.1).



Рисунок 1. Важнейшие целевые индикаторы федерального проекта «Морские порты России»

ФГУП Росморпорт и силами нескольких научно-исследовательских институтов была разработана «Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030г.», предполагающая, что к 2030г. портовые мощности возрастут в 2.2 раза и достигнут 1.6млрд.тонн в год. Так к 2030г. Северо-западный бассейн должен стать основными морскими воротами экспорта российских углеводородов и минеральных удобрений, крупнейшим в России морским бассейном по обороту рефрижераторных грузов и контейнерных грузов. Грузовая база Северо-западного бассейна оценивается в 330-547млн.тонн, из них наливные грузы – 150-240млн.тонн, сухие грузы – 180-307млн.тонн.

Южный бассейн к 2030г. как и прежде останется крупнейшим морским бассейном России по объемам грузоперевалки. В портах планируется перевалить 95% насыпных и 41% генеральных грузов страны. Грузовая база оценивается в 340-535млн.тонн, из них наливные грузы – 150-205млн.тонн, сухие грузы – 190-330млн.тонн.

Дальневосточную базу к 2030г. обеспечат минерально-сырьевыми и лесными ресурсами Восточной Сибири и Дальнего Востока, а так же функционированием транспортного коридора Восток-Запад. Грузовая база оценивается в 218-307млн.тонн, из них наливные грузы – 64-90млн.тонн, сухие грузы – 154-217млн.тонн.

Морские порты динамично развивающегося Северного бассейна к 2030г. будут ориентированы на перевалку углеводородов, добываемых здесь же на шельфе, и лесных и минерально-сырьевых ресурсов севера. Грузовая база составит 79-116млн.тонн, из них наливные грузы – 43-65млн.тонн, сухие грузы – 36-51млн.тонн.

Для обеспечения вышеупомянутых потребностей во всех бассейнах планируется строительство новых терминалов портов, строительство портовых комплексов для определенных нужд, развитие уже имеющихся портов, а так же реконструкция действующих терминалов в морских портах.

Следует также отметить обстоятельства, сдерживающие развитие морских портов России. Основной проблемой является несогласованность сроков, объемов и направлений государственных инвестиций в рамках транспортных подпрограмм. Пропускная способность портов должна развиваться симметрично пропускной способности порта по перевозке автомобильно-железнодорожных подходов порта, при этом возможно согласование частных инвестиций – сроков, объемов – направлений в рамках государственных программ. Еще одним существенным ограничением являются механизмы инвестирования в портовую инфраструктуру. Несмотря на существование ФЦП «Госграница РФ» и положений законодательства, инвестиционное бремя ложится на плечи частных инвесторов. Наращивание грузооборота сложно осуществимо так же из-за сложностей, связанных с процедурами работы государственных контролирующих органов в пунктах пропуска, обусловленные изменением нормативных документов Таможенного союза. Стоит выделить продолжающееся антимонопольное регулирование деятельности и все неудобства, связанные с пребыванием операторов морских терминалов в Реестре субъектов естественных монополий [10]. Достижения всех поставленных целей предполагается через взаимодействие Минрегиона России с различными органами исполнительной власти, в том числе с Министерством обороны Российской Федерации [11]. Особенности высокоширотной зоны РФ, оказывающие влияние на формирование государственной политики в Арктической зоне и зоне Крайнего Севера, являются [12]:

- экстремальные природно-климатические условия, включая продолжительность ледового покрова и дрейф льда в морях;
- очаговый характер инфраструктуры и освоения территорий;
- удаленность от основных промышленных центров, высокая ресурсоемкость и зависимость хозяйственной деятельности от поставок топлива, продовольствия и иных товаров;
- низкая устойчивость экологических систем, определяющих климат Земли и их зависимость от незначительных антропогенных воздействий.

Многие операции на Крайнем Севере, особенно в Арктике, тесно связаны с интересами безопасности Российской Федерации. Эти районы имеют исключительное военно-стратегическое значение в решении оборонных задач. Морская граница в этом

регионе является самой протяженной и открытой с точки зрения охраны государственной границы, это фронт обороны государства, охрана которого связана с рядом трудностей.

Значение полярных и приполярных областей оценивается по критериям:

- геополитическая и экономическая важность;
- высокая уязвимость к происходящим и ожидаемым климатическим изменениям;
- огромный потенциал влияния на глобальный климат.

Таким образом, особую значимость представляет исследование климатической обстановки высокоширотных областей России, особенно Арктической зоны, и их влияние на обеспечение гидрометеорологической безопасности морских объектов.

Цифровизация морской транспортной инфраструктуры

Необходимость ускорения внедрения цифровых технологий в экономическую и социальную сферы ставит новые задачи перед транспортной отраслью.

Переход России к цифровой экономике предполагает трансформацию стратегии развития организации и структуры, предоставляемых услуг, организационной культуры и т. д., что позволит ей адаптироваться к цифровым потребностям клиентов, вовремя оправдать их ожидания и укрепить свои конкурентные позиции на рынке предоставляемых услуг.

В настоящее время в России действуют различные нормативные документы и программы, охватывающие вопросы развития и цифровизация в целом и в частности на транспорте (табл. 1).

Таблица 1. Действующие нормативные документы, охватывающие вопросы внедрения и развития цифровизации на транспорте

Документ	Цели в части цифровизации
Указ Президента РФ от 07.05.2018г. №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»	Осуществление прорывного научно-технического и социально-экономического развития России, обеспечение ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере, в том числе преобразование транспортной инфраструктуры посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений

Распоряжение Правительства РФ от 30.09.2018г. №2102-р «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года»	Обеспечение развития и модернизации морской и речной инфраструктуры с помощью передовых цифровых технологий
Распоряжение Правительства РФ от 13.02.2019г. №207-р «Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года»	Установлена необходимость развития информационно-телекоммуникационной инфраструктуры путем устранения «цифрового неравенства» субъектов РФ, повышение информационно-телекоммуникационной связности территории РФ для ликвидации инфраструктурных ограничений, повышения доступности и качества транспортной инфраструктуры и ускорения экономического роста, научно-технологического и инновационного развития РФ и др.
Паспорт нацпроекта «Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (утверждена президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол №7 от 04.06.2019г.)	Установлены основные целевые показатели, отражающиеся в увеличении внутренних затрат на развитие цифровой экономики, в создании устойчивой и безопасной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры высокоскоростной передачи, обработки и хранения больших объемов данных, доступной для любых организация и домохозяйств, в использовании преимущественно отечественного ПО госорганами, органами местного самоуправления и организациями
Постановление Правительства РФ от 20.12.2017г. №1596 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы»	Поставлена цель повышения конкурентоспособности транспортной системы РФ на мировом рынке транспортных услуг, ее комплексной безопасности и устойчивости, достижение этого возможно благодаря внедрению новых

	технических требований и стандартов эксплуатации транспортной инфраструктуры, в частности на основе цифровых технологий, внедрения автоматизированных и роботизированных технологий на транспорте, разработки информационно-вычислительных систем автоматизации технологических и управленческих процессов и т.п.
Ведомственная целевая программа «Цифровая платформа транспортного комплекса Российской Федерации» (утверждена Минтрансом России 05.09.2019г.)	Цель принятия программы заключается в обеспечении органов управления транспортным комплексом информацией о состоянии и ходе транспортной системы, ее безопасности и устойчивости, о прогнозе спроса на транспортные услуги, о повышении уровня информационного обеспечения безопасности населения на транспорте, возможного за счет автоматизации и информационно-аналитического обеспечения процессов управления транспортным комплексом, а также совершенствования и обеспечения функционирования систем информационного обеспечения безопасности на транспорте с учетом изменения законодательства

Таким образом, необходимость ускоренного внедрения цифровых технологий в экономическую и социальную сферу формирует новые задачи для субъектов транспортного пространства. Однако стоит отметить, что цифровизация, если рассматривать переход к ней, приведет к определенным преимуществам, но так же не исключаются недостатки (рис.2).

Не смотря на выделенные недостатки внедрение в морских портах России цифрового управления является важным вопросом, касающихся процессов глобализации производства, расширении доступа к рынкам и эффективной интеграции в глобальную экономику.

Как было упомянуто выше в главе, российские порты производят обработку до 80% грузовой промышленности внешней торговли, что обеспечивает государству экономическое и внешнеторговое развитие.

Особенность морских портов России – неравномерность распределения перевалки грузов по морским бассейнам, в связи с географическими факторами и логистических маршрутов (например, большая часть угля переваливается в портах Дальнего Востока, грузы в контейнерах и минеральные удобрения – в большинстве в портах Балтики, зерно и металлы – в портах Азово-Черноморского бассейна). Динамики грузооборота морских портов России (рис.3) имеет тенденцию к увеличению грузооборота и наблюдается она давно, в том числе и по отдельным бассейнам (рис.4).

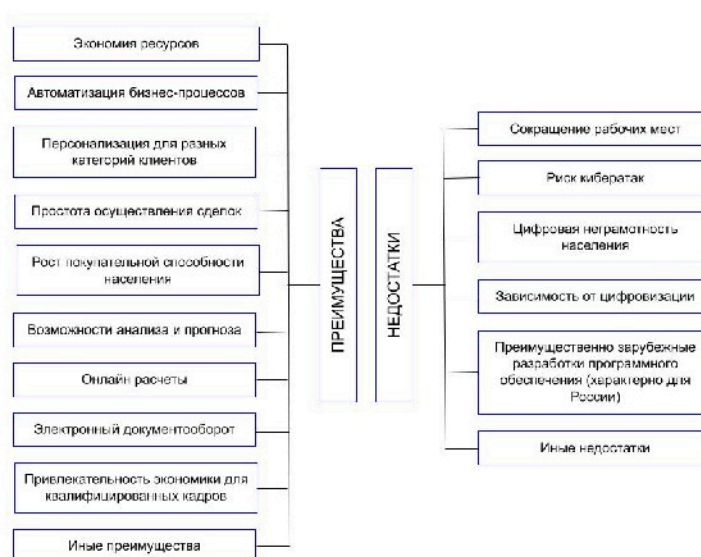


Рисунок 2. Преимущества и недостатки цифровизации для субъектов транспортного пространства

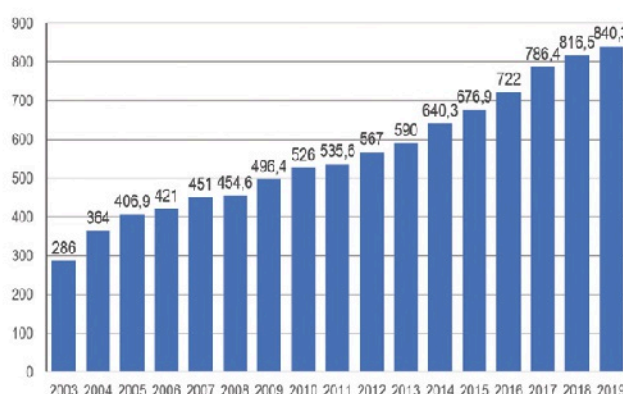


Рисунок 3. Динамика грузооборота морских портов РФ за 2003-2019гг. млн. тонн

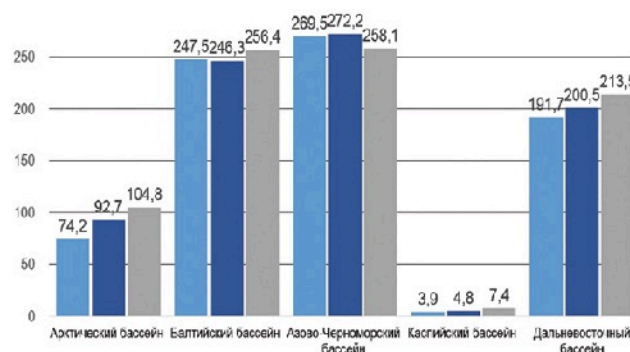


Рисунок 4. Грузооборот морских портов РФ за 2017-2019гг. по бассейнам, млн.тонн

Рассматривая текущую ситуацию и опираясь на официальные данные Ассоциации морских Гортовых портов, можно сказать, что динамика объема грузооборота российских портов в последние годы показывает устойчивый рост.

Эксперты прогнозируют рост до 2030 года, который возрастет с 885млн тонн в настоящие дни до 1129млн.тонн к 2030 году. Этот рост возможно обеспечить за счет влияния различных факторов, включая применение в морских портах различных цифровых решений [13].

Анализируя портовую деятельность некоторых зарубежных портов можно выделить некоторые возможности, открытые благодаря цифровизации:

- повышение объема и эффективности отгрузки товаров;
- сокращение времени пребывания судна на стоянке;
- прием большого количества судов ежедневно;
- снижение нагрузки на транспортные маршруты;
- удвоение пропускной способности (без расширения площади);
- оптимизация работы персонала;
- отслеживание местонахождения и состояния груза и др.

Не смотря на давнее и стремительное развитие зарубежных портов и их цифровизацию, российские порты в режиме конкурентоспособности и повышения эффективности работы, в том числе с использованием новых технологий, повышения уровня их инновационности сегодня остаются очень актуальными и стремятся к развитию.

Рассмотрев основные нововведения российских морских портов, выделим, что преобладают отдельные информационные технологии и/или автоматизированные системы. Комплексные цифровые трансформации в настоящее время практически не используются. К основным причинам можно отнести отставание/ несоответствие

нормативного регулирования, проблемы импортозамещения цифровых технологий и др. [14].

1.2 Обеспечение транспортной безопасности морского транспортного комплекса России

Каждый порт или гавань отличается размерами, расположением и преобладающими гидрометеорологическими условиями, таким образом, существует многообразие индивидуальных требований к локальному морскому гидрометеорологическому обслуживанию.

1.2.1 Система гидрометеорологического обеспечения безопасности на замкнутой прибрежной акватории

К предоставлению морского гидрометеорологического обслуживания в портах обычно привлекаются различные организации, что приводит к различным требованиям в конкретном порту [4].

- Морское гидрометеорологическое обслуживание основных портов и гаваней как правило помогает избежать риски при выполнении всех или некоторых видов деятельности:

- Перемещение судов (заход в порт, выход из порта или перемещение по порту);
- Погрузка/разгрузка контейнеров, обеспечение сохранности и складского хранения контейнеров. Включая безопасность кранов и подъемного оборудования;
- Посадка и высадка пассажиров, особенно на вспомогательном судне;
- Дозаправка топливом;
- Погрузка барж;
- Дноуглубительные и очистные работы;
- Судостроительные и другие строительные работы;
- Работы по инженерному оснащению портов;
- Ледокольное обслуживание в портах и на подходах к ним;
- Работы по борьбе с загрязнением моря в акватории порта;
- Спасательные операции;
- Работа предприятий, торговли. Урегулирование судебных споров и страхование;

- Отдых на воде.

Предоставляемая информация об ожидаемом ветре, волнении и дальности видимости помогает планировать движение судов в гавани, из гавани или в ее пределах. Гидрометеорологические условия влияют на операции по заходу судна в док. Например, при угрозе тропического циклона порту, прогнозируемое перемещение циклона повлияет на решение капитана судна о предстоящих маневрах по уклонению от циклона, выйдя в открытое море или переждать в гавани.

Сильный ветер влияет на погрузочно-разгрузочные работы, поскольку может причинить ущерб кранам и подъемным механизмам. Некоторые виды грузов нельзя обрабатывать во время дождя или при экстремальных значениях температуры. Общие прогнозы не всегда удовлетворительны, поскольку местная топография имеет тенденцию оказывать значительное влияние на распределение скорости ветра и выпадение осадков. Все более широкое использование контейнеров привело к сокращению рабочей силы во многих портах, прогностическое обслуживание имеет большое значение для компаний, занимающихся погрузочно-разгрузочными работами, при составлении графика работы для своих докеров.

Прогнозы скорости ветра, включая порывы, грозы, шквалы и состояние моря, требуются для планирования загрузки барж, дноуглубительных и очистных работ, судостроения и других строительных работ, создания инженерной инфраструктуры портов и в борьбе с загрязнением моря. Для большинства этих работ необходимо предупреждение об ожидаемой скорости ветра, высоте волн, которые превысят критические значения.

Планирование ледокольных операций в портах и на подходах к ним зависит от прогнозов ветра, температуры, волнения и зыби. Жесткие штормы, сопровождаемые сильным забрызгиванием, при отрицательной температуре воздуха может вызвать быстрое обледенение судов и следовательно привести к его затоплению.

Сейши в гаванях могут привести к беспорядочным движениям судов, затрудняя швартовку и увеличивая опасность столкновений.

Информация о дальности видимости или ледовых условиях на различных направлениях при подходе к порту, например, помогает капитанам принять решение относительно выбора соответствующего курса.

В соответствии с конвенцией СОЛАС судам предписывается сообщать о любых явлениях или метеорологических условиях, представляющих серьезную угрозу для безопасности мореплавания. Отдельные суда также представляют на добровольной основе данные регулярных гидрометеорологических наблюдений. Эти данные наблюдений

составляют основу предупреждений и гидрометеорологических прогнозов для целей судоходства, а также используется для составления климатологических атласов. Схема СДН, которая объясняется в Руководстве по Глобальной системе наблюдений (ВМО-№488), III.4, демонстрирует сотрудничество между метеорологами и морским сообществом, в том числе с моряками и рыбаками.

Должно существовать единообразие в наблюдениях гидрометеорологических элементов и элементов поверхности моря. Хотя могут использоваться различные приборы, наблюдательные морские станции (движущиеся суда, платформы) должны измерять одни и те же параметры, описывающие состояние атмосферы или океана в момент измерения. Однако трудно отвечать требованию в рамках программы стандартных наблюдений, поэтому для поддержания на соответствующем международном уровне единообразия производства измерений должен происходить регулярный обмен информацией, опытом и идеями. Так же это относится к станциям в прибрежных и шельфовых районах моря. Подробнее этот вопрос излагается в Руководстве по метеорологическим приборам и методам наблюдений (ВМО-№8).

Портовые гидрометеорологи играют важную роль в обеспечении связи между НМГС и сообществом судоводителей. Их функции являются международными: где бы ни находилось судно, но должно иметь возможность получить помощь, в которой нуждается для выполнения функций метеорологической наблюдательной станции, предоставляемой в данной стране, данном регионе и за границей. ВМО осуществляет международную координацию. А роли и распределение ответственности описаны в Руководстве по Глобальной системе наблюдений (ВМО-№488).

Всемирная служба метеорологической и океанографической информации и предупреждений предоставляет морякам информацию для обеспечения безопасности на море (ИОБМ) в виде продукции, содержащей морские прогнозы и предупреждения.

Глобальная морская система связи при бедствии и для обеспечения безопасности была согласована на международном уровне в рамках ИМО путем внесения поправки к Конвенции СОЛАС. С целью выполнения требований носителя коммуникационного оборудования ГМССБ.

В рамках ГМССБ морские бюллетени для открытого моря передаются через спутник с использованием одобренных поставщиков спутникового обслуживания с системой РГВ. Система РГВ обеспечивает передачу бюллетени всем судам, имеющим соответствующее приемное оборудование и находящимся в:

- а) Стандартной МЕТЗОНЕ или в прибрежном районе;

б) Прямоугольном районе, границы которого обозначаются широтой и долготой в соответствии с местоположением передатчика;

с) Круговой зоне, обозначенной ее центром и радиусом согласно местоположению передатчика.

Важную роль в обеспечении безопасности морских объектов принадлежит портовым метеорологам. Именно они обеспечивают связь между НМГС и сообществом судоводителей. Функции портовых метеорологов являются международными: независимо от местоположения судна, оно должно иметь возможность получить помощь, в которой нуждается для выполнения функций метеорологической наблюдательной станции, а также информацию о морском метеорологическом обслуживании, предоставляемом в данной стране, данном регионе и за границей. На ВМО ложатся задачи по осуществлению международной координации, в роли и распределение ответственности описаны в Руководстве по Глобальной системе наблюдений (ВМО - №488) [15].

В Российской Федерации в первую очередь гидрометеорологическую информацию предоставляют специалисты Росгидромета, занятые в области гидрометеорологического обеспечения морских отраслей экономики и круга специалистов, занимающихся морской деятельностью. Для специалистов органов Службы морских гидрологических прогнозов Росгидромета составлено «Руководство» [16] для помощи в правильном ориентировании судоводителей и морские отрасли экономики РФ относительно гидрометеорологического состояния морской окружающей среды в прошлом, настоящем и будущем, включая информацию об опасных явлениях и загрязнении.

Таким образом, в Российской Федерации гидрометеорологическим обеспечением народного хозяйства занимается Росгидромет, помимо этого в его задачи входит гидрометеорологическое оперативное обслуживание морского флота, обеспечение прогнозами и предупреждение об ОЯ. СМГМО главных портов и районов гаваней РФ включает выпуск портовых метеорологических и морских материалов, которые включают в себя прибрежные метеорологические и морские бюллетени, климатологическое обслуживание др. Морские порты являются главными потребителями информации объектов СМГМО, регулируемое локальными соглашениями и хозяйственными договорами. Доведение гидрометеорологической информации осуществляется местными Бюро погоды, приоритет отдается штормовым предупреждениям. Диспетчерские службы порта имеют схемы штормовых оповещений об ОЯ, информация о которых так же передается вместе с краткосрочными и долгосрочными прогнозами погоды, волнения, ледовой обстановки.

Требования обслуживания СМГМО определяются особенностями порта, количеством обработки судов и метеорологических условий. МГМО портов должно организовываться с учетом условий движения судов на акватории, гидрометеорологических, навигационно-гидрографических и иных особенностей. В СМГМО главных портов и гаваней входит:

- подготовка и выпуск гидрометеорологических бюллетеней, которые включают штормовые предупреждения, краткие обзоры погоды и прогнозы;
- информация о фактической погоде и климатических данных по запросу;
- морские гидрометеорологические консультации;
- устный инструктаж для судоводителей и других потребителей.

В портах с наблюдаемыми приливо-отливными явлениями должно быть включено наступление малой и полной воды. Для распространения гидрометеорологических бюллетеней используют каналы:

- система НАВТЕКС;
- факсимиле, телекс;
- электронная почта;
- обычная почта;
- доставка с посылным;
- телефон, факс;
- мобильные средства связи.

При работе СМГМО отмечается, что наиболее эффективно работа осуществляется в портах, где находится прогностическое бюро или портовые метеорологи. Однако обслуживание может осуществляться прогностическими бюро, расположенными за пределами порта.

Объектами гидрометеорологического обслуживания портов и районов гаваней являются:

- Заход судов в порт и выход из порта (информация о туманах, ураганах и штормах);
- Погрузочно-разгрузочные работы с использованием кранов и подъемных устройств (информация о ветре и осадках);
- Посадка и высадка пассажиров;
- Дноуглубительные работы;
- Очистные операции;
- Спасательные операции и т.п.;
- Перемещение барж (информация о ветре и волнении);

- Судостроение и различные строительные работы (климатическая информация);

- Инженерные изыскания (климатическая информация);
- Ледокольные работы (информация о ледовых условиях в порту);
- Рекреационная деятельность.

Прогноз дается относительно гидрометеорологических элементов:

- Направление и скорость ветра;
- Порывы ветра, экстремальные скорости ветра во время циклонов;
- Прибой и буруны при входе в гавань;
- Ветровые волны и зыбь на входах в гавань, на судоходных каналах и на специальных фарватерах для судов с большой осадкой;

- Дальность видимости;
- Осадки;
- Грозы и шквалы;
- Температура воздуха;
- Относительная влажность;
- Приливные уровни и течения;
- Колебания уровня воды, связанные с ветровыми сгонно-нагонными явлениями;

- Цунами;
- Речные паводки;
- Сейшевые колебания в порту («тягун»);
- Обледенение судов, ледовые условия.

В главных портах России Росгидромет предоставляет портовых метеорологов, через которых осуществляется непосредственная связь с администрацией порта и судоводителями, в то время как не большие порты далеко не всегда имеют доступ к гидрометеорологической информации своего района. Рассмотрим обеспеченность гидрометеорологическими портами территорию Российской Федерации (рис.5). Из чего видно, что основные морские территории, приходящиеся на бассейны Северного Ледовитого и Тихого океанов, значительно уступают по обеспечению гидрометпостами континентальной части РФ. Усугубляет положение расположение морских трасс и следовательно портовых акваторий, находящихся в зоне неблагоприятных климатических условий и Крайнего Севера. Специалисты гидрометеорологии не стремятся к работе в данных регионах, в связи с нехваткой специалистов многие станции приходят в упадок и функционируют не в полном объеме или же прекращают свою работу, что влечет за

собой потерю гидрометеорологической информации или к снижению качества и количества получаемой информации.

В XXI веке вопросы районы Крайнего Севера стали наиболее открытыми. Уже сейчас акватории море этих бассейнов становятся более доступными, по некоторым прогнозам к 2050г. судоходство по ним станет круглогодичным. Именно поэтому развитию морского транспортного комплекса Арктического и Дальневосточного регионов отводится первостепенное значение в государственной арктической политике России [17].



Рисунок 5. Метеорологические станции России

Таким образом, безопасность плавания кораблей является сложным, взаимосвязанным комплексом мероприятий, направленных на предотвращение навигационных аварий и сохранение живучести корабля в повседневных и боевых условиях.

1.2.2 Теоретико-правовые аспекты управления акваториями

Морские порты являются важными звеньями транспортной системы Российской Федерации и ее использование должно учитывать правовой режим их деятельности, подразделяемый на международный и национальный. В любых случаях пребывания судна в порту требуется выполнять правило соблюдения законодательства государства принадлежности порта. Многие вопросы регулируются национальным законодательством и обычаями. Как правило, во всех портах применяется национальное законодательство [18].

Необходимо учитывать, что в «мировой транспортной портовой инфраструктуре в последние годы наметились процессы расслоения портов на глобальные, региональные и

федеральные. Процесс цифровизации направленный на развитие транспортного комплекса РФ должен привести к унификации различных законов, которые служат для регулирования деятельности на акватории порта. Развитие морского порта происходящее комплексно должно основываться на использовании объектов инфраструктуры порта при обеспечении его конкурентоспособности. Для этого требуется обеспечить доступ субъектам предпринимательства к инфраструктуре морского порта [19]. Границы морских портов являются важным элементом, который включает в себя часть акватории водного объекта. Одним из регулятивных документов является Морская доктрина РФ [20], включающая необходимые элементы применения информационных технологий в данной сфере. Цифровая модернизация может помочь в развитии управления портом, информационное взаимодействие многочисленных транспортных организаций может осуществляться в автоматическом режиме. Как отмечалось выше система безопасности морского порта нуждается в модернизации и усовершенствовании, что требует постоянного развития, в том числе с использованием цифровизации. Распоряжением Правительства РФ принято решение оснащения морского порта инновационными продуктами, инженерно-техническими решениями, включающими обеспечение транспортной безопасности и охраны. [21]

Система транспортной безопасности в порту должна строиться на защите от любых угроз, связанных с морским судоходством, с состоянием морских судов и защищенностью объектов морской инфраструктуры.

Несмотря на закрепление четкого юридического статуса порта и правовых основ деятельности и перемещения в порту в законе «О морских портах в Российской Федерации», остались проблемы с обеспечением безопасности, использования инфраструктуры порта, экологии и другие. Контрольные функции в порту, осуществляемые Росморречфлотом, с подчинением службы капитана морского порта, надзорные функции осуществляет Ространснадзор в соответствии с Административным регламентом от 13.12.2011 №313. При этом капитан порта, возглавляющий службу капитана порта, несет ответственность перед Росморречфлотом, представленным на местах администрацией морского, так как служба капитана входит в состав администрации порта и выполняет закрепленные за ней функции, исходя из ст.76 КТМ РФ.

В результате встает необходимость в разграничении зон ответственности капитана морского порта и надзорного органа. Контрольно-надзорные функции необходимо формировать на базе служб капитана порта. Организационно-хозяйственные функции должны возлагаться на портовых менеджеров. Администрация морского порта должна

реализовывать государственные функции в порту без посредников, а в каждом порту должен существовать реальный орган управления.

В целях реализации государственной политики РФ в области морской деятельности действует Указ Президента РФ [22,23].

1.3 Особенности влияния гидрометеорологических условий и климатической изменчивости на геополитическую обстановку и морские объекты

В условиях стремительно меняющегося климата, важнейшим фактором, обеспечивающую безопасное и эффективное функционирование транспортного морского комплекса, остается оценка и прогноз гидрометеорологических элементов. Наблюдения показывают, что в Арктических районах в течение последних десятилетий происходит быстрое нагревание, в свою очередь приводящее к сокращению площади морских льдов в среднем на 10-15%, так же отмечается сокращение площади снежного покрова суши на 10% [24].

Задачами гидрометеорологической деятельности и смежных областей в высокоширотных и полярных районах являются:

- создание условий, которые способствуют достижению высокого уровня и качества специализированного гидрометеорологического обеспечения, позволяющего снизить отрицательное воздействие опасных гидрометеорологических явлений;
- создание и развитие наземных, морских и космических систем наблюдений;
- разработка новых и развитие уже имеющихся методов прогноза опасных явлений;
- разработка и развитие рекомендаций по предотвращению или уменьшению влияния опасных гидрометеорологических явлений;
- создание системы обеспечения своевременного предупреждения об опасных гидрометеорологических явлениях для потребностей социально-экономического комплекса;
- оценка последствий глобальных климатических изменений в полярных и приполярных районах в расчете на среднесрочный и долгосрочный прогноз, а так же разработка мер адаптации к этим последствиям.

Климатическая неопределенность имеет разнообразные последствия. С одной стороны, потепление несет угрозы и приводит к нарастанию температурных аномалий, изменению ландшафтов и деградации вечной мерзлоты, образованию большего числа айсбергов, увеличению штормовой (волновой) активности и др., что снижает показатели

надежности и устойчивости объектов транспортной системы, гидротехнических сооружений [25]. Обратная сторона в долгосрочной перспективе несет за собой более эффективную и полную реализацию экономического потенциала Арктического бассейна и Дальневосточного, как наиболее перспективных в развитии морской транспортной сети.

Климатическая изменчивость высокоширотных районов оказывает значительное влияние на геополитическую обстановку Российской Федерации, что крайне остро отмечается в Арктике и Дальневосточном регионе. Большая часть государств арктического региона ведут борьбу за территориальные границы в этой области. Отметим, что во времена холодной войны, Арктика представляла для некоторых государств стратегический интерес, так как маршрут от США до России наиболее короткий определяется именно через Северный полюс. Только суровые климатические условия являются причиной сложности размещении здесь прибрежной инфраструктуры.

В будущем на активность деятельности на море, возможно, окажет влияние изменение площади льдов в сторону сокращения, связанных с глобальным изменением климата [26]. Благодаря этому морской флот сможет иметь большую активность в Арктике на протяжении значительной части года.

Однако, размещение в арктической зоне морских и прибрежных объектов в суровых климатических условиях сопряжено с рядом трудностей, несмотря на тенденции к потеплению и ослаблению суровости условий, эти зоны в большинстве мало пригодны для активной деятельности людей.

Сложные природно-климатические условия создают высокий уровень рисков для социально-экономической инфраструктуры и значительно влияют на экономическую эффективность деятельности.

Гидрометеорологические, а в некоторых регионах ледовые условия, могут оказать существенное влияние на строительство и дальнейшее функционирование порта или другого объекта. Рассмотрим подробнее гидрометеорологические параметры и их влияние на портовые объекты.

Метеорологические условия: в состав метеонаблюдений входят атмосферное давление, температура воздуха, скорость и направление ветра, облачность, влажность, осадки, продолжительность солнечного сияния, оценка горизонтальной видимости, обледенение, явления погода (грозы, метели и др.). Как правило в пределах порта метеопараметры оказывают одинаковое влияние на все объекты акватории порта. К значимым параметрам здесь относятся скорость и направление ветра, обледенение и частично влажность воздуха.

Гидрологические условия: основными факторами являются колебания уровня моря, термохалинные характеристики, ветровое волнение, направление и скорость течений. Ветровое волнение и течения, имеющие показатель направления, могут менять степень воздействия на гидротехнические сооружения при их различных взаимодействиях, поэтому эти параметры относятся к значимым.

Ледовые условия: включены характеристики даты ледовых фаз и производные от них продолжительность и сроки навигационного периода, толщина льда, характеристики дрейфа льда и др. Наиболее значимыми для эксплуатации порта отмечаются скорость и направление дрейфа льда, сплоченность, характер ледяного покрова и ледяные образования.

Литодинамические условия: к ним относятся динамика наносов, динамика рельефа дна и берегов, эскарация дна ледяными образованиями.

В результате первичного анализа выделены следующие значимые гидрометеорологические параметры:

- скорость и направление ветра;
- обледенение;
- ветровое волнение;
- направление и скорость течений;
- направление и скорость дрейфа льда;
- сплоченность и горизонтальные размеры дрейфующего льда;
- характер ледяного покрова;
- наличие возможности образования и накопления ледяной каши;
- ледяные образования (торосы, стамухи, навалы);
- литодинамический комплекс.

Рассмотрим подробнее гидрометеорологические параметры, выделенные как наиболее значимые при принятии управленческих решений для безопасности судов на акватории порта, и их возможное влияние на морские объекты.

Скорость и направление ветра

Параметры являются существенными при выборе и принятии решений, касающихся морских объектов транспортного комплекса.

Первоначально отметим, что скорость и направление ветра имеют большую временную изменчивость. Высокая временная изменчивость характерна в краткосрочных проявлениях и от сезона к сезону для все видов объектов. Таким образом, предположение о влиянии ветра на объект или группу объектов преимущественно с одного направления и в узком диапазоне скоростей необоснованно, если к этому не приводит ряд предпосылок

при анализе гидрометеорологической статистики. Для узких проливов высокая вероятность преобладания сильных ветров вдоль оси акватории, которые будут влиять на объекты сами по себе или через другие гидрометеорологические параметры (ветровое волнение, дрейф ледяного покрова и др.).

Высокая изменчивость ветровых параметров отмечается не только во временном масштабе, но и в пространственном. Наиболее актуальный этот вопрос стоит для больших территорий портовых комплексов. В таком случае для группы морских объектов на акватории порта считается не обоснованным одинаковое влияние природных факторов на каждый объект при их параллельном расположении, но это абсолютно не верно для элементов окружающей среды и ветровых условий. На практике при небольших дистанциях и любом расположении объектов в большинстве случаев одни объекты оказываются в наветренной стороны, другие – под действием ветровой тени и локальных завихренностей от первых.

В результате можно сделать вывод об отсутствии влияния ветровых условий на морские объекты транспортного комплекса для большинства районов расположения. Отдельные специфические условия можно исключить. Ветровые условия мало влияют на расположение, но становятся значимыми при определении геометрии. Необходим обязательный учет ветрового дрейфа судов поперек оси каналов при расчете его ширины. Без учета этих факторов, при плавании в узких каналах, судно может быть вытеснено на бровку канала.

Обледенение

При совокупности неблагоприятного сочетания температуры воздуха и скорости ветра может возникать атмосферное обледенение. Эти метеорологические параметры равноценно воздействуют на все морские объекты. Из чего следует, что атмосферное обледенение не влияет на компоновочные решения, исключение составляет только случай парения акватории при отеплении акватории для активного воздействия на ледяной покров вблизи причалов и подобных объектов.

Наличие и интенсивность морского обледенения от забрызгивания и заливания объектов морской водой при интенсивном волнении и подъеме уровня воды. Снижение указанных факторов при выборе значений вертикальных отметок горизонтальных поверхностей, выбор более обтекаемой геометрии объекта с использованием соответствующих форм и приспособлений, особенно с наиболее волноопасных направлений. Для портов логичным решением является создание волнозащитных сооружений, ограничивающих акваторию. Внешние ограждения остаются актуальными рекомендациями для терминалов и платформ. Обледенение судов при движении по каналу

отличается невозможностью выбора оптимального курса относительно волны для уменьшения забрызгивания.

Ветровое волнение

Ветровое волнение представляет опасность первоначально для пришвартованных судов, особенно у причалов на акватории порта. Защита гидротехнических объектов и судов от ветрового волнения посвящено достаточно литературы [27,28]. Одним из наиболее опасных является низкочастотные колебания уровня в порту. В некоторых портах низкочастотные колебания пришвартованных к причалам судов с периодом, превышающим период ветровых волн (тягун), не редкое явление. Тягун наносит значительный экономический ущерб морскому порту. При сильном тягуне происходит обрыв швартовых, повреждение судов и причалов, становятся невозможны погрузочно-разгрузочные операции.

Направление и скорость течений

Суммарные течения складываются из периодической (приливной), непериодической (ветровой) и квазипостоянной течений.

Для условий открытого моря, где влияние берегов минимально, течения начинают оказывать равнозначное воздействие со всех сторон по причинам:

- квазипостоянные течения в открытом море малы по сравнению с другими компонентами;
- эллипсы приливных течений с удалением от берега и увеличением глубины стремятся к окружности, т.е. равномерной смене направлений при относительно постоянной скорости;
- ветровые течения, которые зависят от ветрового режима, имеют преимущественно такую же изменчивость и могут считаться не влияющими на геометрию и пространственную ориентацию терминала.

Следствие такого равнозначного воздействия является необходимость создания поворотного узла отгрузки, т.к. судно под действием течений будет стремиться повернуться относительно неподвижного терминала или платформы.

При приближении к берегу сильнее оказывается влияние орографии. Проявляется квазипостоянные течения. Приливные эллипсы вытягиваются и периодические течения становятся ближе к реверсивным с четкой сменой направления четыре раза в сутки. Ветровые течения в большей степени приобретают вдольбереговую направленность. В прибрежной зоне для морских объектов необходим так же поворотный узел отгрузки, только судно стремится повернуться после половины приливного цикла. Это характерно для всех терминалов и платформ в полярных акваториях. В порту резкая смена

направления течения может провоцировать явление тягуна или снос судов при их низкой управляемости из-за отсутствия скорости. Оградительные сооружения помогут существенно снизить остроту проблемы для акватории. Снос судов характерен при движении по каналам. Более ярко это выражается при ортогональном направлении канала и течения, что характерно для подходных каналов портов Обской губы.

Скорость и направление дрейфа льда

Дрейф льда - результат воздействия ветра и течения, следовательно, все сказанное выше по данным параметрам суммируется в этом разделе. Учитывая максимальное совпадение по направлению ветра, поверхностных течений и дрейфующего льда в прибрежной зоне, то наиболее неблагоприятная ситуация будет для судов в акватории порта, когда они плохоуправляемы из-за малой скорости и могут находиться в невыгодном положении относительно внешних нагрузок. В связи с этим рекомендуется защита акватории порта с применением ледозащитных сооружений. Необходим учет того, что практически ни при каких приемлемых вариантах компоновки, самоочищение акватории порта от битого льда происходить не будет. В данной ситуации сталкиваются два противоположных требования к бассейне – открытость акватории для свободного выхода льда и ее закрытость для защиты от воздействия льда.

На внешней границе ледозащитных сооружений и у точечных объектов при дрейфе льда и его торошении перед припятствием могут возникать навалы и стамухи, что способствует блокированию объектов с одной или нескольких сторон. Если для ледозащитных сооружений подобное не критично, то у терминалов и платформ это может вызвать угрозу частичной потери функциональности. Для снижения подобных рисков требуется оптимизация геометрии объектов и компоновки внутренних устройств и механизмов.

Дрейф льда в первую очередь опасен для судов в стесненных условиях канала, где так же может наблюдаться суммарный эффект от воздействия ветра, течений и льда.

Сплоченность и горизонтальные размеры дрейфующего льда

Данные параметры могут усугублять негативный эффект уже рассмотренных факторов, а увеличение сплоченности и размеров льдин будет сказываться следующим образом:

- рост вероятности возникновения и масштаб торошений у припятствий;
- увеличение риска образования навала в зоне выхода трубопроводов на берег;
- увеличение воздействий на судно в канале;
- уменьшение площади разводий в ветровой тени объектов, где создаются благоприятные условия для временной стоянки судна или грузовых операций.

При малой сплоченности льда в пределах 1-3 баллов может проявляться влияние ветрового волнения, которое может привести к ударным нагрузкам от битого льда. Влияние зыби может проявиться при еще большей сплоченности льда и вызвать аналогичные последствия.

Решение данной проблемы состоит в дроблении льда, что снижает нагрузки от дрейфующего льда на сооружения и суда.

Характер ледяного покрова

Ледяной покров подразделяется на подвижный (дрейфующий) и неподвижный (припай).

Влияние дрейфующего льда было рассмотрено выше. Наличие припая, образующегося у кромки объектов, исключает негативное влияние от подвижного льда, но накладывает некоторые ограничения. Припай вблизи объекта демпфирует воздействие на него дрейфующего льда, но создает дополнительные нагрузки от сплошного ледяного покрова: вертикальные – при колебаниях уровня моря, горизонтальные – при термических расширениях. Второе особенно актуально для закрытых акваторий портов. После взлома припая объекты окажутся под воздействием дрейфующего льда с соответствующими последствиями.

Наличие возможности образования и накопления ледяной каши

При судоходстве в припайном льду происходит образование и накопление ледяной каши. Особенно быстро развивается этот процесс в зонах расширения ледового канала, где происходит хаотичный взлом льда. Системы снижения ледяной каши для суровых полярных условий только разрабатываются. Объем накопления каши зависит от площади взлома льда и частоты прохода судов, при проектировании портов следует минимизировать эти показатели, плотнее размещать ключевые объекты и исключать непроизводительные перемещения флота.

Ледяные образования (торосы, стамухи, навалы)

Частично этот фактор рассматривался при анализе дрейфа льда, сплоченности и размеров, прокладке ледовых каналов в припае. Дополнительно можно упомянуть возможность частичной блокировки терминалов и платформ не при местном торошении льда и появлении дрейфующих ледяных образований извне.

Литодинамический комплекс

Существенное влияние на динамику наносов оказывают искусственные прорезы на дне (каналы, дноуглубление и т.п.). При строительстве терминалов и платформ естественные условия изменяются относительно не значительно, стандартная защитная берма предусматривается сразу. Дноуглубление, характерное для каналов и портов,

создает искусственные ловушки для наносов. Минимизация дноуглубления сократит строительные и эксплуатационные затраты. Следующим источником дополнительных наносов являются реки, которые в полярной зоне в период половодья способны выносить до 90% объема годового твердого стока. Отделение портовой акватории от устья реки сократит заносимость. Размыву способствуют слабые грунты и сильные придонные течения. Слабые грунты можно скорректировать при дноуглублении, риск придонных течений возрастает при интенсивности работ судовых винтов и создании локальных сужений, усиливающих естественные потоки [28,30].

Из-за плохой предсказуемости развития природных процессов, особенно в районах вечной мерзлоты, следует минимизировать любое воздействие на нее. Например, оптимальным может быть разумное сокращение дноуглубления и вдольбереговой линии порта.

Выводы по главе

Перспективы развития морских портов Российской Федерации считают развитие в сторону создания «умных портов» на основе применения цифровых технологий (Интернет вещей, искусственный интеллект, 3D-печать, виртуальная и дополненная реальность, цифровые близнецы, технология ведения распределенных реестров учета и удостоверения прав, технологии самоисполняемых кодов выполнения обязательств и др.), что позволит создать абсолютно новую логистику. Стоит учитывать, что выбор и процесс внедрения цифровых решений в портовую деятельность процесс сложный, который так же может стать и разрушительным, а не переходным. Последствия перехода будут зависеть от бизнес-процессов, возникающих в результате адаптации технологий в данной сфере.

Одно из важнейшего, что следует учитывать вопросы, связанные с цифровым взаимодействием морских портов с другими субъектами транспортного пространства с целью обеспечения синхронизации их деятельности в различных аспектах от организационных до технологических.

Рекомендации для портов в следствии влияния гидрометеорологических параметров сводится к защите замкнутых акватории с использованием многофункциональных защитных сооружений, при необходимости регулировать очищение акватории от битого льда и каши, что требует создания специализированных систем, т.к. создать самоочищение порта ото льда практически не возможно, минимизировать площадь акватории порта и протяженность ее береговой границы, оптимизировать ширину ворот порта , минимизировать площади взлома льда и частоты проходов судов для чего необходимо размещать объекты плотнее и исключать

непроизводительные перемещения, минимизировать дноуглубительные работы и воздействия на вечную мерзлоту и отделение акватории порта от устьев рек.

Глава 2. Математическая постановка комплексной задачи геомоделирования гидродинамики и ее численная аппроксимация

В настоящее время исследование ветрового волнения в синоптическом и климатическом масштабах имеют не только научный интерес, но и практический. В практической деятельности человека, сильные шторма, а следовательно сильное ветровое волнение, может затруднить судоходство и привести к гибели судов и людей. В результате прогнозирования этих последствий можно избежать.

Для решения вышеуказанной проблемы необходимо знание полей ветрового волнения. Основная трудность заключается в отсутствии повсеместного инструментальных измерений элементов ветрового волнения. В наиболее изученных районах океана, таких как Северная Атлантика расположены около 40 волноизмерительных буев и три «корабля погоды», при высокой пространственной изменчивости ветрового волнения этого недостаточно.

Альтернативные методы – визуальные наблюдения с попутных судов и неконтактные методы с применением ДЗЗ. Оба эти метода имеют свои недостатки. Визуальные наблюдения имеют достаточно большую погрешность и имеют сильную зависимость от человеческого фактора, т.е. опыта штурмана. Спутниковые измерения имеют большую временную дискретность, при том, что временная изменчивость ветрового волнения значительно выше, чем 20-40 суток.

Вышеуказанные недостатки указывают на необходимость разработки методов с использованием численных гидродинамических моделей. Для таких моделей входными параметрами, как правило, являются данные по полям ветра, сейчас разработаны надежные атмосферные модели, которые с высокой точностью рассчитывают поля ветра.

2.1 Способы моделирования волнения

Степень обоснованности любого прогноза определяется его методологией. Основа прогностического метода является физическая гипотеза о механизме формирования и развития прогнозируемого явления, описываемой дифференциальными или статистическими уравнениями. Все существующие методы морских прогнозов делятся на два класса – гидродинамические и статистические (рис. 6).

Основу статистических методов представляют эмпирические прогностические уравнения, которые характеризуют причинно-следственную связь. Физико-статистические методы предполагают построение статистического прогностического уравнения на основе эмпирического описания изменчивости прогнозируемого параметра в будущем как результат совокупного влияния нескольких факторов. Отметим, что для статистического анализа и последующего составления статистического метода прогноза гидрометеорологических параметров, требуется знание о предыдущих состояниях. Как отмечалось в Главе 1, для районов Крайнего Севера, особенно в прибрежных малых портах и бухтах, отсутствуют ряды данных или имеют большие пробелы.

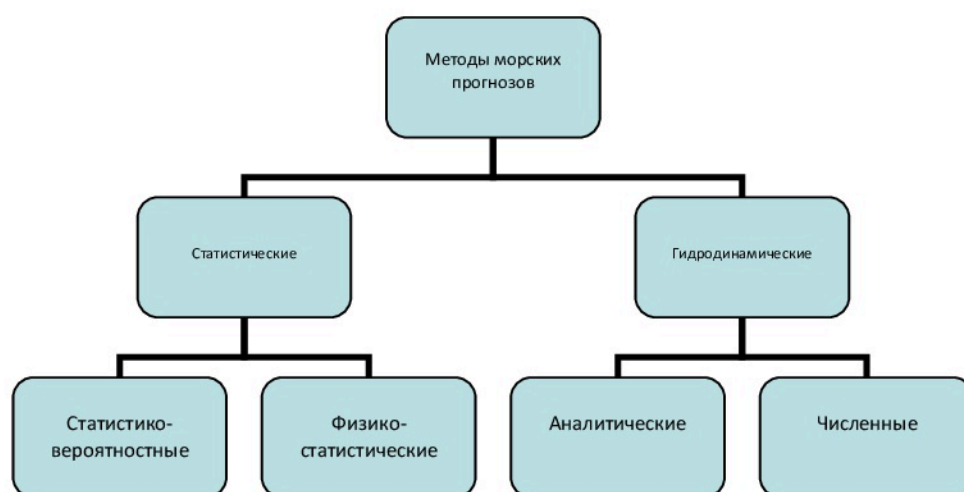


Рисунок 6. Классификация методов морских прогнозов

Гидродинамические методы основываются на решении уравнений гидродинамики. Средством прогнозирования аналитического метода являются уравнения – упрощенные аналитические решения исходных уравнений. Наиболее распространены для прогнозирования состояния морской среды численные системы дифференциальных уравнений с реализацией в конечно-разностной форме.

Сегодня для воспроизведения ветрового волнения применяют разнообразные ветровые модели [31], которые можно разделить на четыре группы:

- 1) спектральные дискретные
- 2) спектральные параметрические
- 3) интегральные параметрические
- 4) прочие (эмпирические, энергетические, монохроматические и др.).

Дискретные модели делятся на поколения, их различия состоит в степени подробности описания механизма нелинейного взаимодействия в спектре ветровых волн. В первых трех поколениях используются нестрогие процедуры упрощения интеграла взаимодействий. Примером может служить модель WAM. К настоящему времени

существует лишь две модели четвертого поколения, отличающихся точным математическим описанием механизма нелинейного взаимодействия – EXACT-NL и модель российского производства атмосферно-волновая модель «узконаправленного» приближения волнового спектра (PABM) [Захаров, 1981; Абузьяров, 2009].

Одной из наиболее известных зарубежных моделей можно считать спектральную дискретную модель WAM с ее модификациями, применяемая во многих центрах прогноза погоды и модель WAVEWATCH [Tolman, 1989, 1996; Абузьяров, 2009]. В России на основе модели PABM Институт Арктики и Антарктики разработана спектрально-параметрическая модель AARI-PD2 [Давидан, 1988; Дымов, 2004].

Выходная продукция доступна внутренним пользователям через базы данных Гидрометцентра России, на файл-сервисах ГИС-МЕТЕО. Внешним пользователям распространяются в кодах GRID и GRIB по каналам Глобальной системы телесвязи ВМО (ГСТ) и через сеть Интернет. Прогностическая информация доводится до капитанов судов, портов, буровых платформ по каналам связи: ГСТ, СМИ, системы связи МЕКОМ, Интернет, мобильные средства связи, подсистемы НАВТЕКС и SafetyNet в рамках Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ) и в рамках Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [32].

Мониторинг и прогноз ветра и волнения взаимосвязанные процессы и требуют развития полностью интегрированной системы прогноза волнения требует мониторинга морской окружающей среды, применения современных технологий и разработки прогностических моделей, играющих важную роль в оценке явлений моря, недостаточно оснащенной системой наблюдений.

Анализ различных источников литературы [32-47] показал, что существует множество моделей ветрового волнения и методов расчета волн по полям и характеристикам ветра. Наиболее развитые модели включают два расчетных блока – атмосферный и волновой. Атмосферный блок отвечает за определение атмосферного воздействия (форсинг) в физической системе ветер-волны, волновой блок определяет реакцию поверхностного слоя на это воздействие.

С развитием методов и моделей стали развиваться ансамблевые методы прогнозирования волнения, которые в оперативном режиме выпускает Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), служба Великобритании (Met Office) и др. [33]. Ансамблевый подход позволяет уменьшить неопределенность прогноза ветра или волнения и повысить его качество с разными, равновесными приближениями.

В России в настоящее время широкое распространение в оперативной работе получили спектрально-параметрическая модель второго поколения AARI-PD2(СМП) [34], модель узконаправленного приближения четвертого поколения PABM, реализованная для Северной Атлантики [35,36], модель WAVWATCH [37,38]. В зарубежной практике наиболее используемы дискретные модели третьего поколения WAM [], WAVEWATCH и для мелководья модель SWAN [39,40], которая активно сегодня начала использоваться и в России. Все модели, кроме модели SWAN используется для расчета на Глубоководье и на мелководье использование не оправдано, SWAN используется на мелководье для решения региональных задач. Упомянутые модели хорошо верифицированы и показывают достаточно удовлетворительные результаты, что исследовано в многочисленных работах [41-46.]. Ниже рассмотрим адаптации упомянутых моделей к моря России.

Адаптация модели WAVEWATCH к акваториям Азовского, Черного и Каспийского морей. ФГБУ «Гидрометцентр России» при развитии оперативного модуля ЕСИМО ФЦП «Мировой океан» на основе моделей WAVEWATCH и SWAN разработали автоматизированную систему прогнозирования элементов ветрового волнения для Азовского, Черного и Каспийского морей. Полученная система обеспечивает прогнозирование характеристик систем ветрового волнения и зыби, а так же характеристик смешанного волнения на срок до пяти суток с периодичностью вывода результатов каждые 3 часа.

Прогноз для Азовского моря осуществляется на широтно-долготной сетке 2х2км, для Черного моря 10х10км, для Каспийского моря 6х6км с детализацией северной части на сетке 2х2км.

Для расчетов используются поля скорости ветра из глобальной прогностической системы GFS, предоставляемые метеорологическим центром NCEP/NOAA. Результаты оцениваются по данным спутниковых наблюдений из базы данных RADS.

Образец выходного результаты представлен на рис.7.

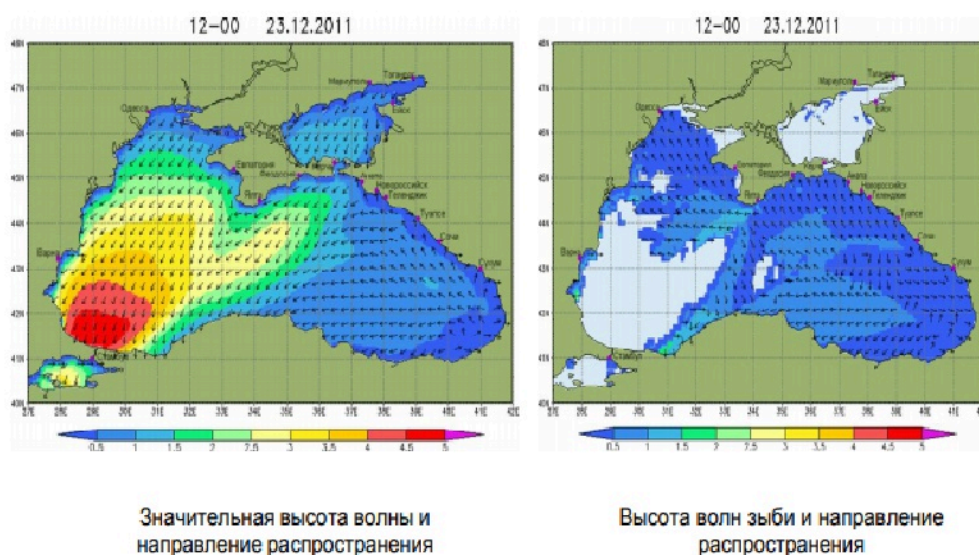


Рисунок 7. Прогноз полей распределения высоты и направления распространения ветровых волн и волн зыби в Черном и Азовском морях на 12ч. 23.12.2011г.

Адаптация моделей WAVEWATCH и SWAN к акваториям дальневосточных морей.

Для решения задач прогнозирования ветрового волнения в Тихом океане и дальневосточных морях сотрудником ФГБУ «ДВНИГМИ» А.Н.Вражкиным разработана автоматизированная оперативная технология прогноза, включающая модели WAVEWATCH версия 1.18 и SWAN. Расчет волнения производится дважды в сутки, выходная продукция включает высоту, период, длину и направление распространения смешанного и ветрового волнения (рис.8).

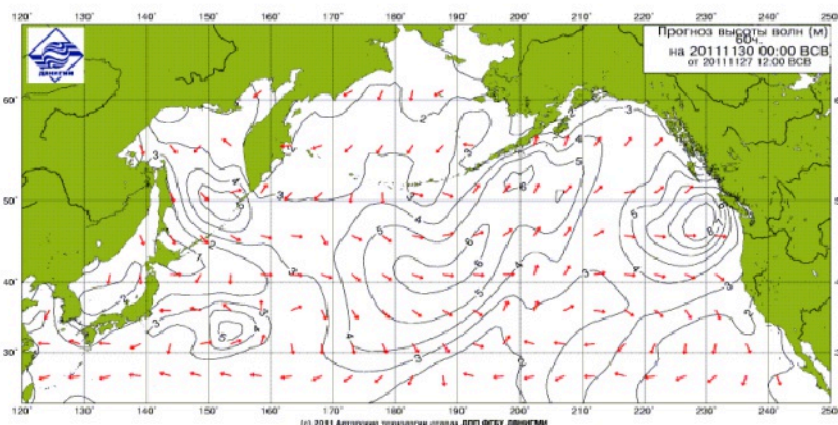


Рисунок 8. Прогноз волнения на 12ч. UTC 30.11.2011г.

Модель SWAN применена для расчетов волнения в мелководной прибрежной зоне на примере залива Петра Великого и Татарского пролива. В результате выявлена прямая связь успешности расчета волнения от точности задания поля ветра.

Спектрально-параметрическая модель AARI-PD2 (глобальная версия). Разработана в Санкт-Петербургском отделении Государственного океанографического института под руководством И.Н.Давидана и в дальнейшем усовершенствованная в Арктическом и

Антарктическом научно-исследовательском институте (ФГБУ «АНИИ»). Модель по точности не уступает WAM, но является более быстродействующей.

Модель многократно верифицировалась по инструментальным данным измерений на различных акваториях и сравнивалась с моделями WAM и WAVEWATCH [47]. Модель дает достаточно надежные результаты, обладает высоким быстродействием, что позволяет использовать ее в оперативной работе для составления прогнозов волнения в реальном времени и для решения других прикладных задач.

Входными данными модели являются частотно-направленный спектр для расчета на глубокой воде и данные батиметрии и распределения ветра в зоне мелководья.

Технология глобального прогноза ветрового волнения совместная разработка Гидрометцентра России и АНИИ. Оперативный прогноз осуществляется в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации (АСОПИ). Входные данные – прогностические поля ветра, вычисляемые по спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России. Пример результатов прогноза представлен на рис.9.

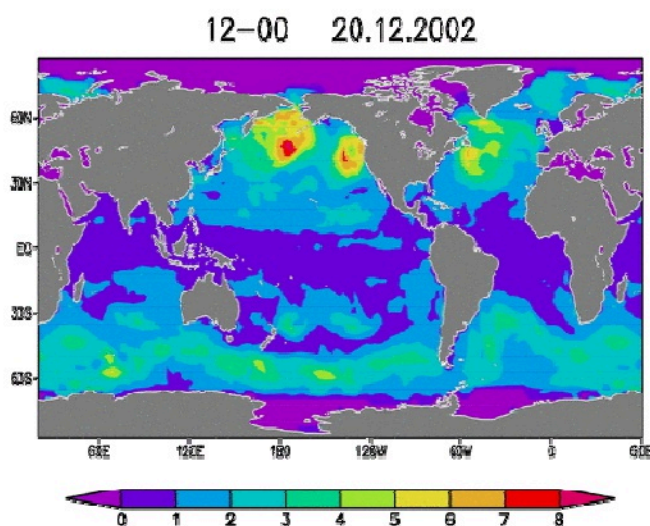


Рисунок 9. Глобальный прогноз ветрового волнения Гидрометцентра России по модели АНИИ

Адаптация моделей AARI-PD2 и SWAN к акватории морей арктического региона.

Модель AARI-PD2 совместно с моделью SWAN была адаптирована к условиям Баренцева и Карского морей, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Модель специально предназначена для расчетов параметров волнения для небольших мелководных акваторий с детальной сеткой по пространству и идеально подходит для прогноза волн в этих морях.

В 2010 году метод был представлен на Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП). Использовались «вложенные сетки» с шагом 1 градус по параллели и 0,5 градуса по

меридиану. В качестве входной информации используется поля приземного давления. Из-за отсутствия регулярных инструментальных измерений волнения в арктических морях России, для оценки качества прогнозов впервые были использованы данные спутников Jason-1, Jason-2, Envisat, Cryosat-2 измерений высот волн. Пример готовой продукции представлен на рис.10.

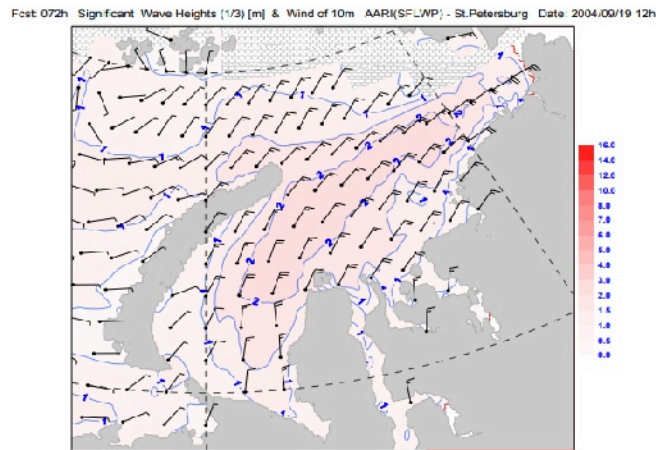


Рисунок 10. Прогноз значительных высот волн и скоростей ветра на 12ч. ВСВ 19.09.2004г. (заблаговременность 72ч.)

2.2 Основные уравнения и краевые условия

Волны в океанах и морях представлены распространяющимися периодическими колебаниями частиц воды около положения их равновесия.

Движение жидкости описывается уравнением Навье-Стокса, в векторной форме записывается как

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho g + F_n - \rho(2w \times V) - \nabla P + \kappa_V \rho \left[\nabla^2 V + \frac{1}{3} \text{grad}(\text{div} V) \right] \quad (2.1)$$

Уравнение показывает, что изменение скорости V элементарного объема жидкости плотностью ρ во времени t определяется действием объемных и поверхностных сил. Первые два члена уравнения характеризуют действие гравитационных сил и разделены на периодические приливообразующие силы F_n и силы, вызывающие ускорение свободного падения g . Третий член уравнения характеризует изменение перемещения жидкости за счет вращения Земли с угловой скоростью $w = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, известная так же как сила Кориолиса. Последние два члена уравнения описывают силу гидростатического давления P и силу вязки напряжений, зависящую от кинематического коэффициента вязкости κ_V .

Уравнение движения жидкости дополняется уравнением неразрывности, выражающим закон сохранения массы:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} V = 0 \quad (2.2)$$

В естественных условиях относительные изменения плотности морской воды достаточно малы [48]. В связи с этим градиенты составляющих скоростей течения по координатным осям практически уравниваются и дивергенция потока жидкости с погрешностью не более десятых долей процента равна нулю. Поэтому изменения плотности никогда не определяют из уравнения неразрывности, а закон сохранения массы достаточно точно можно выразить более простой формулой:

$$\operatorname{div} V = 0 \quad (2.3)$$

По причине турбулентного движения морской воды нет смысла находить мгновенные значения скоростей в уравнении (1). Осреднение проводится входящих в него элементов к некотором диапазоне времени, из-за малости изменения плотности обычно считают ρ в интервале осреднения постоянной. В результате осреднения так же появляются произведение пульсаций скоростей. Обычно эти члены уравнения полагают пропорциональными градиентам средних скоростей и коэффициентам турбулентности K_v . Тогда осреднение уравнения движения отличается от неосредненных добавочным членом уравнения, зависящим от коэффициента турбулентности, все остальные аргументы представляют не мгновенные значения, а осредненные, но их обозначение неизменно:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho g + F_n - \rho(2w \times V) - \nabla P + \rho \nabla(K \nabla V), \quad (2.4)$$

где $K = \kappa_v + K_v$.

Вид уравнения неразрывности при осреднении не меняется.

Стоит заметить, что нерационально использовать полную систему уравнений в случаях, когда входящие в нее члены играют неравнозначную роль. Это важно учитывать, если иметь в виду ошибки определения используемых гидрометеорологических параметров, поэтому перед решением уравнений необходимо их проанализировать и упростить применительно к особенностям изучаемого процесса. Требуется выделить существенные стороны и учесть это в членах уравнения, пренебрегая малыми слагаемыми [49].

Упрощение уравнений движения

Количественное соотношение между членами уравнения движения и неразрывности для процессов различных масштабов определяется статистической

оценкой значений этих слагаемых. В зависимости от пространственного L_x и временного t_x масштаба изучаемого движения определяются среднестатистические значения перепадов давления ∇P_x , скоростей V_x , коэффициентов турбулентности K_x , плотности ρ_x и др. По этим характерным значениям элементов можно произвести приближенную оценку порядка членов уравнений и выделить значимые в процессе исследуемого масштаба.

При использовании характерных масштабов и уравнивании слагаемых приходим к выводу, что сила тяжести уравнивается вертикальным градиентом давления, т.е. в океане выполняется условие гидростатики

$$\frac{dP}{dz} = \rho g \quad (2.5)$$

На этом фоне развиваются практически все движения в океанах и морях, для которых безразмерное отношение $Fr = V^2 / (Lg)$ - число Фруда, значительно меньше 1.

Большой класс движений морской поверхности характеризуется малыми масштабами t_x и L_x , большими масштабами V_x , для которых число Фруда порядка 10^{-1} . Учет перечисленных основных членов приводит уравнение движения для этого масштаба процессов к виду

$$\frac{dV}{dt} + \frac{\nabla P}{\rho} + \nabla \left(\frac{V^2}{2} \right) - g = 0 \quad (2.6)$$

Движение считается безвихревым из-за малости члена уравнения, содержащего вихрь. Скорость движения в таком потоке выражается через градиент скалярной функции потенциала скорости φ

$$V = \nabla \varphi \quad (2.7)$$

Следовательно,

$$\frac{dV}{dt} = \nabla \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.8)$$

При применении уравнений к морской акватории вертикальная ось z направлена параллельно ускорению свободного падения, тогда запишем $g = \nabla g_z$. С учетом перечисленных замечаний при постоянной плотности воды ρ_c и координатной оси z , направленной вверх, уравнение (2.7) преобразуется к виду

$$\nabla \left(\frac{d\varphi}{dt} + \frac{P}{\rho_c} + \frac{V^2}{2} + g_z \right) = 0 \quad (2.9)$$

Уравнение неразрывности и условие отсутствия завихренности позволяют получить следующее уравнение, описывающее потенциал скорости

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2.10)$$

Последние два уравнения описывают гравитационные волны [48, 49].

Основные уравнения, граничные условия и их упрощения

Большой класс непериодических движений описывают основными уравнениями гидродинамики турбулентного океана и соответствующие граничные условия.

На практике, как правило, требуется знание не вектора скорости течения, а его проекций, характеризующих горизонтальные и вертикальные движения. Поэтому уравнения проектируются на оси сферической системы координат (φ, λ, R) . Для устранения особенностей в уравнениях при описании течений на экваторе, широта часто выражается $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$. Проекция на радиус R ради удобства заменяется проекцией на ось z , направленную практически вдоль радиуса от невозмущенной поверхности вглубь океана. В проекции на координаты θ, λ, z уравнения движения имеют вид

$$\frac{du_\theta}{dt} + \frac{u_\theta}{R} \frac{du_\theta}{d\theta} + \frac{u_\lambda}{R \sin \theta} \frac{du_\theta}{d\lambda} + u_z \frac{du_\theta}{dz} - \frac{u_\lambda^2}{R} \operatorname{ctg} \theta - 2w \cos \theta u_\lambda = -\frac{1}{\rho_0 R} \frac{dP}{d\theta} + \frac{d}{dz} K_v \frac{du_\theta}{dz} + \frac{K_{vL}}{R^2} \nabla^2 u_\theta; \quad (2.11)$$

$$\frac{du_\lambda}{dt} + \frac{u_\theta}{R} \frac{du_\lambda}{d\theta} + \frac{u_\lambda}{R \sin \theta} \frac{du_\lambda}{d\lambda} + u_z \frac{du_\lambda}{dz} + \frac{u_\theta u_\lambda}{R} \operatorname{ctg} \theta + 2w \cos \theta u_\theta = -\frac{1}{\rho_0 R \sin \theta} \frac{dP}{d\lambda} + \frac{d}{dz} K_v \frac{du_\lambda}{dz} + \frac{K_{vL}}{R^2} \nabla^2 u_\lambda \quad (2.12)$$

Уравнение гидростатики

$$\frac{dP}{dz} = \rho g. \quad (2.13)$$

Уравнение неразрывности в приближении Буссинеска

$$\frac{1}{R \sin \theta} \left(\frac{d}{d\theta} \sin \theta u_\theta + \frac{du_\lambda}{d\lambda} \right) + \frac{du_z}{dz} = 0. \quad (2.14)$$

В вышеописанной системе уравнений u_θ, u_λ, u_z - составляющие скорости по осям

θ, λ, z сферической системы координат; $\nabla^2 = \frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{d}{d\theta} \sin \theta \frac{d}{d\theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{d^2}{d\lambda^2} \right) -$
горизонтальная часть оператора Лапласа в сферических координатах.

Среди граничных условий выделяются динамические, кинематические и термохалинные условия.

Динамические граничные условия определяют непрерывность тензоров напряжений на границе раздела океан-атмосфера при $z = -\zeta(\theta, \lambda, t)$, т.е. на свободной поверхности океана, и сводятся к соотношениям

$$P = P_a \quad (2.15)$$

где P_a - атмосферное давление, тогда

$$\rho_0 K_V \frac{du_\theta}{dz} = -\tau_\theta, \rho_0 K_V \frac{du_\lambda}{dz} = -\tau_\lambda \quad (2.16)$$

где $\tau_\theta, \tau_\lambda$ - касательные напряжения трения ветра на поверхности.

В связи с малостью величины ζ по сравнению с глубиной моря эти граничные условия иногда задают на невозмущенной поверхности, т.е. при $z=0$.

Кинематические граничные условия означают непроницаемость для жидкости как свободной поверхности $z = -\zeta(\theta, \lambda, t)$, так и поверхности дна $z = H(\theta, \lambda)$ и твердых боковых участков границ.

При $z = -\zeta(\theta, \lambda, t)$

$$u_z = -\frac{d\zeta}{dt} = -\left(\frac{d\zeta}{dt} + \frac{u_\theta}{R} \frac{d\zeta}{d\theta} + \frac{u_\lambda}{R \sin \theta} \frac{d\zeta}{d\lambda}\right) \quad (2.17)$$

При $z = H(\theta, \lambda)$ кинематические условия могут быть двух видов:

а) $u_z = \frac{u_\theta}{R} \frac{dH}{d\theta} + \frac{u_\lambda}{R \sin \theta} \frac{dH}{d\lambda}$ - условие скольжения при отсутствии трения,

б) $u_\theta = u_\lambda = 0, u_z = 0$ - условие прилипания и непроницаемости.

Выбор условия а) или б) зависит от учета трения о дно. Условие скольжения не рассматривает придонный пограничный слой.

На твердых боковых границах $u_\theta = u_\lambda = 0$ - условие прилипания и непроницаемости.

На жидких боковых границах задается распределение вектора скорости

$$V_L = V_L(\theta, \lambda, z). \quad (2.18)$$

Термохалинные граничные условия выражают влияние переноса тепла и солей, в данной работе эта часть не рассматривается.

Начальные условия отражают термодинамическое состояние жидкости в начальный момент времени $t=0$ и сводятся к заданию полей всех характеристик

$$u_\theta = u_\theta^{(0)}, u_\lambda = u_\lambda^{(0)}, u_z = u_z^{(0)}, P = P^{(0)}, \zeta = \zeta^{(0)}, \rho = \rho^{(0)} \quad (2.19)$$

При решении стационарных задач начальные условия отсутствуют.

В итоге задача сводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений при граничных и начальных условиях.

Для океанических бассейнов в декартовой системе координат учитывается изменение параметра Кориолиса с широтой $f(y) = f_0 + \beta y$, где f_0 - значение параметра Кориолиса на краю бета-плоскости, $\frac{df}{dy} = \beta$ - бета-эффект.

Уравнения (2.11) – (2.13) записываются в таком случае

Уравнение движения

$$\frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} + g \frac{dg}{dy} + w \frac{du}{dz} - fg = -\frac{1}{\rho_0} \frac{dP}{dx} + \frac{d}{dz} K_v \frac{du}{dz} + K_{vl} \nabla_r^2 u; \quad (2.20)$$

$$\frac{dg}{dt} + u \frac{dg}{dx} + g \frac{dg}{dy} + w \frac{dg}{dz} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{dP}{dy} + \frac{d}{dz} K_v \frac{dg}{dz} + K_{vl} \nabla_r^2 g \quad (2.21)$$

$$\text{Уравнение гидростатики } \frac{dP}{dz} = \rho g; \quad (2.22)$$

$$\text{Уравнение неразрывности несжимаемой жидкости } \frac{du}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0. \quad (2.23)$$

В этих уравнениях u, g, w - составляющие скорости по осям x, y, z декартовой системы координат; $\nabla_r^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2}$ - двумерный оператор Лапласа в декартовых координатах.

При переходе к декартовой системе координат изменяются граничные условия при $z = -\zeta(x, y, t)$

$$w = -\left(\frac{d\zeta}{dt} + u \frac{d\zeta}{dx} + g \frac{d\zeta}{dy}\right); \quad (2.23)$$

при $z = H(x, y)$

$$w = u \frac{dH}{dx} + g \frac{dH}{dy}. \quad (2.24)$$

Теория гравитационных поверхностных волн

Гравитационные волны описываются уравнениями (2.20) и (2.21). Первое нелинейно из-за квадрата скорости, определяемой адвективным членом в уравнении движения. Введем характерные масштабы величин и сравним члены локальной и адвективной инерции g_x / t_x и g_x^2 / L_x . Скорость частиц жидкости по порядку равна высоте волны h , деленной на период колебаний τ , и сама скорость значительно изменчива за промежутки времени порядка периоды волны и на расстоянии порядка длины волны λ , тогда

$$\frac{g_x}{t_x} \approx \frac{h}{\tau^2}, \quad \frac{g_x^2}{L_x} \approx \frac{h^2}{\lambda \tau^2}. \quad (2.25)$$

Уравнение (2.25) переходит в

$$\nabla \left(\frac{d\varphi}{dt} + \frac{P}{\rho} + gz \right) = 0. \quad (2.26)$$

Рассмотрим колебания в плоскости xOz (плоскопараллельное движение). Начало координат расположим на невозмущенной поверхности с осью z , направленной вертикально вверх, осью x – в направлении распространения волны.

Определим начальные и граничные условия для потенциала скоростей.

Условие непротекания на дне, приводящее к условию для вертикальной составляющей скорости при $H = \text{const}$

$$w|_{z=-H} = 0 \quad \text{или} \quad \left. \frac{d\varphi}{dz} \right|_{z=-H} = 0. \quad (2.27)$$

На свободной поверхности $\zeta = \zeta(x, y, t)$ давление P сохраняет постоянное значение и равно атмосферному P_a .

$$P|_{z=\zeta} = P_a = \text{const}. \quad (2.28)$$

Данное условие достаточно, требуется так же знание зависимости давления от предельных величин, зависимость получаем из интеграла Коши

$$P = -\rho \frac{d\varphi}{dt} - \rho g z + f(t), \quad (2.29)$$

где $f(t)$ – произвольная функция времени.

При $z = \zeta$ из (2.28) и (2.29) имеем

$$P|_{z=\zeta} = -\rho \frac{d\varphi}{dt} - \rho g \zeta = P_a. \quad (2.30)$$

Определив давление, вычитаем атмосферное давление из предыдущего выражения и получаем

$$\left. \frac{d\varphi}{dt} \right|_{z=\zeta} + g\zeta = 0. \quad (2.31)$$

Связь между $\zeta(x, t)$ и потенциалом $\varphi(x, z, t)$ устанавливается из кинематического условия

$$w|_{z=\zeta} = \frac{d\zeta}{dt} + u \frac{d\zeta}{dx} \quad (2.32)$$

$$\text{откуда} \quad \frac{d\zeta}{dt} + \frac{d\varphi}{dx} \frac{d\zeta}{dx} - \frac{d\varphi}{dz} = 0.$$

Так как мы рассматриваем малые колебания то

$$\frac{d\zeta}{dt} = \left(\frac{d\varphi}{dz}\right)_{z=\zeta} \quad (2.33)$$

$$\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_{z=\zeta} = \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_{z=0}, \quad \left.\frac{d\varphi}{dz}\right|_{z=\zeta} = \left.\frac{d\varphi}{dz}\right|_{z=0} \quad (2.34)$$

Данные приближения приводят к погрешности того же порядка, что и погрешности от приближения членом адвективной инерции. Следовательно, (2.33) и (2.34) переходит в

$$\left.\frac{d\varphi}{dt}\right|_{z=0} + g\zeta = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = \left.\frac{d\varphi}{dz}\right|_{z=0} \quad (2.36)$$

Исключение из формул (2.35) и (2.36) функции ζ приводит к второму граничному условию для потенциала скоростей

$$\left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} + g\frac{d\varphi}{dz}\right)_{z=0} = 0. \quad (2.37)$$

Для взволнованной поверхности начальные условия трудно определить и они могут быть произвольными. Если рассматривается установившееся волновое движение, то остаются лишь граничные условия.

Таким образом, определения плоскопараллельных волновых движений в бассейне постоянной глубины сводится к решению уравнения Лапласа при граничных условиях

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} = 0 \quad (2.38)$$

Так как исходные уравнения линейные, общее решение будет любой линейной комбинацией частных решений.

Частное решение уравнение Лапласа в виде произведений функций от горизонтальной координаты $X(x)$, от вертикальной координаты $Z(z)$ и от времени $F(t)$:

$$\varphi = X(x)Z(z)F(t). \quad (2.39)$$

Подстановка этого произведения в исходное уравнение дает

$$-\frac{1}{X} \frac{d^2X}{dx^2} = \frac{1}{Z} \frac{d^2Z}{dz^2} \quad (2.40)$$

Левая часть уравнения зависит только от x , правая – только от z , поэтому обе части всегда равны друг другу и некоторой постоянной величине κ^2 , тогда получим

$$\frac{d^2Z}{dz^2} - \kappa^2 Z = 0; \quad (2.41)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \kappa^2 X = 0. \quad (2.42)$$

Интегрируем первое по вертикали:

$$Z = C_1 e^{\kappa z} + C_2 e^{-\kappa z} \quad (2.43)$$

Применив граничное условие (2.39)

$$C_1 e^{-\kappa H} = C_2 e^{\kappa H} = \frac{C}{2} \quad (2.44)$$

Тогда функция $Z(z)$ может быть выражена как $Z(z) = C \operatorname{ch} \kappa \times (z + H)$, а потенциал скоростей $\varphi = C \operatorname{ch} \kappa (z + H) X(x) F(t)$.

Подставив полученное выражение для φ в условие для свободной поверхности и произведя преобразование получим

$$\frac{1}{F} \frac{d^2 F}{dt^2} = -g \kappa h \kappa H. \quad (2.45)$$

Введем обозначение

$$\sigma^2 = g \kappa h \kappa H. \quad (2.46)$$

Тогда получим

$$\frac{d^2 F}{dt^2} + \sigma^2 F = 0. \quad (2.47)$$

Проинтегрируем это уравнение

$$F = C' e^{i(\sigma t + \gamma)} \quad (2.48)$$

где C' и γ – постоянные интегрирования.

При интегрировании уравнения (2.48) вдоль горизонтальной оси получим

$$X = C'_1 e^{-i \kappa x} + C'_2 e^{i \kappa x} \quad (2.49)$$

Подставляя выражения для $F(t)$ и $X(x)$ в (2.49) окончательно имеем

$$\varphi = C \operatorname{ch} \kappa (z + H) e^{i(\sigma t - \kappa x + \gamma)} + D \operatorname{ch} \kappa (z + H) e^{i(\sigma t + \kappa x + \gamma)} \quad (2.50)$$

Перейдем от показательной формы комплексных чисел к тригонометрической. Предположим фазу колебаний в момент $t=0$ равной нулю, тогда (2.50) перейдет

$$\varphi = C \operatorname{ch} \kappa (z + H) \cos(\sigma t - \kappa x) + D \operatorname{ch} \kappa (z + H) \cos(\sigma t + \kappa x) \quad (2.51)$$

где $\kappa = 2\pi / \lambda$, $\sigma = 2\pi / \tau$ (τ – период колебаний, λ – длина волны). Здесь κ – волновое число, σ – частота волны.

Волновое движение представляет собой волну, распространяющуюся в положительном направлении оси x , второй член уравнения определяет волну, распространяющуюся в обратном направлении, с фазовой скоростью $c = \lambda / \tau = \sigma / \kappa$.

Суперпозиция двух прогрессивных волн с одинаковой амплитудой и одинаковым периодом, движущихся навстречу друг другу, определяет стоячую волну

$$\varphi = 2Cch\kappa(z+H)\cos\sigma t\cos\kappa x. \quad (2.52)$$

Далее будет рассматриваться прогрессивная волна, распространяющаяся в положительном направлении оси x

$$\varphi = Cch\kappa(z+H)\cos(\sigma t - \kappa x) \quad (2.53)$$

Трансцендентное уравнение (2.53) связывает длину волны с периодом колебаний и определяет фазовую скорость распространения волн c . После преобразований получаем

$$c = \sqrt{\frac{g}{\kappa} \tanh \kappa H} \quad (2.54)$$

Профиль свободной поверхности определяется из условия (2.54)

$$\zeta = -\frac{1}{g} \frac{d\varphi}{dt} \Big|_{z=0} \quad (2.55)$$

$$\text{т.е. } \zeta = \frac{c\sigma}{g} ch\kappa H \sin(\sigma t - \kappa x).$$

В итоге отметим, что взволнованная поверхность представляет собой прогрессивную синусоидальную волну высотой $h = \frac{2C\sigma}{g} ch\kappa H$, распространяющуюся в положительном направлении оси x .

Подставляя в выражения для профиля волны и потенциала скорости значение h имеем

$$\zeta = \frac{h}{2} \sin(\sigma t - \kappa x) \quad (2.56)$$

$$\varphi = g_0 \frac{ch\kappa(z+H)}{\kappa sh\kappa H} \cos(\sigma t - \kappa x) \quad (2.57)$$

где $g_0 = \pi h / \tau$ - орбитальная скорость частиц жидкости.

Из (2.57) получаем выражения для составляющих скоростей и давления

$$u = \frac{d\varphi}{dx} = g_0 \frac{ch\kappa(z+H)}{sh\kappa H} \sin(\sigma t - \kappa x) \quad (2.58)$$

$$w = \frac{d\varphi}{dz} = g_0 \frac{sh\kappa(z+H)}{sh\kappa H} \cos(\sigma t - \kappa x) \quad (2.59)$$

$$P = -\rho g z + \rho g \frac{h}{2} \frac{ch\kappa(z+H)}{ch\kappa H} \sin(\sigma t - \kappa x). \quad (2.60)$$

Волны мелкого и глубокого моря

В предыдущем случае были рассмотрены гравитационные волны, распространяющиеся в бассейне глубинной сопоставимой с длиной волны, т.е. моря конечной глубины. Теперь рассмотрим предельные случаи – глубокое и мелкое море. Данные понятия определяются безразмерным параметром κH . Для глубокого моря $\kappa H \rightarrow \infty$, так как $\kappa H > \pi$ то практически все моря можно считать глубокими, тогда выражение для потенциала скорости

$$\varphi = \frac{g_0}{\kappa} e^{\kappa z} \cos(\sigma t - \kappa x) \quad (2.61)$$

Фазовая скорость определяется как

$$c = \sqrt{\frac{g}{\kappa}} = \frac{g}{\sigma} \quad (2.62)$$

Из соотношений (2.58)-(2.60) следует

$$u = g_0 e^{\kappa z} \sin(\sigma t - \kappa x) \quad (2.63)$$

$$w = g_0 e^{\kappa z} \cos(\sigma t - \kappa x) \quad (2.64)$$

$$P = -\rho g z + \rho g \frac{h}{2} e^{\kappa z} \sin(\sigma t - \kappa x) \quad (2.65)$$

$$x - x_0 = -\frac{h}{2} e^{\kappa z_0} \cos(\sigma t - \kappa x_0) \quad (2.66)$$

$$z - z_0 = \frac{h}{2} e^{\kappa z_0} \sin(\sigma t - \kappa x_0). \quad (2.67)$$

Волны глубокого моря являются короткими, что следует из их окружности.

В мелком море $\kappa H \rightarrow 0$. Море считается мелким, если $\kappa H < 0.1\pi$. Тогда в мелком море потенциал скорости записывается как

$$\varphi = \frac{g_0}{\kappa^2 H} \cos(\sigma t - \kappa x) \quad (2.68)$$

Фазовая скорость как

$$c = \sqrt{gH} = \frac{\sigma}{\kappa} \quad (2.69)$$

Из выражений (2.63)-(2.67) имеем

$$u = g_0 \frac{1}{\kappa H} \sin(\sigma t - \kappa x) \quad (2.70)$$

$$w = g_0 \cos(\sigma t - \kappa x) \quad (2.71)$$

$$P = -\rho g z + \rho g \frac{h}{2} \sin(\sigma t - \kappa x) = \rho g(-z + \zeta) \quad (2.72)$$

$$x - x_0 = -\frac{h}{2} \frac{1}{\kappa H} \cos(\sigma t - \kappa x_0) \quad (2.73)$$

$$z - z_0 = \frac{h}{2} \sin(\sigma t - \kappa x_0). \quad (2.74)$$

Волны мелкого моря являются длинными волнами. В таких волнах преобладают колебания в продольном направлении.

В отдельно бегущей длинной волне

$$\frac{u}{c} = \pm \frac{\zeta}{H} \text{ или } u = \pm \sqrt{\frac{g}{H}} \zeta \quad (2.75)$$

Обычно, рассматривая отдельную гармоническую прогрессивную волну, ее записывают

$$\begin{aligned} \zeta &= a \sin(\sigma t \mp \kappa x) \\ u &= \pm u_0 \sin(\sigma t \mp \kappa x) \end{aligned} \quad (2.76)$$

Здесь a – амплитуда волнового возмущения, $u_0 = a\sqrt{g/H}$ – амплитуда скорости течения, σ – частота, $\kappa = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Две встречные прогрессивные волны равной амплитуды в сумме дают стоячую волну

$$\begin{aligned} \zeta &= a \sin(\sigma t - \kappa x) + a \sin(\sigma t + \kappa x) = 2a \cos \kappa x \sin \sigma t \\ u &= u_0 \sin(\sigma t - \kappa x) - u_0 \sin(\sigma t + \kappa x) = -2u_0 \sin \kappa x \cos \sigma t \end{aligned} \quad (2.77)$$

Суперпозиция встречных волн не равных по амплитуде дает смешанную или прогрессивно-стоячую волну

$$\begin{aligned} \zeta &= a_1 \sin(\sigma t - \kappa x) + a_2 \sin(\sigma t + \kappa x) = (a_1 - a_2) \sin(\sigma t - \kappa x) + 2a_2 \cos \kappa x \sin \sigma t \\ u &= u_{0,1} \sin(\sigma t - \kappa x) - u_{0,2} \sin(\sigma t + \kappa x) = (u_{0,1} - u_{0,2}) \sin(\sigma t - \kappa x) + 2u_{0,2} \sin \kappa x \cos \sigma t \end{aligned} \quad (2.78)$$

Волны, имеющие характеристики и коротких и длинных волн, например, при переходе с глубокой части моря на шельф, будем называть промежуточными [49].

В ситуации отсутствия или не большого числа портовых акваторий, характерной для Северного Ледовитого океана, возникает проблема сохранения судов в условиях неблагоприятного волнения. Естественные бухты и заливы в этих районах, как правило, мелководны и малопригодны, поэтому для сохранения судов за подветренными берегами может стать важным элементом безопасности эксплуатации морского транспорта.

2.3 Численная аппроксимация уравнений

Для решения уравнения гидродинамического прогнозирования величин гидрометеорологии применяются приближенные методы, к которым относится метод сеток.

Метод сеток предусматривает задание дискретных значений величин в области определения решения уравнений [50]. В пределах этой области выбирается система отсчета и вводятся дискретные значения независимых переменных и безразмерные координаты на основе соотношений:

$$i = \frac{x}{\Delta x}, j = \frac{y}{\Delta y}, k = \frac{\zeta}{\Delta \zeta}, s = \frac{t}{\Delta t} \quad (2.79)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta \zeta$ - шаги по пространству, Δt - шаг по времени. Совокупность точек, положение которых определяется дискретными безразмерными координатами в пространстве и времени, определяет пространственно-временную расчетную сетку, точки именуются узлами сетки. Сетки различаются по числу узлов, размеру шагов, структуре ячеек и способу задания значения величин в узлах сетки.

Для расчета характеристик волнения, таких как возмущение уровня, как результат граничных условий на боковых границах, для двухмерной области запишем систему уравнений

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{d\zeta}{dx} - ru \quad (2.80)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -g \frac{d\zeta}{dy} - r\vartheta \quad (2.81)$$

$$\frac{du}{dx} = -\frac{k}{th(kH)} \frac{d\zeta}{dt} \quad (2.82)$$

здесь u, v – средние составляющие скорости волновых движений, g – ускорение свободного падения, H – глубина моря, ζ – возмущение уровня свободной поверхности, r – коэффициент придонного трения, x, y – горизонтальные координаты, t - время.

Для решения системы уравнений используется конечно-разностный метод интегрирования уравнений гидродинамики. Представим уравнения в конечно-разностной форме для первых производных по пространству и по времени прямо направленными разностями:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n - g \frac{\Delta t}{\Delta x} (\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n) - ru_{ij}^{n+1} \Delta t \quad (2.83)$$

$$\vartheta_{ij}^{n+1} = \vartheta_{ij}^n - g \frac{\Delta t}{\Delta y} (\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n) - r\vartheta_{ij}^{n+1} \Delta t \quad (2.84)$$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - H \frac{th(kH)}{k} \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_{i,j}^n - u_{i-1,j}^n) - H \frac{th(kH)}{k} \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_{i,j}^n - u_{i,j-1}^n) \quad (2.85)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ - шаги по пространству и времени соответственно.

2.4 Разработка модели прогнозирования ветрового волнения на замкнутой прибрежной акватории

При разработке инженерных проектов в акваториях портов, при обеспечении безопасности морского транспортного комплекса требуется учет и прогностические данные по гидрометеорологическим параметрам. Для этих целей используются модели собственной разработки, с открытым исходным кодом или коммерческие программные комплексы, которые были описаны в Главе 2.

В настоящее время известны технологии прогноза ветрового волнения в оперативном режиме для Мирового океана и морей России. Прогнозы основаны на модели WAVEWATCH3, с пространственным разрешением около 9км, основное назначение модели – прогнозирование волнения в глубоководных акваториях. Информационная продукция представляющая прогностические данные распространяется на регулярной основе посредством Интернет-технологий через систему баз данных ЕСИМО в цифровом виде, так же имеется представление в графическом виде.

Для морей Крайнего Севера информативная гидрометеорологическая база довольно мала и часто не имеет регулярного характера. Так в большинстве имеется информация по полям ветра и ветровому волнению, следовательно, для отдельных морей с малым разрешением. Для прибрежных зон, в том числе для не больших портов, бухт и замкнутых акваторий подробные данные и прогнозы отсутствуют. Не смотря на низкую информативность, остается важным прогноз параметров ветрового волнения с высоким пространственно-временным разрешением для отдельных, небольших акваторий Крайнего Севера России.

Качество моделей по расчету ветрового волнения в основном зависит от используемых данных поля ветра. Из-за малого количества натурных данных, работ по оценке волновых моделей в не больших портах и замкнутых акваториях Крайнего Севера на данный момент не опубликовано.

Работы, изученные в ходе написания данной диссертации, описывают модели прогнозирования, но не являются составляющей частью ГИС и не редко сочетаются с ГИС.

В технологии современного математического моделирования в задачах гидродинамики выделяются следующие этапы [51]:

1. подготовка входной метеорологической информации (данные о ветре) и батиметрической информации и ее преобразование в форматы, ассимиляция данных в модель
2. расчеты по модели на заданный интервал времени с начальными и граничными условиями
3. определение основных характеристик волн по полученным расчетам
4. визуализация расчетных полей
5. верификация модели

Модель. В работе используется разработанная автором нестационарная двумерная гидростатическая модель распространения волнения на замкнутой акватории в среде разработки Delphi. При разработке модели считаем море конечной глубины, т.е. глубина моря сопоставляется с длиной волны, параметр $kH \approx 1$. Численная модель, рассчитывающая распространение ветрового волнение на акватории порта. В модели содержатся уравнения движения и неразрывности, в которых учитывается возможная негидростатичность динамики ветровых волн

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{dz}{dx} \quad (2.86)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -g \frac{dz}{dy} \quad (2.87)$$

$$\frac{du}{dx} + \frac{d\vartheta}{dy} = -\frac{k}{th(kh)} \frac{dz}{dt} \quad (2.88)$$

где u, w - горизонтальная и вертикальная составляющая скорости;

t – время;

x, z – горизонтальные и вертикальные координаты;

ρ - стандартная плотность воды;

g – ускорение силы тяжести;

k – волновое число.

Уравнения рассчитываются численно с помощью метода конечных разностей на смещенной прямоугольной сеточной области. Размер сетки 400х400 узлов. При аппроксимации производных по оси x прямо направленными разностями получается система уравнений

$$u_{i,j} = u_{i,j} - g * \frac{dt}{dx} (z_{i,j} - z_{i-1,j-1}) \quad (2.89)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j} - g * \frac{dt}{dy} (z_{i,j} - z_{i-1,j-1}) \quad (2.90)$$

$$z_{i,j} = z_{i,j} - \frac{th(k * h)}{k} \frac{dt}{dl} ((u_{i+1,j+1} - u_{i,j}) + (v_{i+1,j+1} - v_{i,j})) + q_0 * \sin\left(\frac{2\pi}{T * t}\right) \quad (2.91)$$

где $dl = d(x, y)$, T - период, q_0 - фиктивный источник.

В качестве исходных данных используются массив глубины морского дна в ячейках сеточной области, характеристики поступающего в расчетную область ветрового волнения (характеристики волнения задаются путем соответствующего выбора интенсивности и фазы расположены у жидкой границы фиктивных источников, с помощью которых формируется требуемые характеристики поступающего волнения)[52], расположение волнозащитных сооружений учитываются путем задания в соответствующих узлах сетки нулевых значений в массиве глубин.

Граничные условия для твердых боковых границ устанавливаются в виде условия непротекания:

$$(U \cdot n) = 0 \quad (2.92)$$

где U – вектор скорости;

n – нормаль к боковой границе.

На жидкой боковой границе задается условие пропускания, заданное с помощью импедансного соотношения:

$$u = \frac{g}{c} z \quad (2.93)$$

где c - фазовая скорость.

На поверхности $z=0$ задавалось отсутствие касательного напряжения трения ветра, на дне задается условие прилипания для горизонтальных составляющих скорости.

Выходными данными являются: характеристики установившегося поля ветрового волнения на акватории порта, рассчитанные при заданном расположении волнозащитных сооружений. Программа позволит, в том числе, оценить эффективность защиты порта от ветрового волнения.

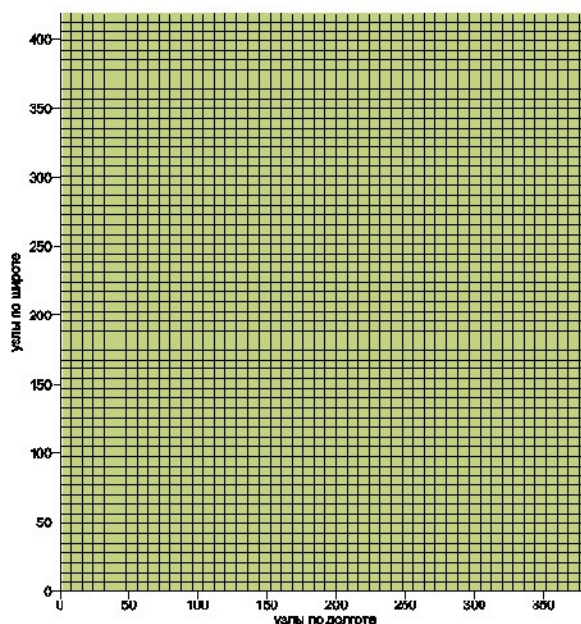


Рисунок 11. Расчетная сетка

Рельеф. Как указывалось выше для работы модели расчета и прогнозирования состояния ветрового волнения требуется задание массива данных о рельефе дна акватории порта. Поиск данных по батиметрии мелководных прибрежных районов имеет малые результаты поиска. В мировой базе данных о рельефе дна GEBCO производятся и предоставляются ряды наборов данных и продуктов по батиметрии с привязкой к сеткам (рис.12). Анализ данного сервиса показал, что данные по батиметрии возможно получить только для относительно крупных акваторий. На прибрежных акваториях результаты отсутствуют или имеют малое пространственное разрешение, что делает невозможным использование данных.

Существующие батиметрические данные и карты, разрабатываемые картографическими производствами, но стоит отметить неудобство и часто невозможность использования подобных данных для моделирования или подобные данные имеют закрытый режим.

В данной работе использовался массив глубин, данные были предоставлены непосредственно службами порта бухта Пяти Охотников в ходе проведенной гидроакустической съемки. Данные представлены для прямоугольной сетки размерами 420x400 узлов с пространственным разрешением по вертикали 2 м и 1 м по горизонтали. Построена батиметрическая карта с указанием берегозащитного сооружения по типу мол и направление распространения волнового фронта (рис.13).

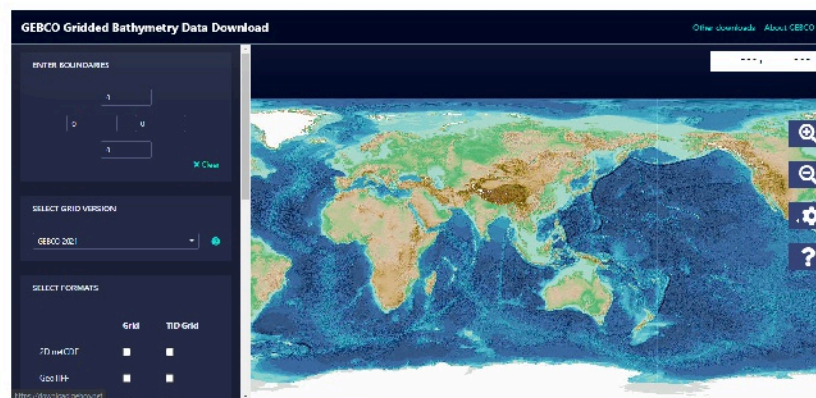


Рисунок 12. Интерфейс мировой базы данных GEBCO

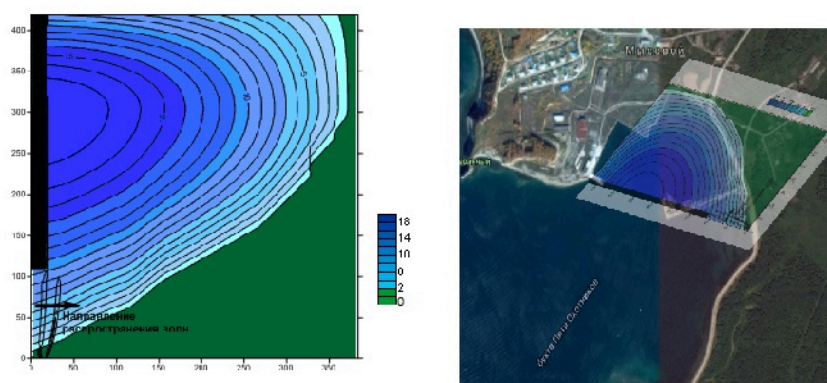


Рисунок 13. Карта глубин бухты Пяти Охотников (м) с указанием расположения берегозащитного сооружения (мола) на акватории порта на карте и указанием направления распространения поступающих волн

Данные полей ветра. В качестве источника ветрового волнения на акватории порта в модели используется фиктивный источник генерации прогрессивных волн на жидкой границе на входе в порт. Данные по характеристике ветра можно получить из различных источников. Достаточно обширная база данных реанализа NCEP/NCAR и NCEP/CFRSR – продукты Национального центра прогноза окружающей среды США. Пространственное разрешение полей ветра достаточно велико для применения в геомоделировании на замкнутых акваториях.

Точность результатов волновых моделей имеют сильную зависимость от данных полей ветра. Это накладывает определенные требования на метеорологические прогнозы. Так для закрытых прибрежных акваторий или замкнутых бассейнов, где поля ветра сильно зависят от локальных условий, не описываемых глобальными моделями, становятся более жесткими.

Уже доказано, что при ошибке прогноза элементов полей ветра 10-20% ошибки в прогнозе высота ветровых волн могут достигать 40%. Ошибки возрастают для закрытых или замкнутых акваторий.

Важное требование оценки модели волнения – наличие надежных измерений параметров волнения и ветра. На сегодня существует обширная сеть наблюдений за этими параметрами, включая спутниковую альтиметрию, океанические буи, суда добровольных наблюдений и др. В настоящее время стали разрабатываться модели на оперативной основе, используя спутниковые данные. В то же время быстрое развитие системы ИНМАРСАТ для связи судно-берег и систем сбора данных, основанных на использовании геостационарных спутников, или системы АРГОС уже обеспечили существенный прогресс в методах сбора морских данных и распространения морской информации.

Несмотря на достигнутые успехи в области методологии и технологии прогнозирования ветрового волнения проблемы все-таки сохраняются. Недостаточная освещенность Мирового океана данными наблюдений одна из важнейших и пока слабо решенных проблем, особенно в Южном полушарии. Возрастает потребность к качеству, полноте и форматам представления информации о волнении, ориентированной на специализированное обслуживание.

В связи с важностью параметра ветровой обстановки и значительное влияния на возникающее волнение, требуется учет ветровых условий и изучение их пространственно-временной изменчивости, поиск зависимостей между характеристиками ветра и возникающим в результате его действия ветрового волнения. Как описывалось в Главе 2 имеется значительная проблема в получении данных по ветру с необходимой дискретностью и пространственным разрешением.

Исследования доказывают, что расчеты ветрового волнения по полям ветра региональных данных превышают точность расчетов по сравнению с полями глобального реанализа NCEP/NOAA [53]. По этой причине при выборе базы данных характеристик ветрового волнения был сделан выбор в пользу региональных баз Гидрометцентра России (рис. 14).

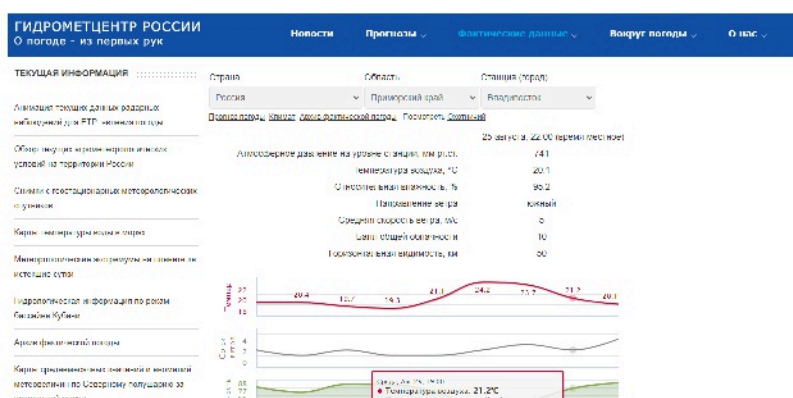


Рисунок 14. Интерфейс сайта Гидрометцентра России

2.5 Результаты численного моделирования ветрового волнения на замкнутой прибрежной акватории в режиме реального времени с реализацией в системе пространственно-временной изменчивости

Исследование возможности использования разработанной модели для расчета и прогнозирования состояния взволнованной поверхности в зависимости от ветровых показателей было апробировано на акватории бухты Пяти Охотников, огражденной одиночным молотом.

Использовалась прямоугольная область размером 400х800метров. Область покрывалась расчетной сеткой 400х400 узлов с шагом по горизонтали 1м, по вертикали 2м. (рис.15). На жидкой границе при входе в порт задавалось распространение прогрессивных волн, обусловленных южным ветром со скоростью 10м/с на 24 часа.

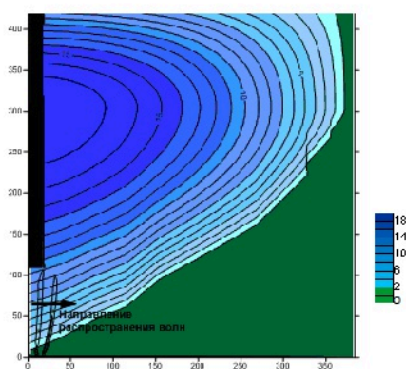


Рисунок 15. Расчетная область с батиметрией акватории (изолинии – изобаты)

По расчетам под влиянием конфигурации рельефа дна и заданных характеристик ветра представлены карты пространственно-временного распределения высоты волн, скорости распространения волнения и максимальной амплитуды (рис.16-18). Поступающая на входе в порт прогрессивная волна распространяется в пределах некоторого сектора с шириной диаграммы направленности, определяемой соотношением

$$\theta = \frac{\lambda}{L} = \frac{\sqrt{gHT}}{L}$$

где θ - ширина диаграммы направленности, L – ширина прохода, H – глубина акватории, T – период волны, g – ускорение силы тяжести.

При входе в порт в следствии близости берега и батиметрических особенностей дна практически сразу начинается рефракция водящего волнового фронта. В результате этого уже через 6 минут волновой фронт, подойдя к берегу по нормали, отразился в результате

чего образовался новый волновой луч в направлении по нормали от берега в пределах той же ширины диаграммы направленности. При достижении отраженной волной границ береговых и мола наблюдается вторичное отражение. После повторного отражения от мола волны распространяются в противоположном направлении. В результате расчетов хорошо выделяется зоны света и тени на акватории порта. Зоне дифракции соответствует акватория за молом, где наблюдается дифракция. Интерференция волн приводит к образованию групповых волн на акватории порта. Из-за расхождения волнового фронта только незначительная часть поступающего волнения имеет возможность выхода через жидкую границу с акватории порта. При ширине акватории порта кратной длине распространяющейся волны, возможно, было бы возникновение резонанса. В исследуемом случае этого не наблюдается.

Отмечается слабое уменьшение амплитуды волн, связанное с увеличением волнового фронта и придонным трением. В следствие высокой зависимости от придонного трения, у берега амплитуда изменчива, в открытой части акватории придонное трение по сравнению с инерцией незначительно, поэтому здесь амплитуда уменьшается слабо.

Вызванные возмущениями уровня, ветровые течения, средняя скорость которых составила 1,5м/с, в районе жидкой границы при входе на акваторию волновой фронт искривляется согласно закону Снеллиуса, что приводит к снижению скорости у берега, увеличению высоты волн и образованию стоячих волн. При этом на выходе из порта (жидкой границе) сформировалось течение с направлением из расчетной области. В более глубоководной части порта, где длина волны не сопоставима с глубиной, направлении волнения происходит с отклонением от направления ветра примерно на 45°. С течением времени дивергенция волн приводит к образованию компенсационных течений. Распределение, обусловленное процессами приспособления течений, тесно связано с распределением возмущения уровня свободной поверхности. Его характеристикой служит области максимума возмущения уровня.

Отмечается ослабление скоростей с удалением от источника. Максимальная наблюдаемая скорость составила чуть более 3.5м/с и отмечается на начальных этапах расчета на жидкой границе. В зоне конвергенции потоков отмечается увеличение высоты ветровых волн.

По окончании периода экстраполяции (24 часа) волнение имеет установившийся характер, волновая картина имеет сложный характер. Максимальная высота ветровых волн при южном штормовом ветре составила около 1 метра и максимальной скорости порядка 3,5м/с, что соответствует исследованиям в ближайших районах [54], отметим, что

по отчетам ГУ «Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» и Амурского бассейнового волнового управления Федерального агентства водных ресурсов в бухте Пяти Охотников при штормовом юго-западного направления высота волн может достигать 1-1,5м. [54]. Из изложенного можно сделать вывод, что модель достаточно описывает эволюцию ветровых волн при заданном характере волнения, но при штормовых условиях завышает экстремальные показатели.

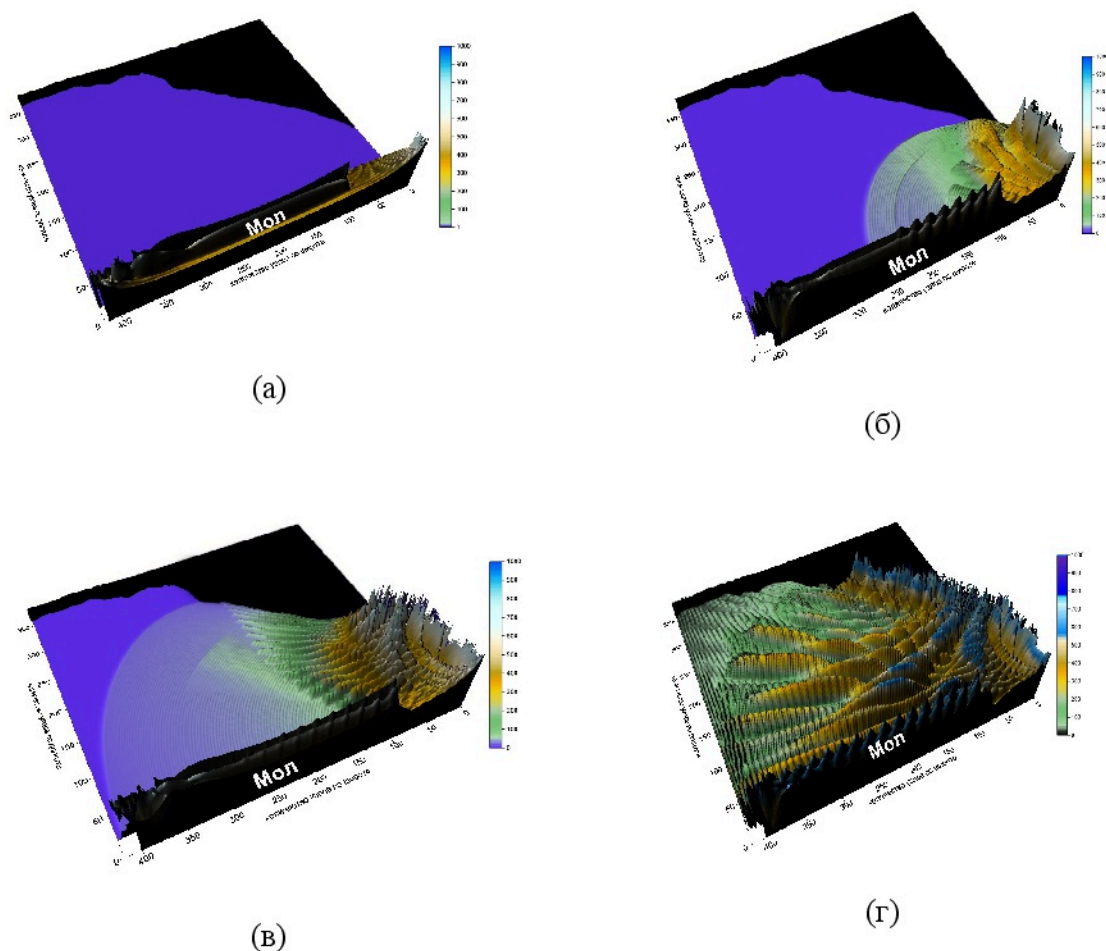
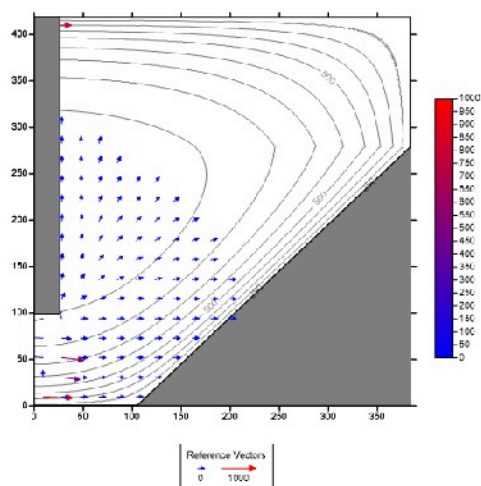
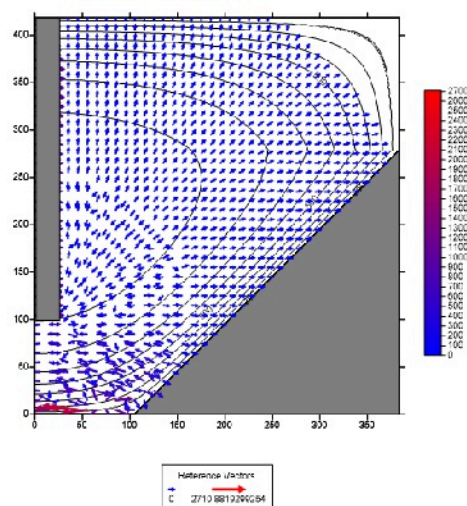


Рисунок 16. Распределение возмущения уровня (мм) спустя 1 минуту (а), 6 минут(б), 12 минут(в), 30 минут(г)

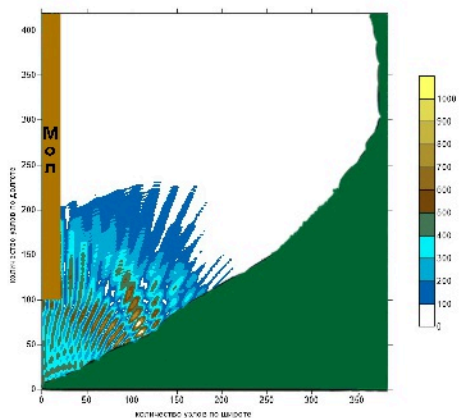


(a)

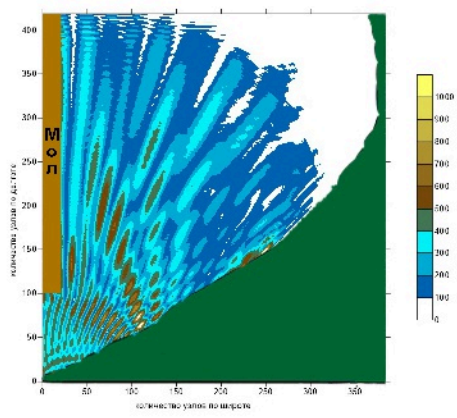


(б)

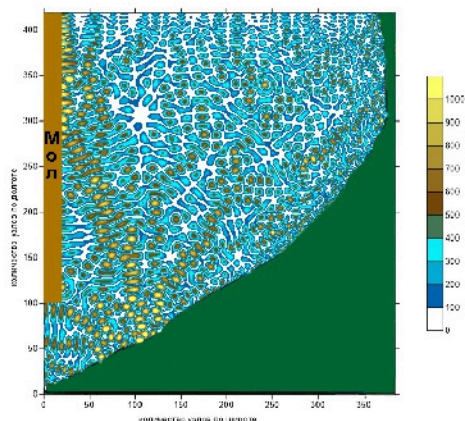
Рисунок 17. Скорости течений у поверхности ($см \cdot с^{-1}$) спустя 1 минуту (а), 6 минут(б), 12 минут(в), 30 минут(г)



(a)



(б)



(в)

Рисунок 18. Максимальная амплитуда ветровых волн (мм) на временном шаге 6 минут(а), 12 минут(б), 30 минут(в)

Верификация модели была проведена для различных погодных условий от штилевой погоды до шторма за период оперативных испытаний с марта по ноябрь 2021г., результаты верификации представлены в Приложении А.

Выводы по главе.

В главе проведен анализ современных методов расчета и прогнозирования ветрового волнения. Выделены преимущества и недостатки описанных моделей. Отмечен недостаток моделей для малых замкнутых акваторий, для которых построение вложенных сеток является не простой задачей и требует определенных умений и навыков от пользователя. Отмечено, что глобальные хорошо ассимилированные волновые модели связаны с данными по полям ветра так же глобального характера, что затрудняет получение данных для расчетных областей низкого пространственного разрешения. В результате была разработана двухмерная гидродинамическая модель с применением данных скорости и направления ветра с региональных гидрометеорологических сайтов для не больших замкнутых прибрежных акваторий. Возможна адаптация численной модели под другие акватории приближенные по размерам с изменением параметров, что делает модель универсальной относительно малых акваторий замкнутого типа.

В главе выделен раздел посвященный описанию математической стороны гидродинамической модели, описанию начальных и граничных условий, метод решения системы основных уравнений модели.

В качестве апробации гидродинамической модели разработана программа на ЭВМ в среде разработки на языке программирования Delphi для порта бухта Пяти Охотников Японского моря при ветре южного направления со скоростью 10м/с на период расчета 24 часа. Опыт использования модели показал, что она позволяет воспроизводить и прогнозировать основные особенности пространственного распространения и трансформации ветровых волн. При моделируемом ветровом шторме южного направления формируется инфрагравитационные волны, распространяющиеся в сторону берега и формирующие нагон, так и движущиеся вдоль берега волны в открытой акватории порта. Под влиянием морфометрии дна формируется неоднородное распределение возмущений морской поверхности, в связи с этим скорость ветровых волн также отличается неоднородностью. В центре акватории скорость отклоняется вправо относительно направления ветра, что обусловлено ускорением Кориолиса. У берега на направление волнения оказывает влияние направление берегового контура.

Результаты, полученные по модели, не противоречат физическим законам, при анализе исследовательских работ в ближайших районах исследования и натурных

наблюдениях значительных отличий модельных результатов не отмечается, что говорит о возможности использования данной модели, а полученный по модели характер динамических процессов может быть использован при дальнейшем освоении порта и оперативном гидрометеорологическом обеспечении.

Проблема подобного рода задач является возможность верификации региональных моделей, по причине отсутствия натурных наблюдений в отдаленных и малых акваториях. Долгосрочный прогноз по модели не предполагается в связи с высокой вероятностью ошибки в связи с высокой зависимостью надежного прогноза полей ветра, таким образом, модель хорошо показывает себя для оперативных прогнозов, а увеличение заблаговременности прогноза требует надежных прогностических полей ветра.

Глава 3. Методика обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях поддержки на основе стохастической модели

3.1 Методы оценки расчета георисков и анализа геоданных

Всемирный экономический форум (ВЭФ) опубликовавший списки глобальных рисков отвел первое место в пятерке главных рисков, ранжированных по вероятности, экстремальным погодным явлениям. По масштабу оказываемого действия, экстремальные погодные явления уступают только оружию массового поражения. По исследованиям ВЭФ наблюдается значимая тенденция возрастания значимости гидрометеорологического фактора в устойчивом развитии общества.

В условиях глобального изменения климата этот вопрос стоит более остро. По данным Росгидромета, на территории России потепление климата происходит значительно быстрее и масштабнее, чем в среднем в мире. Так, например, скорость роста температуры составляет около $0,17^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, в то время как температура на территории России растет значительно быстрее и рост составляет $0,45^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, особенно заметен этот процесс в Арктике, где скорость роста достигает $0,8^{\circ}\text{C}$ за 10 лет [55].

Одновременно с этим статистика показывает о растущем в мире ущербе от опасных погодных и климатических условий. Отмечается, что 90% самых тяжелых экономических потерь приходится именно на опасные гидрометеорологические явления: паводки, наводнения, сильный ветер и т.п. При этом на цунами, извержения вулканов и землетрясения отводится лишь 10%. Согласно современным научно обоснованным прогнозам наблюдаемая тенденция в изменении климата сохранится и с высокой степенью вероятности усугубится.

В подглаве обобщены основные работы в сфере оценки погодно-климатических рисков для территории России. Определение путей управления этими рисками в будущем должно стать ключевым элементом управления планирования адаптации к изменениям климата на федеральном и региональном уровнях.

Негативные экономические последствия могут возникать даже при отсутствии экстремальных погодных явлений. Иногда необычные, несезонные или неожиданные погодные явления приводят к снижению доходов или появлению убытков. В сложившейся обстановке оценка и управление погодно-климатическими рисками становится актуальным. Для примера в 2012 г. был разработан документ «Совершенствование управления климатическими рисками на местном уровне – технологии, примеры, положительный опыт и рекомендации для членов ВМО» [56], содержащий анализ методик управления рисками, обусловленными изменениями и изменчивостью климата на примере сельских сообществ. В конце 2017 г. экспертная группа выпустила Руководства по управлению климатическими рисками для национальных гидрометслужб. Цель которого – облегчение труда специалистов-климатологов на местах взаимодействия с потребителями климатической информации для идентификации, оценки и управления климатическими рисками в секторах экономики и социальной сферы.

Ниже представлена концепция климатического риска представленная МГЭИК (рис.19)

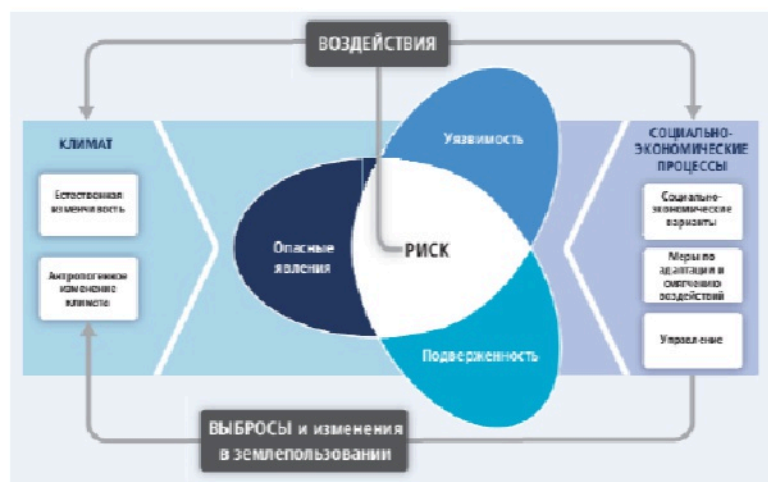


Рисунок 19. Концепция климатического риска

Таким образом, климатический риск имеет место быть, если на данной территории отмечаются опасные или неблагоприятные метеорологические явления и если существует некий объект (реципиент риска), находящийся под их вероятностным воздействием и уязвимый для них. В качестве реципиента может выступать население, территории, отрасли экономики, экосистемы, технические объекты и процессы.

В круге поставленных задач данной диссертационной работы рассмотрим основные виды морской деятельности и возможные риски для них. К основным видам морской деятельности относятся судоходство, портовые операции, разведка и добыча, а так же транспортировка разного рода ресурсов, рыболовство, являющиеся реципиентами воздействий гидрометеорологических явлений на акваториях морей и побережий Российской Федерации. Рассмотрим более подробно ниже каждый вид морской деятельности.

Судоходство. Наибольшие климатические риски для судоходства за пределами арктических территорий России связаны со штормовым волнением, ограничениями видимости, колебаниями уровня моря в отмелой зоне и ледовыми условиями. *Штормовое волнение* снижает скорость судна, причем степень этого снижения зависит от водоизмещения судна. Отметим, что по данным исследований [56], на Черном море повторяемость высоты волн свыше 2,5м не превышает в среднем 3-5% за год, на Белом и Японском морях повторяемость составляет 5-8%. С учетом повторяемости высот волн и, вызванной ими степени снижения скорости судна, риски для судоходства, связанные с потерей ходового времени за счет волнения в не арктических морях России в настоящее время, оцениваются в пределах 0,3-0,5%.

Ограничения видимости как правило связаны с туманами. В таком случае в прибрежной зоне и районах интенсивного судоходства суда вынуждены останавливаться или замедлять ход, что приводит к потере судового времени. Средняя повторяемость туманов неарктических морей России колеблется в пределах 2-8% для южных морей России, до 22% для северных морей России.

Колебания уровня моря в прибрежной акватории вызываются стонно-нагонными явлениями, обусловленными сильными продолжительными ветрами. Наиболее опасны для судоходства такие явления в отмелой зоне, что может затруднять или приводить к невозможности прохода судов морских каналов.

Портовые операции. Ограничения накладываемые при погрузочно-разгрузочных работ на скорость ветра, воздействующий на портовые краны и переносимые ими грузы. Средняя повторяемость сильных ветров (более 15м/с) колеблется в пределах 0,5-16% от Севастополя до Японского моря соответственно [57.]. При сильном ветре погрузочно-разгрузочные работы прекращаются или замедляются, что ведет к увеличению обработки судна в порту.

Другой фактор воздействия на портовые операции можно отметить *ограничения видимости до 50м и менее*, происходящем при сильных туманах и ливневом снеге. На

данный фактор приходится малый процент наблюдений о общего числа неблагоприятных явлений.

В последнее время с увеличением размеров судов, особенно танкеров, важным становится фактор – *сильные течения в узостях при входе в порт*. Влияние заключается в том, что длинные суда подвержены воздействию поперечных составляющих течений, и как следствие, происходит снос судна с линии пути. На сегодняшний день количественная оценка повторяемости неблагоприятных направлений течений затруднены из-за отсутствия режимных данных о течениях в конкретных портовых акваториях.

Итак, во многих случаях, для изменения характеристик ветрового волнения и сонно-нагонных явлений достаточно, чтобы изменились преобладающие направления сильных ветров, возможно даже без изменения скорости. Однако, в отличии от увеличения скорости ветра, изменение его преобладающего направления может стать неблагоприятным, но а так же и благоприятным фактором для судоходства и портовых операций, в зависимости от угла между направлением ветра и береговой линией, конфигурации волнозащитных гидротехнических сооружений в портах относительно преобладающего направления распространения сильного волнения.

Ожидаемый и происходящий подъем уровня моря благоприятен для судоходства тем, что обеспечивает увеличение навигационных глубин без дноуглубительных работ. Но в то же время создает дополнительные трудности в виде реконструкций причальных стенок и волнозащитных сооружений акватории порта.

Рыболовство. Погодно-климатические факторы имеют двойственное воздействие на рыболовство – путем воздействия на объем рыбных ресурсов и на процесс лова.

Воздействие на рыбные ресурсы связано с влиянием температуры, солености, pH и содержания кислорода на процессы размножения, сроки нагула рыб, их миграцию. Для каждого вида рыб существуют свои пределы толерантности параметров морской среды и выход за эти пределы грозит гибелью вида. Даже при невыходе гидрометеорологических параметров за пределы толерантности, изменения могут влиять на урожайность [58]. В настоящее время моделирование изменения гидролого-гидрохимических характеристик под влиянием метеорологического режима находится в стадии зарождения. Поэтому сейчас ведутся разговоры лишь о тенденциях изменения гидрологического режима.

В расчетах по специализированным моделям «климат-состояние морской среды – рыбное поголовье» [60] показали, что изменение климата приведет к миграции рыб в районы более благоприятных условий и частично к уменьшению численности при резком изменении окружающей среды, что приведет к смещению традиционных районов лова и как следствие перераспределение квот вылова между государствами.

На процесс лова так же оказывает влияние ветер и связанное с ним ветровое волнение. При скорости ветра выше 15м/с и высоте волны свыше 4м средние рыболовецкие траулеры прекращают работы или остаются в порту, большие суда ограничивают работу. При скорости ветра свыше 17м/с и высоте волны свыше 6м все суда прекращают работу.

Ущерб. Опасное явление способно нанести ущерб морской деятельности только в случае, когда на акватории или прибрежной акватории находятся какие-либо экономические или социальные объекты. Любые виды ущерба тесно связаны друг с другом, при этом социальный, экологический и моральный ущерб так же могут иметь денежное выражение.

Ущерб в свою очередь подразделяют на прямой и косвенный.

Для оценки вероятностного ущерба используют различные расчетные методы, которые далеко не всегда обеспечены необходимыми оценками стоимости различных фондов. Например, на основе методики МЧС России и Госгортехнадзора РФ по оценке ущерба от затопления при наводнениях на реках [61] была разработана методика оценки ущерба, вызванного затоплением в результате подъема уровня моря и штормовых нагонов. Оценка ожидаемого ущерба при наступлении неблагоприятного явления используется при расчете экономического риска морской деятельности, представляющего произведение вероятности наступления неблагоприятного явления на величину ожидаемого ущерба. При оценке экономического риска следует принимать даже маловероятные события с вероятностью 1% и менее, имеющие значительные последствия.

Методические подходы к оценке природно-климатических рисков.

На сегодня существуют различные определения понятия «управления климатическими рисками». Комиссия по климатологии ВМО определила его как системный и скоординированный процесс, в котором климатическая информация используется для снижения рисков, связанных с изменчивостью и изменением климата, и реализации возможностей для повышения устойчивости социальных, экономических и экологических систем [62,63]. В науке в настоящее время данная сторона не очень хорошо исследована и не имеется четкого определения. Иногда подобные риски определяют как природно-естественные, связанные со стихийными природными силами, погодно-климатические, гидрометеорологические, климатические.

Анализируя литературные источники, отмечается не подверженность систематизации и классификации природно-климатических рисков.

В последнее время в научной литературе стали появляться работы по природно-климатической устойчивости, как цели управления рисками. Как говорилось выше,

отражение изменения глобального климата в видении некоторых ученых [64,65] возможно снизить в следствии выбросов парниковых газов. Часто стабилизацией климата видят ограничения концентрации углекислого газа в атмосфере в равнении с определенным показателем. В итоге цель управления рисками в их понимании в том, чтобы социальные системы не выходили за допустимые рамки, предписываемые критическим событиям.

В.Штеффен, К.Ричардсон и Д.Ливерман считают, что снижении инерции современных направлений развития социально-экономических систем, формирование общественной потребности в управлении изменением климата, сокращение выброса парниковых газов и др. – это цели политики управления климатическими рисками [66].

По результатам исследований некоторых ученых [67] изменение климата связалось с принятием решений в ситуации неопределенности при сокращении выбросов парниковых газов. Однако так было ранее, со временем представления усложнились, приведя принятие решений по управлению климатом к выбору между действием Ии бездействием – ожиданием появления новой информации о проблеме в аспекте деятельного подхода.

В качестве объекта рассматривается в основном риски изменения климата как угроза экономике, туризму, инфраструктуре и т.п.. В результате анализа отметим, что единого мнения цели управления природно-климатическими рисками еще до сих пор не разработаны. Однако отмечается эволюция от цели устранения первопричины рисков до управления последствиями рисков – природно-климатическими угрозами.

Природно-климатические риски сильно связаны с категориями экономической безопасности и устойчивости к рискам. Согласившись с авторами доклада ВЭФ, будем рассматривать не глобальный, а региональный уровень рисков, основной субъект управление природно-климатическими рисками в нашем случае выступает порт и его акватория (региональный субъект), цель управления – повышение устойчивости к негативному воздействию природно-климатическими рискам, таким образом, введем понятие природно-климатической устойчивости и опишем основные ее принципы:

- не существует абсолютной природно-климатической устойчивости, это связано с невозможностью исключения катаклизмов и неблагоприятных явлений и ситуаций, таким образом, цель управления устойчивостью сводится к сокращению частоты их появления.

- устойчивость является обширным диапазоном природно-климатических состояний, а не точкой оптимума

- устойчивость биосферы отлична от устойчивости отдельных экосистем или их суммы

- естественная, относительная природно-климатическая устойчивость может быть достигнута только при согласованной политике всех стран мира

- последствия нарушения естественной устойчивости проявляется и нивелируется на национальном и региональном уровне.

Подведем итог, природно-климатическая устойчивость является составляющей социально-эколого-экономической устойчивости различной хозяйственной деятельности, обеспечение устойчивости достигается путем максимального невмешательства человека в естественную среду, но с другой стороны – созданием адаптивной и эффективной системы управления природно-климатическими рисками, ну и в заключении поддержание устойчивости – задача, которую требуется решать непрерывно и в условиях неопределенности. Следовательно, необходима концепция управления природно-климатическими рисками, обеспечивающая совокупную устойчивость всех звеньев системы.

Обобщенная модель оценки природно-климатических рисков [68] имеет вид:

$$R = \sum_{i=1}^N (r_i P)_i \quad (3.1)$$

здесь R - величина (цена) природно-климатического риска; r_i - вероятность наступления i -го неблагоприятного климатического события; P_i - ущерб, потери от наступления i -го неблагоприятного климатического события.

Вероятность наступления неблагоприятного события оценивается экспертными, статистическими или аналоговыми методами. Непосредственно величина ущерба или потерь определяется из характеристик величины и масштабов распространения неблагоприятных последствий природно-климатического риска. На рис.20 показана система показателей оценки рисков.

В работе [69] приведены различные вариации натуральных, условно-натуральных и стоимостных оценок, которые широко применяют балльные оценки, однако для прогнозирования наступления риска основное применение нашли статистические и экспертные методы, в которых отмечается сложность реализации и неоднозначность использования некоторыми учеными [70,71], в свою очередь экспертные методы также имеют критические отзывы.



Рисунок 20. Система показателей природно-климатических рисков

Определение рисков и, следовательно, устойчивости системы, часто лежит в основе теории надежности. Специфика надежности заключается в том, что точное значение показателей не может быть однозначно указано без задания начальных условий. Все показатели зависят от множества факторов, учет которых просто невозможен.

Под влиянием гидрометеорологических условий и неоднородности самих элементов ветрового волнения, их начального состояния и других факторов интенсивность и характер изменчивости морской поверхности на акватории порта будет различной. Для рационального использования портовой акватории необходимо знание моменты превышения допустимого уровня и скорости ветрового волнения в течении заданного временного интервала.

Анализ геоданных

Любой работе с данными предшествует анализ временных рядов. Протекая во времени и пространстве природные процессы представляют из себя отдельные случайные величин, а с их множеством, зависящим от одного или нескольких параметров. Обобщенным понятием случайной величины является понятие случайной функции. В следствии непостоянства внешних условий формирующих случайную величину она значительно изменчива. Изменяясь во времени и пространстве, совокупность случайных величин и образует случайную функцию.

Таким образом, под случайной функцией мы понимаем неслучайную функцию, значение которой при каждом значении аргумента представляют случайную величину [72].

В практике любая функция может считаться случайной, так как всегда есть воздействующие факторы, не поддающиеся учету. Случайные функции, которые изменяются во времени (в виде временных рядов), называют случайными процессами, а при изменении в пространстве – случайными полями (в виде карт). Как правило, реализация случайной функции записывается как $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, индекс указывает номер реализации. Наиболее часто на практике встречается одномерные или двумерные случайные функции, зависящие от одного или двух параметров соответственно.

Случайная функция (величина) считается заданной, если известна ее функция распределения. Совокупность сечений случайной величины $X(t)$ рассматривается как система случайных величин, тогда функция распределения

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(X_1 < x_1, X_2 < x_2, \dots, X_n < x_n), \quad (3.2)$$

где $X_1, X_2, \dots, X_n$ - n сечений случайной величины.

Для непрерывных случайных процессов можно использовать многомерный дифференциальный закон распределения. Если $F_1(x, t)$ имеет частную производную

$$\frac{dF_1(x, t)}{dx} = f_1(x, t), \quad (3.3)$$

то ее называют одномерной плотностью распределения (одномерный дифференциальный закон распределения случайной функции). По аналогии описываются многомерные дифференциальные законы распределения случайной величины., которые из-за громоздкости и сложности реализации на практике не используются, в большинстве используются максимум двумерные законы распределения.

Итак, числовые характеристики случайных величин представляют собой определенные числа, в то время как числовые характеристики случайных функций – некоторые функции. Математическое ожидание случайной функции $X(t)$ – неслучайная функция $m_x(t)$, равная при каждом значении аргумента t математическому ожиданию от соответствующего сечения случайной функции [72]

$$m_x(t) = M[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) f(x, t) dx, \quad (3.4)$$

здесь $f(x, t)$ - одномерная плотность вероятности.

Дисперсия случайной функции – неслучайная функция $D_x(t)$, для каждого значения аргумента t равная дисперсии соответствующего сечения случайной функции

$$D_x(t) = M[X(t)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - m_x(t)]^2 f(x, t) dx. \quad (3.5)$$

Дисперсия характеризует степень рассеяния возможных реализаций относительно математического ожидания.

Другой характеристикой выражающей степень рассеяния является среднее квадратическое отклонение, связанное с дисперсией, и коэффициент вариации, определяемые как

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}, \quad C_x(t) = \frac{\sigma_x(t)}{m_x(t)} \quad (3.6)$$

Итак, описанные выше математическое ожидание и дисперсия являются характеристиками каждой случайной величины и отражают внешние их свойства и не содержат никакой информации о тесноте связи между отдельными сечениями случайной функции, следовательно, мы не имеем представления о внутренней структуре.

Описание внутренней структуры проводится с помощью автокорреляционной функции, представляющей неслучайную функцию $R_x[(t_1, t_2)]$ двух независимых зафиксированных аргументов t_1 и t_2 , равную корреляционному моменту сечения этих аргументов

$$R_x(t_1, t_2) = M\{[X(t_1) - m_x(t_1)][X(t_2) - m_x(t_2)]\} \quad (3.7)$$

При нормальном распределении случайных величин (процессов) математическое ожидание и автокорреляционная функция – исчерпывающие характеристики. Отметим, что при разных размерностях функции обычно нормируют.

В природе, как правило, наблюдаются несколько случайных процессов совместно, требующих установления связи между этими процессами. Имеем два случайных процесса $X(t)$ и $Y(t)$ характеристиками, которых являются $m_x(t), m_y(t), R_x(t_1, t_2), R_y(t_1, t_2)$, а также корреляционная функция связи, показывающая степень линейной зависимости между сечениями $X(t_1)$ и $Y(t_2)$

$$R_{xy}(t_1, t_2) = M\{[X(t_1) - m_x(t_1)][Y(t_2) - m_y(t_2)]\}, \quad (3.8)$$

Одним из важнейших понятий случайного процесса является стационарность, описывающая устойчивость вероятностных характеристик случайные процессы делятся на стационарные и нестационарные.

Протекающие во времени однородно случайные процессы - стационарные и наоборот. Вероятностные характеристики стационарных процессов мало изменчивы при изменчивости аргумента и не зависят от начала отсчета. Тогда как нестационарные процессы протекают во времени с существенным изменением вероятностных характеристики зависят от начала отсчета. В работе [72] описывается определение стационарности в широком и узком смысле. Случайный процесс в узком смысле если

имеет многомерные распределения при одновременном прибавлении ко всем аргументам одного и того же числа τ остаются неизменными, однако на практике применение вызывает затруднения из-за требования знания многомерного закона распределения.

Наиболее интересна стационарность в широком смысле под которой понимается случайный процесс $X(t)$ стационарен если его выборочные оценки среднего и дисперсии постоянны во времени и соответствуют математическому ожиданию и генеральной дисперсии, а автокорреляционная функция является функцией только интервала времени $\tau = t_2 - t_1$ (сдвиг) и не зависит от значений каждого аргумента t_1 и t_2 в отдельности. Таким образом, стационарность в широком смысле можно обозначить

$$\bar{X}_x(t) = const; s_x^2(t) = const; R_x(t_1, t_2) = f[R_x(\tau)]. \quad (3.9)$$

Для определения стационарности ряда используют статистические методы, в таком случае даже нестационарные процессы можно привести к стационарному путем преобразований, например центрирования или используя первые разности если нестационарность по математическому ожиданию, в некоторых случаях вторые разности при нелинейном тренде в исследуемом ряду.

Проверка на стационарность на практике проводится для одной реализации достаточной длины, предполагается ее эргодичность. Ряд разбивают на продолжительные интервалы, и для каждого вычисляется среднее арифметическое и дисперсия, после чего, используя критерии проверки статистических гипотез, проводится сравнение характеристик. Процесс является стационарным при малом расхождении оценок на обоих интервалах.

Одним из важных свойств стационарной случайной функции является ее эргодичность. Введем определение эргодичности, имеется одна реализация случайного процесса большой продолжительности, тогда математическое ожидание определяется по формуле

$$m_x = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (3.10)$$

где T – интервал осреднения (длина реализации), а автокорреляционная функция описывается

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} [x(t) - m_x][x(t + \tau) - m_x] dt. \quad (3.11)$$

Вопрос состоит в том, будут ли эти полученные оценки близки к аналогичным значениям, полученным по множеству реализаций?

В результате процесс считается эргодическим если стационарный случайный процесс со статистическими характеристиками, полученными путем осреднения по одной реализации, при увеличении интервала осреднения T с вероятностью сколь угодно близкой к единице приближаются к соответствующим характеристикам, полученных по осреднению по всему множеству реализаций [72]. Случайный процесс, не обладающий выше описанными свойствами, считается неэргодическим.

При практических расчетах свойства эргодичность имеет большое значение, так как позволяет сократить объемы вычислений. Учитывая малую продолжительность гидрометеорологических процессов, эргодичность единственная возможность использования аппарата теории случайной функции применимо к временным рядам. Стоит отметить, что доказать эргодичность на практике достаточно сложно, поэтому о ней судят исходя из физических соображений, связанных с природой процесса или принимают априори.

Общая классификация случайных процессов представлена в виде схемы (рис.21).



Рисунок 21. Классификация случайных процессов

Предварительный анализ геоданных состоит из следующих процедур:

1. анализ первичных статистик
2. анализ эмпирической функции распределения и соответствия нормальному закону распределения
3. оценка трендовой компоненты
4. оценка циклической составляющей
5. анализ случайной компоненты

Кратко рассмотрим каждый этап предпрогнозного анализа геоданных в отдельности.

Расчет первичных статистик дает общее представление об исследуемом процессе, ниже приведены статистики, использованные в данной диссертационной работе, которые являются базовыми для описания гидрометеорологических рядов:

Среднее арифметическое
$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3.12)$$

Дисперсия
$$D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (3.13)$$

Среднеквадратическое отклонение
$$\sigma = \sqrt{D} \quad (3.14)$$

Коэффициент асимметрии
$$As = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{N\sigma^3} \quad (3.15)$$

Коэффициент эксцесса
$$Ex = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4 - 3}{N\sigma^4} \quad (3.16)$$

Коэффициент вариации
$$C = \frac{\bar{x}}{\sigma} \cdot 100\% \quad (3.17)$$

Анализ эмпирической функции распределения проводится определение характеристик интенсивности процесса и повторяемости его значений. Определение вероятности перехода от одного характерно состояния к другому позволяет говорить о возможных тенденциях протекания процесса. Гистограмма строится с использованием разбиения ряда данных на количество интервалов $k = 5 \lg N$, а размах интервала определяется $\Delta X = (X_{\max} - X_{\min})/k$. После чего производится расчет количества значений попадающих в определенный интервал и с помощью критерия χ^2 («хи-квадрат») определяется соответствие исходного ряда нормальному закону распределения.

Анализ трендовой компоненты включает оценку наличия в исследуемом ряду колебания с периодом превышающем длину ряда, отражаемое в генеральной совокупности как тренд. В результате тренд можно понимать как длиннопериодные колебания с периодом, существенно превышающем длину выборки. Разделяют линейный и нелинейный тренды, описываемые уравнениями

$$y = a_1 t + a_0 + \varepsilon \quad (3.18)$$

$$y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 + \varepsilon \quad (3.19)$$

где t - время.

Таким образом, расчет характеристик линейного тренда происходит как расчет линейной регрессии, нелинейного тренда - множественной.

Для проверки значимости тренда рассчитывается коэффициент детерминации r^2 , описывающий вклад тренда в общую дисперсию ряда. На основании оценки по критерию Стьюдента коэффициента корреляции r вклад тренда значим или не значим. Если выявлена не значимость тренда, это говорит о том, что тренда нет.

Важной характеристикой тренда является величина тренда, показывающая изменение характеристики по линейному тренду за определенный промежуток времени. Величина тренда равна коэффициенту a_1 уравнения линейного тренда, и имеет размерность характеристики y за единицу дискретности.

Для дальнейшей работы с данными из временного ряда тренд должен быть удален, путем вычитания из исходного ряда значений, рассчитанных по тренду

$$dy_i = y_i - (a_1 t_i + a_0) \text{ или } dy_i = y_i - (a_2 t_i^2 + a_1 t_i + a_0) \quad (3.20)$$

Оценка периодической составляющей производится при помощи гармонического анализа Фурье и спектра. Циклическая (периодическая) компонента может быть выделена в структуре временного ряда когда в нем наблюдается одна или несколько циклических составляющих. Как правило наиболее выраженные периоды хорошо заметны на АКФ, но менее выраженные на АКФ могут не отмечаться, в таком случае применяется спектральный или гармонический анализ. Основа гармонического анализа – разложить любой ряд без остатка в ряд Фурье, иными словами на конечное число гармоник. Гармоники – тригонометрические функции с кратными длине ряда периодами, выражается как

$$G_k = A_k \cos(w_k t - \varphi_k), w_k = 2\pi / T_k \quad (3.21)$$

где k – номер гармоники, A_k - амплитуда k -ой гармоники, w_k - частота k -ой гармоники, T_k - период k -ой гармоники, φ_k - фаза k -ой гармоники, t - время.

Характеристик гармоник определяются на основании коэффициентов Фурье a_k, b_k :

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin(w_k \cdot t_i)]; b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \cos(w_k \cdot t_i)] \quad (3.22)$$

где x_i - исходный ряд, N – длина ряда, w_k - частота k -ой гармоники, $t_i = i, i = 1, 2, 3 \dots N$.

Характеристик гармоник определяются по формулам:

$$\text{Амплитуда гармоники } A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\text{Фаза гармоники } \varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k} \pm \pi;$$

$$\text{Дисперсия гармоники } D_k = \frac{A_k^2}{2};$$

$$\text{Вклад гармоники в общую дисперсию ряда } V_k = \frac{D_k}{D_y},$$

где D_y - дисперсия исходного ряда.

Анализ случайной компоненты, для проведения анализа внутренней структуры процесса, проводится на основе автокорреляции. Графическое изображение называется автокорреляционной функцией (АКФ) и показывает зависимость коэффициента корреляции r от сдвига τ . Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r(\tau) = \frac{1}{\sigma_x^2(N-1-\tau)} \sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x}) \quad (3.23)$$

где N – длина ряда, τ – сдвиг от 1 до максимума.

В АКФ каждый коэффициент корреляции может быть проверен на значимость по критерию Стьюдента.

В результате при анализе АКФ можно определить инерционность процесса по радиусу корреляции, периодичность по значимым коэффициентам корреляции на соответствующих сдвигах и тип процесса («белый шум», «красный шум», «квазигармонический процесс»).

При исследовании нескольких параметров одновременно используется взаимнокорреляционный анализ (кросскорреляция), аналог автокорреляционного анализа. В отличие от АКФ коэффициенты корреляции рассчитываются для положительных и отрицательных сдвигов. Анализ показывает синхронно или асинхронно связаны характеристики.

3.2 Модель оценки рисков и математического ожидания времени наступления опасного явления

Уровень аварийности на морском транспорте, влекущий людские и экономические потери в настоящее время остается весьма высоким. По данным Ливерпульской ассоциации страховщиков, в результате аварийных случаев ежегодно повреждаются около 800 судов, это каждое третье судно мирового флота. Несмотря на технический прогресс в области судостроения и судовождения, морская деятельность до сих пор сопряжена с рисками. По результатам исследования [73] первая причина аварийных ситуаций на воде – нарушение технологических норм эксплуатации морских судов и ошибки экипажа, вторая причина – неправильный учет гидрометеорологических условий. Анализ крупнейших кораблекрушений 16-20 века показал, что основные их причины все те же, человеческий фактор и влияние природной среды [74]. Так, например, судно «Берлин» попав в непредвиденные на море случайное состояние морской стихии было брошено на край мола большой волной

Риск — это возможность возникновения неблагоприятного исхода в условиях неопределенности [75]. Под неблагоприятным исходом понимается:

- упущенная выгода
- убыток
- отсутствие результата
- недополучение дохода или прибыли
- событие, которое может привести к убыткам или недопущению доходов в будущем

Использование оценки риска в России зачастую находит недостаточное теоретическое развитие и практическое применение.

Одной из разновидности рисков является экологический риск, характеризующийся нарушением динамического равновесия в экологических системах, который приводит к изменению параметров характеристик в результате природных процессов или техногенной деятельности. Наиболее подходящим было бы возможное определение «климатический риск», однако до настоящего времени окончательно оно не определено и соответственно терминология не является общепризнанной.

В связи с вышеизложенным, встала задача актуализации и разработки методов оценки опасных гидрометеорологических процессов в связи с климатическими флуктуациями северных регионов России [76].

Стохастическая модель представляет собой модель, учитывающую случайные факторы. Вероятностное описание природных процессов, основой которых служит представление о том, что характеристики этих процессов меняются произвольным образом, т.е. являются случайными величинами.

Рассмотрим понятие цепи Маркова. Последовательность событий $A_i^{(t)}$ является цепью Маркова k -го порядка, если для каждого момента времени t условная вероятность события $A_i^{(t+1)}$ зависит только от событий, которые произошли в k предыдущих моментах времени и не зависит от поведения последовательности до момента $t-k+1$

$$P\{A_j^{(t+1)} | A_i^{(t)}, A_{i_1}^{(t-1)}, A_{i_2}^{(t-2)}, \dots\} = P\{A_j^{(t+1)} | A_i^{(t)}, \dots, A_{i_{k-1}}^{(t-k+1)}\}. \quad (3.24)$$

Из уравнения следует, что цепь Маркова 1 порядка (простая цепь Маркова) для каждого момента времени t справедливо неравенству

$$P\{A_j^{(t+1)} | A_i^{(t)}, A_{i_1}^{(t-1)}, A_{i_2}^{(t-2)}, \dots\} = P\{A_j^{(t+1)} | A_i^{(t)}\}. \quad (3.25)$$

Таким образом, для простой цепи Маркова вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от состояния системы в настоящем и не зависит каким образом

система пришла к этому состоянию. Автокорреляционная связь имеется только между соседними членами ряда. Если же вероятность системы в настоящий момент зависит от некоторого множества состояний системы в предшествующие моменты времени, то это сложная цепь Маркова. Значит, автокорреляционная связь между различными сечениями процесса начинается со сдвига $\tau = 1$.

Рассматривая задачу случайного многомерного процесса стоит отметить, что она сводится к вводу множеств ограничений в предметной области не определяемых или не соблюдаемых. Как правило, задача оценки статистических характеристик двухмерного процесса в заданной области решается в одномерном варианте при наличии хорошего математического обеспечения.

В диссертации рассматривается случай определения состояния природной системы двумя стохастически зависимыми параметрами высоты и скорости ветровой волны. Будем считать, что выход за пределы заданного уровня хотя бы одного параметра говорит о наступлении опасного явления на рассматриваемой акватории. Проблема прогноза опасного явления сводится к оценке математического ожидания времени невыхода T значений гидрометеорологических параметров за пределы допустимого поля значений $D(t)$ при известных начальный момент времени значений этих параметров. Отметим, что информация о законе изменчивости параметров ограничена временным интервалом.

Подобным задачам применительно к техническим системам стоит отметить работы [77] для одномерного процесса и работы [78,79] посвященные оценке функционала $T(x_1, x_2)$ двухмерного процесса.

Постановка задачи.

Пусть задан векторный случайный процесс $X_t = (X_{t1}, X_{t2})$. Будем считать, что каждый одномерный случайный процесс описывается стохастическим дифференциальным уравнением вида

$$dX_{ti} = b_i(t)dt + a_i(t)d\eta_t \quad (3.26)$$

Здесь $i=1,2, \eta_t$ - винеровский процесс с соответствующими $M(\Delta\eta) = 0$ и $M(\Delta\eta^2) = \Delta t, \eta(0) = 0$, коэффициенты $a_i(t), b_i(t)$ определяют управления δ процессом X_t и принадлежат множеству допустимых управлений D , для которых $a_i(t), b_i(t)$ являются кусочно-непрерывными функциями и удовлетворяют условию

$$a_i(t) \geq 0, 0 \leq \alpha_i(t) \leq u_i(t) \equiv \sqrt{\int_0^t a_i^2(t)dt} \leq \beta_i(t) \quad (3.27)$$

здесь $\alpha_i(t), \beta_i(t)$ - заданные неубывающие функции, $\alpha_i(0) = 0$. Если τ - время первого выхода процесса X_t из допустимой области $B = B_1 \times B_2, B_i = (0, \infty), i = 1, 2$.

Взаимнокорреляционная функция удовлетворяет условию $\rho(t_1, t_2) = \rho$.

Введем предположение, что случайная величина τ имеет плотность распределения $q(t)$, начальные значения x_{0i} имеют плотность распределения $f(x_1, x_2)$ что при $x_{01} \leq 0, x_{02} \leq 0 f(x_1, x_2) = 0$. Тогда для $x_i \in (0, \infty), t \in [0, \infty)$ искомый функционал запишется как

$$T^\delta(x_1, x_2) = \int_0^\infty t dQ^\delta(t/x_1, x_2) = \int_0^\infty p^\delta(t/x_1, x_2) dt = \int_0^\infty (1 - Q^\delta(t/x_1, x_2)) dt \quad (3.28)$$

здесь $Q^\delta(t/x_1, x_2) = P(\tau < t/x_{01} = x_1, x_{02} = x_2)$ - функция распределения при условии $X_{01} = x_1, X_{02} = x_2$.

Введение ряда ограничений по [80] сводят задачу к оцениванию $T(x_1, x_2)$, считая, что функция $\rho(t_1, t_2)$ является известной.

Для решения задачи сделав предположение $Q^\delta(t/x_1, x_2) \in F$ - множество двумерных нормальных распределений, $\rho(t_1, t_2) = \rho$, тогда

$$Q^\delta(t/x_1, x_2) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{c_1}^\infty \Phi\left(\frac{C_2 - \rho \cdot z}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz \quad (3.29)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{1}{2} y^2\right) dy, m_i(t) = -\int_0^t b_i(\tau) d\tau$

$$c_1 = \frac{m_1(t) - x_1}{u_1(t)}, c_2 = \frac{m_2(t) - x_2}{u_2(t)}, |\rho| \leq 1.$$

Таким образом, математическая постановка задачи: при известных $X_{01} = x_1, X_{02} = x_2$ и ограничениях требуется найти такие управления $\delta^* \in D$ и $\delta_* \in D$ на которых достигается абсолютный минимум $T^*(x_1, x_2)$ и абсолютный максимум $T_*(x_1, x_2)$ функционала $T^\delta(x_1, x_2)$

$$\begin{aligned} T^*(x_1, x_2) &= \inf_{\delta \in DAC} T^\delta(x_1, x_2) \\ T_*(x_1, x_2) &= \sup_{\delta \in DAC} T^\delta(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (3.30)$$

где S - множество допустимых управлений, удовлетворяющих условиям.

Задача может быть решена для случая $\rho = 0, \rho = 1, \rho \in (0,1)$. Рассмотрим подробнее случай $\rho \in (0,1)$ заранее предполагая данный тип условия для исследуемых параметров природной среды.

В общем виде запишем $P^\delta(t/x_1, x_2) = 1 - Q^\delta(t/x_1, x_2) = \Phi_2(u_1, u_2, x_1, x_2, t)$

$$\text{здесь } \Phi_2(\bullet) = \frac{1}{\sqrt{2\pi u_1}} \int_0^\infty \Phi \left(\frac{(m_2 - x_2)u_1 - \rho(m_1 - y - x_1)u_2}{u_1 u_2 \sqrt{1 - \rho^2}} \right) \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{(m_1 - y - x_1)^2}{u_1} \right) \right) dy$$

Опуская предварительные рассуждения и соответствующие им преобразования, рассмотренные в [81], перепишем исходную задачу:

$$\text{sign} \left(\frac{d}{dt} m_2(t) \right) = \text{sign} (M(x_1 \cdot \psi_2(x_2, x_1)))_t = \text{sign} \left(M \frac{x_2 \cdot \Phi(c_{21}) \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} c_1^2 \right) \cdot f(x_2, x_1)}{\int_0^\infty \Phi(c_{21}) \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} c_1^2 \right) \cdot dF(x_2, x_1)} \right) \quad (3.31)$$

После преобразований

$$\text{sign} \left(\frac{dm_2}{dt} \right) = \text{sign}(m_{21} - m_1) \cdot \text{sign} \left(\frac{\varphi_2'(t) \cdot u_1 - \rho \varphi_1'(t) \cdot u_2}{u_1 u_2} \right) \quad (3.32)$$

$$\text{здесь } m_{21}(t) = \int_0^\infty \int_0^\infty x_2 \psi_{21}(x_1, x_2) dx_2 dx_1$$

Проведем анализ выражения

$$R = \text{sign} \left(\frac{\varphi_2'(t) \cdot u_1 - \rho \varphi_1'(t) \cdot u_2}{u_1 u_2} \right) = \text{sign}(\varphi_2'(t) \cdot u_1 - \rho \varphi_1'(t) \cdot u_2) \quad (3.33)$$

В работах [80-82] установлено, что при $\rho = 0$ и $\rho = 1$ $\text{sign}(m_2'(t)) = +1$, следовательно, для всех значений $\rho \in [0,1]$ $\text{sign}(m_2'(t))$ не зависит от R, в этом случае R=+1, отсюда следует

$$\text{sign} \left(\frac{d}{dt} m_1(t) \right) = \text{sign}(m_{21}(t) - m_1(t)). \quad (3.34)$$

Преобразуем данное выражение к другому виду:

$$m_{21} - m_1 = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty x_2 \exp \left(-\frac{1}{2} c_1^2 \right) \left\{ \exp \left(-\frac{1}{2} c_{21}^2 \right) - \Phi(c_{21}) \right\} \cdot dF(x_2, x_1)}{\int_0^\infty \Phi(c_{21}) \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} c_1^2 \right) \cdot dF(x_2, x_1)} \quad (3.35)$$

Все подынтегральные функции положительны и в положительных плоскостях $x_1 > 0, x_2 > 0$ определенный интеграл от положительных функций будет положительным, отсюда можно сделать вывод, что $sign(m_{21} - m_1)$ будет определяться соотношением

$$sign\left(\exp\left(-\frac{1}{2}c_{21}^2\right) - \Phi(c_{21})\right) \quad (3.36)$$

Обозначив $L(c_{21}) = \exp\left(-\frac{1}{2}c_{21}^2\right) - \Phi(c_{21})$

Предположив $c_{21} > c_*$, где $c_* = L^{-1}(0)$, тогда $L(0) > 0, L(+\infty) = 0, L(c_*) = 0$.

Определим экстремум $L(c_{21})$

$$L(c_{21}) = -c_{21}e^{-\frac{1}{2}c_{21}^2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}c_{21}^2} = 0. \quad (3.37)$$

Максимум уравнения достигается в точке $c_{21} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$, условие максимума определяется из знака второй производной функции, который в нашем случае -1.

Из полученных соотношений получим решение при условии $c_{21} \geq c_*$

$$sign\left(\frac{d}{dt}m_1(t)\right) = +1. \quad (3.38)$$

Из этого следует, что уравнение $x_2 = M_{\psi_2}$ имеет единственное решение по t при выполнении

$$\frac{\varphi_2(u_2) - x_2}{u_2} - \rho \frac{\varphi_1(u_1) - x_1}{u_1} \geq c_* \quad (3.39)$$

Пусть $c_{21} < c_*$, тогда $L(-\infty) < 0, L(c_*) = 0$. Данная функция имеет один экстремум при $c_{21} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$, интервалы монотонности для $L(c_{21})$ определяются из условий

$$\begin{cases} sign = (L(c_{21})) = +1, \forall c_{21} \geq c_* \\ sign = (L(c_{21})) = -1, \forall c_{21} < c_* \end{cases} \quad (3.40)$$

Подведя итог скажем, что для рассматриваемого случая $\rho \in (0,1)$ существует два решения уравнения $x_2 = M_{\psi_2}$, значит, для определения экстремума функционала $T(x_1, x_2)$ необходимым является выполнение условия (3.40).

По аналогии проводятся рассуждения для второго уравнения $x_1 = M_{\psi_1}$, где условие существования единственного решения:

$$\frac{\varphi_1(u_1) - x_1}{u_1} - \rho \frac{\varphi_2(u_2) - x_2}{u_2} \geq c_* \quad (3.41)$$

Соотношения (3.40) и (3.41) позволяют решить задачу поиска экстремумов.

Алгоритм нахождения экстремумов – решение задачи определения экстремумов

$$T_1(\tilde{u}_1, x_1) = \begin{cases} \inf_{\delta \in D \wedge C} T_1^\delta(x_1) \\ \sup_{\delta \in D \wedge C} T_1^\delta(x_1) \end{cases} \quad (3.42)$$

или

$$T_2(\tilde{u}_2, x_2) = \begin{cases} \inf_{\delta \in D \wedge C} T_2^\delta(x_2) \\ \sup_{\delta \in D \wedge C} T_2^\delta(x_2) \end{cases} \quad (3.43)$$

Как указывалось выше, решение проводится в рамках одномерного случая. Из (3.43) определяются оптимальные управления $\tilde{u}_1(t)$ или $\tilde{u}_2(t)$. При известных функциях $F_1(x_1)$ и $F_2(x_2)$ можем получить в явном виде функции $\varphi_1(x_1), \varphi_2(x_2)$ с дальнейшим решением задачи определения множества допустимых управлений $N_1(N_2)$, которые удовлетворяют условиям (3.41) или (3.40). Тогда допустимые управления определяются при условии известности $u_2(t)$ или $u_1(t)$. Полученное множество позволяет найти экстремумы $\tilde{u}_2(t)$ или $\tilde{u}_1(t)$ и на заключительном этапе по известным $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2$ и N определяем экстремумы

$$\begin{aligned} T^*(x_1, x_2) &= \inf_{u_1, u_2 \in D \wedge C \wedge H} T(u_1, u_2, x_1, x_2, \rho) \\ T^*(x_1, x_2) &= \sup_{u_1, u_2 \in D \wedge C \wedge H} T(u_1, u_2, x_1, x_2, \rho) \end{aligned} \quad (3.44)$$

здесь $H = N_1 \vee N_2, D = D_1 \vee D_2, c = c_1 \vee c_2$ выбираются в зависимости от последовательности поиска экстремумов.

Применение метода для оценки математического ожидания времени нахождения случайного процесса в заданном поле буде представлена ниже при решении задачи.

3.3. Реализация метода и верификация модели

Постановка задачи

Имея два случайных процесса $X(t)$ и $Y(t)$, описывающих изменчивость высоты и скорости ветровых волн соответственно. Для каждого из них существует критическое допустимое значение $X_{\text{крит}}$ и $Y_{\text{крит}}$, превышение которого говорит о наступлении опасного явления.

Будем считать, что опасное явление наступило, если высота волны или ее скорость превысили заданное предельное значение (рис.22).

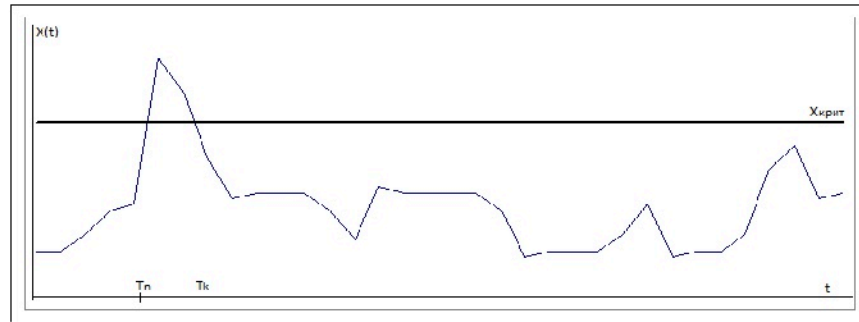


Рисунок 22. Схема наступления опасного явления на примере высоты волн $X(t)$, где T_n – время начала ОЯ, T_k – время окончания ОЯ

Оценка риска

Для оценки риска используются оценки, полученные в работе [80]

$$\bar{R}^* = (1 - P_*(t_3 / x_0)) \bar{W} - \text{верхняя оценка риска}$$

$$\bar{R}_* = (1 - P^*(t_3 / x_0)) \bar{W} - \text{нижняя оценка риска}$$

где $P(t_3 / x_0)$ - вероятность невыхода случайного процесса за пределы допустимых значений при условии известных значений процесса в начальный момент времени $t=0$ $x(t=0) = x_0$.

Тогда оценки риска примут вид

$$\bar{R}^* = (1 - P_*(t_3 / x_0)) \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \cdot W_{\max} \quad (3.45)$$

$$\bar{R}_* = (1 - P^*(t_3 / x_0)) \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \cdot W_{\max} \quad (3.46)$$

Помимо заблаговременного прогноза гидрометеорологических параметров, не менее важным считается оценка вероятности наступления риска.

Методика оценки риска в геосистемах включает следующие расчетные этапы:

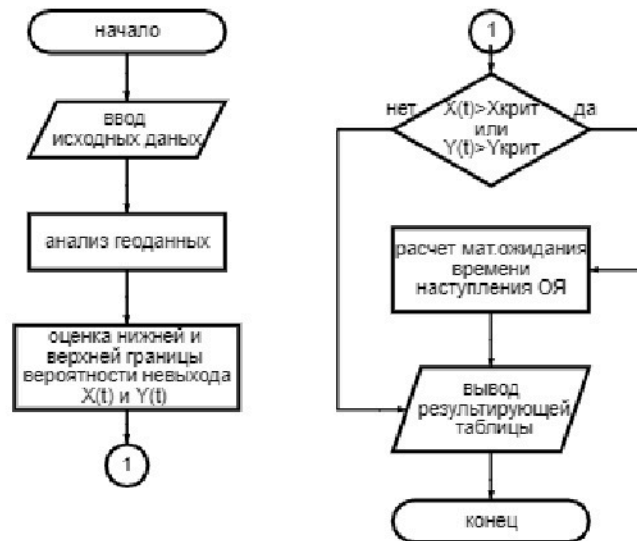


Рисунок 23. Методика обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях

1. Ввод исходных данных, полученных в результате геомоделирования
2. Расчет статистических показателей исследуемого процесса $X(t)$ – математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, автокорреляционная функция и др.
3. Оценка границ вероятности превышения процессом уровня ординара по формулам:

$$\bar{Q}^* = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi(1-r^2(0, t_3))} \int_0^t |w(t/x_0)| dt} \right) \quad (3.47)$$

$$\bar{Q}_* = \left(1 - \left[\Phi \left\{ \frac{b - m_x - r_x(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x]}{\sigma_x \sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}} \right\} - \Phi \left\{ \frac{-m_x - r_x(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x]}{\sigma_x \sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}} \right\} \right] \right) \quad (3.48)$$

где m_x – математическое ожидание случайного процесса; σ_x – среднеквадратическое отклонение; $r_x(0, t_3)$ – автокорреляционная функция; $w(t/x_0)$ – плотность распределения времени невыхода процесса за пределы установленных границ $a(t)$ и $\beta(t)$.

При анализе ветрового режима используется $a(t) \equiv 0, \beta(t) \equiv C$.

$$w(t/x_0) = [\gamma'(t) + \rho'(t) \cdot \gamma(t)] \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\gamma^2(t)\right\} - [\eta'(t) + \rho'(t) \cdot \eta(t)] \cdot \exp\left\{\frac{1}{2}\eta^2(t)\right\} \quad (3.49)$$

$$\gamma(t) = a(t) - r(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x] / \sigma_x; \rho(t, t + \tau) = \frac{1}{r(t, t + \tau)} \quad (3.50)$$

$$\eta(t) = \beta(t) - r(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x] / \sigma_x; \rho'(t) = \frac{d}{d\tau} \rho(t, t + \tau) |_{\tau=0} \quad (3.51)$$

4. Расчет математического ожидания времени наступления и продолжительности превышения параметром заданного уровня.

5. Вывод полученных результатов в табличном виде с указанием верхней и нижней границы вероятности не выхода случайного процесса за заданные пределы, время наступления и окончания опасного явления и его продолжительности

Расчет непосредственно ущерба, его размера или коэффициентов в данной работе не рассматривается.

Практическая реализация

Для прогнозирования рисков на акватории порта выбраны два параметра – высота ветрового волнения и скорость ветровой волны, описываемые случайным процессом. При описании физического явления случайным процессом можно оценить свойства явления в любой момент времени по совокупности выборочных функций, образующих этот случайный процесс. Первоначально проводится определение стационарности и эргодичности процесса для дальнейшей работы с ним.

Построение стохастической модели оценки состояния водной поверхности при известных параметрах на начальный момент времени расчета для выявления статистической закономерности процесса и оценки их вероятностных характеристик представлено на рис.24.

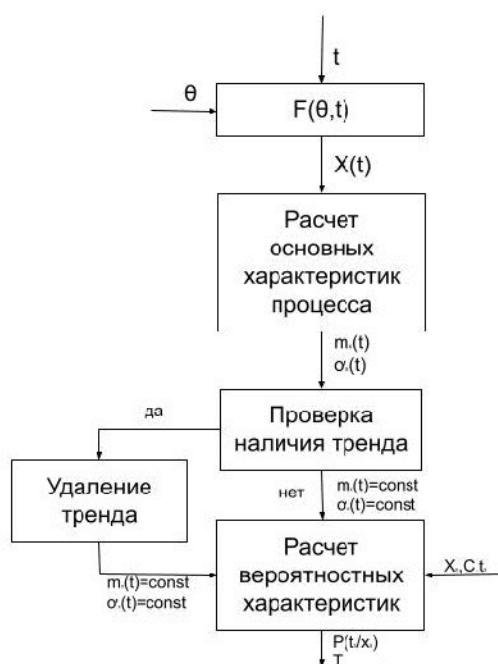


Рисунок 24. Модель оценки состояния водной поверхности при известных параметрах на начальный момент времени

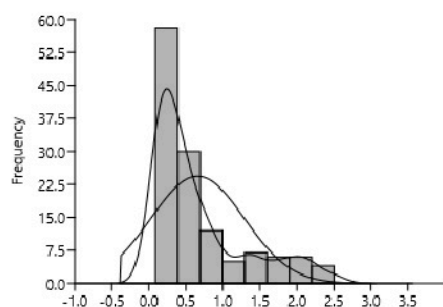
Входными данными для модели являются:

- θ – вектор гидродинамических параметров, определяющих состояние морской поверхности;
- $X(t) = F(\theta, t)$ – случайная функция времени t и параметров θ ;
- t_z – заданное время прогнозирования ;
- x_0 - фактическая высота волны и скорость волны на начало расчета $X(t_0) = x_0$.

Выходные параметры модели:

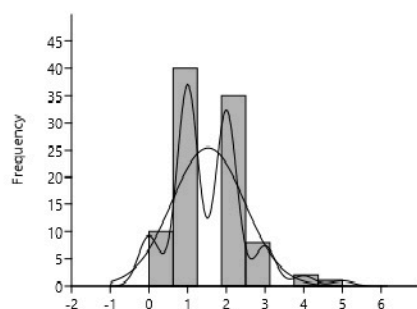
- $P(t_z / x_0)$ - вероятность не выхода характеристики $X(t)$ за заданный предел $X_{крит}$;
- $\bar{T}$ - среднее время опасного явления (математическое ожидание времени нахождения случайного процесса $X(t)$ выше предельного уровня).

В первом блоке происходит определение оценка вида случайного процесса $X(t)$. При обработке данных высоты и скорости ветровых волн (длина реализации 128, результаты гидродинамического моделирования за 16 суток) определено, что по критерию χ^2 при уровне значимости 5% распределение не соответствует нормальному закону распределения (рис.24-25).



Bin start	Bin end	All	95% CI lo	95% CI hi
0,09	0,39125	58	46,718	69,566
0,39125	0,6925	30	21	40,624
0,6925	0,99375	12	6,3213	20,229
0,99375	1,295	5	1,6388	11,367
1,295	1,5963	7	2,8502	14,007
1,5963	1,8975	6	2,2264	12,702
1,8975	2,1988	6	2,2264	12,702
2,1988	2,5	4	1,0981	9,9942

Рисунок 24. Эмпирическая функция распределения для высоты волн



Bin start	Bin end	All	95% CI lo	95% CI hi
0	0,625	10	4,905	17,59
0,625	1,25	40	30,418	50,09
1,25	1,875	0	0	3,6189
1,875	2,5	35	25,795	45,03
2,5	3,125	8	3,5199	15,131
3,125	3,75	0	0	3,6189
3,75	4,375	2	0,24317	7,0307
4,375	5	1	0,025314	5,4408

Рисунок 25. Эмпирическая функции распределения скорости волн

Во втором блоке происходит расчет основных параметров процессов математическое ожидание, среднеквадратическое отклонения, дисперсии (рис.26) и коэффициента корреляции между двумя процессами для оценки связи между ними.

	All
N	128
Min	0,09
Max	2,5
Sum	84,24
Mean	0,658125
Std. error	0,05582382
Variance	0,3988862
Stand. dev	0,6315744
Median	0,41
25 prcntil	0,2
75 prcntil	0,85
Skewness	1,381355
Kurtosis	0,8585348
Geom. mean	0,4278086
Coeff. var	95,96572

а)

	All
N	96
Min	0
Max	5
Sum	147
Mean	1,53125
Std. error	0,09591792
Variance	0,8832237
Stand. dev	0,9397998
Median	1
25 prcntil	1
75 prcntil	2
Skewness	0,7625843
Kurtosis	1,447087
Geom. mean	0
Coeff. var	61,37468

б)

Рисунок 26. Основные параметры высоты (а) и скорости (б) ветровых волн

Оценка стационарности по математическому ожиданию и дисперсии показала, что оба процесса стационарны. Считая процессы стационарными и эргодическими можно проводить расчеты по выборке, применяя полученные результаты к генеральной совокупности.

В третьем блоке проводится оценка трендов. По фактическим расчетам определено наличие значимых трендов у высоты и скорости волн (рис.27), значимость трендов определялась с помощью критерию Стьюдента при уровне значимости 5%. Для дальнейшего анализа тренд был удален для приведения исходных данных к нормальному

закону распределения. Как видно из повторной проверки вида закона распределения после удаления тренда высота и скорость ветровых волн соответствует нормальному закону распределения при уровне значимости 5% по критерию χ^2 (рис.28-29).

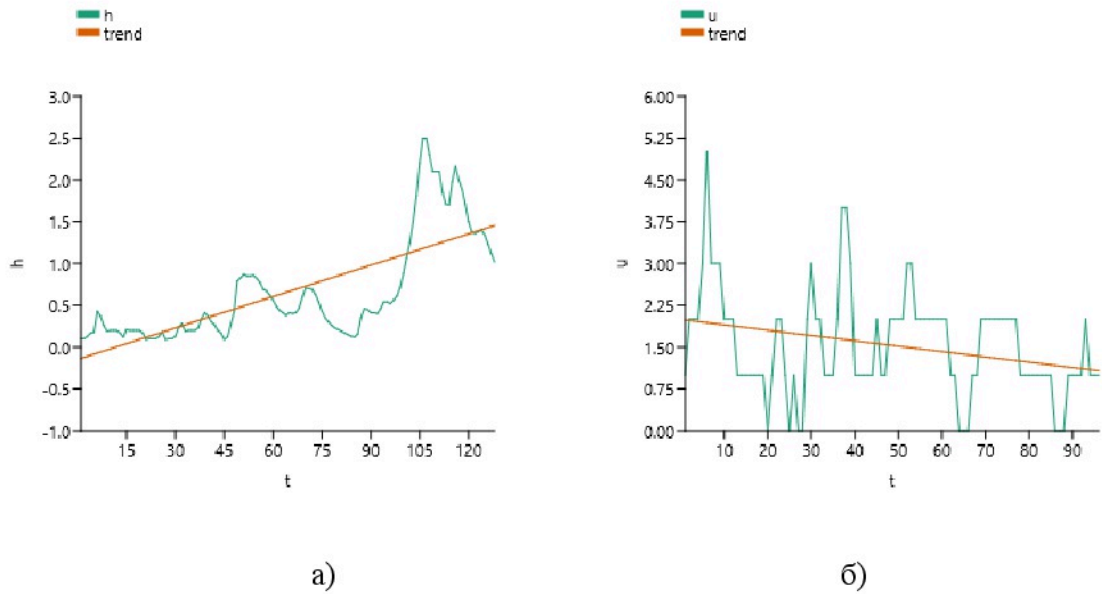


Рисунок 27. Временная изменчивость высоты (а) и скорости (б) ветровых волн с аппроксимацией трендом

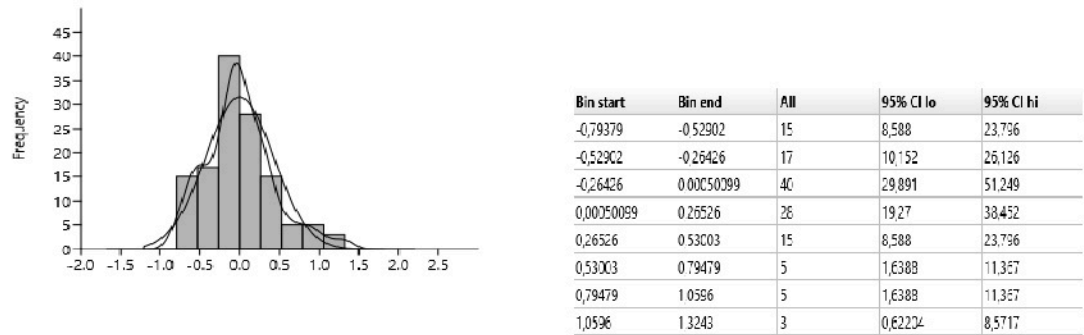


Рисунок 28. Эмпирическая функция распределения высоты волн после удаления тренда

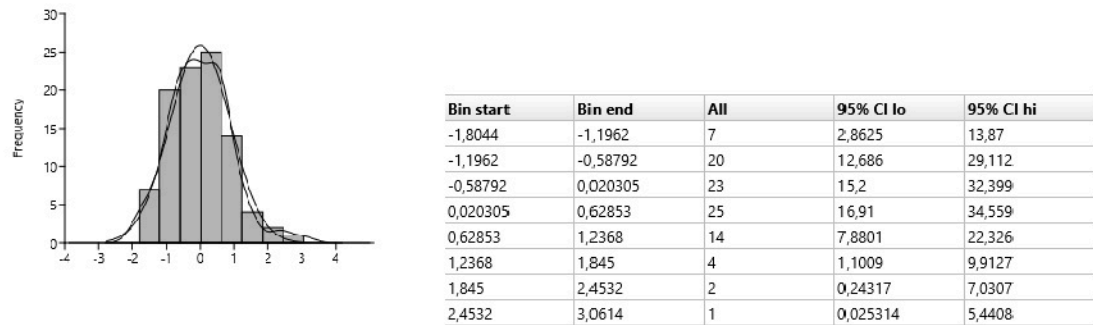


Рисунок 29. Эмпирическая функция распределения скорости волн после удаления тренда

Оценка автокорреляционной функции показывает, что случайная составляющая высоты и скорости волн аппроксимируется экспонентой вида $r_{x,y}(t) = e^{-bt}$ (рис.30)

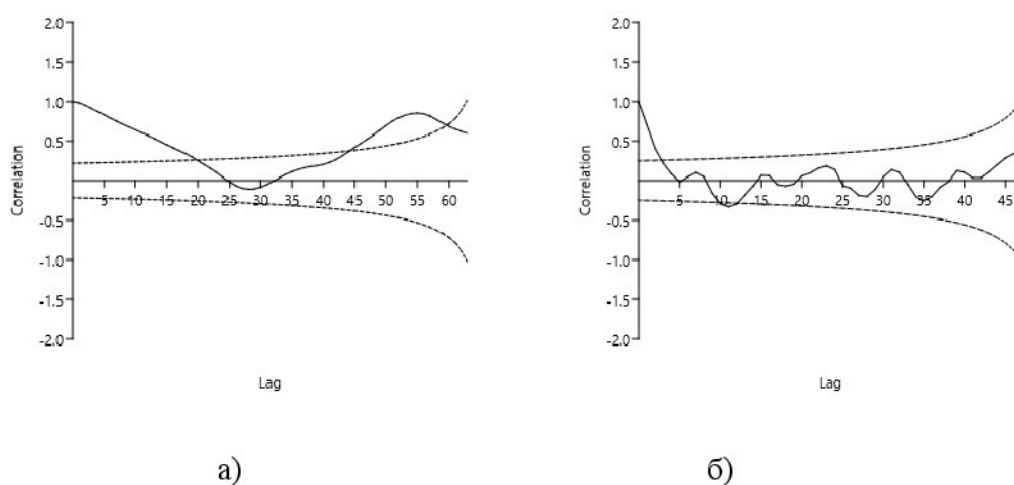


Рисунок 30. Автокорреляционная функция: а) высоты ветровых волн, б) скорости ветровых волн

После обработки данных и расчетов можно сказать, что процессы являются стационарными, эргодическими и соответствуют нормальному закону распределения.

В этом же блоке модели осуществляется оценка связи двух параметров, в результате чего был получен коэффициент корреляции 0,27 (рис.31-32), говорящий о наличии связи между скоростью и высотой ветровых волн. Что дает нам основу для решения задачи оценки риска и его математического ожидания для случая $\rho \in (0,1)$.

	скорость вол	высота волн
скорость вол		0,2758
высота волн	0,2758	

Рисунок 31. Коэффициент корреляции между скоростью и высотой ветровых волн

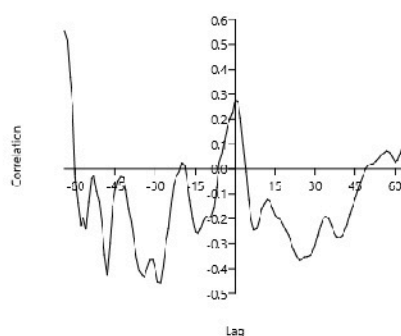


Рисунок 32. Взаимокорреляционная функция между высотой и скоростью ветровых волн

В последнем блоке осуществляется расчет вероятностных характеристик процессов $X(t)$ и $Y(t)$:

- оценка верхней и нижней границы возможных значений $P(t_3 / x_0)$ по формуле

$$\left\{ P^*(t_3 / x_0) = \min_{\theta \in [0,3]} \int_{D(\theta)} dF_1 y / x_0 \right.$$

где $F_1(y / x_0) = P\{X(\theta) \langle y / X(0) = x_0 \}$.

$$\left\{ P_*(t_3 / x_0) = 1 - \lim_{r \rightarrow 0} 1 / \tau \left\{ \int_0^{t_3} w_1(t_1 \tau / x_0) dt - \sum_{i=2}^{S-1} \int_0^{t_3} w_i(t_1 \tau / x_0) dt \right\} \right.$$

здесь $\{w_1(t, \tau / x_0) = P\{X(t) \in D(t), X(t + \tau) \in D(t + \tau / X(0) = x_0\}$

$\{w_i(t, \tau / x_0) = P\{X(t) \in D(t), X(t + \tau) \in D(t + \tau), \dots, X(t + i\tau) \in D(t + i\tau / X(0) = x_0\}$

- оценка верхней и нижней границы возможных значений $\bar{T}$

$$T^*(x_1, x_2) = \begin{cases} T_2 + \int_{T_2}^{\infty} P_1(t) \cdot P_2(t) dt, x_1 \leq m_1, x_2 \leq m_2 \\ T_2 + \int_{T_2}^{\infty} \varphi(\bar{u}_1, \bar{u}_2, t) dt, x_1 > m_1, x_2 > m_2 \end{cases}$$

$$T_*(x_1, x_2) = \begin{cases} \bar{T}_{12} + \int_{T_{12}}^{\infty} P_1(t) \cdot P_2(t) dt, x_1 > m_1, x_2 \leq m_2 \\ \bar{T}_{12} + \int_{T_2}^{\infty} \varphi(\bar{u}_1, \bar{u}_2, t) dt, x_1 \leq m_1, x_2 > m_2 \end{cases}$$

Таким образом, зная высоту и скорость ветровых волн в момент времени t_0 , модель позволяет получить прогноз возможного наступления опасного явления, его времени начала и продолжительности при заданной глубине прогноза.

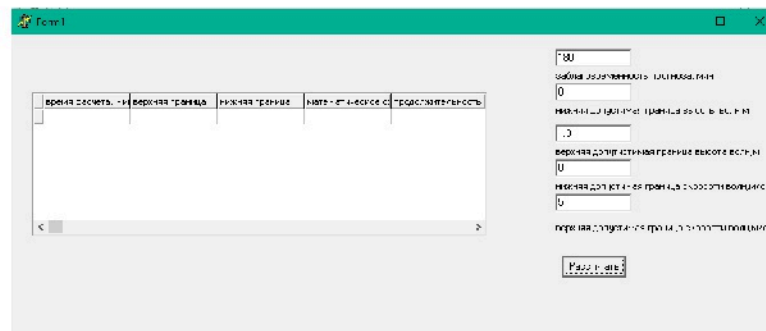


Рисунок 33. Модуль расчета оценки риска и математического ожидания времени превышения заданного уровня параметров ветрового волнения

Для оценки рисков и времени наступления и длительности опасного явления можно использовать стохастическую модель, характеристиками которой являются одна реализации двух параметров (высоты и скорости ветровой волны).

Выводы по главе

Климатическая изменчивость и непосредственно связанные с ней природно-климатические риски сегодня относятся к одним из значимых глобальных угроз мирового общества. На основе чего теория управления природно-климатическими рисками пока находится в зарождающейся форме, на стадии изучения и ее развитие еще только будет происходить. Выдвигается предположение о том, что возможно повышение социально-эколого-экономическую устойчивость благодаря концептуальным основам управления природно-климатическими рисками и применением их на практике.

Автором на основе изученного теоретического материала уточняется сущность, содержание, особенности природно-климатического риска, а так же закладывается основа разработки методологии оценки и управления рисками для обеспечения безопасности кораблей на замкнутых прибрежных акваториях, позволит в разработке инструментария выявления и оценки природно-климатических рисков.

Для большинства методов анализа одним из основных требований является стационарность исследуемого ряда, в частности среднего значения и дисперсии, поэтому на первом этапе анализа геоданных оценивается стационарность, если она не выявлена ряд преобразовывается к стационарному. Так же одним из основных условий является соответствие нормальному закону распределения.

Глава 4 Разработка практических рекомендаций по применению разработанных моделей и методики в геоинформационной системе управления морскими объектами для обеспечения безопасности на замкнутой прибрежной акватории

4.1 Геоинформационные системы управления

Общие требования к геоинформационной системе управления развитием ПТС. Информация о состоянии ПТС может храниться в различных информационных системах, на различных носителях, производится и движется в различных форматах. Весь объем такой информации образует информационное пространство системы управления. Определим информационное пространство как систему, обеспечивающую для ЛПР представление, хранение и доступ к любым данным в различных срезах и сочетаниях [83].

Очевидно, что для сложных пространственно распределенных систем информация будет обрабатываться и храниться в нескольких информационных системах, которые могут использовать различные технологии и способы работы с данными.

Особенность пространственных данных требует использования и обработки координатной информации в привязке к атрибутивной. Поэтому формирование единого информационного пространства для управления развитием ПТС становится достаточно сложной и дорогостоящей задачей, которая представляет интерес лишь в случае создания соответствующей системы управления, предполагающей интеграцию ответственности, полномочий и интересов [84,85]. Такой подход наиболее актуален для управления ПТС в общей системе государственного управления, а также для управления крупными интегрированными организационными системами (корпоративное управление).

Общие требования к автоматизированной системе управления (АСУ), используемой в различных сферах деятельности (управление, исследовательское проектирование и т.п.) включают: описание процесса деятельности; цели, назначение и области использования информационной системы; решения по структуре системы, подсистем, средствам и способам связи для информационного обмена между компонентами системы, подсистем и элементов; решения по взаимосвязям АСУ со смежными системами; решения по режимам функционирования; состав функций, комплексов задач, реализуемых системой (подсистемой); решения по составу информации, объему, способам ее организации и др.; элементы функциональной структуры АСУ (подсистемы); информационные связи между подсистемами (элементами) и с внешней средой.

Современные геоинформационные системы представляют собой новый тип интегрированных информационных систем, которые оперируют пространственной координатно-привязанной информацией и, в силу этого, обладают определенной спецификой в организации и обработке данных, но включают методы обработки данных многих ранее существовавших автоматизированных систем. В традиционном понимании географическая информационная система – это информационная система, оперирующая пространственными данными о пространственных объектах и их наборах в форме их цифровых картографических представлений (векторных, растровых, квадратомиических и иных) [84].

Совершенствование системы управления обеспечивается использованием геоинформационных систем управления (ГИСУ) как функционально ориентированных географических систем, оснащенных распределенными гетерогенными базами данных, базами знаний, реализующими пространственные аспекты анализа и представления

информации, а также соответствующими технологиями получения, обработки, хранения, представления и распространения управленческой информации.

Геоинформационный подход к управлению с учетом рассмотренных особенностей предполагает формирование новых требований как к ГИСУ в целом (геоинформационная система для поддержки принимаемых решений), так и к элементам ГИСУ. Системы поддержки принимаемых решений (ППР) как комплекс программных средств, включающий базу данных, базу знаний (различные модели и инструменты разработки и реализации решений), управляющие программы, предполагают определенную специфику функциональных и морфологических характеристик [86]. Управляющая программа обеспечивает процесс разработки и реализации решений с учетом специфики проблематики ЛПР и ориентируется на информационную поддержку различных видов деятельности в части: - облегчения взаимодействия между данными (в том числе и процедурами анализа и обработки данных) и знаниями (моделями принятия решений и др.) с одной стороны, и спецификой лиц, принимающих решения (ЛПР), как пользователя этих систем - с другой; - предоставление вспомогательной информации, для выполнения неструктурированных или слабоструктурированных задач, для которых трудно заранее определить данные и процедуры соответствующих решений. Управляющая программа должна контролироваться людьми, которые понимают ее назначение, цели и задачи, и использоваться в соответствии с основными социальными и этическими принципами. Она должна обеспечивать производство достоверной, надежной, систематизированной и своевременной информации. Для создания и использования ГИСУ необходимо формализовать и выстроить структуру, функции и политику субъекта управления ПТС, определить цели управления, возможности применяемой технологии. Ключевые элементы: структура и органы управления, стандартные процедуры, персонал, корпоративная культура.

Построение ГИСУ должно начинаться с анализа структуры системы управления ПТС соответствующего класса. ГИСУ должна обладать свойствами:

- интерактивности, что позволит руководителям получить полезную информацию из первоисточников, проанализировать ее, а также выявить существующие модели для решения определенных задач. На основе свойства интерактивности (онлайн-системы) можно в реальном времени проследить за всеми доступными информационными активами, выполнить необходимые измерения, получить сравнительные значения характеристик ПТС в рамках всех элементов пространств, спрогнозировать перспективы ее развития при гипотетическом поведении (инвестиции, внедрении новой технологии и др.), а также рассмотреть все возможные альтернативные решения;

- эффективности, что включает осуществление выбора по заранее обоснованным критериям: выбор наилучшего решения из множества возможных (оптимизация), возможность упорядочения возможных решений по предпочтительности (ранжирование), выбор совокупности критериев, на основе которых в дальнейшем будут оцениваться и сопоставляться возможные решения (альтернативы);

- гибкости относительно свойств пользователей на различных уровнях управления и в различных слоях геоданных: возможность управления входом и выходом, адаптируемость и быстрая реакция на изменение условий принятия решений, динамику объектов управления и анализа, ограниченность привлекаемых профессиональных специалистов информационных технологий;

- масштабируемости, что обеспечит поддержку для решений и проблем, которые не могут быть определены заранее и возможность использования новых сложных методов анализа и инструментальных средств моделирования, возможность расширения ГИСУ, как по уровням управления, так и по совокупности элементов анализа; - пространственная ориентация элементов решения – учет пространственных характеристик субъекта решения, объектов, факторов, событий, проблем, вариантов, исполнителей и др.

Для информационного обеспечения систем управления в ГИСУ могут использоваться различные методы: непосредственные измерения с использованием системы мониторинга; информационный поиск (поиск знаний в базах данных и внешней среде); интеллектуальный анализ данных; рассуждение на основе прецедентов; имитационное моделирование; эволюционные вычисления и генетические алгоритмы; нейронные сети; экспертный и ситуационный анализ; когнитивное моделирование и др [87]. По функциональным возможностям ГИСУ должны быть достаточно разнообразны, как показано на рисунке 34.



Рисунок 34. Функциональные возможности ГИСУ

4.2 Структура геоинформационной системы управления морскими объектами

Требования к структуре и специфике данных ГИСУ. База геоданных (БГД) является самой важной частью ГИСУ, поскольку она является основным источником сведений об управляемой системе, территории. От точности, полноты и корректности хранимой в ней информации, в конечном итоге зависит результат работы всей ГИСУ и эффективность принимаемых ЛПР решений. Взаимосвязанное ведение цифровых карт и реляционных баз данных называют геореляционной структурой. Построение геореляционных структур является на сегодняшний день наиболее часто встречающейся формой организации банка данных. Геореляционная структура основывается на понятии геометрической модели цифровой карты. При размещении геоданных особый интерес вызывает проблема согласованности разнородных геоданных по значениям хранимых значений признаков (атрибутов). Если атрибутивные данные из одной таблицы можно рассматривать как класс эквивалентности экземпляров одного логического типа с точностью до перечисления списка атрибутов, то с геоданными все выглядит не так просто. Наборы связанных классов атрибутов, имеющих одинаковую пространственную привязку, должны быть организованы так, чтобы значения их атрибутов соответствовали установленным топологическим отношениям, т.к. способность хранения геометрии атрибута является одним из обязательных условий существования БГД, поскольку каждый пространственный атрибут всегда должен быть доступен для отображения и анализа.

Для обеспечения целостности ГИСУ предлагается использовать специально созданную для этих целей множественно-реляционную модель и реализованный на ней механизм поддержания структурной согласованности, позволяющие вместо линейной ссылочной целостности плоских отношений поддерживать триангуляционную целостность пространственных атрибутов [83]. Пространственная информация богата структурами высокого уровня, и, не смотря на то, что каждая из классических моделей управления базами данных, которые стали появляться в 1960-х годах, смогла предложить в этой предметной области что-то свое, ни реляционная, ни объектно-ориентированная модель не согласуется с такой информацией в полной мере. Реляционная модель эффективно работает с топологическими отношениями, однако страдает от отсутствия средств представления сложных иерархических отношений, протяженных в пространстве. Объектно-ориентированные модели справляются как с топологическими, так и с иерархическими отношениями, но при этом также испытывают трудности, имея дело с явлениями и вещами, которые характеризуются пространственной протяженностью. В

реляционной базе данных все объекты, сущности и понятия, которые отличаются друг от друга, представлены в виде отношений, или таблиц. Отношение определяется именем и перечнем различных атрибутов, которые его характеризуют, но при работе с пространственными данными необходим тип ломаных линий, чтобы привязать те или иные данные к географической точке или объекту. В реляционной БД заведомо этого типа данных нет, и есть необходимость создания множества таблиц и отношений для хранения пространственной информации, что создает сложности в работе с информацией.

Для обработки пространственной информации нужны более сложные конструкции, призванные уменьшить глубокое смысловое расхождение между точкой зрения пользователя и реализацией базы данных. Такие средства предложены в рамках парадигмы объектно-ориентированных программных средств, которые основаны на принципах пользовательских типов данных, а также наследовании и полиморфизме [88].

Требования к знаниям. Знания включают закономерности предметной области, сформулированные в виде принципов, связей, законов, методических разработок и др., полученные в результате практической деятельности и научных исследований предметной области. Их основное предназначение определяется функциональными возможностями – постановка и решение актуальных задач управления с использованием геоинформации. Качество базы знаний ГИСУ определяется связностью знаний и данных, механизмами доступа и способами сопоставления применительно к достижению целей ЛПР. Связность (агрегация) знаний обеспечивает ускорение поиска релевантных знаний. Знания должны организовываться вокруг наиболее значимых объектов (сущностей) предметной области, что позволит связывать и представлять их в виде отдельного объекта и облегчит их поиск. В подобных объектах выделяют два вида связей: внутренние – характеризуют структуру объекта (объединяют компоненты в единое целое); внешние – отражают взаимозависимости с другими объектами и подразделяются на логические и ассоциативные. Логические выражают семантические отношения между элементами знаний.

Ассоциативные используются с целью ускорения поиска релевантных для принимаемых решений знаний. Операция сопоставления может использоваться как средство выбора нужного объекта из предлагаемого множества, так и для классификации, подтверждения, декомпозиции и коррекции. Незвестный объект может быть классифицирован (идентифицирован) с некоторыми известными образцами, при сопоставлении с которыми получены лучшие результаты. При поиске сопоставление используется для подтверждения некоторых объектов из множества возможных. Если неизвестный объект сопоставляется с известным объектом, может быть осуществлена

частичная декомпозиция описания. Операции сопоставления могут принимать определенные формы: синтаксическое – соотносятся формы, а не содержание объектов. Успешность предполагает идентичность объектов (результат бинарный – «да» - «нет»); параметрическое – в соответствии с предлагаемым параметром, характеризующим степень сопоставления; семантическое – соотносятся не образцы объектов, а их функции; принуждаемое – один сопоставляемый образец рассматривается с точки зрения другого. Вопрос стоит в силе принуждения (эффективность определенных процедур, связываемых с объектами).

Соответствие задачам ЛПР. Применение моделей в рамках баз знаний для принятия решений зависит от специфики решаемых задач, которые можно отнести к соответствующим категориям:

оптимизация задач с несколькими альтернативами – дерево решений, таблицы решений;

оптимизация с использованием математического программирования – линейные, нелинейные, динамические, стохастические модели решений;

имитационное моделирование – метод Монте-Карло, планирование эксперимента;

визуальное моделирование и имитация – интерактивное, статическое и динамическое.

Для ГИСУ последняя форма представления знаний является преобладающей; эвристики – эвристическое программирование, экспертные системы, количественные и качественные решения. Методики в базе знаний ГИСУ являются специализированными и ориентируются на целевые установки и объекты (сущности) управления развитием ПТС. Для представления онтологий в базе знаний возможно использование фреймовой модели представления знаний, что обусловлено возможностью наследования, полиморфизма и установления связей между различными формами знаний. Методики логического вывода и прецеденты удобно представлять в информационной системе в виде продукционных правил и алгоритмов, а структуры и карты развития объектов в виде семантических сетей. Полученные знания позволяют сформировать два типа решений: организационные - решения по перераспределению ответственности в системе управления территорией; результативные - решения по развитию действующих и потенциальных объектов, кластеров и территории в целом.

Анализ характеристик территории является базовым этапом в разработке стратегии развития. Методически данный этап предполагает выявление сущностей, формирующих привлекательный конкурентный имидж территории, ее экономический потенциал, а также субъектов и объектов, препятствующих положительной динамике развития. Позволяя

оценить преимущества и слабые стороны территории, результаты анализа могут быть положены в основу стратегического управления развитием территории. Как правило, анализ характеристик ПТС реализуется системой мониторинга.

Для реализации функций геоинформационного управления следует предъявить к ГИСУ, как информационным системам обеспечения разработки и реализации управленческих решений, некоторые дополнительные требования. Предъявляемые требования относятся к содержанию функций, но могут повлечь за собой необходимость совершенствования технологий их реализации в ГИСУ. Создание единого информационного пространства предполагает унификацию технологических решений для различных уровней управления и функциональных составляющих, инструментов, создание единой технологической и информационной среды. Поэтому структура системы знаний в ГИСУ должна иметь соответствующие отличия от традиционных ГИС. Для интеграции нескольких информационных систем в единое информационное пространство необходимо: во-первых, согласовать используемые данные различных форматов и источников, что обеспечить возможность их представления в консолидированном или агрегированном виде.

Построение пользовательского интерфейса должно учитывать особенности восприятия информации человеком, а также ориентацию ЛПР на использование опыта (своего и предшественников, так называемая типизация поведения). Процесс принятия решений человеком, как включает четыре стадии: распознавание или осмысление - состоит из идентификации и понимания проблем, встречающихся в деятельности: почему проблемы возникают, где и с каким результатом. При таком подходе должно предполагаться наличие исключений; проект или продумывание - в течение принятия решений ЛПР продумывает возможные варианты решения проблем, в первую очередь из своего опыта или опыта руководителей, достойных подражанию; выбор - заключается в выборе решения среди альтернатив. Здесь значимыми становятся критерии и комплексные аналитические модели, чтобы объяснить все следствия и возможности альтернатив; реализация - в течение выполнения решения ЛПР решает задачи определения исполнителей, распределения задач и ресурсов, а также контроля.

Элементами пользовательского интерфейса могут быть некоторые типичные задачи [83]:

- анализ примеров - оценка значений выходных величин для заданного набора значений входных переменных;
- параметрический анализ {«Что, если... ?»} - оценка поведения выходных величин при изменении значений входных переменных;

- анализ чувствительности - исследование поведения результирующих переменных в зависимости от изменения значений одной или нескольких входных переменных;

- анализ возможностей - нахождение значений входной переменной, которые обеспечивают желаемый результат (известен также под названием «поиск целевых решений», «анализ значений целей», «управление по целям»);

- анализ влияния - выявление для выбранной результирующей переменной всех входных переменных, влияющих на ее значение, и оценка величины изменения результирующей переменной при заданном изменении входной переменной;

- анализ данных - прямой ввод в модель ранее имевшихся данных и манипулирование ими при прогнозировании;

- сравнение и агрегирование - сравнение результатов двух или более прогнозов, сделанных при различных входных предположениях, или сравнение предсказанных результатов с действительными, или объединение результатов, полученных при различных прогнозах или для разных моделей;

- командные последовательности - возможность записывать, исполнять, сохранять для последующего использования регулярно выполняемые серии команд и сообщений;

- анализ риска - оценка изменения выходных переменных при случайных изменениях входных величин; - оптимизация - поиск значений управляемых входных переменных, обеспечивающих наилучшее значение одной или нескольких результирующих переменных;

- анализ расстояний между объектами, временных и других характеристик, зависящих от положения и перемещения элементов системы управления в пространстве.

Основные результаты программной реализации пользовательского интерфейса в ГИСУ – представление обоснованных вариантов решений в формах принятых пользователем и адаптированных для восприятия. Структура и функции типовой геоинформационной системы управления. Информационная и консультационная поддержка деятельности руководителя (ЛПР) субъекта управления сложной пространственно распределенной социально-экономической системой и территорией предполагает создание геоинформационной системы управления, обеспечивающей поддержку принимаемых решений и контроль их исполнения с учетом пространственных аспектов развития объектов управления.

В результате обработки и анализа информации формируется система рекомендаций руководителям субъектов управления (вариантов решений) для повышения эффективности управления, совершенствованию организационной структуры и производственной деятельности, повышению качества основных и обеспечивающих

процессов. В геоинформационной системе управления формируется образ реальной обстановки, производится анализ и оценка сложившейся ситуации, планируются управляющие воздействия, принимаются варианты решений, обеспечивающие правильную работу ПТС и выполнение возложенных на нее задач, а также наблюдает и оценивает результаты реализации решений. Формируемая геоинформационная модель обеспечивает функциональный гомоморфный перенос (отображение) части внешнего мира (оригинала) на систему понятий (изображений, визуализированных картин, символов, знаков и т. п.). В соответствии с таким определением существенными компонентами геоинформационной модели являются: понятия (термины, знаки, символы); правила трансформации (правила вычисления); постулаты (аксиомы или законы); формализованные закономерности развития моделируемой системы, принципы и методы ее преобразования для достижения соответствующей цели (знания); правила соответствия, которые позволяют сравнивать результаты отображения, вычислений и преобразований с прогнозируемыми, экспериментальными или практическими результатами [89].

Приведенные общие положения могут характеризовать информационные модели-теории, а также очень простые модели. Как правило, такие модели составляют основу компонентов ГИСУ. Геоинформационная система управления является информационной операционной моделью, если она способна отвечать на вопросы о внешнем мире и способах его преобразования. Важным достоинством операционного определения является то, что оно включает в себя не только модели-теории, но и практически реализуемые модели действий. В соответствии с общепринятым положением о том, что слишком абстрактная модель системы бесплодна, а слишком детальная вводит в заблуждение, объем информации, включенной в модель, и правила ее организации должны соответствовать предназначению системы – для геоинформационной системы управления: задачам и методам управления. Физически информационная модель реализуется с помощью разнообразных средств отображения и преобразования информации. Наиболее существенной особенностью использования информационной модели человеком является необходимость соотнесения сведений, получаемых посредством приборов, экранов, мнемосхем, табло и т. п., как между собой, так и с реальными управляемыми объектами. На процедурах соотнесения этих сведений строится вся деятельность субъекта. Отсюда понятно, что построение адекватной геоинформационной модели является одной из важнейших задач конструирования ПТС в целом.

Физически информация определяет предсказуемость поведения и свойств объекта во времени: чем выше уровень организации (больше информации), тем менее подвержен объект действию среды (поведение предсказуемо) [90]. В этом смысле организованность, упорядоченность системы – способность предопределять свою перспективу, свое будущее. Качественное решение задач управления невозможно без соответствующего информационного обеспечения управленческой деятельности, которое осуществляется, прежде всего, на основе специальной системы мониторинга обстановки, которая должна обеспечить реализацию процессов добывания, сбора, передачи, обработки, представления информации и выдачи соответствующих рекомендаций. Важной особенностью современных систем мониторинга обстановки в ПТС является их взаимодействие с ГИСУ в качестве пространственной информационной основы, обеспечивающей реализацию пространственно-временной интеграции данных [83].

Современные геоинформационные системы предоставляют качественно новый подход к анализу самых различных проблем и решению сложных задач, опирающийся на учет пространственных характеристик систем. Возможности ГИСУ должны позволить прогнозировать развитие явлений и событий окружающего мира с осмыслением и выделением главных пространственных факторов и причин, выявлять их возможные последствия, а также планировать деятельность различных заинтересованных пространственно распределенных ПТС, обеспечивая им поддержку принятия важных решений. ГИСУ совместно с системой мониторинга должна быть ориентирована на решение следующих задач: добывание, сбор и обработка информации о внешней и внутренней среде ПТС; формирование пространственной модели объекта управления и наглядное ее представление; оценка динамики процессов развития; прогноз и оценка рисков развития обстановки; разработка вариантов управленческих решений; организация контроля исполнения решений.

Одним из перспективных направлений применения распределенных геоинформационных систем является создание мобильных ГИС. В рамках создания каждой из реализации такой ГИС выполняются работы по сбору и актуализации динамически изменчивых пространственных данных. Для достижения заданной точности определения положения объектов управления, обеспечения актуальности данных, создавать и модифицировать пространственные данные необходимо непосредственно на объектах. Типизацию геоинформационной системы управления проведем с двух точек зрения – функциональной и структурной. Типовая структура ГИСУ включает, как показано на рисунке 35:

- базу данных (с системой управления - СУБД);

- базу знаний (с системой управления - СУБЗ);
- систему управления ГИС в целом с выходом на соответствующий интерфейс (глобальная система управления), согласованный с особенностями пользователя;
- систему мониторинга функционирования ПТС.



Рисунок 35. Типовая структура геоинформационной системы управления

4.3 Практические рекомендации по применению разработанных моделей и методики в геоинформационной системе управления для обеспечения безопасности морских объектов на замкнутой акватории и их апробация

Особую роль в пространственном распределении параметров природно-технической среды играет система прогнозирования будущего состояния системы. Прогнозирование состояния волновой поверхности акватории осуществляется с применением разработанной гидродинамической модели. Производится расчет и прогнозирование по средствам гидродинамического моделирования параметров ветрового волнения в зависимости от задания гидрометеорологических параметров (как правило, скорость и направление ветра). Гидрометеорологические параметры импортируются из базы данных или ручным вводом непосредственно в ИС с дискретностью 3 часа. Данная дискретность исходных данных связана с требованиями оперативного гидрометеорологического обслуживания. Результаты моделирования могут иметь графическое или картографическое представление в зависимости от потребностей пользователя.

Для прогнозирования волновых параметров требуется также задать топографию акватории. Для этого используется файл формата .dat, расположенный в поддиректории IN. Вывод информации осуществляется путем записи файла формата .dat и .grid в поддиректорию OUT. Название выводимого файла состоит из сокращенного обозначения выводимого параметра с информацией о времени, шаг дискретизации записи может задаваться пользователем, пример названия выводимого файла о данных уровня морской

поверхности при $t=1000$ секунд имеет вид lev_1000.dat в поддиректорию OUT. Полученные результаты могут служить основой создания базы знаний.

При отсутствии регулярных метеорологических данных или иных причин отсутствия поступающих исходных данных использование модели возможно при условии возможного ухудшения качества прогноза параметров ветрового волнения. При оперативной работе (составление краткосрочных прогнозов) результаты прогноза соответствуют требованиям морских гидрологических прогнозов и считаются оправдавшимися до тех пор, пока расхождение прогнозируемых и фактических данных не составит более 30%.

Методика определения вероятности оценки риска на основе разработанной инновационной двухпараметрической вероятностной модели определения времени ожидания наступления опасного явления при известных начальных значениях геоданных, внедренная в систему управления ГИС с выходом на соответствующий интерфейс поможет ЛПР для принятия управленческих решений. Пользователем для оценки риска проводится стохастическое моделирование оценки риска превышения параметров волнения заданных критических значений. Результаты представляются в табличном виде, с указанием верхней и нижней границы вероятности наступления риска, времени наступления и продолжительности.

Процесс алгоритма обработки геоинформации при оценке риска в следствии воздействия опасного явления на замкнутой прибрежной акватории представлен на рис.36.

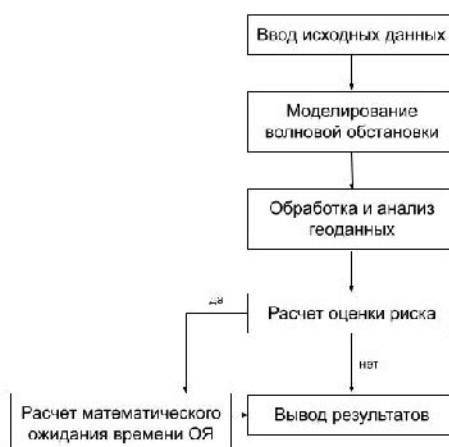


Рисунок36. Алгоритм организации обработки геоданных

Выходная продукция итогового прогноза оценки риска включает:

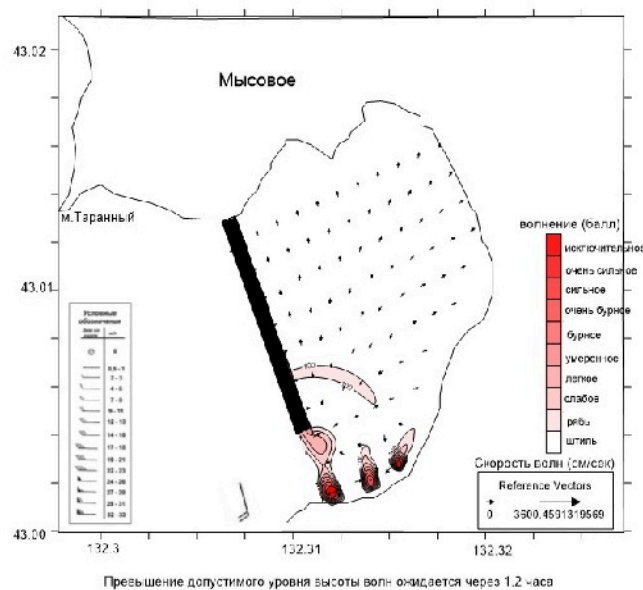
- автоматически составленный текст информационного сообщения о результатах возникновения опасного явления (возможность и время превышения характеристик

ветрового волнения критических отметок, сведения об ожидаемой высоте, скорости, амплитуде и периоде ветрового волнения);

- карту акватории с визуализацией уровня риска с цветовой шкалой градации уровня риска. Уровень риска определяется исходя из руководящих документов для исследуемого района, руководства по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности, руководящих документов Росгидромета.

Апробация проводилась по полученным и обработанным геоданным для порта бухта Пяти Охотников. Прогнозируемые параметры среды – высота, амплитуда и скорость ветрового волнения, временной интервал – октябрь 2020 года с дискретностью 3 часа, за этот период были произведены расчеты для ветра различной силы от штиля до сильного шторма. На рис.18 представлен итоговый результат при наиболее часто встречающихся характеристиках ветра: направление ветра – южное, скорость ветра – 10 м/сек. Для оценки риска была задана предельная высота волны - 1.5м, период – 20 секунд, предельная скорость волны – 5м/сек. Заблаговременность прогноза выбрана 180 минут. Результаты расчетов показали, что наиболее опасными зонами акватории является зона у открытой границы входа в порт. Высота волны здесь может достигать почти 2 м. На рис.37 представлена волновая обстановка на момент времени спустя 1.2 часа, что говорит о возможности принятия управленческих решений за данное время.

Испытания разработанных моделей и методики применительно к ГИС показали, что возможно получение прогнозов хорошего качества при условии соблюдения основных ограничений модели.



Выводы по главе

В четвертой главе обозначены основные функциональные задачи и свойства геоинформационной системы управления, разработаны практические рекомендации по применению разработанных новых моделей и методики в геоинформационной системе управления кораблей для обеспечения безопасности в замкнутых прибрежных акваториях.

Были рассмотрены функциональные возможности геоинформационной системы управления.

Рассмотрена типовая структура геоинформационной системы управления. Подробно изучены требования к ГИСУ. Разработаны практические рекомендации по применению разработанных моделей и методики в геоинформационной системе управления на основе типовой структуры ГИСУ, показано место и особенности разработанных моделей и методики в ГИС, способы получения информации о выделенных природных процессах, формы представления результатов оценки опасного ветрового волнения пользователю, ограничения и оценки точности прогнозов.

На заключительном этапе проходит тестирование геоинформационной системы на основе геоданных, полученных в результате реализации алгоритмов, рассмотренных во второй и третьей главе.

Апробация проведена по данным ранее представленным, в результате чего на картографическом слое происходит воспроизведение районов с различными цветовыми градациями, соответствующими уровню риска. Рядом с картой выводится краткая пояснительная записка для пользователя.

Таким образом, сформированные практические рекомендации для замкнутых прибрежных акваторий позволяют потребителям (лицам принимающим решения) получить сведения для эффективного и безопасного управления морскими объектами на замкнутой акватории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения актуальной научной задачи разработки и совершенствования моделей и методик геоинформационного обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях разработаны **новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны**, включающие:

1. *Требования к методическому аппарату информационного обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях*, которые *отличаются* тем, что описываются на результатах анализа условий информационного обеспечения безопасности морских объектов геоданными в замкнутых прибрежных акваториях, что *позволяет* разрабатывать компоненты методического аппарата обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях.

Были представлены критерии, влияющие на развитие морского транспортного комплекса и прибрежной инфраструктуры морей России. Выявлено направление развития в сторону цифровизации и внедрение современных технологий, что говорит о необходимости внедрения геоинформационных технологий даже на акваториях мелкого масштаба. Метод моделирования обусловлен отсутствием регулярных измерений гидрометеорологических и гидрологических данных, а так же в связи с сокращением количества постов наблюдений. В результате анализа гидрометеорологических факторов выявлены факторы, наиболее влияющие на возможности возникновения риска на замкнутых прибрежных акваториях и возможные риски для морских объектов.

2. *Модель прогнозирования ветрового волнения в замкнутых прибрежных акваториях*, которая *отличается* тем, что в ней впервые представлена двухмерная нестационарная модель ветрового волнения на основе уравнений гидродинамики с допущениями для замкнутой прибрежной акватории, что *позволит* обеспечить точность краткосрочных прогнозов до 95%. Модель апробирована на примере реального объекта порта бухта Пяти Охотников, где ранее подобные исследования моделирования волнения не проводились. Полученные данные верифицированы по натурным наблюдениям, оценка показала адекватность модели данным натурных наблюдений и не выход ошибки за пределы 5%. Результаты моделирования представляются в виде пространственно-временной изменчивости параметров ветрового волнения (значительных высот волнения, направления скорости распространения волн, амплитуды волн). Проведен анализ волновой обстановки и выявлены особенности пространственно-временной изменчивости

параметров ветрового волнения за исследуемый временной период на исследуемой акватории.

3. **Методика оценки вероятности риска**, которая *отличается* тем, что строится на основе геоданных с использованием двухпараметрической вероятностной модели, которая впервые реализована на основе однопараметрической вероятностной модели, и определением времени ожидания наступления опасного явления при известных начальных значениях, что *позволяет* повысить достоверность оценки риска при влиянии волновых процессов на морские объекты на замкнутых мелководных акваториях с точностью до 90%.

Проводится анализ данных, включая расчет описательных статистик, проверка стационарности, эргодичности и соответствие нормальному закону распределения, проводится оценка и сглаживание трендовой компоненты, рассчитывается автокорреляционная и взаимокорреляционная функции. Апробация показала, что оценка верхней и нижней границы вероятности наступления риска при известных начальных условиях дают ошибку в пределах 10% на исследуемом интервале времени при заданной глубине прогноза.

4. **Практические рекомендации по применению полученных моделей и методики в геоинформационной системе управления морскими объектами в интересах обеспечения безопасности деятельности морского транспортного комплекса на замкнутых прибрежных акваториях**, которые *отличаются* тем, что основываются на разработанных моделях и методике обеспечения безопасности морских объектов на замкнутой прибрежной акватории, что *позволит* реализовать геопространственное представление информации для поддержки принятия решений для обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях.

В результате была рассмотрена типовая структура ГИС, показано место и особенности разработанных моделей и методики в ГИС, способы получения информации о выделенных природных процессах, формы представления результатов оценки опасного ветрового волнения пользователю, ограничения и оценки точности прогнозов.

Основное положение заключается в совмещении двух видов моделей, которое несет в себе множество преимуществ. Их корректное совмещение требует дальнейшего детального изучения и более объемного тестирования и развития обеих моделей, включением дополнительных условий.

Не смотря на ряд недостатков, эксперименты показали достаточно хорошие результаты для оперативного обслуживания и имеют место для дальнейшего развития.

Основные направления дальнейших исследований заключаются в увеличении числа гидрометеорологических параметров модели и адаптация моделей и методики на других акваториях, разработка практических рекомендаций по применению полученных результатов специалистами, обеспечивающими навигационное и гидрометеорологическое сопровождение морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях с использованием геоинформационных систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакланов П.Я., Романов М.Т. Геополитические факторы долгосрочного развития восточных арктических районов России// Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2015. №1. с.95-99
2. Заостровских Е.А. Проблемы и перспективы развития пунктов пропуска Дальнего Востока России// Регионалистика. 2014. Т.1. №3. с.69-75
3. Заостровских Е.А. Формирование зон развития в портовом регионе: теоретические аспекты// Ученые записки . Выпуск 10. Теоретические и прикладные аспекты исследований региональной экономики/ под ред. О.М.Прокапало. Хабаровск:ИЭИ ДВО РАН, 2018. с.96-106
4. Н.М.Груздев, Безопасность плавания, учебник, 2002г
5. Крылов Ю. М. и др. Ветер, волны и морские порты. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 264 с.
6. Михайличенко В.В. Северный морской путь – национальная транспортная магистраль России в Арктике// Российский Север: модернизация и развитие. М.: Центр стратегического партнерства, 2012. с.350-353
7. Лукьянович Н.В. Морской транспорт в мировой экономике. М.: Моркнига, 2009
8. Бабурин О.Н., Грасс Е.Ю. Современное состояние и проблемы морского транспорта России. Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 16(205), 2013, с.52-57
9. Доклад Министерства Обороны. Москва, 2016
10. Жусунов С.Д. Состояние и перспективы развития морских портов России. Транспорт Российской Федерации, №6, 2011, с. 36-39
11. Распоряжение Правительства РФ от 28.05.2007 №673-р
12. Селин В.С. Современные тенденции и проблемы развития арктических морских грузопотоков// Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз, 2015. №4. с.60-73
13. Попов В.В., Черныш А.Я.Об эволюции теории и практики единого информационного пространства и первоочередных мерах по его развитию в интересах повышения эффективности управления национальной обороной Российской Федерации// Военная мысль. 2019. №9. с.53
14. Королева Е.А., Черепанов И.В., Филатов Е.В. Цифровизация морских портов// Морские порты. 2020. №4
15. Руководство по морскому метеорологическому обслуживанию, ВМО - №4711, изд.2018г.
16. Руководство по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2009
17. Серова Н.А., Серова В.А. Основные тенденции развития транспортной инфраструктуры российской Арктики// Арктика и Север. 2019. №36. с.42-56
18. Бразовская Я.Е. Правовое регулирование деятельности морских портов: Учебное пособие. СПб.: Издательство ГУМРФ им.адм.С.О.Макарова. 2017. с.6
19. Шохонина Ю.Б., Мишина Л.А. Правовое регулирование морских портов в российском законодательстве// Современные проблемы использования потенциала морских акваторий и прибрежных зон. Материалы XI Международной научной конференции. Часть 2. М. 2015. С.439
20. Морская доктрина РФ на период до 2020г. (Утв. Указом Президента РФ от 27.07.2001 №1387)// Сборник документов МО РФ и ВМФ, СПб. 2002
21. Распоряжение Правительства «Об утверждении Транспортной стратегии РФ на период до 2030г.» от 22 ноября 2008г. «1734-р. (ред. От 12.05.2018))

22. Указ Президента РФ от 20 июля 2017 г. № 327 “Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2030 года
23. Приказ Главнокомандующего Военно-Морским Флотом от 01.09.2001 № 350
24. Кондратов Н.А. Особенности развития транспортной инфраструктуры в Арктической зоне России // Географический вестник. 2017. №4 (43) с.68-80
25. Воронина, Е.П. Транспортное освоение арктических территорий: стратегические задачи и анализ рисков // Арктика: экология и экономика. 2017. №3 (27). С.61-68
26. РД 52.88.699-2008 "Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений"
27. Лаппо Д. Д., Стрекалов С. С., Завьялов В. К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. — Л.: Изд. ВНИИГ, 1990. — 432 с
28. СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82, М, Госстрой РФ, 2012, 116 с
29. Виноградов Р.А., Андреев О.М. Учет гидрометеорологических условий при выборе компоновки грузовых терминалов и портов в российской Арктике// Neftegaz.ru. 2017. №11
30. СП 11-114-2004 «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений», М, Госстрой РФ, 2004, 91 с.
31. Еремина Т.Р., Софьина Е.В., Дайлидиене И. Оперативная океанография. Учебное пособие. - СПб., изд.РГГМУ, 2014. – 99с.
32. Зеленко А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения с Мировом океане и морях России// Труды государственного океанографического института. 2014. Т.215. с.90-101
33. Saetra O., Bidlot J.-R. Potential benefits of using probabilistic forecasts for waves and marine winds based on the ECMWF ensemble prediction system // Weather and Forecasting. – 2004. – Vol. 19. – No 4. – P. 673–689
34. Давидан И.Н, Давидан Г.И., Дымов В.И, Пасечник Т.А. Модифицированная версия спектрально-параметрической модели и результаты ее верифицирования // Известия Рус. географ. об-ва. – 2010. – Т. 142. № 2. – С. 31–39
35. Заславский М.М., Красицкий В.П. О спектрах полностью развитого волнения в море конечной глубины // Известия РАН. ФАО. – 2001. – Т. 37. № 4. – С. 557–565
36. Заславский М.М., Красицкий В.П. О стационарных спектрах поверхностных гравитационных волн в море конечной глубины // Известия РАН. ФАО. – 2001. – Т.37. № 1. – С. 112–120
37. Tolman H.L. et al. Development and implementation of wind generated ocean surface models at NCEP // Weath. Forecasting. – 2002. – Т. 17. – P. 311–333
38. Tolman H.L. Numerics in wind wave models // Proceedings of a workshop held at ECMWF on Ocean Wave Forecasting, 2-4 July 2001. – 2002. – P. 5–14
39. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L. H. A third-generation wave model for coastal regions// Part 1. Model description and validation // J. Geoph. Res. – Vol. 104 (C4). – P. 7667–7681.
40. SWAN. User manual SWAN Cycle III, version 40.41. Delft University of Technology. – Desember 2004. – <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>
41. Давидан И.Н, Давидан Г.И. Сравнительная характеристика современных математических моделей ветрового волнения и их применение для решения прикладных задач // Труды ГОИН. – 2005. – Вып. 209. – С. 107–128

42. Дымов В.И. и др. Сопоставление результатов расчетов по современным моделям ветрового волнения с данными натурных измерений // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 7. – С. 87–94
43. Нестеров Е.С., Абузьяров З.К., Григорьева Г.А. и др. Оценка точности расчета смешанного волнения в океане по современным численным моделям // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 10. – С. 44–52
44. Полников В.Г., Дымов В.И., Абузьяров З.К. и др. Тестирование и верификация модели ветрового волнения с оптимизированной функцией источника // Океанология. – 2008. – Т. 48. – № 1. – С. 11–18.
45. Bidlot J.R., Holt M.W. Verification of operational global and regional wave forecasting systems against measurement from moored buoys // JCOMM Technical Report 30. – 2006. – WMO/TD-No 1333. – 11 p
46. Bidlot J.R., Holmes D.J., Wittmann P.A., Lalbeharry H.S. Intercomparison of the performance of operational ocean wave forecasting systems with buoy data // Wea. Forecasting. – 2002. – Vol. 17. – P. 287–310
47. Струков Б.С., Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник №40. Новые технологии, модели и методы гидродинамических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. 2013. с.64-79
48. Шамраев Ю.И., Шишкина Л.А. Океанология. – Л.: Гидрометеониздат, 1980. – 378с.
49. Доронин Ю.П. Динамика океана. – Л.: Гидрометеониздат, 1980. – 304 с.
50. Численные методы решения задач динамики // ред. Дмитриевой-Аппаго Л.Р., Руховцева Л.В., Шнеерова Б.Е. Гидрометеорологическое издательство Ленинград. 1968. – 367с.
51. Царев В.А. Влияние штормового волнения на рельеф мелководной области курортного района Санкт-Петербурга // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2012. №24. с.83-88
52. Царев В.А., Мовчан Е.В., Удодов А.И. Особенности ветровых течений в Геленджикской бухте // Материалы итоговой сессии Ученого совета. Российский Государственный Гидрометеорологический Университет. 2004. с.65-66
53. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в морях и океанах // ред. Нестерова Е.С.-М. 2013. – 367с.
54. Шевченко Г.В., Горбунов А.О., Королев П.Ю. Гидродинамические и геоморфологические условия в районе строительства «Порта «Вера» (Уссурийский залив) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т.10, №2. с.49-62
55. Малинин В.Н., Гордеева С.М. О современных изменениях глобальной температуры воздуха // Глобальный экологический кризис: мифы и реальность. 2015. с.215-221
56. Improving Climate Risk Management at Local Level – Techniques, Case Studies, Good Practices and Guidance for World Meteorological Organization Members (Chapter 21) in a book by InTech: Risk Management – Current Issues and challenges (Edited by Nerija Banaitiene, ISBN 978-953-51-0747-7, 584 p, 2012
57. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Тома I–VI, VIII–X. Вып.1. Гидрометеорологические условия. Гидрометеониздат, 1989–1991
58. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Тома I–VI, VIII–X. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Гидрометеониздат, 1989–1991
59. Guide to the Applications of marine Climatology. WMO-№ 781, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1994
60. Poloczanska E.S., Hoegh-Guldberg O., Cheung M., Pörtner H.-O., Burrows M., 2014: Cross-chapter box on observed global responses of marine biogeography, abundance, and phenology to climate change. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and

- Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 123–127
61. РД 03-626-03. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнического сооружения (утв. приказом МЧС РФ и Госгортехнадзора РФ от 15 августа 2003 г. № 482/175а) (согл. письмом Минэкономразвития РФ от 14 марта 2003 г. № МЦ-234/23)
 62. Martínez R., Hemming D., Malone L. Improving Climate Risk Management at Local Level – Techniques, Case Studies, Good Practices and Guidance for World Meteorological Organization Members (Chapter 21). InTech: Risk Management – Current Issues and challenges (Edited by Nerija Banaitiene, 584 p., 12 September 2012)
 63. O'Neill B., Ermoliev Y., Ermolieva T. Endogenous risks and learning in climate change decision analysis // Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. 2006 Vol. 581 P. 283–300
 64. Tong S., Confalonieri U., Ebi K., Olsen J. Managing and Mitigating the Health Risks of Climate Change: Calling for Evidence-Informed Policy and Action // Environmental Health Perspectives. 2016 Vol. 124, Is. 10 P. 176–179.
 65. Butler M.P., Reed P.M., Fisher-Vanden K., Keller K., Wagener T. Inaction and climate stabilization uncertainties lead to severe economic risks // Climatic Change. 2014 Vol. 127, Is. 3-4. P. 463–474
 66. Giles A.R., Stadig G.S., Strachan S.M., Doucette M. Adaptation to aquatic risks due to climate change in Pangnirtung, Nunavut // Arctic. 2013 Vol. 66, Is. 2 P. 207–217
 67. Botzen W.J.W., Van Den Bergh J.C.J.M. Managing natural disaster risks in a changing climate // Environmental Hazards. 2009 Vol. 8, Is. 3 P. 209–225
 68. Яковлева Е.Н. Уточнение категориального аппарата методологии управления природно-климатическими рисками в России // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2018 Т. 17 № 2 С. 283—309
 69. Яковлева Е.Н., Яшалова Н.Н., Рубан Д.А., Васильцов В.С. Методические подходы к оценке природно-климатических рисков в целях устойчивости развития государства // Ученые записки РГГМУ 2018 №52 С.120-137
 70. Салль М.А. Погодно-климатические риски как объект управления // Труды ГГО. 2014 Вып. 575С. 183—203
 71. O'Neill B., Ermoliev Y., Ermolieva T. Endogenous risks and learning in climate change decision analysis // Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. 2006 V. 581 P. 283—300
 72. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник, - СПб.: изд. РГГМУ, 2008. - 408 с
 73. Трегуб А.В., Трегуб И.В. Методика прогнозирования показателей стохастических экономических систем // Лесной вестник. 2008. №2. с.144-150
 74. Кожевников А.С. Программное обеспечение для статистического моделирования и анализа случайных процессов со скачками, описывающих динамику цен акций предприятий авиационной отрасли // Труды МАИ. 2012. №59. с.230-242
 75. Музалевский А.А., Карлин Л.Н. Экологические риски: теория и практика. - СПб.: РГГМУ, ВВМ, 2011. - 448 с
 76. Истомин Е.П., Слесарева Л.С. Анализ экономических аспектов прогнозирования состояния водной среды в прибрежных зонах. Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право // Сб. науч. тр., вып. 7(7). - СПб.: Андреевский издат. дом, 2010

77. Истомин Е.П., Слесарева Л.С. Применение стохастических моделей для прогнозирования рисков в геосистемах// Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. №17. с.145-149
78. Истомин Е.П., Соколов А.Г., Зоринова Е.М., Слесарева Л.С. Геоинформационные аспекты управления рисками устойчивого развития приморской рекреационной территории// Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. №9 (146). с.233-239
79. Истомин Е.П., Фокичева А.А., Коршунов А.А., Слесарева Л.С. Управление гидрометеорологическими рисками в социально-экономических системах//Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. №44. с.219-224
80. Карташов Г.Д., Шведова И.Г. Об одной задаче отбора изделий // Технич. кибернетика, 1983, № 3, с. 70-75
81. Истомин Е.П. Приближенная оценка вероятности пребывания случайного процесса в заданной области // Тр. МВТУ. Планирование и оценка результатов экспериментов, вып. 1, 1986
82. Истомин Е.П., Колбина О.Н., Петров Я.А., Слесарева Л.С. Информационная система прогноза рисков наводнений в Санкт-Петербурге// Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2013. №1(10). с.33-37
83. Разработка основ методологии геоинформационного управления объектами и территориями: монография / Соколов А.Г., Бескид П.П., и др. под общ ред. Истомина Е.П.- СПб, Изд. РГГМУ, 2016.- 250 с.
84. ГОСТ Р 12.0.006 — 2002 Система стандартов безопасности труда. Общие требования к системе управления охраной труда в организации
85. ГОСТ Р 52571 – 2006 Геоинформационные системы. Основные понятия и определения
86. Соколов А.Г., Истомин Е.П., Кирсанов С.А., Колбина О.Н. Феномен геоинформационного управления и принципы его реализации //Вестник СПбГУ. Сер.7. 2014. Вып. 4 с. 180-188
87. «Разработка основ методологии геоинформационного управления объектами и территориями» /отчет о НИР, РГГМУ, 2014 г., № 01201459336
88. Соколов А.Г., Истомин Е.П. и др. Феномен геоинформационного управления и принципы его реализации // – Вестник СПбГУ, серия 7, выпуск 4, СПбГУ, 2014
89. Соколов А.Г., Истомин Е.П., Попов Н.Н., Бурлов В.Г., Абрамов В.М.« Development of technology of process control of environmental safety on the basis of geoinformation systems », научная статья.- 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, www.sgem.org, SGEM2017 Conference Proceedings, 29 June - 5 July, 2017, Albena, BULGARIA (Scopus, WS)
90. Алиев Ф.К., Курочкин В.П., Маслеников О.В., Тляшев О.М. Об информатизации Вооруженных Сил Российской Федерации// Военная мысль. 2019. №12. с.66

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты апробации модели прогнозирования ветрового волнения

Результаты апробации параметра «высота ветровой волнь»

Дата	Метеорологическая ситуация	Высота волн, м	
		По наблюдениям	По прогнозу
13.05.2021	Ветер 1м/с южного направления	0,5	0,5-0,75
01.06.2021	Умеренный ветер направления западо-юго-запад	0,5-1,0	0,5-1,0
24.08.2021	Штормовой ветер юго-западного направления	1,25-1,5	1,0-2,0

Результаты апробации параметра «скорость ветровой волнь»

Дата	Метеорологическая ситуация	Скорость волн, м/с	
		По наблюдениям	По прогнозу
13.05.2021	Ветер 1м/с южного направления	0-1м/с	0-1,5м/с
01.06.2021	Умеренный ветер направления западо-юго-запад	1-5м/с	0-10м/с
24.08.2021	Штормовой ветер юго-западного направления	5-10м/с	5-10м/с

Оценка успешности прогнозов высот волн за период оперативных испытаний с марта по ноябрь 2021г.

	Анализ	Заблаговременность (час)				
		3	6	9	12	24
Среднее	1,45	1,44	1,48	1,52	1,47	1.49
Стандартное отклонение	1,01	1.01	1.01	1.01	1.0	0.8

Максимальное значение	2,7	2.9	3.6	3.1	3.4	3.4
Среднеквадратическая ошибка		0.78	0.8	0.79	0.79	0.78
Коэффициент корреляции		0.85	0.75	0.74	0.74	0.73
S/σ		0.7	0.71	0.71	0.7	0.72
Обеспеченность (%)		95.1	91.0	90.7	90.5	90.0