

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

На правах рукописи

Мартын Ирина Андреевна

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

Специальность 25.00.35 – Геоинформатика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург, 2022

Работа выполнена на кафедре прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

Научный руководитель: **Истомин Евгений Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный консультант: **Михеев Валерий Леонидович**, кандидат юридических наук, доцент, ректор ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Официальные оппоненты: **Кляхин Валерий Николаевич**, доктор военных (кандидат технических) наук, профессор, старший научный сотрудник НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Меламед Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М.Кирова»

Ведущая организация: АО «СПИИРАН – Научно-техническое Бюро Высоких Технологий» (АО «СПИИРАН-НТБВТ")

Защита диссертации состоится «06» октября 2022 года в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.197.03 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр.Малоохтинский, дом 98, ауд._____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.197.03
к.воен.н.,доцент

Соколов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Значительные геополитические изменения в последние годы в корне изменили и изменяют политическую и экономическую ситуацию в Российской Федерации. Россия всесторонне укрепляет свое влияние на морском пространстве, как следствие происходит увеличение морских перевозок, морских переходов, растет объем мореплавания. 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.

Проводимые в последнее время разработки и проводимые работы требуют серьезного научного, экологического, технического и гидрометеорологического обеспечения. Анализ показал, что из общей суммы ущерба, наносимого неблагоприятными погодными условиями, на долю морской деятельности приходится 68%. При этом ущерб, который можно предотвратить, используя гидрометеорологическую информацию, по экспертным оценкам составляет до 20% от суммы ущерба. Таким образом, эффективность использования гидрометеорологической информации выражается в экономии материальных средств в областях, где учитываются гидрометеорологические условия при планировании и организации деятельности морских динамических объектов.

Для обеспечения эффективности решения различного типа задач и управленческих решений, разработке рекомендаций по безопасной эксплуатации, гидрометеорологической безопасности и защищенности морских объектов необходимо как можно точнее прогнозировать воздействие морской среды на морские объекты и территории, что требует постоянного мониторинга погодных-климатических условий, тенденции к изменению которых проявляются, особенно в арктическом регионе РФ. Данные мониторинга служат основой для получения оценок экстремальных свойств гидрометеорологических факторов при определении состояния окружающей среды и разработки сценариев деятельности на море, эксплуатации морских объектов, а так же при планировании строительства объектов прибрежной инфраструктуры. Безопасность движения транспорта и использования морских объектов на акватории является важным аспектом функционирования морских акваторий, для организации перевозок и планировании работы транспортных узлов и проведения морских операций. Безопасность плавания судов сложный, взаимосвязанный комплекс мероприятий, которые направлены на предотвращение навигационных аварий и сохранение живучести судна в повседневных условиях. Из этого следует, что проблемой функционирования навигационных служб флота в настоящее время является необходимость обеспечения более высокой автоматизации процесса, значительно устаревшие с конца 20 века. Это требует разработки специальных

подходов и методов, обеспечивающих работу навигационных служб, прежде всего, как системы обеспечения поддержки принятия решений.

Для обеспечения безопасности морских объектов при принятии управленческих решений важную роль играет гидрометеорологическая обстановка и возможное воздействие факторов внешней среды. Анализ гидрометеорологических факторов показал, что наибольшее влияние на безопасное функционирование на замкнутых прибрежных акватории, вносит ветровое волнение, при этом наиболее значимыми элементами ветрового волнения являются высота, скорость, амплитуда и период волн. В определении гидрометеорологических характеристик и их прогнозирования широко используются методы вычислительной гидродинамики, основанные на решении уравнений Навье-Стокса. Для разработки практических рекомендаций необходимо правильно моделировать динамическое поведение гидрометеорологических характеристик, что повысит оценку обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях, особенно в тех районах, где имеется существенный недостаток получения регулярной гидрометеорологической информацией, отмеченное на большей территории России и в условиях экстремальных погодных условий.

Под влиянием гидрометеорологических условий и неоднородности самих элементов ветрового волнения, их начального состояния и других факторов, интенсивность и характер изменчивости морской поверхности на замкнутой прибрежной акватории будет различной. Для рационального использования замкнутых прибрежных акваторий необходимо оценивать превышение допустимого уровня и скорости ветрового волнения в течение заданного временного интервала. Заранее известное время наступления события играет ключевую роль для принятия управленческих решений в интересах обеспечения безопасности деятельности морских объектов. Таким образом, **актуальной является научная задача разработки и совершенствования моделей и методик обеспечения безопасности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях.**

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 прибрежных 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.

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.

Научные 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.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.35 – «Геоинформатика» пунктам 1,3,6,7.

Практическая и научная значимость работы. Создана модель прогнозирования ветрового волнения в замкнутых прибрежных акваториях, которая представляет собой впервые реализованную двухмерную нестационарную модель, построенную на основе уравнений гидродинамики с характеристиками замкнутой прибрежной акватории, что позволит повысить точность краткосрочных прогнозов безопасных районов деятельности кораблей до 95%.

Создана двухпараметрическая вероятностная модель определения времени ожидания наступления опасного явления при известных начальных значениях геоданных, на основе которой разработана методика определения вероятности оценки риска принятия решений по обеспечению безопасности деятельности кораблей в замкнутых морских акваториях при влиянии волновых процессов на морские объекты на замкнутых мелководных акваториях, что позволит повысить точность прогнозов до 90%.

Разработаны практические рекомендации по применению полученных моделей и методики в геоинформационной системе управления морскими объектами в интересах обеспечения безопасности деятельности кораблей в замкнутых прибрежных акваториях, основанные на разработанных моделях и методике обеспечения безопасности на замкнутых прибрежных акваториях, что позволит реализовать геопространственное представление информации для поддержки принятия решений для обеспечения безопасности кораблей на замкнутых прибрежных акваториях.

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 работ.

Получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021619840 «Геоинформационная система моделирования волновых процессов в закрытой акватории (бухте)», №2021619836 «Применение геоинформационных систем управления навигацией в Арктическом регионе».

Достоверность полученных результатов. Разработанные модели тестировались путем проведения серии численных экспериментов для случаев различной силой и направлением ветра на замкнутой прибрежной акватории с учетом рельефа дна. Полученные результаты численного моделирования сопоставлялись с данными натуральных наблюдений.

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 научнопрактической конференция «Актуальные проблемы развития и эксплуатации ракетноартиллерийского, 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. Научные результаты исследования опубликованы в 14 статьях научно-технических изданиях, в том числе 2 из рекомендованного перечня ВАК РФ и 12 публикаций в изданиях, индексируемые в международных базах данных (Scopus), 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обозначена актуальность научной работы, определены объект, предмет, цели и задачи исследования, представлена теоретическая и практическая ценность работы, приведено краткое содержание диссертации по главам, перечислены основные научные результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматривается анализ деятельности морского транспортного комплекса России, а так же их гидрометеорологической обеспеченности, на основе чего разрабатываются требования к методическому аппарату информационного обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях. Дано описание замкнутым прибрежным акваториям, исследованы и описаны состояние и направление развития прибрежных регионов России, в том числе в области гидрометеорологического обеспечения, морского транспорта и их взаимодействия. Описаны гидрометеорологические параметры и их влияние на безопасность функционирования деятельности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях акваториях, и возникающие в результате их негативного влияния риски.

В результате анализа перспектив развития морских портов Российской Федерации выявлено 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.). Это позволит создать абсолютно новую логистику и обеспечить эффективное управление морскими территориями. Стоит учитывать, что выбор и процесс внедрения цифровых решений в морскую 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.

Рекомендации для замкнутых прибрежных акваторий, в следствии влияния гидрометеорологических параметров сводятся к защите акватории с использованием многофункциональных защитных сооружений, при необходимости регулировать очищение акватории от льда, минимизировать площадь замкнутой прибрежной акватории 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 и замкнутых акваторий специального назначения от устьев рек.

В исследовании рассмотрено влияние гидрометеорологических и климатических факторов на деятельность морских объектов, перечислены особенности влияния гидрометеорологических условий на морские объекты. 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.

Влияние перечисленных гидрометеорологических параметров, выделенные как наиболее значимые при принятии управленческих решений для безопасности судов на замкнутой прибрежной акватории, и их возможное влияние на морские объекты рассмотрены более подробно. Лидирующие позиции среди перечисленных факторов занимает ветровое волнение.

Определено, что гидрометеорологические и климатические факторы имеют значительное влияние на геополитическую обстановку, национальную безопасность и условия функционирования морских объектов. Акцентировано внимание на важности определения гидрометеорологической обстановки в удаленных и труднодоступных регионах Российской Федерации.

На основе изучения существующих информационных систем и в частности ГИС, обоснованы требования к геоинформационным системам обеспечения безопасности на замкнутой прибрежной акватории на основе многопараметрического анализа характеристик геоинформационных систем. Основные требования и функциональные возможности, предъявляемые к

геоинформационным системам обеспечения безопасности деятельности на замкнутой прибрежной акватории, исходя из поставленных задач и цели диссертации:

-прогностическая оценка элементов ветрового волнения на замкнутой прибрежной акватории

-геомоделирование, включая составление прогностических карт с целью обеспечения безопасности морских объектов

-оценка поведения ГИС, анализ и обработка с помощью методического аппарата вносимых геоданных (оперативные метеоданные)

-синхронизация ГИС с распределенными базами данных и банками геоданных

-гибкая многопараметрическая настройка компонентов ГИС

-работа с ГИС в автономном режиме (без подключения к сети Интернет)

-экспорт обработанных геоданных (прогностических оценок) волновой обстановки в графическом и табличном виде

-понятный графический интерфейс

-не предъявлять к пользователю высокого уровня знаний в области гидрометеорологических процессов

Проведен анализ на выявление ГИС соответствующих поставленным требованиям. Результаты анализа показывают, что в настоящее время не существует геоинформационных систем обеспечения безопасности на замкнутых прибрежных акваториях с использованием прогностических геоданных. Исходя из изложенного, ставится научная задача о необходимости формирования модели ГИС обеспечения безопасности на замкнутой прибрежной акватории специального назначения.

Во **второй главе** проводится анализ существующих методов и моделей расчета и прогнозирования ветрового волнения с указанием параметров моделей, их преимуществ и недостатков.

В результате анализа выделены преимущества использования методов моделирования в гидродинамических задачах, в том числе при решении задач взаимосвязи океан-атмосфера.

Описаны основы волновой теории и изучены наиболее известные способы моделирования ветрового волнения, которые относятся к четырем группам:

1)спектральные дискретные

2)спектральные параметрические

3)интегральные параметрические

4)прочие (эмпирические, энергетические, монохроматические и др.).

В последнее время эксплуатируется большое количество численных гидродинамических моделей, воспроизводящих процессы генерации, развития и распространения ветровых волн в широком пространственно-временном

масштабе. Такие модели являются не только средством для изучения волновых процессов, но и служат инструментом прогнозирования полей волнения с различной заблаговременностью.

Анализ различных источников литературы 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 система ветер-волны, волновой блок определяет реакцию поверхностного слоя на это воздействие.

Рассмотрены модели, используемые в России, а так же адаптации европейских моделей к морям России. Отмечается, что большинство из них реализованы или адаптированы для морских акваторий. Для замкнутых прибрежных акваторий необходимо использование метода вложенных сеток с улучшенным вертикальным разрешением в прибрежной зоне моря, что создает сложности для использования этих моделей в прибрежной акватории.

Качество моделей по расчету ветрового волнения в большой степени зависит от данных поля ветра. Из-за малого объема натуральных данных, исследовательских работ по оценке волновых моделей в прибрежных акваториях практически не опубликовано. Как указывалось выше для большинства моделей, используемых в России, требуется задание полей ветра, что требует большого числа регулярных наблюдений за ветровыми характеристиками. В условиях сокращения гидрометеорологических постов и не достаточностью данных дистанционного зондирования с сверхвысоким пространственным разрешением использование подобных моделей также становится затруднительным.

Таким образом, появляется задача в разработке новой модели прогнозирования ветрового волнения в замкнутых прибрежных акваториях.

Модель. В работе используется, разработанная автором, нестационарная двумерная гидростатическая модель распространения волнения на замкнутой прибрежной акватории, в среде разработки Borland Delphi 7. При разработке модели вводится допущение море конечной глубины, т.е. глубина моря сопоставляется с длиной волны, параметр $kH \approx 1$. Модель, содержит уравнения движения и неразрывности, в которых учитывается возможная негидростатичность динамики ветровых волн

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{dz}{dx}$$

$$\frac{dS}{dt} = -g \frac{dz}{dy}$$

$$\frac{du}{dx} + \frac{dS}{dy} = -\frac{k}{th(kh)} \frac{dz}{dt}$$

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 420x400 узлов. При аппроксимации производных по оси x прямо направленными разностями получается система уравнений.

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

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

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

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

В качестве входных данных используются: массив глубин в ячейках сеточной области, характеристики ветрового волнения (характеристики волнения задаются путем соответствующего выбора интенсивности и фазы фиктивного источника у жидкой границы). Расположение берегозащитных и иных гидротехнических сооружений учитываются путем задания в соответствующих узлах сетки нулевых значений в массиве глубин.

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

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

где U - вектор скорости; n - нормаль к боковой границе.

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

$$u = \frac{g}{c} z$$

где c - фазовая скорость.

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

Выходные данные имеют вид пространственно-временного распределения характеристик установившегося ветрового волнения (высота, скорость, амплитуда, период ветровых волн) на акватории при заданных начальных условиях. Пространственное распределение высоты, периода и амплитуды ветровых волн отображены послойной раскраской в пространстве выбранной области, описанной легендой, с использованием изолиний. Скорость и направление ветровых волн отображаются в виде векторов с соответствующей легендой. Полученные результаты могут использоваться для оценки риска наступления опасного явления в каждой

точке акватории в зависимости от гидрометеорологических параметров, а так же для исследовательского анализа акватории. Данные прогнозирования экстремальных характеристик волнения первого уровня информативности (высота, период, длина, направление распространения волнения и скорость распространения) позволят своевременно передавать на суда и другие хозяйственные объекты штормовые предупреждения и оповещения о месте и возникновении опасного волнения. Это в дальнейшем дает возможность принять своевременные меры по снижению рисков встречи с опасным гидрометеорологическим явлением и обеспечить безопасность и эффективность морских операций.

В качестве апробации гидродинамической модели разработана программа на ЭВМ в среде разработки Borland Delphi 7 на языке программирования Delphi для порта бухта Пяти Охотников Японского моря при штормовом ветре южного направления на период расчета 24 часа.. Исходные данные массива глубин были предоставлены непосредственно службами порта, как результат 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 мола и направление распространения волнового фронта (рис.1). Выбор метеорологических характеристик (параметров ветра) проводился с региональных баз Гидрометцентра России.

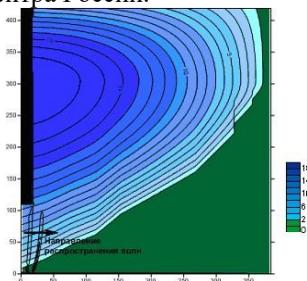
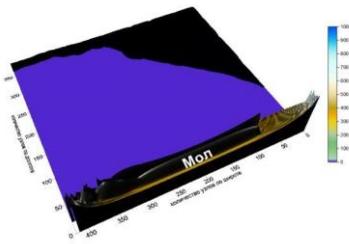
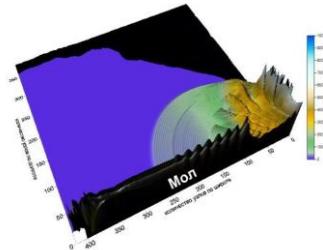


Рисунок 1 - Карта глубин бухты Пяти Охотников (м) с указанием расположения берегозащитного сооружения (мола) на акватории порта на карте и указанием направления распространения поступающих волн

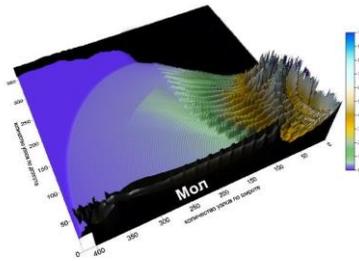
По расчетам под влиянием конфигурации рельефа дна и заданных характеристик ветра представлены карты пространственно-временного распределения высоты волн, скорости распространения волнения (рис.2-3) и максимальной амплитуды высоты поверхности.



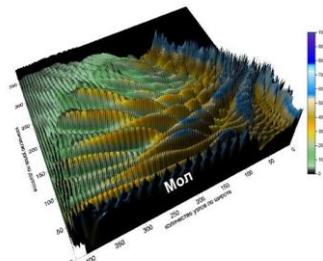
(a)



(б)

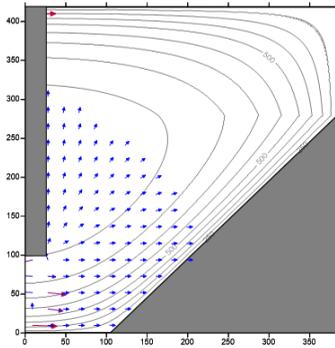


(в)

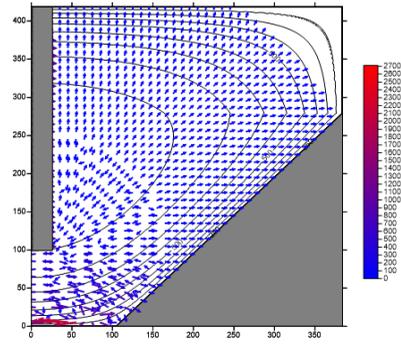


(г)

Рисунок 2 - Распределение возмущения уровня (мм) спустя 1 минуту (а), 6 минут(б), 12 минут(в), 30 минут(г)



(a)



(б)

Рисунок 3 - Скорости течений у поверхности ($см \cdot c^{-1}$) спустя 1 минуту (а), 6 минут(б)

Опыт использования модели показал, что она позволяет воспроизводить и прогнозировать основные особенности пространственно-временного 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. Верификация модели по натурным данным показала адекватность модели при уровне значимости 95%, что говорит о возможности практического применения данной модели, а полученный по модели характер динамических процессов может быть использован при дальнейшем освоении порта и оперативном гидрометеорологическом и геоинформационном 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.

Научная новизна модели заключается в том, что разработана двумерная нестационарная гидродинамическая модель прогнозирования параметров ветрового волнения с возможностью использования минимального количество входных данных с учетом топографии, на основе уравнений гидродинамики.

В **третьей главе** рассмотрены понятия и проведен анализ методик оценки риска в природных системах.

Анализ различных методик оценки риска деятельности морских объектов под влиянием природных и климатических систем показал отсутствие методик оценки риска на замкнутых прибрежных акваториях в зависимости от гидрометеорологических параметров. В результате разрабатывается методика оценки риска с возможностью расчета математического ожидания времени наступления опасного явления для замкнутой прибрежной акватории на основе двухпараметрической вероятностной модели при известных начальных значениях параметров.

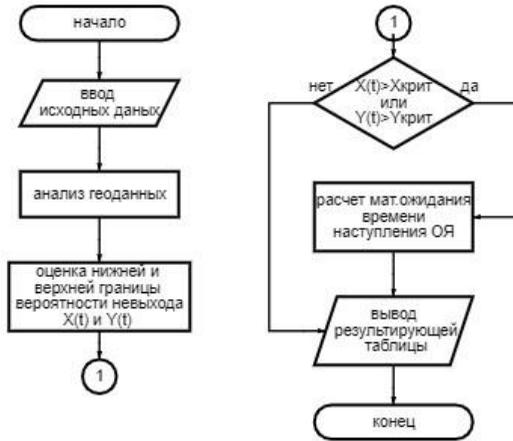


Рисунок 4 - Методика обеспечения безопасности деятельности морских объектов на замкнутых прибрежных акваториях

Представленная методика оценки вероятности риска в геосистемах включает следующие расчетные этапы:

1. Ввод исходных данных

Ввод исходных данных производится пользователем путем загрузки файла данных выбранных характеристик ветрового волнения на требуемый момент времени. Файлы формируются в результате геомоделирования, описанного во 2 Главе.

Пользователь задает глубину прогноза оценки риска и предельно допустимые значения характеристик ветрового волнения (как правило, высота и скорость волны).

2. Анализ геоданных включает:

- расчет первичных статистик
- расчет эмпирической функции распределения и ее соответствие нормальному закону распределения
- оценка трендовой компоненты
- проверка ряда на стационарность и эргодичность

3. Оценка верхней и нижней границы вероятности превышения параметром заданного уровня

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

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

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 акватории использовалось $a(t) \equiv 0, \beta(t) \equiv C$

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

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

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

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.

Апробация работы проводилась по данным, полученным в результате геомоделирования, описанного во 2 главе диссертационной работы.

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_{krit} и Y_{krit} , превышение которого говорит о наступлении опасного явления.

Будем считать, что опасное явление наступило, если высота волны или ее скорость превысили заданное предельное значение (рис.5).

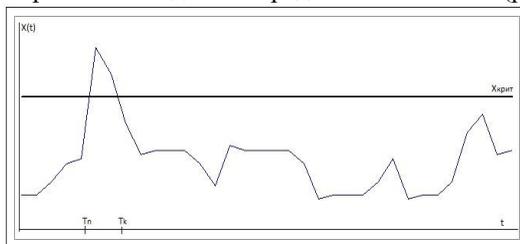


Рисунок 5 - Схема наступления опасного явления на примере высоты волн $X(t)$, где T_n – время начала ОЯ, T_k – время окончания ОЯ

Алгоритм разработанной стохастической модели оценки риска замкнутой прибрежной акватории при известных параметрах на начальный момент времени для выявления статистической закономерности процесса и оценки их вероятностных характеристик представлен на рис.6.

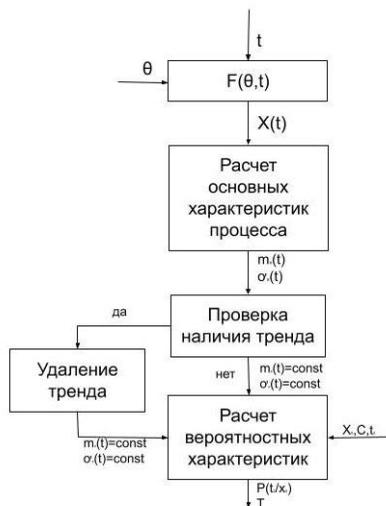


Рисунок 6 - Модель оценки риска на замкнутых прибрежных акваториях при известных параметрах на начальный момент времени

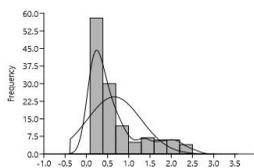
Входными данными для модели являются:

- 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:

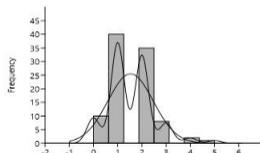
- $P(t_z / x_0)$ – вероятность не выхода характеристики $X(t)$ за заданный предел $X_{крит}$;
- T – среднее время опасного явления (математическое ожидание времени нахождения случайного процесса $X(t)$ выше предельного уровня).

В первом блоке происходит определение оценка вида случайного процесса $X(t)$. Апробация по данным высоты и скорости ветровых волн (длина реализации 128) показала, что по критерию Пирсона χ^2 при уровне значимости 5% распределение не соответствует нормальному закону распределения (рис.7-8). Ниже представлены примеры анализа геоданных в узле 200;200.



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 7 - 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	0,34317	7,0307
4,375	5	1	0,029314	5,4408

Рисунок 8 - Эмпирическая функция распределения скорости волн

Во втором блоке происходит расчет основных параметров процессов математическое ожидание, среднеквадратическое отклонения, дисперсии (рис.9) 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 9 - 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.10), 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 Пирсона χ^2 (рис.11-12).

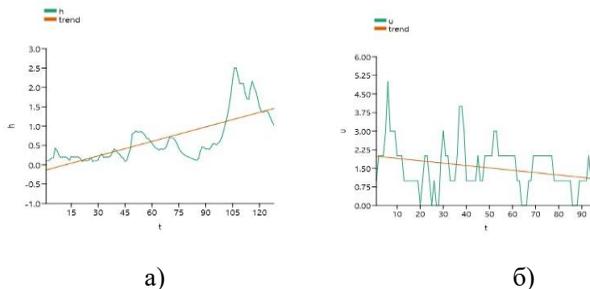


Рисунок 10 - Временная изменчивость высоты (а) и скорости (б) ветровых волн с аппроксимацией трендом

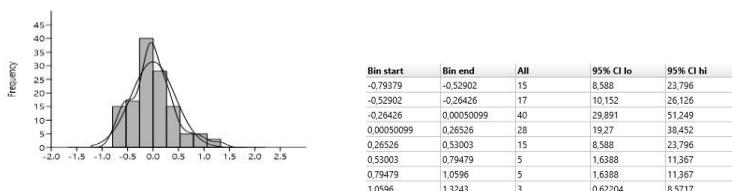


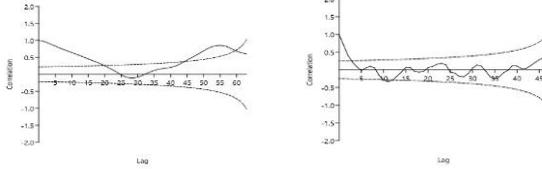
Рисунок 11 - Эмпирическая функция распределения высоты волн после удаления тренда



Рисунок 12 - 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.13).

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



а)

б)

Рисунок 13 - Автокорреляционная функция: а) высоты ветровых волн, б) скорости ветровых волн

В этом же блоке модели осуществляется оценка связи двух параметров, в результате чего был получен коэффициент корреляции 0.27, 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 $\rho \in (0,1)$.

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

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

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.

Для оценки рисков и времени наступления, а также длительности опасного явления можно использовать стохастическую модель, характеристиками которой являются одна реализация двух параметров (высоты и скорости ветровой волны). Верификация результатов показала не выход ошибки за пределы 10%.

Научная новизна методики заключается в подходе оценки риска и математического ожидания времени наступления опасного явления и его продолжительности при известных значениях параметра на начальный момент времени для двухмерного случайного процесса на основе геоданных моделирования.

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

Качественное решение задач управления невозможно без соответствующего информационного обеспечения управленческой деятельности, которое осуществляется на основе специальной системы мониторинга обстановки, которая должна обеспечить реализацию процессов добычания, сбора, передачи, обработки, представления информации и выдачи соответствующих рекомендаций. Важной особенностью современных систем мониторинга обстановки в природно-технических системах является их взаимодействие с ГИСУ в качестве пространственной информационной основы, обеспечивающей реализацию пространственно-временной интеграции данных.

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:

- добычание, 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 является создание мобильных ГИС. В рамках создания 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.

Типовая структура ГИСУ включает, как показано на рис.15 :

- 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.

Основные функции геоинформационной систему управления. Планирование развития систем в пространственном аспекте. Планирование как функция управления включает выбор целей, а также определение характера поведения (порядка действия) для их достижения. Фактически планирование – это проектирование желаемого будущего системы и выбор эффективных целей его достижения. Поэтому планирование следует рассматривать как процесс принятия решений о достижимых состояниях системы, путях и способах достижения рациональных состояний и основных критериях оценки результатов деятельности.

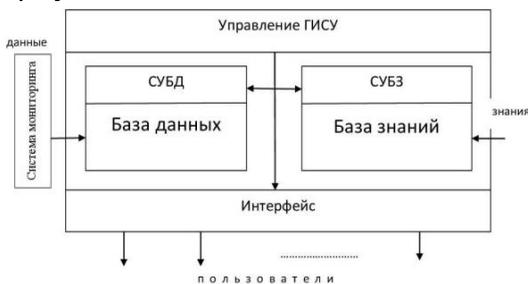


Рисунок 15 - Типовая структура геоинформационной системы управления

Требования к структуре и специфике данных ГИСУ. База геоданных является самой важной частью ГИСУ, поскольку она является основным источником сведений об управляемой системе, территории. От точности, полноты и корректности хранимой в ней информации зависит результат работы всей ГИСУ и эффективности принимаемых ЛПР решений.

Для обеспечения ГИСУ предлагается использовать специально созданную для этих целей базу географических данных, включающую метеорологическую информацию с ближайшего или нескольких ближайших

от места исследования гидрометеорологических постов. Так же допускается использование широко применимых баз данных Росгидромета и его региональных подразделений.

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 связанностью знаний и данных, механизмами доступа и способами сопоставления применительно к достижению целей ЛППР.

Соответствие задачам ЛППР. 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;
- имитационное моделирование;
- оптимизация с использованием математического программирования;
- эвристики;
- визуальное моделирование и имитация.

Для ГИСУ последняя форма представления знаний является преобладающей и разработанные модели, в том числе относятся к данной форме. Методики в базе знаний ГИСУ являются специализированными и ориентируются на целевые установки и объекты управления.

Анализ характеристик территории является базовым этапом в разработке стратегии развития. Методически данный этап предполагает выявление сущностей, формирующих экономический потенциал, а также объектов и субъектов, препятствующих положительной динамике развития. Позволяя оценить преимущества и слабые стороны территории, результаты анализа могут быть положены в основе стратегического управления развитием территории. Как правило, анализ характеристик природно-технических систем реализуется системой мониторинга.

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. 16.



Рисунок 16 - 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 и военно-морского флота.

Апробация проводилась по полученным и обработанным геоданным для порта бухта Пяти Охотников. Прогнозируемый 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.17 представлена волновая обстановка на момент времени спустя 1.2 часа, что говорит о возможности принятия управленческих решений за данное время.

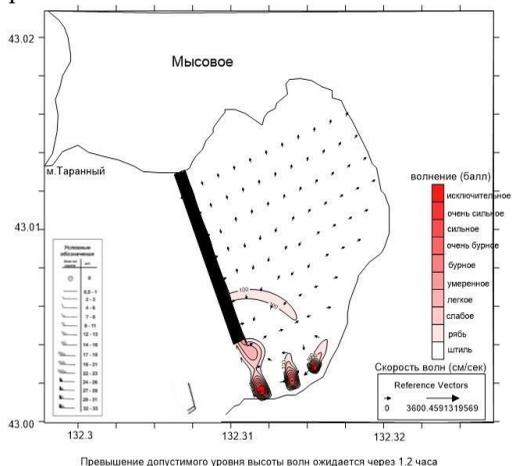


Рисунок 17 - Итоговый прогноз возможности риска для обеспечения безопасности на замкнутых прибрежных акваториях

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

Научная новизна состоит в разработке практических рекомендаций по применению предложенных новых моделей и методики геоинформационного обеспечения безопасности деятельности морских объектов в замкнутых прибрежных акваториях.

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 геоанализом 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. 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.

2. Модель прогнозирования ветрового волнения в замкнутых прибрежных акваториях, которая отличается тем, что представляет собой впервые реализованную двухмерную нестационарную модель, построенную на основе уравнений гидродинамики с характеристиками замкнутой прибрежной акватории, что позволяет повысить точность краткосрочных прогнозов безопасных районов деятельности кораблей 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. 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 реализована на основе разработанной инновационной двухпараметрической вероятностной модели определения времени ожидания наступления опасного явления при известных начальных значениях геоданных, что позволяет повысить достоверность оценки риска принятия решений по обеспечению безопасности деятельности морских объектов при влиянии волновых процессов на морские объекты на замкнутых прибрежных 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 морских объектов 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.

Список публикаций по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Мартын И.А. Моделирование волновых процессов на замкнутых акваториях мелководных районов / Истомин Е.П., Михеев В.Л., Петров Я.А. // Геоинформатика. 2021. № 3. с.30-35.
2. Мартын И.А. Геомоделирование предельного усиления цуга волн при выходе на шельф / Истомин Е.П., Михеев В.Л., Петров Я.А. // Информация и космос. 2021. № 3. с.78-85.

В изданиях, индексируемых в международных базах данных:

3. Martyn I., Sidorenko A. et al. GIS conceptual model as a modern tool in the Arctic navigation. *Lecture Notes in Networks and Systems* 2022
4. Martyn I. et al. Assessing the economic effect of marine hazard forecasts based on averted losses. *AIP Conference Proceedings* 2021, 020012
5. Martyn I., Sidorenko A. et al. The model for predicting data in socio-economic systems based on digital filtering in Arctic region. *AIP Conference* 2021, 020027
6. Martyn I., Stepanov S.E. et al. Methods for managing of hydrometeorological information in socio-economic systems under uncertainty. *AIP Conference Proceedings* 2021, 020029
7. Martyn I., Istomin E. et al. Development of a mathematical model of wind waves in the area of the proposed construction of a hydraulic structure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2021, 052030
8. Martyn I. et al. Modeling of sea currents and the spread of an oil slick in the Labrador sea area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2021, 052035
9. Martyn I., Tatarnikova T. et al. Determination of Internal Waves Off the Coast of Morocco According to Earth Remote Sensing Data. *GraphiCon 2020: Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision (22-25 September 2020, Saint-Petersburg, Russia)*. – 2020. – vol. 2744
10. Martyn I., Istomin E. et al. About the methodology of geo-risk management in forestry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2020 | conference-paper DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012006EID: 2-s2.0-85087872822Part of ISBN: 17551315 17551307
11. Martyn I., Istomin E. et al. Application of Kalman-Bucy filter for vessel traffic control systems in the northern sea route. *Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020 | conference-paper DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012012EID: 2-s2.0-85087694141 Part of ISBN: 1757899X 17578981
12. Martyn I., Istomin E. et al. Study of intra-day dynamics of currents in the area of the navigable strait of Baltiysk to adjust the movement of water transport. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020 | conference-paper DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012013EID: 2-s2.0-85087690595 Part of ISBN: 1757899X 17578981
13. Martyn I., Sidorenko A. et al. Application of a remote sensing data processing method for assessment ice cohesion in the Arctic navigation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2020-08-13 | journal-article DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012128 Part of ISSN: 1755-1315
14. Martyn I. et al. Spatial-temporal variability of ice cover of the Bering sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2020-08-13 | journal-article DOI: 10.1088/17551315/539/1/012198 Part of ISSN: 1755-1315