

На правах рукописи



Силина Ангелина Александровна

**ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО
ПОРТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.9.7 «Эксплуатация водного транспорта, водные пути
сообщения и гидрография»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Майоров Николай Николаевич.

Официальные оппоненты: **Маликова Татьяна Егоровна**
доктор технических наук, доцент,
МГУ им. адм. Г.И. Невельского, профессор
кафедры теории и устройства судна;

Ковалев Константин Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО ПГУПС, доцент кафедры
«Логистика и коммерческая работа».

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова».**

Защита состоится «01» октября 2024 г. в 13-30 часов на заседании диссертационного совета 45.2.003.03 при ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» по адресу: 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7, ауд. 235а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
https://gumrf.ru/naudejat/gna/dissoy_45200303/zd45200303

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Изотов Олег Альбертович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена постоянным увеличением значимости морских пассажирских портов и терминалов в мировых транспортно-экономических системах. Отрасль морских пассажирских перевозок постоянно подвергается воздействию внешней среды, что формирует тенденции, стимулирующие изменения и модернизацию инфраструктуры. Среди этих факторов – рост размеров новых круизных и паромных судов, активное внедрение новых логистических услуг в портах. Текущие изменения в отрасли морских пассажирских перевозок и портов, включая адаптации из-за ограничений, вызванных пандемией Covid-19, также оказывают значительное влияние на морские пассажирские перевозки и требуют внимательного изучения. Данные изменения отражаются сегодня в быстром увеличении объемов морских пассажирских перевозок, создании со стороны компаний перевозчиков новых маршрутов, которые приводят к изменениям объемов пассажирских перевозок между портами и терминалами. Ситуация особенно актуальная для регионов морей, как, к примеру, в регионе Балтийского моря. Данная ситуация ужесточает конкуренцию между пассажирскими портами и терминалами, и вызывает необходимость кардинально менять стратегию развития порта с позиций лица принимающего решения. Влияние внешней среды формирует ситуацию, когда принятие стратегий развития морского пассажирского порта не может в полной мере оцениваться с позиций опыта отрасли, но формирует требование использования новых динамических моделей и инструментальных средств для многокритериального анализа. Важно понимать, что морские пассажирские порты не могут с большой скоростью увеличивать свою пропускную способность, изменять инфраструктуру и ее модернизировать, поскольку она ограничивается существующей инфраструктурой, изменение которой требует значительных временных и финансовых затрат.

Уникальность морского пассажирского порта, как объекта транспортной инфраструктуры, обусловлена широким охватом аспектов: социально-экономических, транспортных, технических, качественного управления и оценки влияния на окружающую среду. Развитие морского пассажирского порта оказывает прямое влияние на город, регион, развитость наземной инфраструктуры и международную позицию с точки зрения привлекательности региона. Неучет современных трендов, невыполнение модернизации, основанной на стратегическом прогнозировании, может привести к исключению порта или терминала из новых маршрутных сетей компаний перевозчиков, что постепенно приведет к значительному уменьшению вклада в региональную составляющую морских пассажирских перевозок. Существующие тенденции в отрасли морских

паромных или круизных линий приводят к расширению спектра направлений и маршрутов, которые вносят изменения в региональную составляющую положения порта в регионе.

С другой стороны, на фоне экономических аспектов развития морских пассажирских портов и терминалов, существует растущая потребность в интеграции более сложных информационных технологий, способных оперировать динамическими данными, для обеспечения конкурентоспособности порта. В результате, традиционные инструменты прогнозирования в морской пассажирской отрасли, основанные на устаревших концепциях и использующие несовременные теоретические модели, теряют актуальность в условиях разнообразия процессов и воздействия широкого спектра стохастических факторов. Сегодня на передний план выходят критерии оперативности принятия решения при оценке необходимости модернизации инфраструктуры и прогнозировании развития, сокращения времени и повышения точности. Представленные факты указывают на современную необходимость перехода от исследования только отдельного порта, к многокритериальному исследованию прогнозирования развития на основе взаимодействия систем «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт».

Повышение качества стратегического прогнозирования, и управления взаимодействием представленных систем как единым объектом, на который оказывает динамическое влияние внешняя среда, может быть достигнуто за счет применения моделей и методов имитационного моделирования с интеграцией методов построения цифровых имитационных моделей порта, моделей, описывающих интенсивности судозаходов с учетом влияния современных трендов и вызовов. Для многокритериальной оценки модернизации причалов морского пассажирского порта нужно разработать методы, которые связывают микроскопический, макроскопический и региональный уровни транспортного планирования. Эти методы должны быть реализованы в специализированной информационной подсистеме для руководителя порта или лица, принимающего решение.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы планирования, прогнозирования, рационализации и моделирования работы морских портов и терминалов, независимо от их вида (грузовых или пассажирских), были исследованы во многих работах исследователей как из-за границы, так и в отечественной литературе. Эволюция морских пассажирских портов на различных этапах произошла под воздействием разнообразных внешних факторов и ограничений, связанных как с развитием инфраструктуры и портовых возможностей, так и с влиянием внешней экономической обстановки. Важно отметить различие между исследованиями, посвященными морским паромным и круизным линиям, и теми, которые фокусируются на портах и терминалах. Исследованиям

круизных перевозок в разных работах уделяли внимание такие авторы, как: А. В. Бабкин, Н. Л. Безрукова, М. Н. Войт, В. А. Дергачев, М. А. Жукова, А. М. Котлубай, С. Г. Нездойминов, С. П. Шпилько, А. Д. Чудновский, Р. В. Чударев, П. Уайльд и другие. Значительный вклад в формирование современного методологического базиса развития портов и терминалов на различных этапах экономического развития общества внесли Д. Берд, Ф. Г. Аракелов, К. Берсефорд, Е. Н. Воевудский, А. В. Кириченко, А. В. Галин, Д. В. Кочнев, А. Л. Кузнецов, В. А. Логиновский, В. С. Лукинский, О. Б. Маликов, В. Н. Мячин, Т. Е. Маликова, Т. Ноттебум, А. Ф. Парфенов, В. А. Погодин, М. Я. Постан, А. Л. Степанов, В. И. Сергеев, Б. П. Усанов, В. А. Фетисов, Ю. Хайяз, Я. Я. Эглит, Л. Д. Ветренко, В. И. Немчиков и другие ученые и специалисты.

Вопросы в области имитационного моделирования технических систем, в том числе морских портов и терминалов, а также моделирование потоков представлены в работах С. С. Вальковой и Ю. И. Васильева, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецова, Н. В. Купцова, Г. Б. Попова, Н. Н. Майорова. Научные труды авторов заложили основы экономики, организации и управления пассажирскими перевозками на водном транспорте. Однако представленные авторы с одной стороны исследовали отрасль через изменения в круизной отрасли и рассматривали экономические вопросы, с другой стороны основывались на изучении портов и инфраструктуры, рассматривали задачи увеличения пропускной способности порта, повышения эффективности использования портового оборудования, организации безопасных и эффективных перевозок пассажиров и грузов. Помимо этого, большой набор данных для научного анализа представляется в специализированных изданиях, публикуемых UNCTAD, CINN, Cruise Industry. Особое место занимают работы, посвященные информационным системам, частью которых является представление пассажирских портов и терминалов, анализу интенсивностей круизных и паромных линий в регионах морей, как, к примеру, на основе информационных систем Helcom, MarineTraffic и других.

На основе исследования работ авторов, можно заключить, что вопросам принятия решений развития инфраструктуры морских пассажирских портов уделяется ограниченное внимание. Не в полной мере рассматриваются ситуации принятия решений при неопределенности, с которыми сталкиваются руководители портов, которые сегодня особенно актуальны по причине изменений в отрасли и возрастания конкуренции между терминалами при восстановлении пассажиропотоков после ограничений в период пандемии.

В диссертационном исследовании проведен аннотированный библиографический анализ основных отечественных и зарубежных работ,

относящихся к тематике диссертационного исследования. Отдельно представлены результаты выполненного наукометрического анализа, подтверждающего актуальность исследования, выбранные области разработки моделей и методов и выбранные инструментальные средства. При выполнении диссертационного исследования за основу была выбрана академическая наука, в частности представленная школами ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» и ФГАОУ ВО ГУАП, которые составили впоследствии методологическую основу диссертационной работы.

Цель исследования состоит в повышении эффективности методов планирования, прогнозирования развития и модернизации морского пассажирского порта или терминала в ситуации изменчивого влияния внешней среды, новых трендов отрасли, наличия стохастических процессов в интенсивностях входящего потока круизных и паромных судов на основе перехода к многокритериальному исследованию взаимодействия систем «морская круизная/паромная линия – морской пассажирский порт», достигаемое методами имитационного моделирования, разработки моделей и подсистем (цифровых двойников) для представления сегментации вклада морского пассажирского порта в общую сферу морских пассажирских перевозок региона.

Выявленное в диссертационном исследовании **противоречие заключается** в том, что широко используемые модели принятия решения по обоснованию модернизации инфраструктуры морского порта основываются не на динамических моделях, учитывающих влияние внешней среды, а на дискретных моделях, моделях принятия решений на основе опыта отрасли, что неприменимо в полной мере, в связи с отличительными особенностями каждого морского порта, наличия уникальных региональных особенностей и взаимного влияния и конкуренции портов и терминалов. Преобладание дискретных моделей не позволяет сформировать полную группу прогнозных состояний морского пассажирского порта, сформировать набор уникальных сценариев по модернизации причалов с последующим анализом, и обеспечить определенное поле допустимых значений для выбора наилучшего сценария. Использование дискретных моделей приведет к усеченной выборке вариантов прогнозирования развития, что крайне недостаточно для формирования полной стратегии развития инфраструктуры порта при неопределенности с учетом многовариантного сценарного моделирования.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту научной специальности 2.9.7 – «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография»: п. 10 Морские транспортные потоки; п. 12 Информационные цифровые технологии и системы водного транспорта.

Объектом исследования является морской пассажирский порт (терминал), являющийся сложной системой, и процессы его функционирования.

Предметом исследования являются методы и модели организации работы морского пассажирского порта, оценки загруженности причалов, взаимодействия систем «морские паромные линии – морской пассажирский порт» в условиях неопределенности, происходящие под воздействием возмущающих и управляющих факторов со стороны современной транспортно-логистической системы.

Гипотезой исследования является предположение о том, что эффективность методов прогнозирования развития морского пассажирского порта, эффективность оценки изменений взаимодействия систем «морская круизная линия – морской пассажирский порт» может быть повышена путем использования в моделях принятия решений при неопределенности результатов имитационного моделирования, результатов работы цифровых транспортных моделей, специализированных оптимизационных экспериментов по обработке входящего потока круизных и паромных судов с учетом приоритетности причалов. Полученный объем данных является основой для построения набора состояний работы круизных и паромных линий с выделением изменения положения порта по отношению к другим в регионе при выборе модельного сценария развития.

Научной задачей исследования является создание имитационной модели (цифрового двойника) морского пассажирского порта, с возможностью использования и интеграции динамических данных по причалам, полученных от современных беспилотных авиационных систем, которая может служить новым инструментом планирования и прогнозирования работы морского пассажирского порта с учетом технологии выполнения внутренних операций и включения трендов влияния внешней среды. Полученные данные многосценарного моделирования являются основой для построения моделей оценки положения пассажирского порта в регионе моря по отношению к другим. Одним из современных трендов является увеличение габаритов круизных и паромных судов, возрастания их интенсивности, что требует значительной модернизации причалов.

Для решения научной задачи необходимо решить ряд частных задач:

– Выполнение анализа современных трендов и вызовов в сфере морских пассажирских перевозок, определяющий возникновение ситуаций принятия решений при неопределенности;

– Выполнение ретроспективного анализа развития выбранных морских пассажирских портов в регионе Балтийского моря для формирования обобщенной модели развития и выявления отдельных

стадий с фиксацией условий необходимости модернизации инфраструктуры;

- Выполнение построения набора дискретных состояний положения портов в регионе и представление отдельных круговых диаграмм интенсивностей Circos на основе интенсивностей работы круизных и паромных линий;

- Выделение больших круизных и паромных судов в общем потоке для оценки интенсивности;

- Разработка имитационной модели взаимодействия потока круизных и паромных судов и причалов морского пассажирского порта, рассматриваемого как систему причалов, с включением различных сценариев интенсивности входного потока;

- Разработка модели включения в имитационную модель пространственных данных от беспилотных авиационных систем, для улучшения точности представления инфраструктуры морского пассажирского порта;

- Формирование данных многосценарного имитационного моделирования для перехода к моделям принятия решений при неопределенности;

- Представление круговых диаграмм интенсивностей Circos для определения вариантов прогнозного положения порта в регионе моря;

- Разработка модели информационной подсистемы для анализа и прогнозирования развития морского пассажирского порта с включением переменных влияния внешней среды и представления положения порта на макроуровне транспортного планирования.

Научная новизна исследования обуславливается тем, что впервые создана модель морского пассажирского порта с возможностью адаптации к современным трендам отрасли за счет учета возможности динамического изменения параметров, учета стохастических факторов, с возможностью оценки положения пассажирского порта по отношению к другим в регионе. По результатам исследования предложена и теоретически обоснована методика принятия решения по формированию сценариев развития морского пассажирского порта на основе использования серии оптимизационных экспериментов.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- Формализованном описании различных вариантов интенсивностей потока круизных и паромных судов, учитывая стохастические процессы и влияния современных трендов;

- Формализованном описании условий необходимости модернизации комплекса морского пассажирского порта и представления положения порта в регионе;

– Создании имитационной модели (цифрового двойника) для формирования набора данных многосценарного моделирования интенсивностей входящего потока судов;

– Практическом формировании набора сценариев использования моделей принятия решения при неопределенности для выбора стратегии развития и модернизации морского пассажирского порта;

– Создании методики повышения точности данных для имитационных моделей морских пассажирских портов за счет интеграции динамических пространственных данных от беспилотных авиационных систем.

Практическая значимость работы заключается в возможности создания специализированного программного инструмента для поддержки управленческих решений, а также в разработке практических рекомендаций по эффективному использованию данного инструментария для прогнозирования и управления работой морского пассажирского порта или терминала в условиях неопределенности при принятии решений. Эффективность предложенных решений подтверждают акты внедрения.

Достоверность полученных результатов исследования обусловлена тщательным анализом существующих научных исследований в данной области, использованием проверенного научно-методического инструментария, основана на совпадении полученных в исследовании данных с собранными автором характеристиками реальных процессов морского пассажирского порта «Морской Фасад» (Санкт-Петербург). Информационно-эмпирической базой исследования послужили законодательные и нормативно правовые акты Российской Федерации, имеющиеся аналитические данные по судозаходам и маршрутные сети, инфраструктуры морских пассажирских портов и терминалов Балтийского моря.

Методология исследования основана на системном подходе, математической логике, теории множеств, теории алгоритмов, теории и практике объектно-ориентированного моделирования.

Методы исследования включают в себя аналитические методы, методы теории вероятности и математической статистики (сбор данных, статистическая обработка, планирование, обработка результатов экспериментов), методы планирования экспериментов.

Границами исследования установлена совокупность процессов, протекающих в операционных зонах морского пассажирского порта, без рассмотрения связи с наземной околотерминальной транспортной инфраструктурой.

Положения, выносимые на защиту:

1. формализованная модель описания взаимодействия систем «морская паромная линия – морской пассажирский порт» для исследования положения порта в регионе и оценки его вклада в сферу морских пассажирских перевозок;

2. модель планирования морского пассажирского порта, основанная на методе моделирования круизных и паромных судов с выделением приоритетности, позволяющая прогнозировать различные сценарии загруженности причалов и сформировать данные для принятия решений при неопределенности;

3. имитационная модель (цифровой двойник) морского пассажирского порта с отдельными модулями по оценке влияния внешней среды, трендов отрасли, включением новых модулей оптимизационных эксперимента;

4. модель принятия решения при неопределенности по прогнозированию развития морского пассажирского порта на основе результатов многосценарного моделирования;

5. алгоритм внедрения цифровой модели морского пассажирского порта в контур принятия решения по оценке и модернизации инфраструктуры с учетом моделей анализа динамических данных геоинформационных систем.

Внедрение результатов работы. Подходы и методы, использованные в настоящей работе, внедрены в образовательный процесс, с актом внедрения от ФГАОУ ВО ГУАП, при чтении курсов «Имитационное моделирование сложных технических систем» и «Исследование операций в технических системах», «Теория транспортных процессов и систем» для направлений подготовки 23.03.01, 23.04.01 «Технология транспортных процессов», а также при разработке компетенций будущего «Университет Future Skills» (проект Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Агентства развития профессий и навыков и ГУАП, 2021-2024 гг.). Методы и модели разработки цифровой модели морского пассажирского порта и отдельных подпрограмм автоматизации анализа интенсивностей работы круизных и паромных линий, алгоритмы анализа данных для построения цифровой геоинформационной модели морского пассажирского порта, подтверждаются полученными результатами НИР (регистрационный номер 123030200052-2, 2023), актами от СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта».

Личный вклад соискателя. Все разделы диссертационной работы написаны лично автором. Результаты исследований получены им самостоятельно, либо при его непосредственном участии.

Степень достоверности результатов обусловлена: корректной постановкой задач; репрезентативностью данных, полученных из официальных источников; современными методами исследования, которые соответствуют поставленным в работе цели и задачам; корректным использованием апробированных методов и программных инструментов.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследования были представлены на национальных и международных научно-практических конференциях: XXIV и XXV Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные

системы» (31.05-04.06.2021, 30.05-03.06.2022); 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 (31.05-04.06.2021); XXI Международная научно-практическая конференция «Логистика: современные тенденции развития» (07-08.04.2022); Международная научная конференция Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии (14-22.04.2022, 04-21.04.2023, 04-20.04.2024); 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2022(30.05-03.06.2022); IV, V и VI Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (04.03.2022, 02.03.2023, 01.03.2024); XXII Международная научно-практическая конференция «Логистика: современные тенденции развития» (06-07.04.2023, 04-05.04.2024).

Публикации по теме диссертации. Публикации по теме исследования отражены в 20 работах, в том числе: 4 работы в изданиях, индексируемых ВАК; 2 работы с индексацией в Scopus; 11 работ в сборниках всероссийских и международных конференций, журналах, индексируемых РИНЦ; 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы определена логикой и целью исследования. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка терминов и сокращений, списка литературы и изложена на 146 страницах, содержит 82 рисунка, 14 таблиц. Список используемых источников состоит из 98 наименований, из них 63 – иностранных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, определены цель и задачи работы, объект и предмет исследования, определена научная новизна и практическая значимость исследования, отражены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе приводится анализ развития морских паромных и круизных перевозок как с точки зрения мирового рынка, так и обособленно в регионе Балтийского моря, описаны основные тенденции отрасли. Отмечено, что пандемия и другие факторы оказали большое влияние на пассажиропоток по всему миру, что привело к значительному изменению маршрутов. В настоящее время наблюдается восстановление маршрутов и разработка новых направлений (рисунок 1). Возрастает нагрузка на инфраструктуру порта: пассажиропоток растет, размеры круизных лайнеров также постоянно увеличиваются. Эти факторы подчеркивают важность своевременных изменений в стратегиях принятия решений по развитию портовой инфраструктуры для соединения с мировыми круизными сетями.



Рисунок 1 – Обзор рынка круизов с прогнозом до 2033 года

На основе анализа исторических данных отмечены ключевые этапы развития пассажирского сообщения. Кроме того, через призму существующих инфраструктурных проектов выявлены основные тенденции развития инфраструктуры портов, одна из которых – улучшение взаимосвязи «морская круизная / паромная линия – пассажирский порт – город». Описаны аспекты взаимодействия порта с круизными и паромными маршрутами.

Приводится наукометрический анализ публикаций в сфере прогнозирования развития морских пассажирских портов. Выделена необходимость применения современных инструментов моделирования для разработки более стратегически обоснованных сценариев развития порта.

Во втором разделе приведены основные модели развития портов и изменение концепции города-порта с течением времени. Рассмотрены модель Дж. Берда «Anurort», модель исторического развития портов Г. Норклиффа, модель трех поколений UNCTAD, а также модель «Workport». На основе данных об историческом развитии и инфраструктурных проектах портов, полученных из первого раздела, разработана модель эволюции морского пассажирского порта:

- Грузопассажирский порт без регулярных пассажирских сообщений;
- Установление регулярных пассажирских сообщений;
- Развитие инфраструктуры: увеличение размера судов и загрузки причалов приводит к развитию инфраструктуры порта;
- Отделение: стремительный рост пассажиропотока приводит к созданию проектов специализированных терминалов для приема пассажиров;
- Интеграция портов в городскую среду. Возникающий тренд на непрерывное взаимодействие «морская паромная/круизная линия – морской порт – город», требует соединения с городской средой.

Развитие портов в значительной степени зависит от взаимосвязей с маршрутными линиями. Анализ различных форм организации маршрутных сетей позволяет выявить системные изменения и конкретные моменты времени, обосновывающие эволюцию маршрутной сети. На основе имеющихся данных разработана система основных маршрутов Балтийского моря, выявлены ключевые порты региона, концентрирующие основной объем пассажиров (рисунок 2).

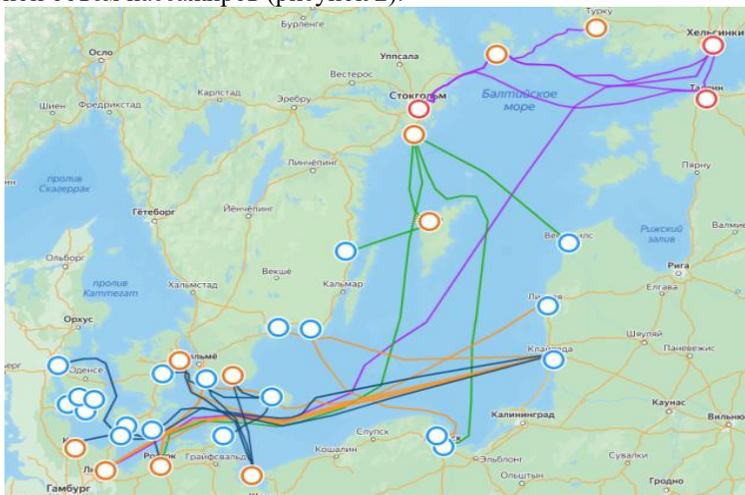


Рисунок 2 –Разработанная информационная карта паромных / круизных маршрутов Балтийского моря с обозначением классов значимости портов

На основе диаграмм CircoS построена модель маршрутной сети главных портов региона, а также рассмотрено положение Санкт-Петербурга в сети портов (рисунок 3).

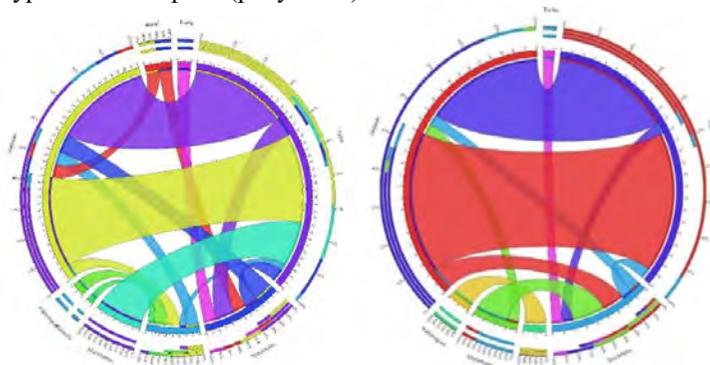


Рисунок 3 – Диаграмма интенсивностей паромного движения между портами Балтийского моря за 2019 и начало 2024 г.

Основываясь на интенсивности движения пассажирских судов между ключевыми портами, изучено изменение пассажиропотока в динамике.

Полученные данные свидетельствуют о значимости Санкт-Петербурга как направления в центральной части Балтийского моря. Несмотря на влияние различных факторов, Санкт-Петербург составляет конкуренцию портам, на которых сосредоточен основной объем пассажиров (Хельсинки, Таллин, Стокгольм и др.). Опираясь на полученные данные о динамике изменения маршрутной сети, необходимо отметить, что для прогнозирования дальнейшего развития, необходимо обращаться к моделям принятия решений в условиях неопределенности, чтобы эффективно планировать стратегии и действия для устойчивого развития порта «Морской Фасад» Санкт-Петербурга.

В третьем разделе представлен общий вид модели порта в виде «черного ящика» с описанием факторов, влияющих на интенсивности потока судов. Важными аспектами являются экономическая и политическая обстановка на мировом рынке, сезонность и конкуренция. Ключевыми ресурсами системы являются портовая инфраструктура и специализированные организации, предоставляющие услуги в порту.

Для описания процесса обработки пассажирских паромов и круизов в порту Санкт-Петербурга использована модель систем массового обслуживания. При моделировании работы порта «Морской фасад», который имеет 7 каналов обслуживания, возникает потребность в установлении приоритетности обработки судов. Важно учитывать, что причалы имеют ограниченную длину, и для снижения вероятности отказов необходимо эффективно распределять суда по причалам, а также перенаправлять потоки на другие терминалы.

Рассмотрим модель с приоритетами судов более детально. В таком случае в порт прибывают круизные суда, каждое из которых имеет свой уровень приоритета для обработки. В этой модели установлены два простейших потока с различными интенсивностями – η_1 и η_2 . Пусть круизные суда первого типа обладают более высоким приоритетом.

Таким образом, портовая система принимает следующие состояния:

1. Q_o – в данное время нет прибывающих судов;
2. Q_{oj} – в данный момент поступило j судов со вторым приоритетом, при этом одно из них находится в процессе обработки, а $(j+1)$ ожидает в очереди;
3. Q_{ij} – в портовой системе находится j судов со вторым приоритетом и i судов с первым приоритетом.

Система уравнений для вероятностей состояний морского пассажирского порта имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{00}(t)}{dt} &= -(\eta_1 + \eta_2)N_0(t) + \mu_1 N_{1,0}(t) + \mu_2 N_0, \\ \frac{dN_{i0}(t)}{dt} &= -(\eta_1 + \eta_2 + \mu_1)N_{i,0}(t) + \eta_1 N_{i-1,0}(t) + \mu_1 N_{i+1,0}(t), (i > 0) \\ \frac{dN_{0j}(t)}{dt} &= -(\eta_1 + \eta_2 + \mu_2)N_{0,j}(t) + \eta_2 N_{0,j-1}(t) + \mu_2 N_{0,j+1}(t) + \mu_1 N_{ij}(t), (j > 0), \\ \frac{dN_{ij}(t)}{dt} &= -(\eta_1 + \eta_2 + \mu_1)N_{i,j}(t) + \eta_2 N_{i,j-1}(t) + \mu_1 N_{i+1,j}(t) + \eta_1 N_{i-1,j}(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Схема взаимного влияния морского пассажирского порта и города (рисунок 4).

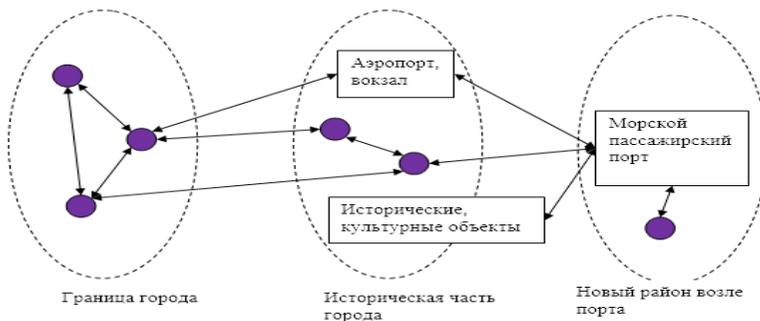


Рисунок 4 – Схема взаимного влияния пассажирского порта и города

Для дальнейшего моделирования работы порта были использованы исходные данные о расписании порта «Морской фасад» за период с 2015 по 2019 годы. Суда были распределены на категории – малые (длиной до 218 м), средние (длиной от 218 до 288 м) и большие круизные лайнеры (длиной более 288 м). В качестве инструмента имитационного моделирования предложено и обосновано применение программной среды AnyLogic, которая объединяет различные виды моделирования, что повышает эффективность и точность проектируемой модели. Приведены этапы построения цифровой имитационной модели порта Санкт-Петербурга в AnyLogic, учитывая различные аспекты работы порта и необходимости оптимизации его процессов (рисунок 5).

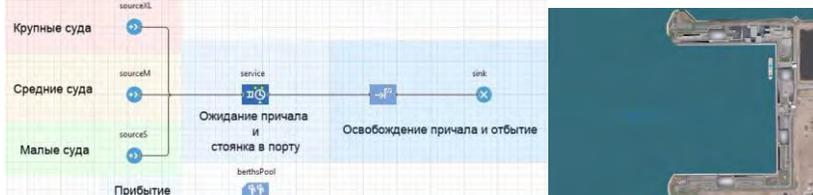


Рисунок 5 – Схема логики модулей имитационной модели пассажирского порта

Оконные формы трехмерной модели порта, построенной в среде Anylogic с учетом распределения заявок поступающих судов согласно выделенным приоритетам представлены на рисунке 6.

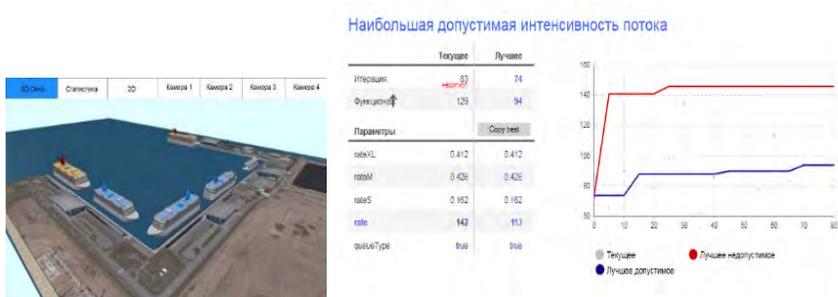


Рисунок 6 – Трехмерная модель порта «Морской фасад» и оконная форма оптимизационного эксперимента

В четвертом разделе произведен анализ результатов полученной модели порта. Для воссоздания различных сценариев модели согласно данным интенсивностей порта, были применены различные законы распределения потока поступающих судов: гамма-распределение, распределение Пуассона и нормальное распределение. Для каждого вида распределения полученный набор данных интенсивностей был проанализирован с помощью S-критерия, поскольку он наиболее точно отражает ситуацию принятия решений по модернизации морского порта без наличия достоверной информации об анализируемом объекте.

Функция, определяющая семейство линий уровня S-критерия, представлена следующим образом:

$$f(u; v; \dots; z) = \max \{a_y - u; a_{y,2} - v; \dots; a_{y,n} - z\} \quad (2)$$

Задача нахождения наилучшего решения при этом критерии формализуется следующим образом:

Пусть i – вариант возможного решения ЛПП $i = (1, 2, \dots, m)$; $j = (1, 2, \dots, m)$ вариант возможной ситуации a_{ij} – доход ЛПП, если будет принято решение i , а ситуация сложится j -я; $A = (a_{ij})$ – матрица полезностей. Целевая функция критерия:

$$Z_S = \min \{K_i\}, \quad (3)$$

$$\text{где } K_i = \max \{l_{ij}\}; l_{ij} = \max \{a_{ij}\} - a_{ij}$$

На основании анализа выделена область полезностей, которая ограничивается утопической и антиутопической точкой (рисунок 7). Кроме того, сформировано поле полезностей при уточнении значений приоритетности обслуживания судов. Таким образом, анализ результатов позволяет прогнозировать возможные колебания числа прибывающих

судов в порт на протяжении года с учетом интенсивности за предыдущие периоды, что расширяет возможности для принятия решений о развитии портовой инфраструктуры в условиях неопределенности.

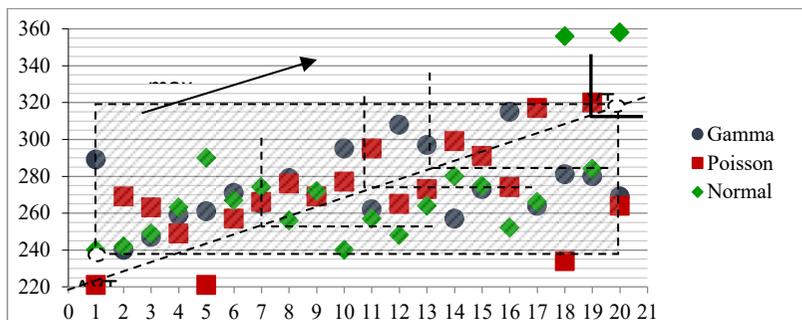


Рисунок 7 – Графическая интерпретация выборки годовых интенсивностей и формирования поля полезностей

Анализ результатов модели позволяет сделать вывод о необходимости использования новой модели принятия решений с использованием комплексного подхода для обоснования модернизации морского пассажирского порта. Данная модель должна включать модели принятия решений в условиях неопределенности, модели систем массового обслуживания, однако уникальной составляющей разработанной модели является интеграция динамических данных, включая информацию от беспилотных авиационных систем. Таким образом, предложено объединение данных имитационной модели порта, разработанной в среде AnyLogic, с динамическими данными аэрофотосъемки с беспилотных авиационных систем, чтобы в полной мере отразить текущее состояние причальной инфраструктуры, что позволит создать более точную и реалистичную цифровую модель порта, способную адаптироваться к изменениям в реальном времени и улучшить принятие управленческих решений.

Предложенный алгоритм построения цифровой модели с использованием данных беспилотных авиационных систем реализован в лабораторных условиях. Для проработки траектории на территории порта «Морской фасад», территория была разделена на несколько секторов равной площади (рисунок 8). Наиболее подходящий маршрут облета – челночный, так как он позволяет легко рассчитать площади перекрытия фотоснимков.

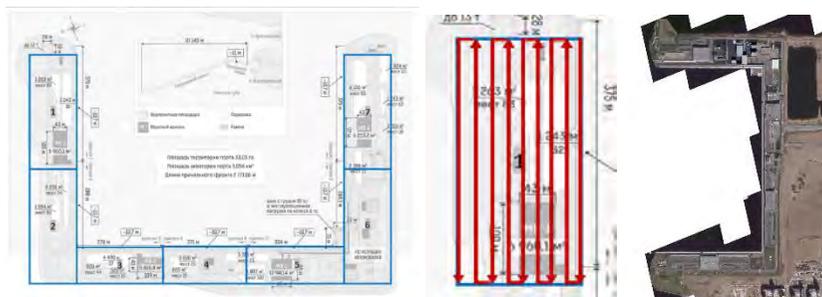


Рисунок 8 – Деление территории порта на секторы (а), траектория полета на участке №1 (б)

Согласно данным порта, был разработан его макет, схема размещения модели в лаборатории беспилотных авиационных систем ГУАП представлена на рисунке 9 (а). В процессе полетов выполняется аэрофотосъемка модели на летном поле. Автоматический полет беспилотной авиационной системы по заранее запроектированным маршрутам позволяет снизить возможность ошибок при пилотировании дрона и повысить уровень безопасности работ. Код автономного полета написан на языке Python (рисунок 9).

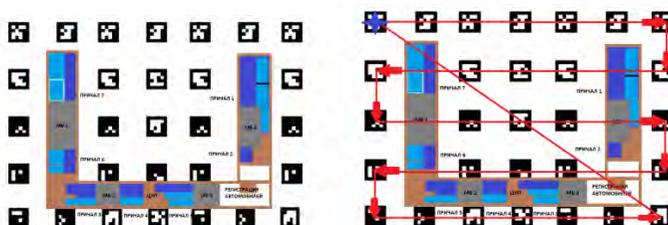


Рисунок 9 – Схема размещения макета порта «Морской Фасад» на летном поле (а); маршрут облета модели (б)

Снимки, полученные в результате аэрофотосъемки, подлежат дальнейшей обработке с использованием программы Metashape. В первую очередь, все полученные изображения были визуально оценены, чтобы исключить некачественные снимки, и затем загружены в программу и выровнены. После этого уменьшается область построения модели, для более точного формирования модели, а также удаляются точки и снимки, расположение определено неверно. Полученная цифровая модель является основой для использования в цифровом двойнике порта в ApyLogic, что позволяет использовать данные реального состояния инфраструктуры. Укрепленная блок-схема исследования и прогнозирования развития с учетом включения разработанных новых модулей динамических данных от беспилотных авиационных систем проведена на рисунке 10.

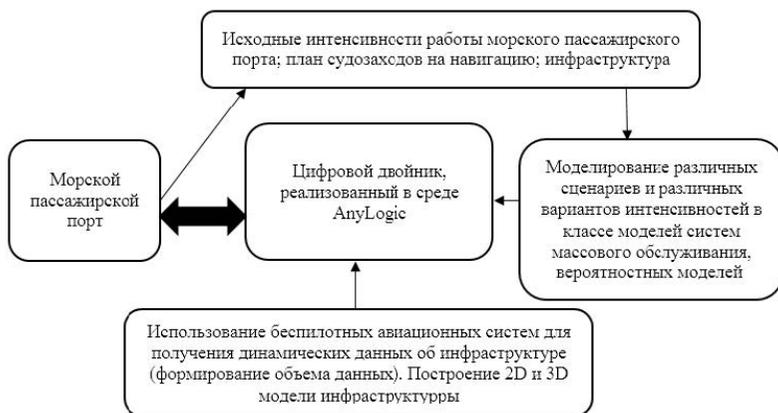


Рисунок 10 – Методика получения и интеграции данных в цифровую модель для последующего принятия решений при неопределенности с выделением отдельных состояний в развитии морского пассажирского порта на основе данных от использования беспилотных систем

За счет разработки и интеграции модулей данных от беспилотных систем повышается точность представления инфраструктуры морского пассажирского порта, повышается точность моделирования и объективность формирования DataSet для решения задачи прогнозирования развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе достигнута цель, которая состоит в повышении эффективности методов планирования, прогнозирования развития и модернизации морского пассажирского порта или терминала в ситуации изменчивого влияния внешней среды. В рамках выполнения частных задач исследования решены следующие задачи: произведен анализ современных трендов и вызовов в сфере морских пассажирских перевозок; выполнен ретроспективный анализ развития морских пассажирских портов в регионе Балтийского моря; выполнено построение набора дискретных состояний положения портов в регионе и представлены отдельные круговые диаграммы интенсивностей Circos; выделены наибольшие потоки круизных и паромных судов в общем потоке для оценки интенсивности; разработана имитационная модель взаимодействия потока круизных и паромных судов и причалов морского пассажирского порта; разработана модель включения в имитационную модель пространственных данных от беспилотных авиационных систем; сформированы данные многосценарного имитационного моделирования развития морского пассажирского порта.

Разработанная имитационная модель (цифровой двойник) морского пассажирского порта учитывает приоритет поступающих заявок, позволяет провести исследование различных сценариев интенсивности поступающих круизных судов. За счет разработанных новых модулей интеграции данных от беспилотных систем в цифровую модель морского пассажирского порта достигается повышение точности выполнения модели, моделирования и получения данных для принятия решений по прогнозированию развития.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список работ, опубликованных в журналах перечня ВАК:

1. Добровольская, А. А. Моделирование маршрутов морских паромных перевозок на основе теории графов в контексте стратегического планирования / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Добровольская // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2021. – Т. 13. – № 6. – С. 782-793.

2. Добровольская, А. А. Вероятностная модель прогнозирования прибытия круизных или паромных судов в морской порт для оценки инфраструктуры / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Добровольская // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 169-180.

3. Добровольская, А. А. Исследование вариантов обоснования модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта для решения задачи прогнозирования его развития с учетом влияния внешней среды / Н.Н. Майоров, А. А. Добровольская // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14. – № 5. – С. 701-712.

4. Добровольская (Силина), А. А. Исследование модели оценки загруженности инфраструктуры морского пассажирского порта с помощью моделей принятия решений при неопределенности / А. А. Добровольская // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 537-548.

Работы, опубликованные в материалах международных конференций и индексированных Scopus:

5. Dobrovolskaia, A. A. Research of Variants of Modernization of Transport Terminal Infrastructure Based on Stochastic Models / N.N. Maiorov, A.A. Dobrovolskaia, M.R. Yazvenko // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2022. – Vol. 5. – № 1. – P. 282-285. – DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803580.

6. Dobrovolskaia, A.A. Assessment of the impact of marine ferry routes on the environmental situation of the Baltic Sea based on data from information-measuring systems / N.N. Maiorov, A.A. Dobrovolskaia // Journal of Physics:

Conference Series. – 2022. – Vol. 2373. – art. no. 42003. – DOI: 10.1088/1742-6596/2373/4/042003.

Работы, опубликованные в других изданиях:

7. Добровольская, А. А. Исследование путей разработки точных цифровых моделей для объектов и узлов транспортной инфраструктуры / Н.Н. Майоров, А.А. Добровольская, В.Е. Таратун // Системный анализ и логистика. – 2021. – № 4 (30). – С. 114–121.

8. Добровольская, А. А. Исследование информационно-измерительной системы для построения цифровых моделей объектов транспортной инфраструктуры / А.А. Добровольская // «Метрологическое обеспечение инновационных технологий». Материалы IV Международного форума. – СПб.: ГУАП, 2022. – С. 55-56.

9. Добровольская, А. А. Применение цифровых моделей транспортных систем на микроуровне транспортного планирования / А.А. Добровольская, В. А. Фетисов // «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии». Третья международная научная конференция: сборник докладов. – СПб.: ГУАП, 2022. – С. 59-64.

10. Добровольская, А. А. Пространственная характеристика интенсивностей работы морских пассажирских портов в регионе Балтийского моря / А. А. Добровольская, В. А. Фетисов // «Логистика: современные тенденции развития». Материалы XXI Международной научно-практической конференции. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2022. – С. 112-118.

11. Добровольская, А. А. Исследование вариантов модернизации инфраструктуры транспортного терминала на основе вероятностных моделей / А.А. Добровольская, Н.Н. Майоров, М. Р. Язвенко // «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы». Материалы XXV Международной конференции. – СПб.: ГУАП, 2022. – С. 162-170.

12. Добровольская, А. А. Влияние основных трендов в сфере круизных и паромных перевозок на инфраструктуру морских пассажирских портов и терминалов / Н.Н. Майоров, А.А. Добровольская // Системный анализ и логистика. – 2022. – № 4(34). – С. 144-152.

13. Добровольская, А. А. Исследование моделей качества портовых услуг как фактор конкурентоспособности / А.А. Добровольская, Н.Н. Майоров // «Метрологическое обеспечение инновационных технологий». Материалы V Международного форума. – СПб.: ГУАП, 2022. – С. 218-219.

14. Добровольская, А. А. Оценка загруженности причалов морского пассажирского порта на основе моделей принятия решений в условиях неопределенности / А.А. Добровольская, Н.Н. Майоров // «Логистика: современные тенденции развития». Материалы XXII Международной научно-практической конференции. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2023. – С. 136-142.

15. Добровольская, А. А. Применение беспилотных авиационных систем на объектах транспорта и разработка алгоритма постобработки данных / Е. А. Гайдук, А. А. Добровольская // «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии». Четвертая международная научная конференция: сборник докладов. – СПб.: ГУАП, 2023. – С. 137-142.

16. Добровольская, А. А. Принятие решений при неопределенности по прогнозированию развития морского пассажирского порта на основе моделирования разных приоритетов заявок судов / А. А. Добровольская, Н.Н. Майоров, М. Р. Язвенко // «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы». Материалы XXVI Международной конференции. – СПб.: ГУАП, 2023.– С. 107-112.

17. Силина, А.А. Построение цифрового двойника морского пассажирского порта для формирования системы принятия решений по модернизации инфраструктуры / Н. Н. Майоров, А. А. Силина // «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии». Пятая международная научная конференция: сборник докладов. – СПб.: ГУАП, 2024. –Ч.1 – С. 288-293.

Свидетельства о государственной регистрации:

18. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2023661875. РФ. Программа расчета показателей эффективности обслуживания пассажирских судов в порту/ А.А. Добровольская; правообладатель ФГАОУ ВО ГУАП (RU). Оpubл. 02.06.2023, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

19. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2023667377. РФ. Программа для выполнения автономного полета беспилотной системы для построения цифровой модели морского пассажирского порта/ А.А. Добровольская; правообладатель ФГАОУ ВО ГУАП (RU). Оpubл. 22.08.2023, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

20. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2024611434. РФ. Программа получения данных для анализа состояния причальной инфраструктуры морского пассажирского порта с помощью беспилотных авиационных систем/ А.А. Добровольская; правообладатель ФГАОУ ВО ГУАП (RU). Оpubл. 22.01.2024, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.