

ПОРТЫ, ПОРТОВОЕ ХОЗЯЙСТВО И ТРАНСПОРТНАЯ ЛОГИСТИКА

PORTS, PORT INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT LOGISTICS

Научная статья

УДК 656.072+65.012.1

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-76-88>

EDN QKMZYZ

Исследование модернизации морского пассажирского порта на основе цифрового двойника и оценка инфраструктуры с помощью динамических данных от беспилотных авиационных систем

**Николай Николаевич Майоров[✉], Ангелина Александровна Силина,
Владимир Андреевич Фетисов**

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия, sciencesuai@yandex.ru[✉]*

Аннотация. Рассматривается текущее состояние отрасли морских пассажирских перевозок, а также исследуются факторы, влияющие на выбранную отрасль (конкуренция между портами в регионе моря, новые экологические требования и дефицит площадей для новых портов и терминалов в мегаполисах). Проанализированы модели эволюции морских портов и терминалов в регионах морей и выявлена необходимость решения задачи прогнозирования развития, обоснованной модернизации инфраструктуры. Отмечается важность интеграции пассажирских портов в транспортные системы городов и обеспечение эффективной взаимосвязи морского транспорта с транспортными системами регионов. Особое внимание уделяется росту и потенциалу развития морских паромов, круизов в регионе Балтийского моря, отмечается историческая значимость Санкт-Петербурга для круизного туризма и необходимость постепенного восстановления работы порта и развития новых маршрутных сетей. Обосновывается необходимость разработки новых методов для модернизации инфраструктуры морских пассажирских портов на основе создания цифровых моделей и использования динамических данных. В качестве решения предлагается создание новой цифровой модели морского пассажирского порта с использованием информации, полученной с беспилотных авиационных систем. Данная модель будет точно учитывать инфраструктурные особенности пассажирских портов и терминалов, а также установленную приоритетность причалов по обслуживанию круизных и паромных судов. Для многосценарного моделирования предлагается разработанная новая цифровая модель морского пассажирского порта Санкт-Петербурга «Морской фасад». Для анализа результатов моделирования предлагаются разработанные программные модули на языке программирования Python для описания стратегий поведения лица, принимающего решение (руководителя порта). Для описания процесса принятия решений в условиях неопределенности, которая возникает при принятии решения о модернизации инфраструктуры порта, в качестве критерия был обоснован выбор критерия Вальда. Выполнена серия экспериментов, на основе данных сформированы цифровые 2D и 3D-модели морского пассажирского порта для последующего использования в среде AnyLogic, выполнено построение цифрового двойника. Отличительная особенность модели заключается в актуальной информации о состоянии транспортной инфраструктуры и интеграции с данными по судозаходам. Представленная модель, методы работы с результатами многосценарного моделирования, использование беспилотных авиационных систем, разработка модели на основе принятия решений при неопределенности могут быть применены для других морских пассажирских портов и терминалов, что подчеркивает универсальность предложенного подхода.

Ключевые слова: морской пассажирский порт, беспилотные авиационные системы, цифровая модель, принятие решений в условиях неопределенности, модернизация инфраструктуры, моделирование, морской пассажирский порт

Для цитирования: Майоров Н. Н., Силина А. А., Фетисов В. А. Исследование модернизации морского пассажирского порта на основе цифрового двойника и оценка инфраструктуры с помощью динамических данных от беспилотных авиационных систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 2. С. 76–88. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-76-88>. EDN QKMZYZ.

Original article

Research of modernization of sea passenger port based on digital twin and infrastructure assessment using dynamic data from unmanned aerial systems

Nikolai N. Maïorov[✉], *Angelina A. Silina*, *Vladimir A. Fetisov*

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia, sciencesuai@yandex.ru*[✉]

Abstract. The current state of the maritime passenger transportation industry is considered, as well as the factors influencing the chosen industry are investigated (competition between ports in the sea region, new environmental requirements and a shortage of space for new ports and terminals in megacities). Models of the evolution of seaports and terminals in the regions of the seas are analyzed and the need to solve the problem of forecasting development, reasonable modernization is revealed infrastructure. The importance of integrating passenger ports into urban transport systems and ensuring effective interconnection of maritime transport with regional transport systems is noted. Special attention is paid to the growth and development potential of sea ferries and cruises in the Baltic Sea region, the historical importance of St. Petersburg for cruise tourism and the need for the gradual restoration of the port and the development of new route networks are noted. The necessity of developing new methods for modernizing the infrastructure of passenger seaports based on the creation of digital models and the use of dynamic data is substantiated. As a solution, it is proposed to create a new digital model of a marine passenger port using information obtained from unmanned aircraft systems. This model will accurately take into account the infrastructural features of passenger ports and terminals, as well as the established priority of berths for the service of cruise and ferry ships. For multi-scenario modeling, a new digital model of the marine passenger port of St. Petersburg “Marine Façade” is proposed. To analyze the simulation results, the developed software modules in the Python programming language are proposed to describe the behavior strategies of the decision maker (port manager). To describe the decision-making process in the conditions of uncertainty that arises when making a decision on the modernization of the port infrastructure, the choice of the Wald criterion was justified as a criterion. A series of experiments was performed, based on the data, digital 2D and 3D models of a marine passenger port were formed for subsequent use in the AnyLogic environment, and a digital twin was built. A distinctive feature of the model is the up-to-date information on the state of the transport infrastructure and integration with data on ship calls. The presented model, methods of working with the results of multi-dimensional modeling, the use of unmanned aircraft systems, and the development of a model based on decision-making under uncertainty can be applied to other passenger seaports and terminals, which emphasizes the universality of the proposed approach.

Keywords: passenger seaport, unmanned aircraft systems, digital model, decision-making under uncertainty, infrastructure modernization, modeling, passenger seaport

For citation: Maïorov N. N., Silina A. A., Fetisov V. A. Research of modernization of sea passenger port based on digital twin and infrastructure assessment using dynamic data from unmanned aerial systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2024;2:76-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-76-88>. EDN QKMZYZ.

Введение

Существенные изменения в мировой экономике, такие как развитие современной транспортной инфраструктуры, изменения в обществе, развитие глобального туризма, а также повсеместное внедрение цифровых технологий, напрямую влияют на

развитие портов и морских терминалов. Морские пассажирские порты и терминалы являются новыми точками роста и развития городов и регионов. При исследовании развития данных объектов необходимо рассматривать взаимное влияние систем «город (мегаполис, транспортная инфра-

Майоров Н. Н., Силкина А. А., Фетисов В. А. Исследование модернизации морского пассажирского порта на основе цифрового двойника и оценка инфраструктуры с помощью динамических данных от беспилотных авиационных систем

структура) – морской пассажирский порт». В работе [1] Г. Норклифф обоснованно выделяет три периода в эволюции отношений городов и морских портов: период симбиоза городов и портов, период активного роста мегаполисов в отрыве от портов и период активного роста портов за пределами мегаполисов, сопровождающийся отрывом внутригородской причальной линии от разрастающегося порта. Несмотря на то что существует историческая взаимосвязь между развитием портов и городов, в настоящее время наблюдается усиление влияния других факторов на взаимодействие систем «город – морской пассажирский порт», таких как конкуренция на рынке пассажирских морских перевозок, повышенные экологические требования и дефицит площадей для новых пассажирских портов и терминалов в городах и мегаполисах. Решение вопросов прогнозирования развития, изменений в инфраструктуре, оценки влияния необходимо находить на основе исследования систем «морской пассажирский порт – город и его инфраструктура». Пассажирские порты должны интегрироваться в единую транспортную сеть городов, обеспечивая максимальный пассажиропоток и быстрый доступ к центральным частям мегаполисов, исторической и деловой части городов. Данное обстоятельство определяет актуальность вопросов прогнозирования развития морских пассажирских портов, формирования системы принятия решений по модернизации инфраструктуры порта для достижения определенных показателей по пассажиропотоку и судопотоку круизных и паромных судов.

Материалы исследования

Несмотря на мировые ограничения в перемещении пассажиров, вызванные COVID-19 в период с 2019 по 2021 г., сегодня отмечается активное восстановление морских паромных и круизных сетей, вывод на рынок новых направлений и маршрутов, активное стремление паромных и круизных компаний к достижению докризисного уровня по всем регионам морей, что также свидетельствует о активном развитии и восстановлении отрасли [2] (рис. 1–3). Под влиянием внешней среды система портов и терминалов в регионе вынуждена формировать ответное воздействие. Данное воздействие может находить отражение в модернизации, наращивании причальной инфраструктуры под новые типы судов, введении новых информационных логистических сервисов для пассажиров, изменении процессов обслуживания пассажиров и судов в порту для минимизации задержек, изменении околотерминального транспортного пространства. Модернизация инфраструктуры, к примеру, в регионе Балтийского моря будет обуславливать изменение интенсивности работы порта в сторону возрастания и привлечения новых маршрутов по отношению к другим портам региона. Таким образом, произойдет перераспределение пассажирских потоков и приоритетов у пассажиров. К примеру, в статье [3] представлена модель эволюции и управления развития морского пассажирского порта, на основе данных представлен современный тренд на увеличение размеров круизных и паромных судов.

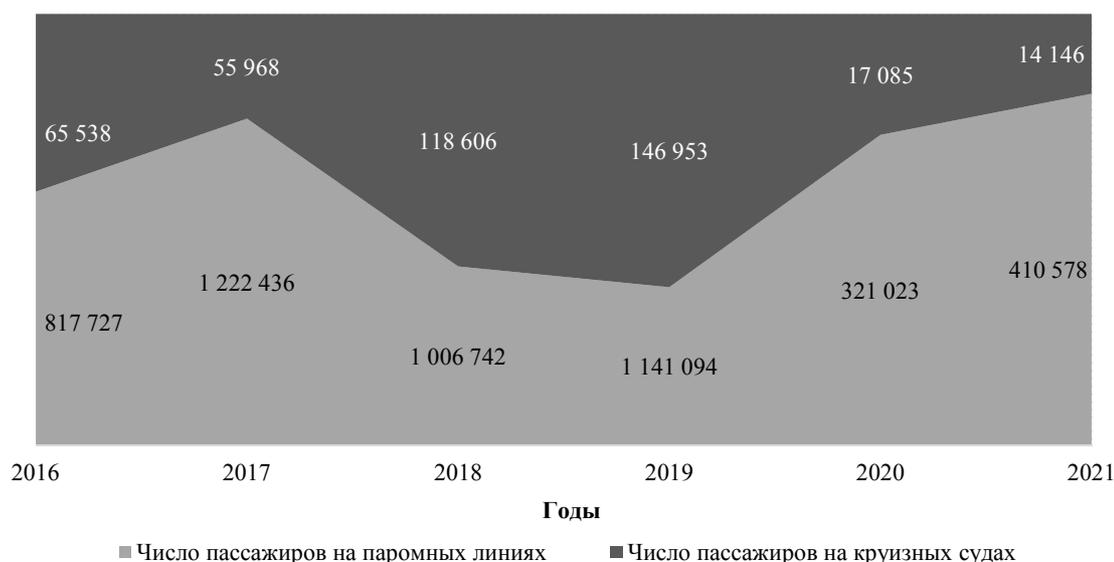


Рис. 1. Число пассажиров на круизных и паромных линиях

Fig. 1. Number of passengers on cruise and ferry lines

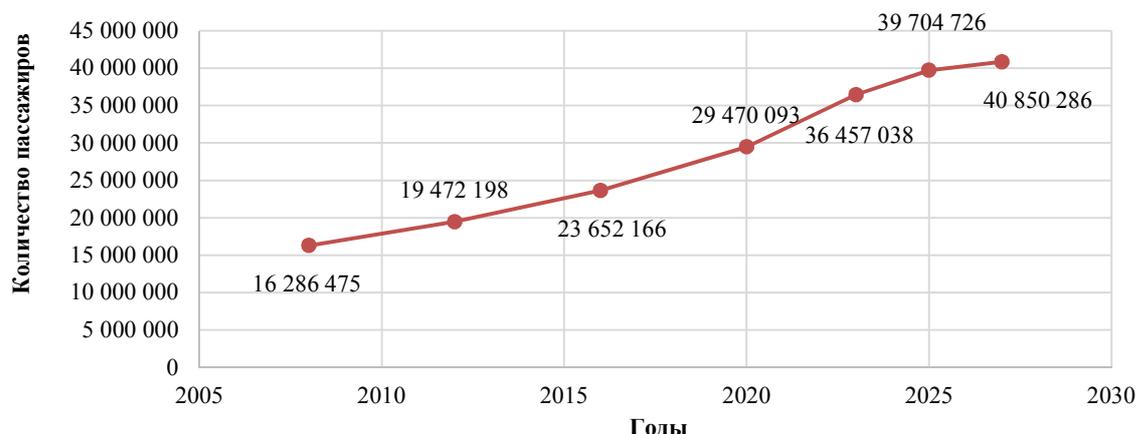


Рис. 2. Тренд по увеличению спроса/емкости рынка круизных и паромных перевозок
Fig. 2. The trend of increasing demand/capacity of the cruise and ferry transportation market

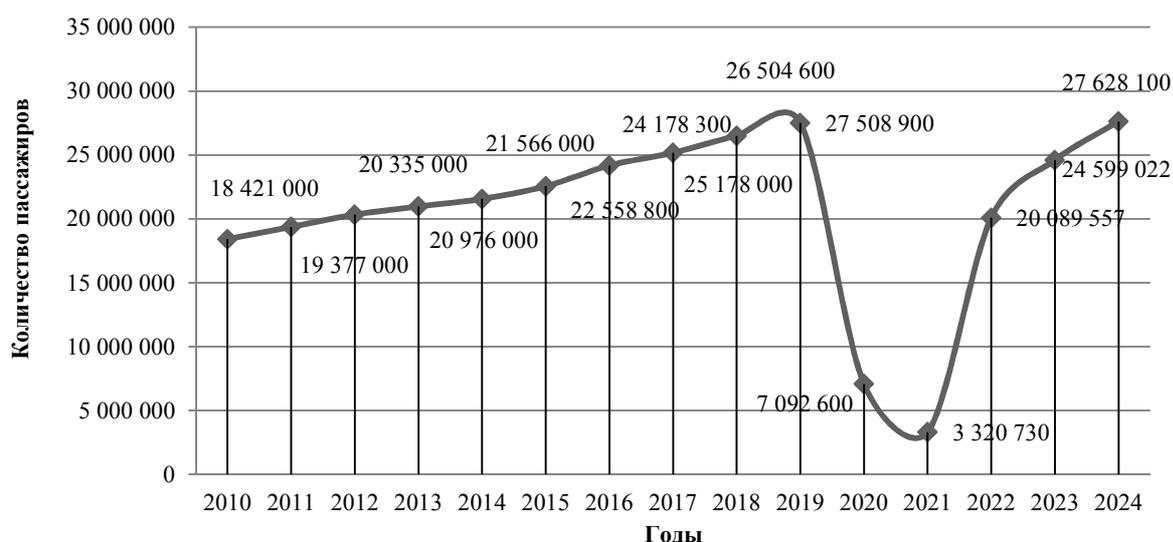


Рис. 3. Рост индустрии мировых круизных линий
Fig. 3. The growth of the global cruise line industry

Согласно результатам исследования мировой отрасли пассажирских паромов, проведенного агентством TMR, стоимость мирового рынка пассажирских паромов в 2022 г. составляет 8,1 млрд долл. США, а к концу 2031 г. возрастет на 7,1 % и достигнет 15,0 млрд долл. [4]. Морские паромы в Балтийском море являются неотъемлемой частью транспортной системы прибрежных городов, не только обеспечивая перемещение людей и грузов, но и способствуя развитию туризма в регионе, а также экономики в целом. На основе периода COVID-19 и исходя из системы показателей эффек-

тивности программы управления портами Train-ForGrade [5] за период с 2016 по 2020 г. количество пассажиров снизилось на 34 % по сравнению со средним показателем за предыдущие 5 лет. Аналогично произошло сокращение пассажиропотока и на круизных линиях – поток пассажиров снизился на 28 %. Только за период с 2019 по 2020 г. количество пассажиров на пароме сократилось на 71 %, а на круизных лайнерах – на 76 % (см. рис. 1). Снижение пассажиропотока значительно повлияло на всю отрасль, однако круизный сектор оказался весьма устойчивым, пассажиропоток постепенно

возрастает и, как ожидается, к концу 2023 г. вернется к уровню 2019 г.

Одной из причин непрерывного роста и глобального распространения круизного туризма, несмотря на влияние негативных факторов, является постоянная реакция круизных линий на изменения внутри рынка. Круизные линии внедряют инновации в области увеличения размеров судов, развития новых портов и модернизации существующих, разработки новых конструкций судов, развития новых маршрутов, в то же время используется все большее число портов захода круизными линиями с целью обеспечения более комфортного пребывания в порту и пункте назначения. Это делает круизную, паромную индустрию наименее подверженной кризисам [6, 7]. Исторически многие города развивались вокруг портов, в настоящее время большинство портов либо находятся поблизости от города, либо располагаются прямо внутри города. Такое сосуществование требует нового подхода к изучению его пространственного расположения [8], поскольку эффективно функционирующие порты могут иметь значительное экономическое и инновационное влияние на весь регион [9–11].

Географически крупнейшими секторами круизных перевозок являются регионы Северной Америки, Европы, а также Азиатско-Тихоокеанский регион. Главными перевозчиками на мировом рынке круизов являются Carnival Corporation, Cruiseaway, Disney Cruise Line, Fred Olsen Cruise Lines, Island Queen Cruises, Luxury Cruise Connections, MSC Cruises, Norwegian Cruise, динамика изменений пассажиропотока приведена на рис. 2.

Объектом исследования в статье является регион Балтийского моря. На рис. 3 (оконная форма сформированной выборки данных, согласно информационно-аналитическим системам [10, 11]) можно увидеть, как сильно повлияла пандемия COVID-19 на пассажиропоток во всем мире, однако важно отметить, что индустрия заметно набирает обороты. Мировой рынок круизных перевозок в данных обстоятельствах демонстрирует значительную устойчивость в условиях экономических кризисов. Для адаптации к современным вызовам и требованиям рынка портам и морским терминалам необходимо использовать современные динамические методы анализа данных для изменения обоснования модернизации своей инфраструктуры.

В настоящее время круизные маршруты Балтийского моря хорошо разработаны, учитывают сезонность и предоставляют расширенные варианты. Они также открывают новые возможности для развития отрасли. Регион Балтийского моря имеет значительный потенциал развития паромных маршрутов благодаря географической близости

стран и развитым круизным сектором региона. При этом сегодня, несмотря на региональную ограниченность и сформированность Балтийского моря, имеется возможность вывода новых направлений или включения нового порта в круизные или паромные маршруты.

Исторически Санкт-Петербург всегда представлял интересный сегмент на данном рынке. В революционный период Ленинград исчез из направлений паромного судоходства Балтийского региона, движение начало восстанавливаться только после распада Советского Союза в декабре 1991 г. [12]. Санкт-Петербург всегда являлся значимой отправной точкой развития для мирового круизного туризма Балтийского региона. В настоящее время в связи с рядом факторов, вызванных, в том числе, пандемией COVID-19, движение круизных судов было полностью остановлено в 2019 г. и не восстановилось до сих пор. Необходимо постепенное восстановление и возобновление работы маршрутных сетей и направлений. К примеру, в «Концепции развития круизного туризма в Российской Федерации на период до 2024 года» [13–15] Санкт-Петербург отмечается одним из основных перспективных пунктов отправления морских маршрутов, однако сегодня происходит перекавалификация на развитие рынка внутреннего туризма.

Таким образом, ввиду влияния современных трендов развития морских паромных и круизных маршрутов для лиц, принимающих решение, руководителей портов, аналитиков отрасли требуется разработка новых подходов и методов для прогнозирования развития и оценки различных сценариев модернизации инфраструктуры. Для достижения цели исследования были разработаны новые цифровые двойники морского пассажирского порта, новые алгоритмы анализа данных. При построении модели обеспечено динамическое изменение и варьирование параметров модели, использование аппарата имитационного моделирования и установление системы принятия решений с использованием динамических данных от беспилотных авиационных систем. Беспилотной авиационной системе отводится роль источника для получения данных с последующей обработкой для включения в цифровую модель.

Модели и методы исследования

Объектом исследования был выбран регион Балтийского моря и морской пассажирский порт «Морской фасад» (АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад»). Анализ интенсивности работы морского пассажирского порта «Морской фасад» с 2015 по 2019 г. (Санкт-Петербург) приведен на рис. 4.

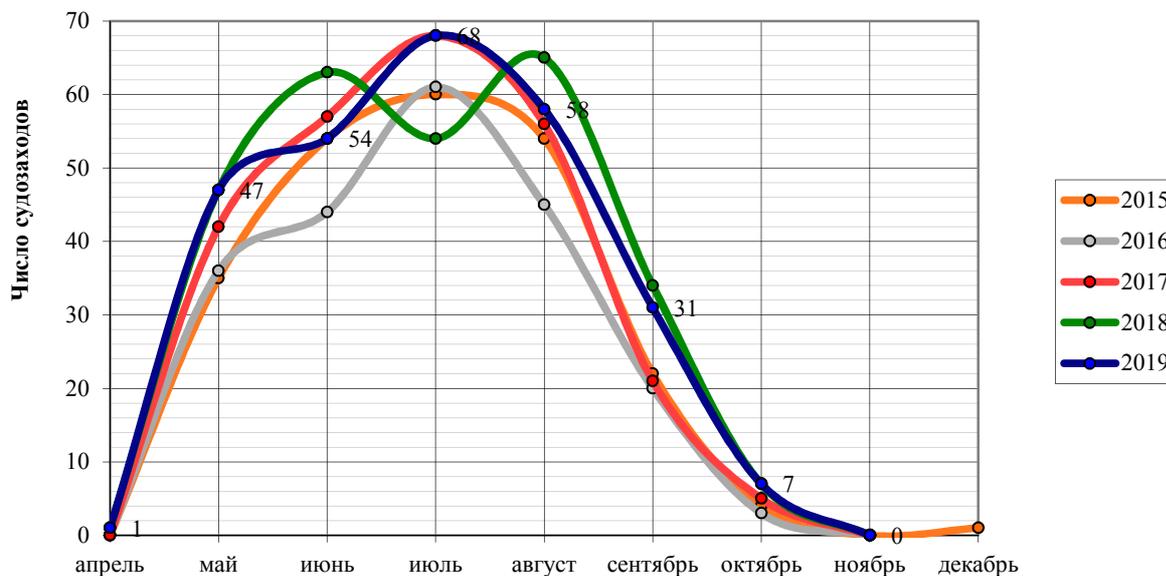


Рис. 4. Интенсивность заходов круизных и паромных судов в пассажирский порт Санкт-Петербурга «Морской фасад» с 2015 по 2019 г.

Fig. 4. The intensity of cruise and ferry ship calls at the passenger port of St. Petersburg “Marine Façade” from 2015 to 2019

Модернизация инфраструктуры морского пассажирского порта должна быть обоснована, при этом влияние внешней среды отражается в необходимости формирования набора прогнозных сценариев развития. Руководитель порта оперирует имеющейся у него интенсивностью работы за прошлые периоды, в то время как для оценки различных сценариев прогнозирования необходимо создать определенное количество гипотез и выполнить последующее моделирование сценариев. Особенно ситуация актуальна, когда формируется задача изменения положения порта относительно других в регионе или существует острая необходимость модернизации по причине формирования нового потока мегалайнеров, которые требуют большей длины причала.

Характерным примером формирования ответа на внешний вызов и влияния тренда на увеличение габарита круизных судов является тот факт, что ввиду увеличения длины судна больше 330 м АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» успешно выполнил проект строительства выносных палов [3] – увеличение длины причалов № 6 и 7 (причального фронта) на 108,6 м. В данном случае морской пассажирский порт «Морской фасад» стратегически реализовал возможность приема крупных морских лайнеров – внес город Санкт-Петербург в новую систему круизных и паромных маршрутов.

Ввиду формирования различных сценариев годовой загруженности необходимо разработать модель данных. Предлагается также использовать динамические данные от беспилотных авиационных систем для построения цифровых моделей с последующей интеграцией в имитационные программные среды. Для работы с данными и формирования модельных сценариев предлагается следующая модель (рис. 5).

С позиций формирования системы принятия решений по модернизации инфраструктуры, от набора данных по интенсивностям судозаходов, необходимо переходить к формированию некоторого поля полезности и анализировать различные стратегии принятия решений при неопределенности. Основные модели принятия решений при неопределенности приведены в учебном пособии Г. Л. Бродецкого [15]. Для выполнения исследования необходимо формирование набора альтернатив на основе результатов работы цифровой имитационной модели и различного набора оптимизационных экспериментов, каждый из которых определяет загруженность порта, загруженность причалов в порту. В представленной на рис. 6 цифровой модели также реализована специализация причалов как для больших лайнеров, так и для обработки морских паромов.

Майоров Н. Н., Силина А. А., Фетисов В. А. Исследование модернизации морского пассажирского порта на основе цифрового двойника и оценка инфраструктуры с помощью динамических данных от беспилотных авиационных систем



Рис. 5. Модель работы с цифровым двойником морского пассажирского порта и включением данных от беспилотных авиационных систем

Fig. 5. The model of working with the digital twin of a marine passenger port and the inclusion of data from unmanned aircraft systems

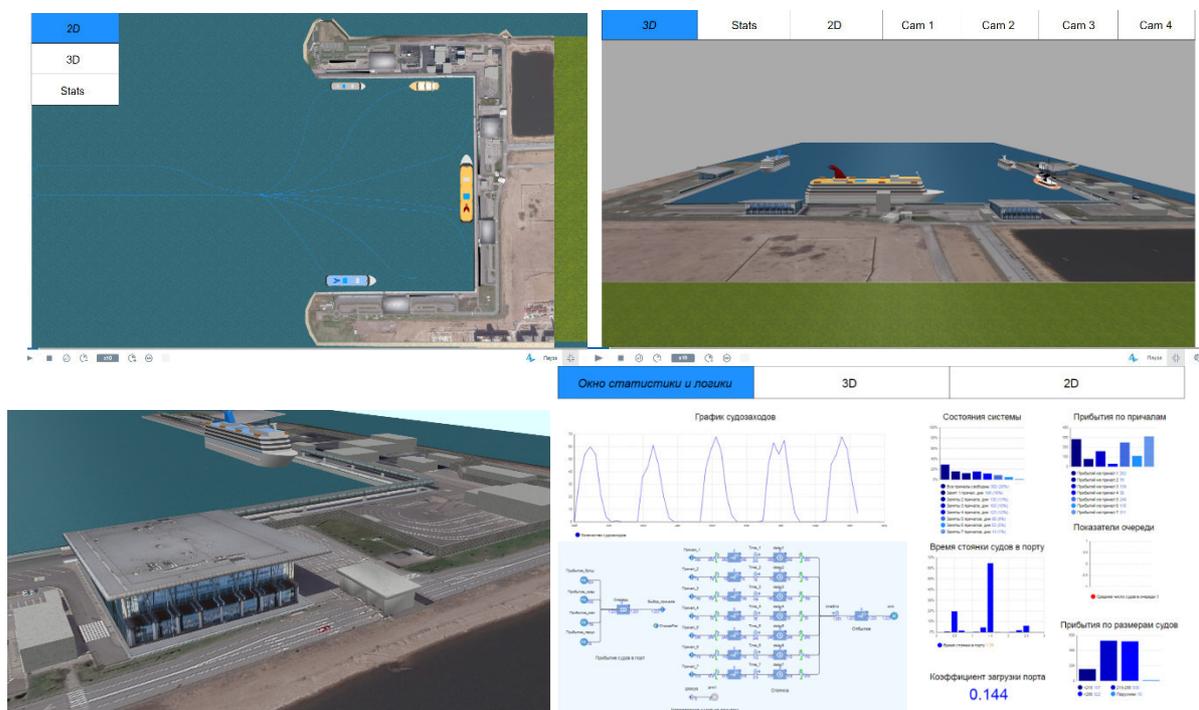


Рис. 6. Имитационная цифровая модель морского пассажирского порта в программной среде AnyLogic: примеры определения загруженности причалов

Fig. 6. Simulation digital model of a marine passenger port in the AnyLogic software environment, examples of determining berth congestion

Из-за активного влияния внешней среды, изменений в отрасли и влияния внешнеэкономической и международной ситуации примем как основную стратегию Вальда. Данный критерий основан на «осторожном поведении» лица, принимающего решения, которое выполняет детальную проработку возможных исходов, оценивает взаимное влияние морских пассажирских портов в регионе. Таким образом, будет достигнут определенный системный выигрыш при наихудших условиях.

Математическая модель, определяющая семейство линий уровня для принятия решений, записывается следующим образом:

$$f(u; v; \dots; z) = \min\{u; v; \dots; z\},$$

где $f(u; v; \dots; z)$ – функция n переменных, аргументом которой являются n -мерные векторы-строки соответствующей матрицы полезностей.

Математическая модель критерия Вальда для выполнения исследования:

$$K_{opt}^{Вальд} = \max_{a_i} \left\{ \min_{s_j} v(a_i, s_j) \right\},$$

$$K_{opt}^{Вальд} = \min_{a_i} \left\{ \max_{s_j} v(a_i, s_j) \right\},$$

где величина $v(a_i, s_j)$ приобретает либо значения полученной прибыли, либо исходы потери работы системы.

После получения результатов работы модели цифрового двойника и морского пассажирского порта формируется поле полезности, определяются графические зависимости результатов и формируются линии уровня. Необходимо отметить, что лицо, принимающее решение, может самостоятельно формировать набор линий уровня в зависимости от целевых установок. При использовании

аппарата принятия решений при неопределенности открывается возможность получить самые крайние значения работы системы, некоторые утопические и антиутопические точки, которые характеризуют либо самую минимальную загруженность порта, либо максимальный уровень загрузки порта.

Практическое исследование принятия решения по модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта на основе многосценарного моделирования и использования данных от беспилотных авиационных систем

Для анализа различных сценариев работы морского пассажирского порта была создана цифровая транспортная модель с использованием программного обеспечения AnyLogic [16, 17]. В качестве исходных данных была выбрана интенсивность работы АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» за навигационный период до 2019 г. Для каждого типа распределения входного потока было проведено большое количество экспериментов с использованием цифровой транспортной модели, разработанной в среде AnyLogic. Минимальное количество экспериментов при выделении отдельного состояния составляет 30 экспериментов. В цифровой модели реализована возможность не только менять законы распределения из набора базовых, но и формировать самостоятельные условия. Оконная форма разработанной цифровой модели морского пассажирского порта в вариантах 2D и 3D приведена на рис. 6.

На основе выполненного моделирования ожидаемое значение входного потока было установлено с использованием данных за 2019 г. и составляло 265 судов в год для морского пассажирского порта. Результаты исследования представлены в таблице.

Результаты эксперимента

The results of the experiment

| Номер эксперимента | Общее количество судов | | |
|--------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| | Гамма-распределение | Распределение Пуассона | Нормальное распределение |
| 1 | 247 | 263 | 249 |
| 2 | 289 | 221 | 240 |
| 3 | 240 | 269 | 242 |
| 4 | 297 | 273 | 264 |
| 5 | 280 | 320 | 284 |
| 6 | 264 | 317 | 266 |

Для моделирования интенсивностей судозаходов был разработан дополнительный отдельный программный модуль. Фрагмент программного

кода на языке Python поиска оптимального решения по полученным модельным интенсивностям по критерию Вальда представлен на рис. 7.

```
def crit_vald(data):
    mm_crit = {}
    mm_dop = []
    for key, value in data.items():
        mm_crit[key]=min(value)
        mm_dop.append(min(value))
    #print(mm_crit)
    a = max(mm_dop)
    b = min(mm_dop)
    for key, value in mm_crit.items():
        if value == a:
            return {key:value}
        if value == b:
            print('Антиутопическое решение = ', b)
DATA = {'X1': [247, 263, 249],
        'X2': [289, 221, 240],
        'X3': [240, 269, 242],
        'X4': [297, 273, 264],
        'X5': [280, 320, 284],
        'X6': [264, 317, 266]}
if __name__ == "__main__":
    print(f'Решение по критерию Вальда (ММ-показатель): {crit_vald(DATA)}')
```

Рис. 7. Фрагмент программного кода для анализа данных по критерию Вальда (ММ-показатель)

Fig. 7. A fragment of the program code for analyzing data according to the Wald criterion (MM-indicator)

На основе анализа данных интенсивностей полученная область поля полезностей ограничивается антиутопической точкой со значением 221 судна и утопической точкой со значением 280 судов (рис. 8).

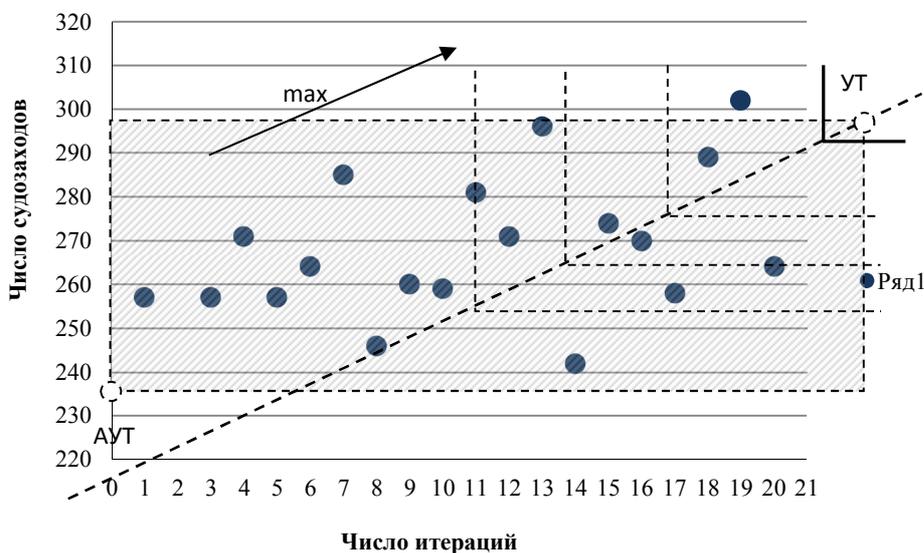


Рис. 8. Результаты работы модели принятия решения по критерию Вальда по оценке загруженности причалов морского пассажирского порта

Fig. 8. Results of the work of the decision-making model according to the Wald criterion for assessing the workload of berths of a marine passenger port

Для повышения точности моделирования предлагается использование динамических данных от беспилотных авиационных систем (квадрокоптеров). Благодаря им необходимо произвести фотосъемку и, обработав результаты в специальном программном обеспечении, получить готовую цифро-

вую модель. Работа может проводиться и дистанционно, тем самым увеличивая скорость и безопасность проведения мониторинга. Кроме того, данный метод – один из самых высокопроизводительных способов аэрофотосъемки. Согласно схеме порта «Морской фасад» был разработан его макет и цифровая 3D-модель. Эксперименты по построению цифровой модели на основе данных от беспилотных авиационных систем выполнялись в лаборатории

беспилотных авиационных систем инженерной школы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Код автономного полета написан на языке Python. После проведения аэрофотосъемки тестового полигона полученные снимки были преобразованы в трехмерную модель поверхности с использованием программного обеспечения Metashape [18], результаты приведены на рис. 9.

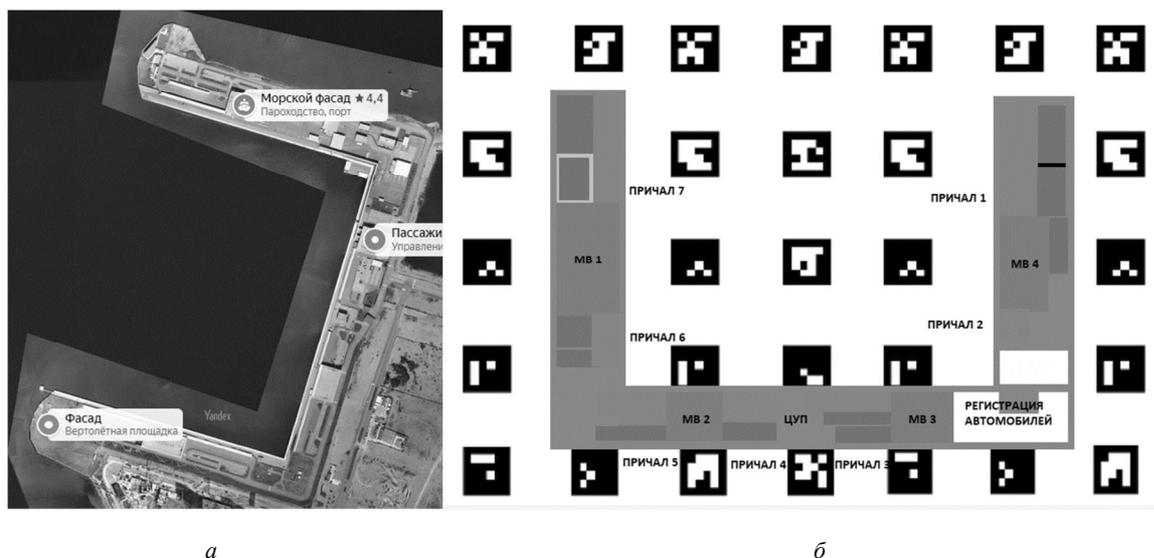


Рис. 9. Схема порта «Морской фасад» (а) и схема размещения макета (модели в масштабе) порта «Морской фасад» в исследовательском летном поле (б)

Fig. 9. The scheme of the port “Marine Façade” (a) and the layout of the layout (scale model) of the port “Marine Façade” in the research airfield (b)

Для создания трехмерной модели порта используется челночная схема облета беспилотной авиационной системой. По ней выполнен автономный

полет согласно разработанному маршруту с выполнением аэрофотосъемки модели на летном поле. Итоговая модель приведена на рис. 10.

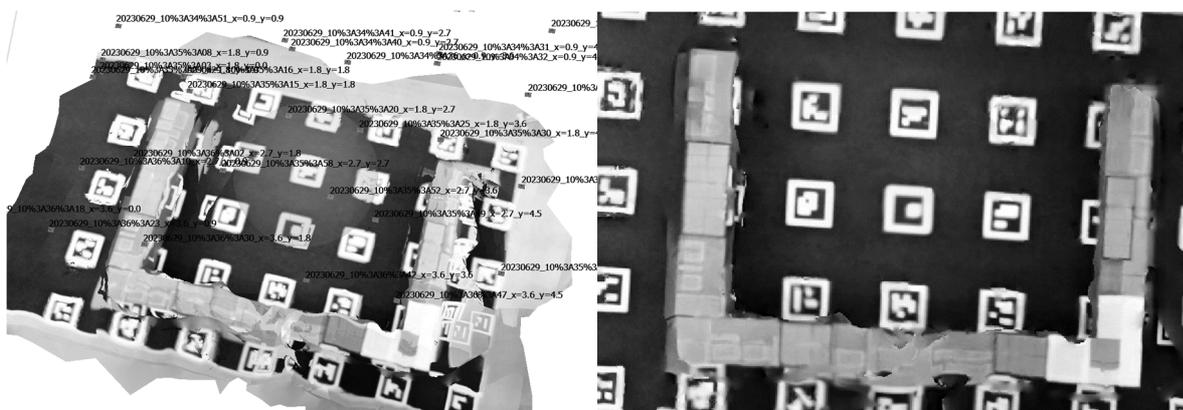


Рис. 10. Трехмерная модель полигона для построения модели причалов морского пассажирского порта

Fig. 10. Three-dimensional polygon model for constructing a model of berths of a marine passenger port

Полученная модель является основой для переноса в имитационную программную среду AnyLogic и выполнения последующего многосценарного моделирования. За счет включения модуля с данными от беспилотных авиационных систем повышается точность использования инфраструктуры морского пассажирского порта, точность моделирования и качество представления модели. Кроме того, наличие системы 3D динамических моделей от беспилотных авиационных систем позволяет фиксировать отдельные стадии в развитии инфраструктуры.

Заключение

Сегодня для оценки прогнозирования развития объектов морских пассажирских портов недостаточно использовать только детерминированные модели. Ввиду влияния внешней среды и повышенных требований к детализации процессов необходима разработка цифровых транспортных моделей, цифровых двойников с возможностью выполнения многосценарного моделирования. Кроме использования отдельно имитационных программных сред, необходимо обеспечивать точность и детализацию инфраструктуры в разработанных моделях. В связи с данным обстоятельством использование цифровой имитационной модели совместно с данными от беспилотных авиационных систем является перспективным направлением.

Выполненное исследование демонстрирует включение в имитационную модель элементов инфраструктуры морского пассажирского порта, включая его объекты и сооружения. Успешные лабораторные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования цифровых моделей

для своевременного анализа актуальных данных о состоянии портовой инфраструктуры. Применение современных программных средств обработки данных, полученных с помощью беспилотных авиационных систем, позволяет создавать высокоточные цифровые модели.

Обоснован метод анализа результатов многосценарного моделирования с позиций моделей принятия решений при неопределенности. Ввиду возможности варьирования моделей принятия решений открывается возможность описывать отдельное поведение лица, принимающего решение, от характера влияния внешней среды. Данное обстоятельство позволяет повысить точность принятия решений по обоснованию модернизации инфраструктуры.

Благодаря применению модулей принятия решений при неопределенности и определению полей полезности были выявлены ошибочные данные и, как следствие, определены возможные ошибки от использования некорректных данных по интенсивностям судозаходов.

В результате исправления также были получены новые алгоритмы обработки данных, новые программные модули и цифровые модели. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможной интеграции предложенного решения в контур принятия решения по управлению морским пассажирским портом. Дополнительно результаты моделирования позволяют утверждать об универсальности использования цифровых моделей и данных от беспилотных авиационных систем для оценки состояния инфраструктуры, загруженности морского порта и оценки модернизации инфраструктуры.

Список источников

1. Norcliffe G., Bassett K., Hoare T. The emergence of postmodernism on urban waterfront: Geographical perspectives on changing relationships // *Journal of Transport Geography*. 1996. V. 4. Iss. 2. P. 123–134.
2. Ćorluka G., Peronja I., Tubić D. Cruise Port Passenger Flow Analysis: a Cruise Port Governance Perspective // *Naše More*. 2020. V. 67. N. 3. P. 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
3. Майоров Н. Н., Добровольская А. А. Исследование вариантов обоснования модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта для решения задачи прогнозирования его развития с учетом влияния внешней среды // *Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова*. 2022. Т. 14. № 5. С. 701–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-701-712.
4. Wilmington Delaware March 28, 2023 (Globe Newswire). URL: <https://www.transparencymarketresearch.com/microcars-market.html/> (дата обращения: 06.11.2023).
5. TrainForTrade. URL: <https://tft.unctad.org/> (дата обращения: 06.11.2023).
6. Smirnov A., Smolokurov E., Timofeeva E., Krovsh S. Features of Development of Sea Cruise Tourism // *Transportation Research Procedia*. 2022. V. 61. P. 147–154.
7. Zhang H., Wang Q., Chen J., Rangel-Buitrago N., Shu Y. Cruise tourism in the context of COVID-19: Dilemmas and solutions // *Ocean and Coastal Management*. 2022. V. 228. P. 106321.
8. Rodrigue J.-P., Wang G. W. Y. Cruise shipping supply chains and the impacts of disruptions: The case of the Caribbean // *Research in Transportation Business and Management*. 2022. V. 45. Part B. P. 100551.
9. CLIA: Economic impact. URL: https://cruising.org/-/media/Facts-and-Resources/CLIA_Economic-Impact-Factsheet_June-2020_Global#:~:text=The%20cruise%20industry%20is%20a,and%2C%20of%20course%2C%20tourism (дата обращения: 06.11.2023).
10. Cruise Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, by Type (Ocean Cruises and River Cruises), by Region, and Segment Forecasts, 2023-2032. URL: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/cruise-market> (дата обращения: 06.11.2023).
11. 2021 Worldwide Cruise Line Market Share. URL: <https://cruisemarketwatch.com/market-share/> (дата обращения: 06.11.2023).

12. Майоров Н. Н. Развитие морских паромных перевозок в Балтийском море в контексте глобальных тенденций // Систем. анализ и логистика. 2020. № 1 (23). С. 65–73.

13. Об утверждении Концепции развития круизного туризма в Российской Федерации на период до 2024 года: Распоряжение Правительства РФ от 28.01.2022 № 117-р. URL: www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403388914/ (дата обращения: 06.11.2023).

14. Passenger ferries market size. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/passenger-ferries-market-103655> (дата обращения: 06.11.2023).

15. Бродетский Г. Л. Системный анализ в логистике.

Принятие решений в условиях неопределенности. М.: Academia, 2010. 336 с.

16. Anylogic. URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 06.11.2023).

17. Добровольская А. А., Майоров Н. Н., Язвенко М. Р. Исследование вариантов модернизации инфраструктуры транспортного терминала на основе вероятностных моделей // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: материалы XXV Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 30 мая – 03 июня 2022 г.). Санкт-Петербург: Изд-во ГУАП, 2022. Ч. 3. С. 162–170.

18. Agisoft Metashape. URL: <https://www.agisoft.com/> (дата обращения: 06.11.2023).

References

1. Noreliffe G., Bassett K., Hoare T. The emergence of postmodernism on urban waterfront: Geographical perspectives on changing relationships. *Journal of Transport Geography*, 1996, vol. 4, iss. 2, pp. 123-134.

2. Ćorluka G., Peronja I., Tubić D. Cruise Port Passenger Flow Analysis: a Cruise Port Governance Perspective. *Naše More*, 2020, vol. 67, no. 3, pp. 181-191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.

3. Maïorov N. N., Dobrovol'skaia A. A. Issledovanie variantov obosnovaniia modernizatsii infrastruktury morskogo passazhirskogo porta dlia resheniia zadachi prognozirovaniia ego razvitiia s uchetom vliianiia vneshnei sredy [The study of options for justifying the modernization of the infrastructure of a marine passenger port to solve the problem of forecasting its development taking into account the influence of the external environment]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 701-712. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-701-712.

4. *Wilmington Delaware March 28, 2023 (Globe Newswire)*. Available at: <https://www.transparencymarketresearch.com/microcars-market.html/> (accessed: 06.11.2023).

5. *TrainForTrade*. Available at: <https://tft.unctad.org/> (accessed: 06.11.2023).

6. Smimov A., Smolokurov E., Timofeeva E., Krovsh S. Features of Development of Sea Cruise Tourism. *Transportation Research Procedia*, 2022, vol. 61, pp. 147-154.

7. Zhang H., Wang Q., Chen J., Rangel-Buitrago N., Shu Y. Cruise tourism in the context of COVID-19: Dilemmas and solutions. *Ocean and Coastal Management*, 2022, vol. 228, p. 106321.

8. Rodrigue J.-P., Wang G. W. Y. Cruise shipping supply chains and the impacts of disruptions: The case of the Caribbean. *Research in Transportation Business and Management*, 2022, vol. 45, part B, p. 100551.

9. *CLIA: Economic impact*. Available at: https://cruising.org/-/media/Facts-and-Resources/CLIA_Economic-Impact-Factsheet_June-2020_Global#:~:text=The%20cruise%20industry%20is%20a,and%2C%20of%20course%2C%20tourism (accessed: 06.11.2023).

10. *Cruise Market Share, Size, Trends, Industry Analysis*

Report, by Type (Ocean Cruises and River Cruises), by Region, and Segment Forecasts, 2023-2032. Available at: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/cruise-market> (accessed: 06.11.2023).

11. *2021 Worldwide Cruise Line Market Share*. Available at: <https://cruisemarketwatch.com/market-share/> (accessed: 06.11.2023).

12. Maïorov N. N. Razvitie morskikh paromnykh перевозок v Baltiiskom more v kon-tekste global'nykh tendentsii [The development of sea ferry services in the Baltic Sea in the context of global trends]. *Sistemnyi analiz i logistika*, 2020, no. 1 (23), pp. 65-73.

13. *Ob utverzhenii Kontseptsii razvitiia kruiznogo turizma v Rossiiskoi Federatsii na period do 2024 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28.01.2022 № 117-r* [On approval of the Concept for the development of cruise tourism in the Russian Federation for the period up to 2024: Decree of the Government of the Russian Federation dated 01/28/2022 No. 117-r]. Available at: www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403388914/ (accessed: 06.11.2023).

14. *Passenger ferries market size*. Available at: <https://www.fortunebusinessinsights.com/passenger-ferries-market-103655> (accessed: 06.11.2023).

15. Brodetskii G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Priniatie reshenii v usloviakh neopredelennosti* [System analysis in logistics. Decision-making in conditions of uncertainty]. Moscow, Academia Publ., 2010. 336 p.

16. Anylogic. Available at: <https://www.anylogic.ru/> (accessed: 06.11.2023).

17. Dobrovol'skaia A. A., Maïorov N. N., Iazvenko M. R. Issledovanie variantov modernizatsii infrastruktury transportnogo terminala na osnove veroiatnostnykh modelei. *Volnovaia elektronika i infokommunikatsionnye sistemy* [The study of options for upgrading the infrastructure of the transport terminal based on probabilistic models. Wave electronics and infocommunication systems]. *Materialy XXV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Sankt-Peterburg, 30 maia – 03 iunია 2022 g.)*. Saint Petersburg, Izd-vo GUAP, 2022. Part 3. Pp. 162-170.

18. *Agisoft Metashape*. Available at: <https://www.agisoft.com/> (accessed: 06.11.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Николаевич Майоров – доктор технических наук, доцент; профессор кафедры системного анализа и логистики; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; sciencesuai@yandex.ru

Nikolai N. Maiorov – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Systems Analysis and Logistics; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; sciencesuai@yandex.ru.

Ангелина Александровна Силина – ассистент кафедры системного анализа и логистики; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; angd999@gmail.com

Angelina A. Silina – Lecturer of the Department of Systems Analysis and Logistics; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; angd999@gmail.com

Владимир Андреевич Фетисов – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой системного анализа и логистики; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; fet1@aanet.ru

Vladimir A. Fetisov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of System Analysis and Logistics; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; fet1@aanet.ru

