

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211

SIMULATION OF SEA PASSENGER PORT OPERATION ON THE BASIS OF A DIGITAL TRANSPORT MODEL TAKING INTO ACCOUNT DIFFERENT PRIORITIES OF CRUISE AND FERRY VESSELS

N. N. Maiorov, V. A. Fetisov, A. A. Silina

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

New approach for the analysis of the incoming flow of cruise or ferry ships, taking into account the division into sizes and the formation of new signs of berths “priority”, is proposed. To solve the problem of multiscenario modeling it is proposed to use Poisson and normal distributions. Also, in order to extend the model of ship requests prioritization, it is proposed to consider the situation when the intervals between ship calls in the flow of ships obey gamma distributions that take into account the after-effects of the flow. The reference data in this paper are the known intensities of operation of the Passenger Port of St. Petersburg “Sea Façade” during the navigation period. To verify the results, the data for the maximum monthly load of the sea passenger port are chosen. The performed analysis of berths loading is presented in the paper and the data on intervals between cruise and ferry ships are investigated. To solve the problem of “multiscenario modeling”, a new digital model of the sea passenger port is presented. The digital model aims at solving the problems of “sea cruise/ferry line — sea passenger port/terminal” systems research, taking into account the possibility of dynamic change of parameters by the intensity of work. The justification of using “optimization experiment” is presented; the results of the research performance both without the “priority” parameter and taking into account the “priority”, as well as the results of the runs of the developed special digital model of the passenger port are given. On the basis of the results of multi-scenario modeling, new results, proving that the introduction of cruise or ferry ships “priority” into the model by berths achieves the effect of increasing the throughput capacity, are obtained. Based on the presented modeling, the effectiveness of including a study based on gamma distribution is confirmed. The obtained results of multiscenario modeling with the allocation and implementation of “priority” in conjunction with the use of macro-level regional planning based on Circos intensity diagrams allow us to form a complete data set for multi-criteria analysis of changes in response to the influence of the external environment and assessment of the sea passenger port position in the sea region. The presented methodology, developed models on “prioritization” and modeling results can be applied to other maritime ports.

Keywords: sea passenger port, ferry line intensities, berth congestion, simulation model, mass service systems, infrastructure modernization, digital transport model.

For citation:

Maiorov, Nikolai N., Vladimir A. Fetisov, and Angelina A. Silina. “Simulation of sea passenger port operation on the basis of a digital transport model taking into account different priorities of cruise and ferry vessels.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 197–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211.

УДК 65.012.1, 656.072

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ПОРТА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ПРИОРИТЕТОВ КРУИЗНЫХ И ПАРОМНЫХ СУДОВ

Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Силина

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предложен новый подход для анализа входящего потока круизных и паромных судов с учетом разделения на размеры и формирования новых признаков «приоритетности» причалов. Для решения задачи много-сценарного моделирования предлагается использование пуассоновского и нормального распределений.

Также для расширения модели приоритетности заявок судов предлагается рассмотреть ситуацию, когда в потоке судов интервалы между судозаходами подчиняются гамма-распределениям, учитывающим последствие потока. Эталонными данными в работе выбраны известные интенсивности работы «Пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад» за навигацию. Для проверки результатов выбраны данные для максимальной месячной загрузки морского пассажирского порта. В статье представлен анализ загруженности причалов, исследованы данные по интервалам между круизными и паромными судами. Для решения задачи «многосценарного моделирования» представлена новая цифровая модель морского пассажирского порта, направленная на решение задач исследования систем «морская круизная / паромная линия — морской пассажирский порт / терминал», с учетом возможности динамического изменения параметров по интенсивностям работы. Представлено обоснование использования «оптимизационного эксперимента», приведены результаты выполнения исследования как без параметра «приоритетности», так и с учетом «приоритетности», а также результаты «прогнозов» разработанной специальной цифровой модели пассажирского порта. На основе результатов многосценарного моделирования получены новые данные, доказывающие, что при введении в модель «приоритетности» круизных или паромных судов по причалам достигается эффект возрастания пропускной способности. На основе представленного моделирования подтверждается эффективность включения исследования на основе гамма-распределения. Полученные результаты многосценарного моделирования с выделением и реализацией «приоритетности» в совокупности с использованием на макроуровне регионального планирования на основе круговых диаграмм интенсивностей Circos позволяют сформировать полный набор данных для многокритериального анализа изменений в ответ на влияние внешней среды и оценки положения морского пассажирского порта в регионе моря. Представленная методика, разработанные модели по выделению «приоритетности» и результаты моделирования могут быть применены для других морских пассажирских портов и терминалов, что определяет универсальность представленного подхода.

Ключевые слова: морской пассажирский порт, интенсивности паромных линий, загруженность причалов, имитационная модель, системы массового обслуживания, модернизация инфраструктуры, цифровой двойник.

Для цитирования:

Майоров Н. Н. Моделирование работы морского пассажирского порта на основе цифровой транспортной модели с учетом различных приоритетов круизных и паромных судов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Силина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 197–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211.

Введение (Introduction)

Морской пассажирский порт в транспортной системе региона и города играет важнейшую роль, являясь сложной технологически взаимосвязанной системой, направленной на обслуживание пассажиропотока и обработку сопутствующих грузов и транспортных средств с высоким уровнем оперативности. Необходимо отметить, что исследованием сферы морских круизов занимались многие ученые и специалисты [1], [2], но на основе детального анализа видно, что представленные исследования затрагивают только отдельные выбранные области (например, только эксплуатационные вопросы развития морских круизных линий либо рассмотрение только отдельных морских пассажирских портов и терминалов [3]–[5].

Успешность региона и города, в котором располагается морской пассажирский порт [7], зависит от многих факторов и условий, одним из которых является достижение непрерывного развития. Морской пассажирский порт находится под влиянием многих как внутренних, так и внешних воздействий, являющихся источником начала формирования обратных управляющих воздействий для достижения нового уровня или стабилизации существующего уровня интенсивностей работы морских паромных и круизных линий, некоторого стабильного уровня развития круизного сектора в регионе. Развитие морского пассажирского порта или терминала напрямую влияет на развитие региона, наземной околопортовой транспортной инфраструктуры, логистических сервисов и создание новых сегментов для пользователей порта и элементов инфраструктуры.

В настоящее время сфера морских круизных и паромных перевозок, несмотря на некоторый временный спад по причине ограничений Covid-19, находится в стадии активного восстановления и развития. Статистические данные по другим регионам морей приведены в работах [4], [6],

а также аналитических отчетах по отрасли [8], [9]. Аналитические данные по восстановлению пассажиропотока приведены на рис. 1, на котором представлены мировые статистические данные по количеству причалов для морских круизных и паромных линий до 2026 г., согласно [9], и линия тренда, характеризующая увеличение количества введенных новых причалов.

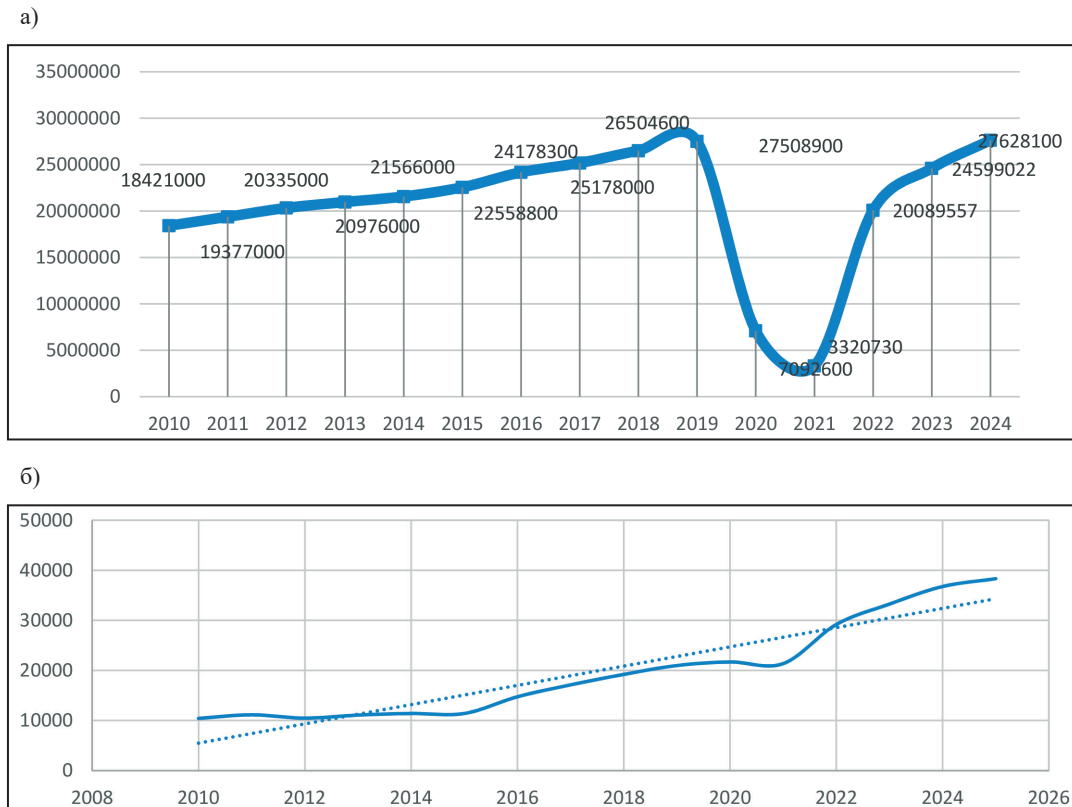


Рис. 1. Аналитические данные, характеризующие активное восстановление пассажиропотока морских круизных и паромных линий (а), и аналитические данные роста количества причалов для морских круизных и паромных судов согласно аналитическому отчету CIN (б)

Fig. 1. Analytical data characterizing the active restoration of passenger traffic of sea cruise and ferry vessels (a), and analytical data on the growth in the number of berths for sea cruise and ferry ships according to the CIN analytical report (b)

Приведенные на рис. 1 данные, с одной стороны, подтверждают активное развитие сферы морских пассажирских перевозок, а с другой — определяют тенденцию на ввод новых и модернизацию существующих причалов в портах под новые круизные суда. Ситуация активного влияния внешней среды и современных трендов на увеличение размеров новых круизных и паромных судов обуславливает необходимость модернизации причалов. Вместе с тем из-за конкуренции за пассажиропоток в регионах морей, например, в регионе Балтийского моря, любые изменения в маршрутных сетях приводят к уменьшению или наоборот увеличению роли порта в регионе за счет связанности портов. Поэтому лицам, принимающим решение, необходимо иметь комплекс цифровых решений, цифровых двойников, которые позволяют выполнить многокритериальную комплексную оптимизацию «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт – околопортовая транспортная наземная инфраструктура».

Объектом исследования в работе выбрано исследование взаимодействия систем «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт». Актуальность исследования обусловлена тем, что несмотря на плановые данные судозаходов, из-за влияния внешней среды возможны изменения как по причине возникновения вероятностных процессов, так и ввиду формирования новых стратегических требований по модернизации инфраструктуры для соответствия новым требованиям отрасли. Объектом исследования является входящий поток круизных

и паромных судов, причалы морского пассажирского порта, которым назначаются определенные приоритеты.

Предметом настоящего исследования является математическая проблема исследования входящего потока судов с формированием приоритетных заявок в очереди с помощью многосценарного моделирования и моделей систем массового обслуживания. Данная модель является частной, рассматриваемой авторами в работе [10]. Возникшая ситуация требует разработки нового аппарата и программной реализации признака «приоритетности» для моделирования различной интенсивности круизных и паромных судов в специализированной цифровой модели.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Определение положения морского пассажирского порта в регионе моря на основе дискретного набора интенсивностей, фиксация изменений в маршрутных сетях с автоматическим определением вклада порта в региональную сферу пассажирских перевозок представлены в работах [11], [12]. В данной модели на основе построения Circos круговых диаграмм интенсивностей основной переменной исследуются изменения в маршрутных сетях в выбранном регионе, например, Балтийском море [12], [13]. Представим основную модель тренда на увеличение размеров круизных и паромных судов и изменения в входящем потоке судов для морского пассажирского порта или терминала (рис. 2).

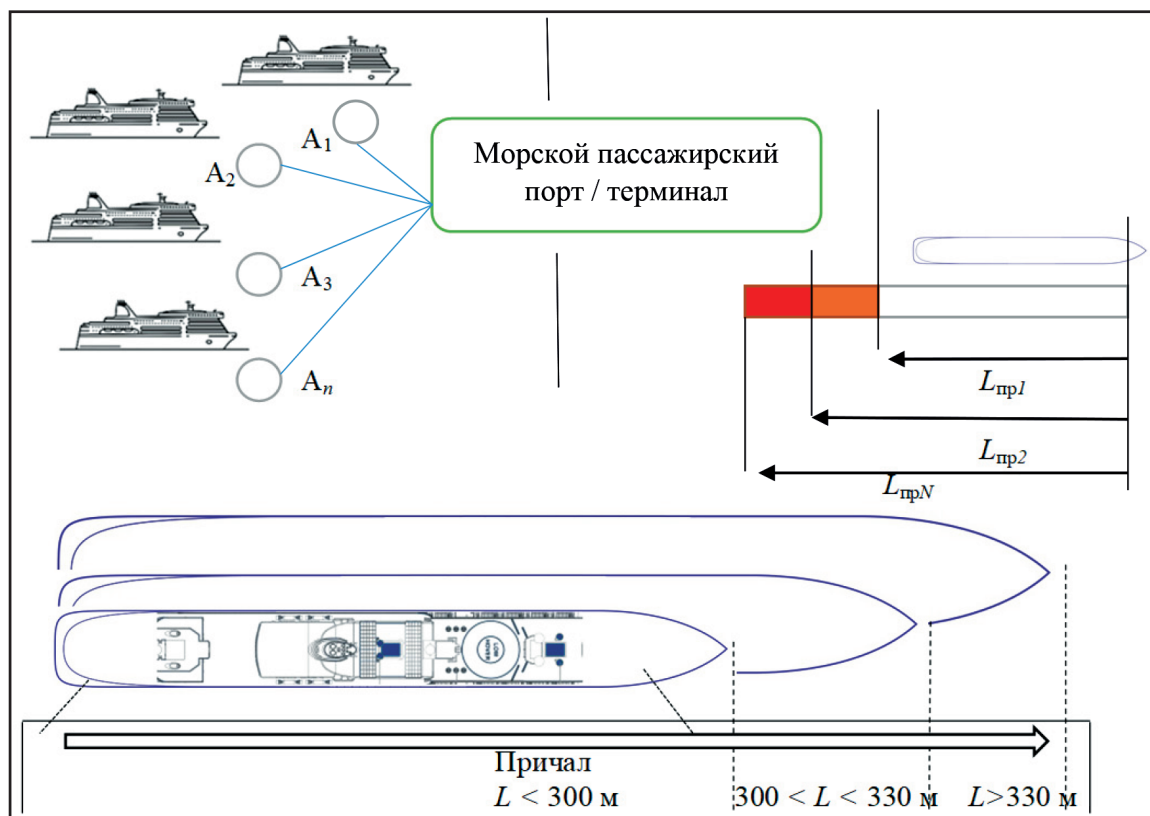


Рис. 2. Модель влияния тренда по увеличению размера круизных и паромных судов и изменений в маршрутных сетях

Условные обозначения:

A_1, A_2, \dots, A_n — входящий поток, интенсивности работы круизных / паромных линий, образующих входящий поток; $L_{пр1}, L_{пр2}, \dots, L_{прN}$ — потребность в увеличении длины причала в связи с увеличением габаритов судов;

L — размеры круизного или паромного судна с учетом тренда на увеличение

Fig. 2. Model of the influence of the trend towards increasing

the size of cruise and ferry vessels and changes in route networks:

A_1, A_2, \dots, A_n — incoming flow, operating intensity of cruise/ferry lines forming the incoming flow;

$L_{пр1}, L_{пр2}, \dots, L_{прN}$ — the need to increase the berth length due to the increase in vessels dimensions;

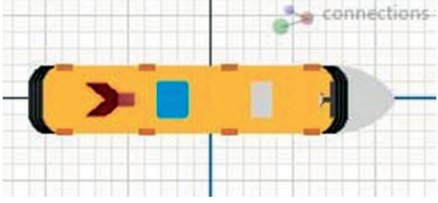
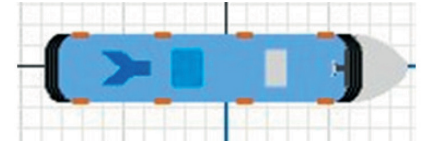
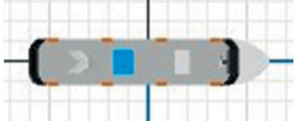
L — dimensions of a cruise or ferry vessel, taking into account the increasing trend

Определяющим фактором эффективности функционирования и развития морского пассажирского порта являются входящие потоки круизных или паромных судов. Для формирования принятого решения о результатах исследования положения порта в регионе необходимо иметь набор сценариев интенсивностей с добавлением переменной признака «приоритетности». Объектом исследования выбрана инфраструктура АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург “Морской фасад”» [14], в котором под влиянием внешней среды были модернизированы причалы 1 и 7 для приема крупных лайнеров. Поэтому одним из параметров приоритетности судов для практической реализации *цифрового двойника* является закрепление появившегося при моделировании большого лайнера за заданными причалами в порту.

Разработка цифрового двойника в среде AnyLogic [15], [16] позволяет реализовать возможность многосценарного моделирования с автоматическим формированием Dataset различных вариантов работы порта и определения загруженности причалов. В табл. 1 приведена графическая модель разделения входного потока паромных / круизных судов с выделением отдельных агентов, за которыми закрепляется атрибут размера судна.

Таблица 1

Графическое представление признака «приоритетности» круизных / паромных судов в очереди в морской пассажирский порт

Тип судна	Имя агента в модели	Размеры реальных судов	Изображение судна с приоритетом в цифровой модели в среде Anylogic
Крупный лайнер	CruiseShipsXL	> 288 м	
Лайнер среднего размера	CruiseShips	220–288 м	
Небольшой паром	CruiseFerries	< 220 м	

Для исследования различных вариантов загруженности причалов необходимо использовать аппарат моделирования. Классическая модель оценки интенсивности движения, в том числе круизных и паромных судов, основана на пуассоновском законе распределения [17], [18] (на основе моделей систем массового обслуживания). Следовательно, интервал между прибытиями судов подчиняется экспоненциальному распределению с плотностью

$$f_k(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Пуассоновский поток является стационарным, ординарным и не имеет последействия. Однако для исследования различных вариантов необходимо рассмотреть несколько законов распределения. Для моделирования входного потока круизных и паромных судов для системы причалов морского пассажирского порта были выбраны такие законы распределения, как пуассоновский нормальный. Также для расширения модели приоритетности заявок предлагается рассмотреть ситуацию, когда в потоке судов интервалы между судозаходами подчиняются гамма-распределению [19]–[21], учитывающему последействие потока. Выбранные математические модели законов распределения приведены в табл. 2.

**Выбранные для моделирования математические модели,
описывающие интенсивности поступления круизных или паромных судов
для цифровой модели порта и исследования разноприоритетных заявок**

Пуассоновское распределение	Нормальное распределение	Гамма-распределение
$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!},$ <p>где λ — среднее число заявок (круизных или паромных судов) простейшего потока, которые поступают в систему в единицу времени; t — время; k — количество заявок.</p>	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$ <p>где μ — среднее количество заявок; σ — среднеквадратическое отклонение.</p>	$f(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{r-1} e^{-\lambda t}}{\Gamma(r)};$ $f(t_v) = \frac{\lambda(t_0 + t_v)(\Lambda_{t_0, t_0 + t_v})^{r-1} e^{-\Lambda_{t_0, t_0 + t_v}}}{\Gamma(r)},$ <p>где $t_v \geq 0$ — интервал между приходами круизных судов; λ — интенсивность входящего потока судов; r — закон распределения ($r > 0$); $\Gamma(r)$ — гамма-распределение. Для работы с нестационарными потоками судов используется «ведущая функция» $\Lambda(t)$, которая на промежутке $[t, t + \Delta t]$ выражена следующим образом: $\Lambda_{t, t+\Delta t} = \int_t^{t+\Delta t} \lambda(t) dt.$</p>

В статье [22] представлена модель исследования взаимодействия систем «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт» на основе построения круговых диаграмм интенсивностей Circos [23], позволяющих в определенный дискретный момент времени отразить интенсивности в регионе Балтийского моря и в процентах определить вклад порта в сферу морских пассажирских перевозок. В статье [24] рассмотрена модель построения замкнутых маршрутов. Следующим шагом необходимо представить различные варианты моделирования интенсивностей судозаходов с учетом современных трендов. Таким образом обосновывается введение в модель и методику понятия «выделение приоритетности». «Оконная форма» с представлением логики модели для исследования интенсивности круизных и паромных линий в программной среде Anylogic приведена на рис. 3.

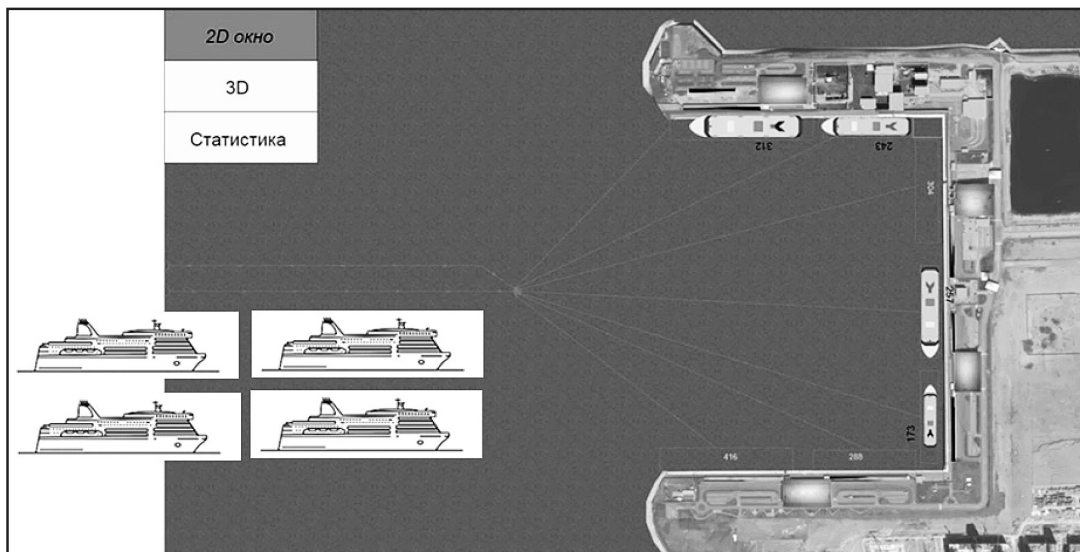


Рис. 3. Логика реализации модели поступления круизных и паромных судов в морской пассажирский порт в цифровой модели (цифровом двойнике порта)

Fig. 3. Logic for implementing a model for the arrival of cruise and ferry vessels at a sea passenger port in a digital model (digital twin of the port)

Известные данные по интенсивностям судозаходов круизных и паромных судов в 2015–2019 гг. для АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург “Морской Фасад”» принимаются как эталонные и будут применены в дальнейшем для оценки достоверности моделирования и возможных сценариев. На основе моделирования можно выполнить оценку годовых значений судозаходов, предварительно определив прогнозный разброс значений и выполнив исследование за определенные месяцы работы.

Результаты исследования (Results of the research)

На основе известных данных по интенсивностям судозаходов для АО «Пассажирского порта Санкт-Петербург “Морской Фасад”» в 2015–2019 гг. были определены характеристики судов и время их стоянки в порту. В морском пассажирском порту семь причалов. Итоговое распределение судов по причалам приведено на рис. 4.

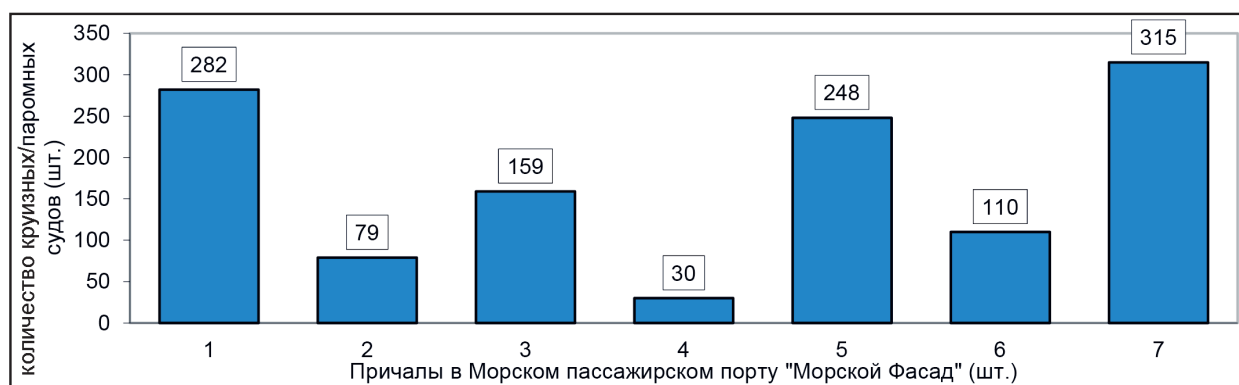


Рис. 4. Распределение судов по причалам в морском пассажирском порту
Fig. 4. Distribution of vessels by berths in the sea passenger port

Данные, приведенные на рис. 5, позволяют сделать вывод о загрузенности причалов 1 и 7 в основном крупными круизными судами. Фрагмент исходных данных (сентябрь и октябрь 2019 г.) для следующего моделирования, оценки времени стоянки в пассажирском порту приведен в табл. 3.

Таблица 3

Пример представления исходных данных по интенсивностям работы

№ п/п.	Вокзал	Причал	Название судна	Прибытие	Отправление	Продолжительность стоянки в порту (дн.)
1	МВ-3	ПАС-3	Astoria	26.09.2019 8:00	27.09.2019 18:00	1,42
2	МВ-1	ПАС-7	Norwegian Getaway	27.09.2019 7:00	28.09.2019 19:00	1,50
3	МВ-1	ПАС-7	Pacific Princess	29.09.2019 7:00	30.09.2019 18:00	1,46
4	МВ-1	ПАС-6	Magellan	02.10.2019 7:00	03.10.2019 19:00	1,50
5	МВ-1	ПАС-7	AIDAmar	03.10.2019 7:00	03.10.2019 19:00	0,50
6	МВ-1	ПАС-7	Norwegian Getaway	06.10.2019 7:00	07.10.2019 19:00	1,50
7	МВ-1	ПАС-7	AIDAprima	08.10.2019 8:00	08.10.2019 20:00	0,50
8	МВ-1	ПАС-7	Balmoral	11.10.2019 7:30	12.10.2019 18:00	1,44
9	МВ-1	ПАС-7	Norwegian Getaway	15.10.2019 7:00	16.10.2019 19:00	1,50
10	МВ-1	ПАС-7	AIDAaura	20.10.2019 7:00	21.10.2019 18:00	1,46

На основе анализа интенсивностей работы выберем пиковое известное значение, равное 68 судов (данные на июль 2019 г. как эталонные для проверки). «Оконные формы» разработанного специального цифрового двойника морского пассажирского порта в программной среде AnyLogic с учетом визуализации модели работы в 2D- и 3D-вариантах приведены на рис. 5.

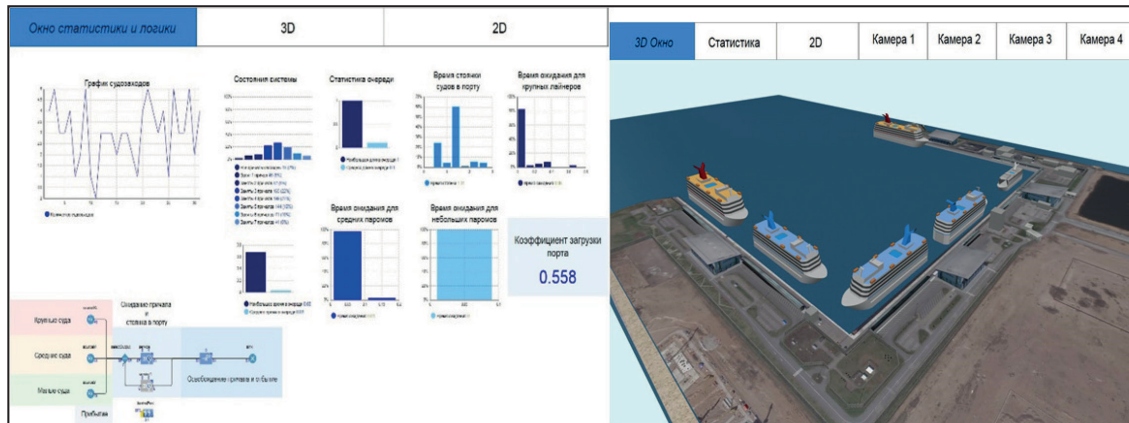


Рис. 5. «Оконные формы» разработанной цифровой модели морского пассажирского порта с учетом реализации различных приоритетов

Fig. 5. “Window shapes” of the developed digital model of the sea passenger port, taking into account the implementation of various priorities

Отличительной особенностью модели являются реализация выбранных законов распределения, возможности сравнения с дискретным расписанием движения, выполнение специализированного оптимизационного эксперимента [25]–[27], реализация динамического изменения сценариев работы входного потока круизных и паромных судов. Оптимизация созданной модели в AnyLogic заключается в последовательном выполнении нескольких прогонов модели с различными значениями параметров и нахождении оптимальных для данной задачи значений параметров. Общий алгоритм оптимизации состоит из нескольких последовательных прогонов выбранной модели морского пассажирского порта с различными значениями параметров.

Модель выполняется в приведенной последовательности:

1. Оптимизатор выбирает допустимые значения оптимизационных параметров и запускает созданную модель морского пассажирского порта с этими значениями.
2. Завершив «прогон» модели, оптимизатор вычисляет значение целевой функции на момент завершения.
3. Оптимизатор анализирует полученное значение, изменяет значения оптимизационных параметров в соответствии с алгоритмом оптимизации и процесс повторяется заново.
4. Оптимизационный эксперимент для пуассоновского закона распределения представлен на рис. 6.

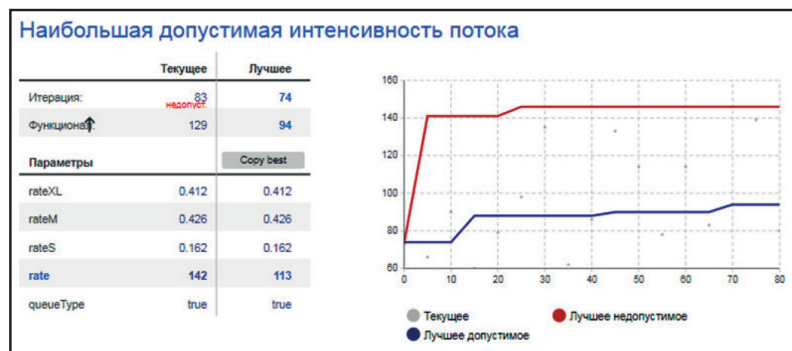


Рис. 6. «Оконная форма» результата выполнения оптимизационного эксперимента после выбора моделирование интенсивности круизных и паромных судов по пуассоновскому закону распределения

Fig. 6. “Window shape” of the optimization experiment result after choosing the modeling of cruise and ferry vessels intensity according to the Poisson distribution law

Результаты выполненных экспериментов при моделировании потока круизных и паромных судов с учетом признаков «без приоритетов судов», «с приоритетами» приведены в табл. 4 и 5. Для каждого вида распределения входного потока было проведено более 200 экспериментов в цифровой транспортной модели морского порта в среде AnyLogic [15]. Результаты десяти прогонов модели приведены в табл. 4.

Таблица 4

Моделирование потоков судов

№ п/п.	Пуассоновское распределение		Гамма-распределение		Нормальное распределение	
<i>Без приоритетности</i>						
1	92	142	82	142	87	143
2	85	152	82	150	87	148
3	88	155	93	150	82	152
4	88	156	86	149	81	156
5	83	152	64	159	86	157
6	90	152	99	159	84	157
7	94	155	85	159	77	157
8	82	155	86	159	78	157
9	77	154	83	159	83	156
10	86	154	87	158	81	157
<i>С приоритетностью</i>						
1	86	151	90	149	83	157
2	101	155	98	150	94	157
3	81	150	92	152	97	155
4	88	156	95	157	96	157
5	79	148	85	158	90	155
6	77	152	87	158	78	156
7	87	153	94	158	95	153
8	89	157	100	158	85	155
9	100	156	86	155	91	156
10	81	158	85	154	83	152

Графические результаты экспериментов с учетом в модели приоритетов и без них приведены на рис. 7.

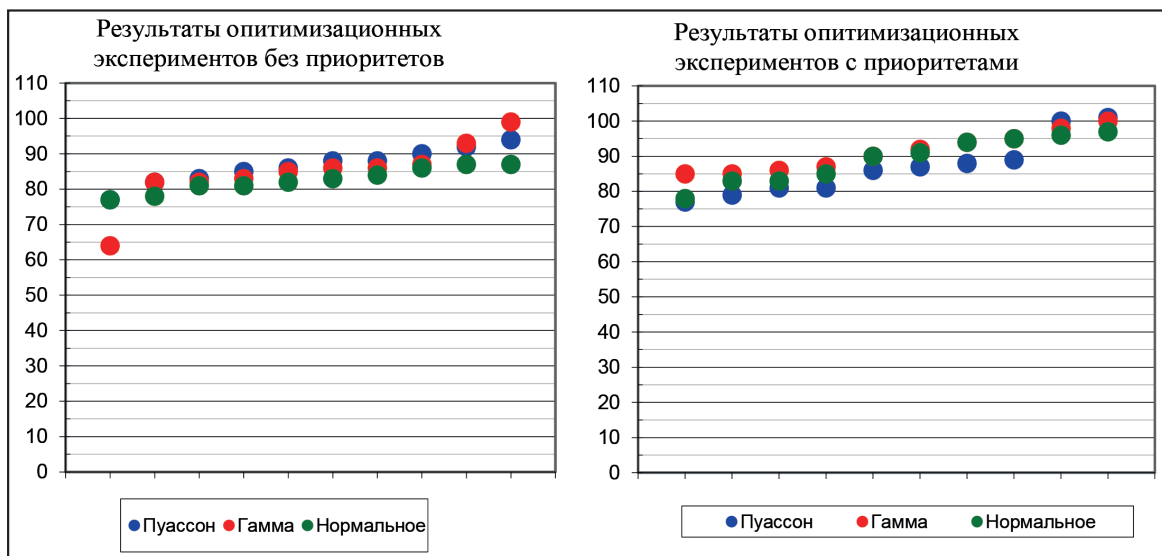


Рис. 7. Результаты оптимизационных экспериментов при различных интенсивностях круизных и паромных судов в пиковый месяц навигации

Fig. 7. Results of optimization experiments for different intensities of cruise and ferry vessels during the peak month of navigation

На рис. 7 приведены данные, которые в результате выполнения оптимизационных экспериментов составили допустимые значения интенсивностей. Для проверки корректности моделирования использовались известные данные по интенсивностям работы. Представленное поле значений, как и в приведенной выборке, позволяет сформировать область допустимых значений интенсивностей судозаходов с учетом приоритетов судов.

Обсуждение (Discussion)

Согласно модели развития портов автора Bird J. Anuport одним из принципов развития морского порта с технологической и инфраструктурной точки зрения является модернизация перегрузочного оборудования, специализация погрузочно-разгрузочного оборудования, специализация причального фронта, разделение на грузовые районы и выполнение специализации отдельных районов и терминалов. Таким образом, модель развития морского пассажирского порта с учетом географических особенностей формируется либо как отдельная модель порта, когда порт строится отдельно специально, либо как логичная стадия развития крупного порта, в котором выделяется отдельный район — *морской пассажирский порт*. Развитие морского пассажирского порта оказывает непосредственное влияние на развитие региона, что определяет необходимость решения задачи стратегического планирования. Горизонт планирования формируется в каждом случае индивидуально — либо на ближайшую навигацию, либо ставится задача изменения порта в регионе и привлечение как можно большего количества круизных и паромных линий, а также формирование полного круизного маршрута с началом и завершением в морском пассажирском порту.

Любые изменения зависят от возможностей инфраструктуры. Поэтому для того, чтобы выйти на более высокий уровень интенсивности работы, необходимо выполнять модернизацию инфраструктуры путем ввода новых пассажирских терминалов и расширения причалов. Ввиду влияния внешней среды с позиций современного тренда на строительство крупных новых круизных судов, подробно исследованного в данной статье, перед руководителями порта ставится задача либо построить новые причалы под новый тип судов, либо выполнить модернизацию существующих. Невыполнение действий приведет в конечном итоге к исключению порта из маршрутной сети определенных компаний и, соответственно, к уменьшению пассажиропотока и потерям региона, города. К таким примерам относится ответ на внешний вызов (ввод новых направлений в регионе) и влияние тенденции увеличения габарита круизных судов, а именно увеличения длины судна более 330 м. АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург “Морской фасад”» успешно выполнил проект строительства выносных палов, увеличив длину причалов № 6 и № 7 (причального фронта) на 108,6 м. В данном случае он стратегически реализовал возможность приема крупных морских лайнеров, тем самым включив и сохранив город Санкт-Петербург в новой системе круизных и паромных маршрутов. Однако необходимо иметь в виду взаимное влияние морских пассажирских портов друг на друга в регионах морей, как, например, в выбранном регионе Балтийского моря. В итоге лицу, принимающему решение, необходимо основываться не на опыте отрасли либо личном опыте, а принимать решение на основе получения данных Dataset, использовать многопараметрическую оптимизацию и исследовать взаимодействие систем «морская паромная / круизная линий – морской пассажирский порт – наземная инфраструктура».

Выполненное исследование направлено на решение проблемных вопросов при изучении систем: «морская паромная / круизная линий – морской пассажирский порт». Лицам, принимающим решение по модернизации порта, предлагается разработанная новая цифровая транспортная модель (цифровой двойник) с возможностью визуализации движения паромных судов как в 2D, 3D пространственных вариантах, а также использование средств для динамического изменения данных интенсивности работы круизных линий. Для решения задачи многосценарного моделирования, основанного как на реальных, так и прогнозных данных по планам судозаходов круизных и паромных судов, выполнено использование пуассоновского, нормального и гамма-распределений, позволяющих сформировать набор данных для последующего анализа и оценки инфраструктурных изменений.

Необходимо отметить, что в данном случае цифровая модель морского порта является специализированным инструментальным средством, создаваемым для каждого морского пассажирского порта отдельно ввиду его уникальных особенностей. Созданные алгоритмы позволяют обеспечить сближение реальных процессов в модельной среде с большой точностью.

Представленный в статье *цифровой двойник* позволяет на качественно новом уровне решить задачу моделирования систем «морская паромная / круизная линии – морской пассажирский порт» с учетом выделения приоритетов в потоке судов или специализации причалов. Представленное решение в дополнение к данным круговых интенсивностей в регионе Балтийского моря Circus, позволяет сформировать полную оценочную модель изменения веса порта в регионе после обоснованного принятия решений по модернизации и созданию новых логистических сервисов. Реализованная возможность использования оптимизационного эксперимента позволяет сформировать определенные поля полезностей и использовать модели и методы принятия решений при неопределенности, что значительно увеличивает практическое поле проводимых исследований.

Результаты (Results)

Представленная новая цифровая модель морского пассажирского порта с реализованной возможностью приоритетности в потоках судов и специализации причалов позволяет выполнить многосценарное моделирование различных интенсивностей как на основе реальных эталонных данных, так и прогнозных сценариев, выполненных на основе пуассоновского, нормального и гамма-распределений. Эталонными для проведения исследования и проверки предлагаемой модели являлись данные «Пассажирского порта Санкт-Петербург “Морской фасад”», интенсивность его работы в течение различных временных периодов и пиковая интенсивность в 2019 г.

На основе анализа результатов, приведенных на рис. 7, можно сделать следующие выводы:

1. В процессе моделирования потока судов без приоритетов использование нормального распределения дает более стабильные результаты, пуассоновское распределение показывает большую пропускную способность и сохраняет стабильность работы нормального распределения, гамма-распределение дает больший разброс, но и большие цифры успешно обслуженных круизных и паромных судов в короткие сроки.

2. При введении в модель приоритетности судов по причалам видно, что эффект от приоритетности ярко выражен — возросла пропускная способность. Все выбранные распределения показывают близкие значения.

3. При выполнении моделировании реализована задача использования как эталонных данных по интенсивностям, так и динамических данных с возможностью обновления. Полученные результаты сценариев моделирования подтвердили необходимость выполнения модернизации и специализации причалов, что и было реализовано для данного порта, подтвердив эффективность предложенной модели.

4. Представленные результаты подтвердили эффективность создания цифровой транспортной модели и введения моделей оценки с приоритетностями заявок и приоритетностью причалов. Можно утверждать, что предложенную модель исследования систем «морской пассажирский порт – морская паромная / круизная линия» с учетом внедрения в контур принятия решения цифровой транспортной модели необходимо использовать для принятия решений по модернизации инфраструктуры и формирования обоснованного перехода на новую стадию развития.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнено обоснование эффективности исследования взаимодействия систем «морская круизная / паромная линия – морской пассажирский порт» на основе многовариантного моделирования интенсивностей судозаходов для формирования набора данных Dataset и последующего прогнозирования.

2. Обоснована и подтверждена экспериментально необходимость учета в моделях развития морских пассажирских портов и терминалов влияния внешней среды в форме параметров увеличения

габаритов новых круизных и паромных судов и исследования интенсивностей на основе круговых диаграмм Circos.

3. Представлены аналитические данные по отрасли, подтверждающие актуальность задачи модернизации морских пассажирских портов, модернизации причалов и изменений в маршрутных сетях.

4. Предложена новая модель представления и назначения «приоритетности» круизных или паромных судов для выполнения моделирования и отображения в динамике в цифровой модели морского пассажирского порта.

5. Представлены результаты анализа загруженности причалов «Пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад», интервалов между судозаходами и загруженности причалов.

6. Обоснован выбор пуассоновского, нормального и гамма-распределений как основного математического аппарата для исследования различных интенсивностей круизных и паромных линий, в том числе с приоритетностью.

7. Обосновано использование «оптимизационного эксперимента» в цифровой транспортной модели для формирования набора данных для последующего принятия решения.

8. Представленные результаты моделирования в цифровой транспортной модели позволяют утверждать, что при введении в модель «приоритетности» судов по причалам видно, что эффект от приоритетности ярко выражен — возросла пропускная способность.

9. При использовании предложенной модели не требуется проводить исследования достоверности (достаточной репрезентативности количества испытаний).

10. Подтверждено, что разработка цифровой транспортной модели морского пассажирского порта в совокупности с практической реализацией региональных моделей портов в программном инструменте Circos формирует полный набор данных для обоснованного принятия решения и определения положения морского пассажирского в сфере пассажирских перевозок по отношению к другим портам.

11. Разработанный цифровой двойник необходимо использовать лицам, принимающим решение, при стратегическом развитии морского пассажирского порта или терминала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпилько С. П. Морские круизы: теория и практика / С. П. Шпилько, Н. В. Андропова, Р. В. Чударев. — М.: Советский спорт, 2012. — 147 с.

2. Титов А. В. Современные тенденции развития морских портов в мире и их влияние на портовую индустрию России / А. В. Титов, Д. Б. Ивашкович // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 1. — С. 115–124.

3. Bird J. Seaports and Seaport Terminals / J. Bird. — London: Hutchinson University Library, 1980. — 117 p.

4. Brida J. G. Cruise Passengers in a Homeport: A Market Analysis / J. G. Brida, M. Pulina, E. Riaño, S. Z. Aguirre // Tourism Geographies. — 2013. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 68–87. DOI: 10.1080/14616688.2012.675510.

5. Čorluka G. Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective / G. Čorluka, I. Peronja, D. Tubić // NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo. — 2020. — Vol. 67. — Is. 3. — Pp. 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.

6. Barron P. Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market / P. Barron, A. B. Greenwood // Tourism in Marine Environments. — 2006. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238.

7. Майоров Н. Н. 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-782-793.

8. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 22.02.2024).

9. Cruise Industry News [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.cruiseindustrynewswire.com/> (дата обращения: 22.02.2024).

10. *Майоров Н. Н.* Этапы эволюции взаимоотношения города и морского пассажирского порта на примере Санкт-Петербурга / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // *Логистика: современные тенденции развития: материалы XIX Международной научно-практической конференции.* — СПб.: Изд-во Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова, 2020. — С. 279–285.

11. *Майоров Н. Н.* Прогнозирование развития морских пассажирских терминалов и сети паромных линий в регионе Балтийского моря / Н. Н. Майоров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1299–1311. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.

12. *Krile S.* Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // *Sustainability.* — 2021. — Vol. 13. — Is. 7. — Pp. 3869. DOI: 10.3390/su13073869.

13. *Krile S.* The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals / S. Krile, N. Maiorov // *Transport Problems.* — 2020. — Vol. 15. — Pp. 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020-060.

14. АО «Пассажирский Порт Санкт-Петербург «Морской фасад» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.portspb.ru/> (дата обращения: 15.02.2024).

15. AnyLogic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 01.02.2024).

16. *Майоров Н. Н.* 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-169-180.

17. *Chládek P.* On some aspects of graph theory for optimal transport among marine ports / P. Chládek, D. Smetanová, S. Krile // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport.* — 2018. — Vol. 101. — Pp. 37–45. DOI: 10.20858/sjsutst.2018.101.4.

18. *Fernández-Gómez M. A.* A dynamic modelling approach to manage the cruise port of call / M. A. Fernández-Gómez, L. Valcarce-Ruiz, R. Becerra-Vicario, J. Diéguez-Soto // *Research in Transportation Business & Management.* — 2022. — Vol. 43. — Pp. 100818. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100818.

19. *Каталевский Д. Ю.* Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учебное пособие; 2-е изд., перераб. и доп. / Д. Ю. Каталевский. — М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. — 496 с.

20. *Язвенко М. Р.* Моделирование морского грузового порта как системы массового обслуживания в среде AnyLogic / М. Р. Язвенко, А. Г. Морозков // *Системный анализ и логистика.* — 2020. — № 4 (26). — С. 59–66. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-4-59-66.

21. *Tsamboulas D.* How to forecast cruise ship arrivals for a new port-of-call destination / D. Tsamboulas, P. Moraiti, G. Koulopoulou // *Transportation Research Record.* — 2013. — Vol. 2330. — Is. 1. — Pp. 24–30. DOI: 10.3141/2330-04.

22. *Maiorov N.* Simulation of the route network and ferry traffic intensity based on the process of discretization and circos plot intensity diagram / N. Maiorov, V. Fetisov, S. Krile, D. Miskovic // *Transport Problems.* — 2019. — Vol. 14. — Is. 4. — Pp. 21–30. DOI: 10.20858/tp.2019.14.4.2.

23. *Circos 2024* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sourceforge.net/projects/jcircos/> (дата обращения: 22.02.2024).

24. *Krile S.* Efficient heuristic for non-linear transportation problem on the route with multiple ports / S. Krile // *Polish Maritime Research.* — 2013. — Vol. 20. — Is. 4. — Pp. 80–86. DOI: 10.2478/pomr-2013-0044.

25. Оптимизационный эксперимент в AnyLogic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://anylogic.help/ru/anylogic/experiments/optimization-experiment.html> (дата обращения: 01.03.2024).

26. *Воевудский Е. Н.* Стохастические модели в проектировании и управлении деятельностью портов / Е. Н. Воевудский, М. Я. Постан. — М.: Транспорт, 1987. — 318 с.

27. *Майоров Н. Н.* 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. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-114-121.

REFERENCES

1. Shpil'ko, S. P., N. V. Andronova, and R. V. Chudarev. *Morskije kruizy: teoriya i praktika.* М.: Sovetskii sport, 2012.

2. Titov, Alexey Valerievich, and Danila Borisovich Ivashkovich. "Modern ways of development of the world sea ports and their influence on the port industry in Russia." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2016): 115–124.
3. Bird, J. *Seaports and Seaport Terminals*. London: Hutchinson University Library, 1980.
4. Brida, Juan Gabriel, Manuela Pulina, Eugenia Riaño, and Sandra Zapata Aguirre. "Cruise passengers in a homeport: A market analysis." *Tourism Geographies* 15.1 (2013): 68–87. DOI: 10.1080/14616688.2012.675510
5. Ćorluka, Goran, Ivan Peronja, and Dejan Tubić. "Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective." *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo* 67.3 (2020): 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
6. Barron, Paul, and Ana Bartolome Greenwood. "Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market." *Tourism in Marine Environments* 3.2 (2006): 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238.
7. Maiorov, Nikolai N., Vladimir A. Fetisov, and Angelina A. Dobrovolskaia. "Simulation of marine ferry routes based on graph theory in the context of strategic planning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 782–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-782-793.
8. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry. Web. 22 Feb. 2024 <<https://cruisemarketwatch.com/growth/>>.
9. Cruise Industry News. Web. 22 Feb. 2024 <<https://www.cruiseindustrynewswire.com/>>.
10. Maiorov, N. N., and V. A. Fetisov. "Stages of evolution of the relationship between the city and the sea passenger port on the example of St. Petersburg." *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya. Materialy XIX Mezh-dunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vol. 1. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2020. 279–285.
11. Majorov, Nikolaj N. "Forecasting of the evolution of sea passenger terminals and network of ferry lines in the region of the Baltic sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1299–1311. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.
12. Krile, Srećko, Nikolai Maiorov, and Vladimir Fetisov. "Modernization of the infrastructure of marine passenger port based on synthesis of the structure and forecasting development." *Sustainability* 13.7 (2021): 3869. DOI: 10.3390/su13073869.
13. Krile, Srećko, and Nikolai Maiorov. "The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals." *Transport Problems* 15 (2020): 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020–060.
14. Passenger Port of Saint-Petersburg, Marine Façade. Web. 15 Feb. 2024 <<https://www.portspb.ru>>.
15. AnyLogic. Web. 01 Feb. 2024 <<https://www.anylogic.ru>>.
16. Maiorov, Nikolai N., Vladimir A. Fetisov, and Angelina A. Dobrovolskaia. "Stochastic model for forecasting of cruise or ferry ship arrival at seaport for infrastructure assessment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 169–180. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-169-180.
17. Chládek, Petr, Dana Smetanová, and Srećko Krile. "On some aspects of graph theory for optimal transport among marine ports." *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 101 (2018): 37–45. DOI: 10.20858/sjsutst.2018.101.4.
18. Fernández-Gámez, M. A., L. Valcarce-Ruiz, R. Becerra-Vicario, and J. Diéguez-Soto. "A dynamic modelling approach to manage the cruise port of call." *Research in Transportation Business & Management* 43 (2022): 100818. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100818.
19. Katalevskii, D. Yu. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii*. M.: Izdatel'skii dom «Delo» RANKhiGS, 2015.
20. Yazvenko, Maksim Romanovich, and Andrey Georgievich Morozkov. "Simulation of a sea cargo port as a queuing system in AnyLogic." *Sistemnyi analiz i logistika* 4(26) (2020): 59–66. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-4-59-66.
21. Tsamboulas, Dimitrios, Panayota Moraiti, and Giorgia Koulopoulou. "How to forecast cruise ship arrivals for a new port-of-call destination." *Transportation research record* 2330.1 (2013): 24–30. DOI: 10.3141/2330-04.
22. Maiorov, Nikolai, Vladimir Fetisov, Srećko Krile, and Darijo Miskovic. "Simulation of the route network and ferry traffic intensity based on the process of discretization and circos plot intensity diagram." *Transport problems* 14.4 (2019): 21–30. DOI: 10.20858/tp.2019.14.4.2.
23. Circos. Web. 22 Feb. 2024 <<https://sourceforge.net/projects/jcircos/>>.
24. Krile, Srećko. "Efficient heuristic for non-linear transportation problem on the route with multiple ports." *Polish Maritime Research* 20.4 (2013): 80–86. DOI: 10.2478/pomr-2013-0044.

25. Optimizacionnyj eksperiment v AnyLogic. Web. 1 March 2024 <<https://anylogic.help/ru/anylogic/experiments/optimization-experiment.html>>.

26. Voevodskii, E.N., and M. Ya. Postan. *Stokhasticheskie modeli v proektirovanii i upravlenii deyatel'nost'yu portov*. M.: Transport, 1987.

27. Maiorov N. N., A. A. Dobrovolskaia, and V. E. Taratun. "Research of ways to develop accurate digital models for objects and nodes of transport infrastructure." *Sistemnyi analiz i logistika* 4(30) (2021): 114–121. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-114-121.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майоров Николай Николаевич —
доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская 67, лит. А
e-mail: nmsoft@yandex.ru
Фетисов Владимир Андреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская 67, лит. А
e-mail: fetlvlad@yandex.ru
Силина Ангелина Александровна — ассистент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: angd999@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maiorov, Nikolai N. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: nmsoft@yandex.ru
Fetisov, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: fetlvlad@yandex.ru
Silina, Angelina A. — Assistant
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: angd999@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 10 марта 2024 г.
Received: March 10, 2024.*