

## RESEARCH OF BERTH OCCUPANCY AT A SEA PASSENGER PORT BASED ON A SIMULATION MODEL ACCOUNTING FOR REGIONAL FEATURES AND STOCHASTIC EXTERNAL INFLUENCES

**N. N. Maiorov, V. A. Fetisov, M. R. Yazvenko**

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

*The article addresses the topical problem of forming big data to support decision-making and forecasting the development of maritime passenger ports based on data obtained from a digital twin of a seaport, taking into account regional features. Maritime passenger ports and terminals of the Baltic Sea were selected as the object of study. The necessity of multi-scenario modeling of varying intensities of cruise and ferry vessel calls is substantiated, with consideration given to berth characteristics, operational constraints, and decision-making limitations when processing navigation-period data. To address this problem, a new digital transport model is proposed that enables effective analysis and optimization of cruise and ferry vessel servicing processes. An algorithm and a novel approach to the analysis of fixed and stochastic inbound vessel flows are developed, taking into account service priority. The study employs multi-scenario simulation methods based on different traffic intensities and regional characteristics of port infrastructure. The research is based on an analysis of real operational data from Baltic Sea passenger ports, which allows evaluation of the proposed model under conditions of maximum port load, using the ports of Warnemünde (Rostock) and Kiel as case studies. Special attention is given to the analysis of port infrastructure utilization intensity and optimization of resource allocation. A simulation model is presented to represent the operation of a multi-priority queueing system in which service requests arrive both according to a priority schedule and randomly. The boundary operating conditions of two Baltic Sea passenger ports for accommodating vessel calls beyond the planned schedule under stochastic influences are experimentally determined. The modeling is based on actual port infrastructure data and planned cruise ship arrival schedules. The proposed software module of the digital port model enables the generation of simulation data to support both operational management decision-making at maritime passenger ports and long-term development forecasting.*

*Keywords: cruise ships; priority queue; queueing system; multi-priority queue; simulation modeling; sea passenger port; decision-making; ferry line; Circos model; regional features; increased passenger flow; port infrastructure modernization*

### For citation:

Maiorov, Nikolai N., V. A. Fetisov and M. R. Yazvenko. "Research of Berth Occupancy at a Sea Passenger Port Based on a Simulation Model Accounting for Regional Features and Stochastic External Influences". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.6 (2025): 801–815. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-801-815.

**УДК 656.021.2, 65.012.1, 656.072**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРУЖЕННОСТИ ПРИЧАЛОВ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ПОРТА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И СТОХАСТИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

**Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, М. Р. Язвенко**

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

*В статье рассмотрена актуальная проблема формирования больших данных для принятия решений по работе и прогнозированию развития морских пассажирских портов на основе получения данных от цифрового двойника морского порта с учетом региональных особенностей. Объектом исследования выбраны морские пассажирские порты и терминалы Балтийского моря. Обоснована необходимость многосценарного*

моделирования различных интенсивностей судозаходов круизных и паромных судов с учетом особенностей причалов и принятия решений при работе с данными за навигацию. Для решения задачи рассмотрена новая цифровая транспортная модель, позволяющая анализировать и оптимизировать процессы обслуживания круизных и паромных судов. Предложен алгоритм и новый подход к анализу фиксированного и стохастического входящих потоков судов с учетом их приоритетности в обслуживании. В работе использованы методы многосценарного моделирования на основе различных интенсивностей и региональных особенностей инфраструктур портов. Исследование базируется на анализе реальных данных работы пассажирских портов Балтийского моря, что позволяет проверить эффективность предложенной модели в условиях максимальной загрузки выбранных портов (Варнемюнде (Росток), Киль). Особое внимание уделено изучению интенсивности работы портовой инфраструктуры и оптимизации распределения ресурсов. Представлена имитационная модель для исследования работы разноприоритетной очереди в транспортной системе, в которую поступают заявки как по приоритетному расписанию, так и случайным образом. Экспериментально представлены граничные условия работы двух пассажирских портов Балтийского моря по приему судов сверх планируемого расписания с учетом стохастических процессов. Моделирование производилось на основе реальных данных об инфраструктуре портов и их планируемом расписании прибытия круизных судов. Предложенный новый программный модуль цифровой модели порта позволяет получить модельные данные для формирования принятия решений как по операционному управлению морского пассажирского порта, так и для реализации задачи прогнозирования его развития.

**Ключевые слова:** круизные суда, приоритетная очередь, система массового обслуживания, разноприоритетная очередь, имитационное моделирование, морской пассажирский порт, принятие решений, пассажирский порт, паромная линия, Circos модель, региональные особенности, увеличение пассажиропотока, модернизация портовой инфраструктуры.

Для цитирования:

Майоров, Н. Н. Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе имитационной модели с учетом региональных особенностей и стохастического влияния внешней среды / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, М. Р. Язвенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 6. — С. 801–815. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-801-815. — EDN CFLCLU.

## Введение (Introduction)

В настоящее время происходит изменение подходов к описанию процессов и принятию решений по модернизации инфраструктуры в транспортных системах ввиду изменчивого динамического влияния внешней среды, а также поиска инструментальных цифровых средств, позволяющих решать задачу прогнозирования развития и формировать большие данные для анализа различных сценариев. В сфере круизных морских перевозок актуальным является вопрос модернизации портовой инфраструктуры, обусловленный как ежегодным вводом крупных судов и возрастающим спросом на круизы [1], [2], так и конкуренцией за пассажиропотоки в регионах морей.

Лица, принимающие решения, руководители портов или ответственные от исполнительных органов государственной власти по обоснованию стратегических решений находятся в ситуации неопределенности, располагая лишь ограниченными данными на навигацию. Под воздействием многих факторов и условий внешней среды для системы морского пассажирского порта возникают задачи, формирующие новые требования по операционной работе и прогнозированию развития. Для этого необходим переход от рассмотрения отдельного пассажирского порта к исследованию взаимодействия технических систем «морская паромная / круизная линия – морской пассажирский порт – региональная (городская) транспортная инфраструктура». Комплексная модель развития морского пассажирского порта с учетом внешних и внутренних процессов, представленная в статье [3], позволяет сформировать требования к необходимому объему данных для прогнозирования развития.

Для получения набора данных и оценки различных сценариев развития морского пассажирского порта необходимо выполнение многосценарного многопараметрического моделирования процессов на основе цифровых моделей и цифровых транспортных двойников [1, 4, 5]. С позиций моделей систем массового обслуживания особую сложность для анализа представляют задачи с неоднородным входным потоком, в котором имеется разнородность заявок и различные требования по их обслуживанию.

Учет стохастического влияния внешней среды на морские пассажирские терминалы позволяет решать проблему стратегического развития для максимизации пассажиропотока и увеличения интенсивности круизных и паромных судов, а также изменения положения порта в регионе моря и на рынке пассажирских перевозок. Решение может быть найдено на основе разработки новых моделей и методов, реализации моделирования неоднородного входного потока, создания специализированных подсистем внутри цифровых моделей и формирования системы принятия решений на основе имеющихся результатов. Полученные данные и набор сценариев позволяют повысить точность принятия решений при неопределенности [1, 5–7] для последующих предложений по модернизации на основе анализа больших данных результатов моделирования.

В исследовании представлены результаты разработки программного модуля, позволяющего провести моделирование пассажирского порта, одновременно обслуживающего входной поток судов как по заранее созданному расписанию, так и случайного незапланированного потока так, чтобы это не мешало обслуживанию заранее согласованных судов.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Регион Балтийского моря — крайне популярен в сфере морских круизов. Одной из причин этого является расположение на берегу моря крупных столиц Европейских государств, представляющих интерес среди туристов. Хельсинки (Финляндия), Таллин (Эстония), Стокгольм (Швеция), Копенгаген (Дания) — все они имеют выход к Балтийскому морю и крайне привлекательны для туризма. Также выход к морю имеют Германия, Россия, Норвегия, Польша, Литва и Латвия. Все это формирует постоянный спрос на морские перевозки как внутри Балтийского региона, между городами, так и в другие страны. Статистические данные по увеличению пассажиропотока, согласно открытым аналитическим данным агентства Cruisemarketwatch1 на 12 октября 2025 г., в том числе данные за первое полугодие 2025 г., приведены на рис. 1.

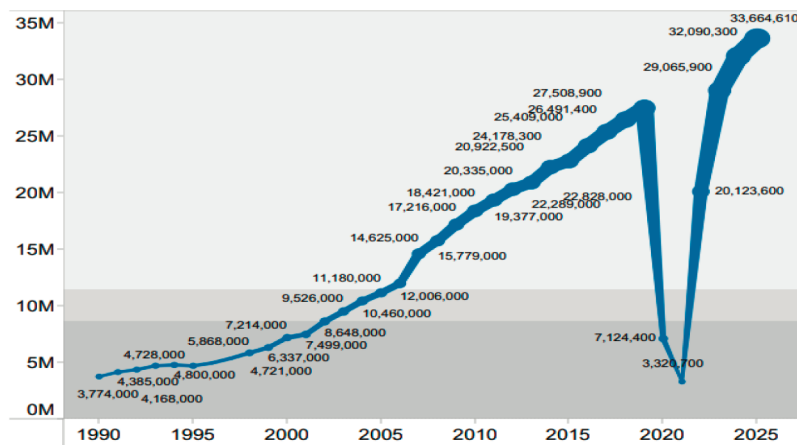


Рис. 1. Данные по отрасли морских паромных и круизных линий в 2020–2025 гг.

С помощью аналитической системы Cruise Market Watch АИС<sup>1</sup> можно выделить следующие наиболее востребованные порты для круизных пассажирских перевозок: Стокгольм, Таллин, Хельсинки, Гдыня, Варнемюнде (Росток), Киль, Копенгаген. На рис. 2 приведена гистограмма планируемых на момент октября 2025 г. судозаходов за каждый месяц 2026 г. для семи наиболее популярных портов, полученная на основе анализа прошлых навигаций. На базе выполненного в течение нескольких лет анализа судозаходов планируется 20–34 судов в месяц с июня по сентябрь.

<sup>1</sup> Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 01.09.2025).

Cruise Ship Tracker, Itineraries, Schedules, Deck Plans – CruiseMapper [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cruisemapper.com/> (Дата обращения: 01.10.2025).

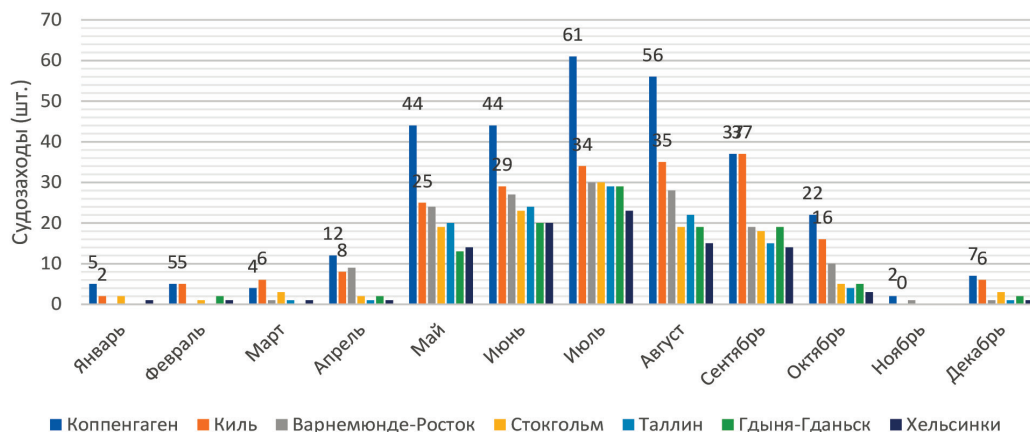


Рис. 2. Гистограмма планируемых прибытий круизных и паромных судов на наиболее загруженные терминалы Балтийского моря по месяцам 2026 г.

Среди всех морских пассажирских портов Балтийского моря на основе выборки рис. 2 наблюдается тренд сезонности перевозок с наибольшей загруженностью в июле (рис. 3).

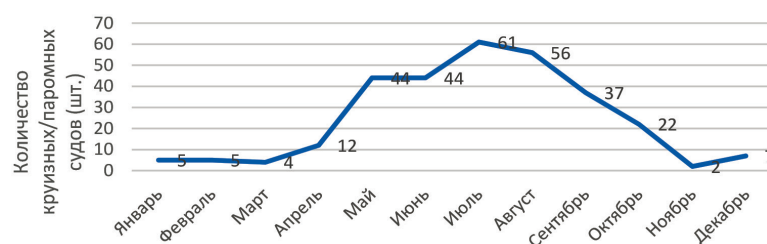


Рис. 3. График планируемого прибытия круизных судов на наиболее загруженный терминал Балтийского моря за 2026 г.

Исключением из данного тренда является порт Киль, где повышение интенсивности происходит до пика в сентябре, после чего резко падает в октябре. Вне «горячего сезона»: с мая по сентябрь, интенсивность судов в месяц во всех портах падает почти в 3 раза. На рис. 4 приведены планируемые данные по потоку круизных или паромных судов по портам Балтийского моря.

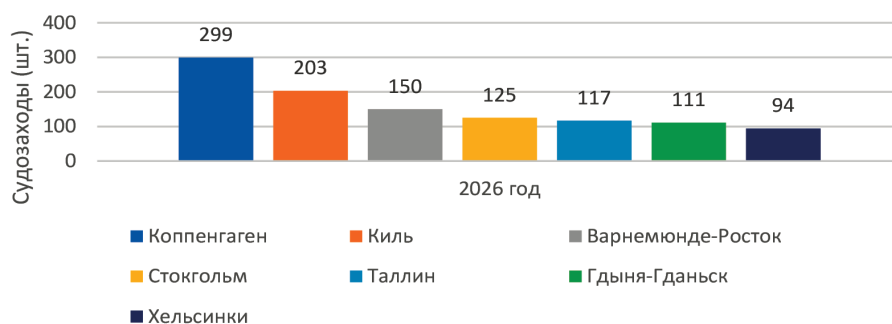


Рис. 4. Гистограмма планируемых прибытий круизных судов на наиболее загруженные терминалы Балтийского моря в 2026 г.

Всего в 2026 г. ожидается 1099 судозаходов в семи наиболее популярных портах. Меньше всего в Хельсинском порту — 97 заходов. Наиболее загруженным по судозаходам ожидается порт Коппенгагена, в котором запланированы 299 судозаходов в год, что почти на 1/3 больше ближайшего по этому показателю порта немецкого города Киль.

Одной из причин данной ситуации является расположение порта Копенгаген [8], который находится в Датских проливах, разделяющих Северное и Балтийское море. Анализируя полученные списки судов, которые ожидаются в 2026 г., можно заметить, что некоторые из них дальше Копенгагена не идут и либо направляются в другие моря, курсируя по всему миру (например, Celebrity Eclipse), либо остаются в пределах Балтийского моря, как AIDAmar. Последнее судно, в свою очередь, курсирует между Варнемюнде (Росток), а также портами Дании, Швеции и Польши, часто представлено в планах половины портов, приведенных на рис. 4.

Один год — довольно отдаленный горизонт планирования, который практически не позволяет со 100 %-й вероятностью определить различные условия, сбои на круизной линии, экономическую международную ситуацию, возможные погодные явления в краткосрочных прогнозах погоды и т. д. К тому же у судовладельцев, не подававших заявку на попадание в расписание, может возникнуть необходимость или желание зайти в порт вне расписания. В связи с этим всегда существует некоторая степень неопределенности в планировании работы порта. Снижение неопределенности возможно с помощью моделирования работы порта в запланированный период времени, который формирует лицо, принимающее решение.

Проанализировать показатели работы порта на основе реальных данных и спрогнозировать работу при наличии случайного потока судов можно с помощью математического и имитационного моделирования. Морской пассажирский порт можно смоделировать как систему массового обслуживания (СМО). В работах [9]–[11] описаны примеры применения математического аппарата для моделирования работы порта. Крупный морской пассажирский порт представляет из себя многоканальную СМО, где каждый канал — это причал. При моделировании портов как СМО используют следующие обозначения:

$\lambda$  — количество заявок, поступающих за единицу времени (плотность входного потока);

$\mu$  — интенсивность обслуживания (плотность выходного потока);

$\alpha$  — приведенная плотность заявок;

$p_0$  — вероятность отсутствия заявок в системе;

$L_{оч}$  — средняя длина очереди;

$t_{обс}$  — среднее время обслуживания;

$t_{оч}$  — среднее время нахождения заявки в очереди;

$t_{СМО}$  — среднее время нахождения заявки в системе;

$P_k$  — вероятность занятости  $k$  каналов обслуживания;

Общая схема многоканальных систем обслуживания представлена на рис. 4.

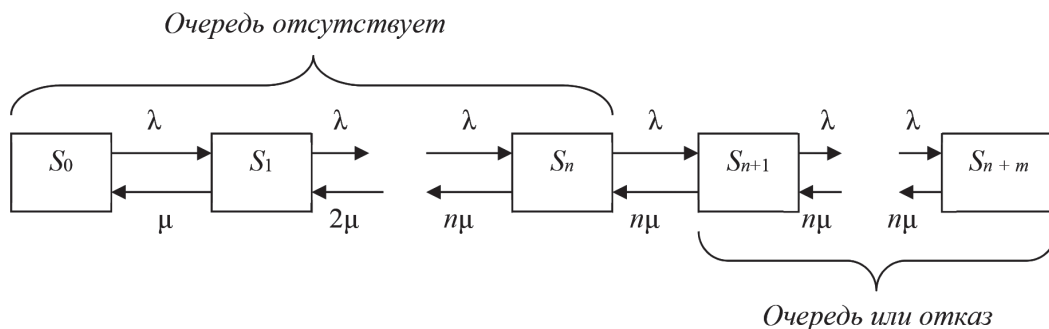


Рис. 5. Схема многоканальной СМО для морского пассажирского порта

Основное уравнение модели СМО приведено в следующих формулах:

$$\lambda = \frac{N}{T};$$

$$\mu = \frac{1}{t_{обс}},$$
(1)



где  $N$  — количество заявок, поступившее за время  $T$ ;  $\mu$  — плотность выходного потока;  $t_{\text{обс}}$  — среднее время обслуживания круизных и паромных судов.

На основе анализа работ [11–13] видно, что аппарат теории массового обслуживания отлично совмещается вместе с имитационным моделированием. Имитационное моделирование позволяет исследовать систему в динамике и представляет широкий выбор инструментов для реализации различных реальных процессов и вариации входных данных. В ходе исследования была разработана имитационная модель условного морского пассажирского порта в среде AnyLogic [14]. Данная среда, как и другие подобные среды имитационного моделирования, позволяет работать с заранее составленными расписаниями прибытия заявок на обслуживание, что дает возможность проводить эксперименты с планируемым расписанием заходов в систему и получить данные о ее работе. Универсальность модели заключается в том, что моделируемый порт создается по исходным данным, заносимым пользователем. Модель позволяет изучать работу порта с одновременным приемом как судов по заранее составленному расписанию, так и незапланированных заходов в порт.

Разработанный модуль использует данные, полученные из баз данных, которые заполняются пользователем. Одна из них — *база расписания судозаходов*, которая будет использоваться для формирования запланированного потока, а также характеристик случайного, вторая — *база параметров причалов порта*, на основе которой будет формироваться количество причалов в порту и ограничения на прием судов. При моделировании порта подобным образом будет использоваться множество условностей, но при этом значительно повысится универсальность модели.

В случае морских пассажирских портов суда могут разделяться как по типу (*ро-ро* или нет), так и по своим габаритным характеристикам. Соответственно причалы обладают соответствующими характеристиками: длина причального фронта и наличие возможности принятия *ро-ро* судов. Аналитическая информационная система Cruisemapper АИС<sup>2</sup> круизных судов представляет расписание заходов в виде табл. 1.

Таблица 1

**Расписания судозаходов для внесения данных в имитационную модель**

| Date                     | Ship              | Arrival | Departure |
|--------------------------|-------------------|---------|-----------|
| 2 July, 2026<br>Thursday | ms Europa         | 8:00    | 23:00     |
| 3 July, 2026<br>Friday   | Mein Schiff Relax | 7:00    | 17:00     |
| ...                      | ...               | ...     | ...       |

Как видно, в расписании имеется достаточная информация о событии: в какой день прибывает судно, какое это судно, время прибытия и отправления. При заполнении базы данных для моделирования добавлен столбец, в котором можно указать конкретный причал в расписании, если в порту это согласовано на стадии составления расписания. Также необходимо указать информацию о характеристиках судна: является ли оно *ро-ро* судном и его размеры.

Для решения задач исследования моделирование акватории морского пассажирского порта ограничивается условным портом с минимальной визуализацией, без учета времени движения судна внутри акватории, поскольку для этого в целях достижения детализации процессов необходимо в разработанной модели использовать специализированные блоки Anylogic для добавления данных из расписаний судозаходов. База данных, формирующая порт и обладающая достаточным количеством информации, состоит из трех характеристик: номера причала, длины причального фронта и возможности приема паромных *ро-ро* судов. Таким образом, для описания как входного потока судов, так и порта, используются две таблицы баз данных: таблица расписания (табл. 2) и таблица с характеристиками причалов (табл. 3).

1. В табл. 2 указано судно, его размеры и тип, время его прибытия и отбытия, а также причал, к которому оно швартуется (при наличии).

Таблица 2

**Пример исходных данных расписания**

| № п/п. | Название судна    | Длина | ro-ro | Причал | Время прибытия  | Время отправления |
|--------|-------------------|-------|-------|--------|-----------------|-------------------|
| 1      | ms Europa         | 198   | Нет   | 4      | 02.06.2026 8:00 | 02.06.2026 23:00  |
| 2      | Mein Schiff Relax | 326   | Нет   | 0      | 03.06.2026 7:00 | 03.06.2026 17:00  |
| ...    | ...               | ...   | ...   | ...    | ...             | ...               |

2. В табл. 3 указаны характеристики причалов.

Таблица 3

**Пример исходных данных порта**

| Номер причала | Длина причального фронта | Может принимать ro-ro |
|---------------|--------------------------|-----------------------|
| 33            | 330                      | Нет                   |
| 35            | 200                      | Да                    |
| ...           | ...                      | ...                   |

Готовые таблицы используются средой моделирования для формирования входного потока и порта. Все моделируемые судозаходы будут выполнены в точности в заданное в расписании время и характеристики судна будут соответствовать заданным в расписании. Параметры судна будут сравниваться с соответствующими значениями из системы. При наличии номера причала у судна он будет сравниваться с номером причала в порту, куда направляется судно. Если судно не имеет заданного причала, то его размеры будут сравниваться с длиной причального фронта свободных причалов и оно будет направлено на подходящий причал.

Цифровая модель морского пассажирского порта реализует приоритетное обслуживание. Поток судов, прибывающих по расписанию, имеет абсолютный приоритет в обслуживании и вытеснит с причала любое другое судно, занимающее его в данный момент. Это имитирует реальное требование к приему судов, не подавших заявку на заход до начала навигации, — не мешать судам, следующим по расписанию. Помимо этого приоритета в потоке случайно заходящих судов реализована приоритетная очередь, которая описана в работах [15, 16]. Распределение характеристик и времени обслуживания судов, поступающих незапланированным потоком, формируются на основе соответствующих данных из загружаемого в модель расписания.

В случае применения в пассажирском порту схемы с приемом незапланированных (случайных) судозаходов вместе с приемом судов по расписанию, порт должен гарантировать возможность приема судна, прибывшего вне расписания. Судозаходы вне расписания могут быть приняты только в случае, если это не мешает принятию и обслуживанию судов, движущихся по расписанию. Схему работы очереди в таких портах можно представить в виде рис. 6.

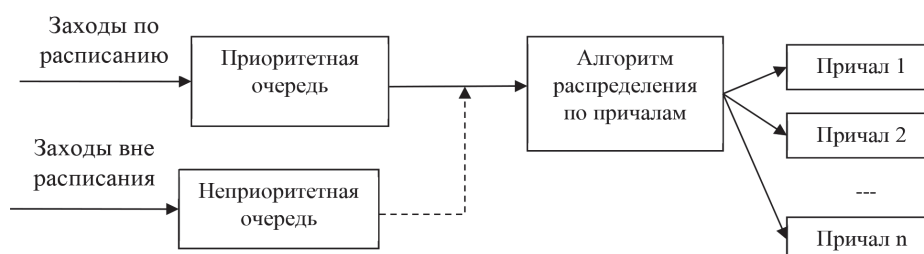


Рис. 6. Схема приоритетной очереди при применении расписания для морского пассажирского порта

Суда, прибывшие вне сетки расписания, принимаются только в случае, если в очереди нет судов, движущихся по расписанию. В морских пассажирских портах всегда существует разница между причалами как в длине причального фронта, так и в наличии специализированной инфраструктуры

для принятия особых типов судов (например, площадки для работы с пароммами), глубине и т. д. Все эти характеристики ограничивают доступное множество причалов данного порта для прибывающих судов. Судно не сможет пришвартоваться к причалу, на который оно не помещается по длине. Данную задачу решает алгоритм распределения по причалам, принцип которого описан в работах [17, 18].

Разработанный алгоритм с учетом возможности морского пассажирского порта и характеристики заявок при работе с очередью судов имеет следующий вид:

1. Определить причалы, которые могут обслужить поступившее судно.
2. При наличии свободных причалов назначить заявку на наиболее подходящий по параметрам причал (например, самый близкий по длине причального фронта к длине судна).
3. В противном случае направить заявку в индивидуальные очереди к каждому из причалов,
4. Когда причал освобождается, выбрать судно, движущееся по расписанию.
5. В случае отсутствия таких судов на обслуживание отправляется случайно прибывшее судно с наилучшими для освободившегося причала характеристиками.

Таким образом, в случае, когда в порту имеются свободные причалы, которые подходят прибывающему неприоритетному судну, но ожидающее приоритетное судно не может их занять в силу несовместимости характеристик, неприоритетное судно будет направлено сразу на обслуживание.

Суда прибывают в порт вне расписания со случайным временем между заходами. Согласно теории массового обслуживания, случайный поток судов является простейшим и подчиняется пуассоновскому распределению, согласно которому вероятность появления  $k$  заявок простейшего потока за время  $t$  определяется по формуле [19]:

$$P_k(t) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad t \in \{0, 1, \dots\}. \quad (2)$$

В целях исследования было проведено моделирование нескольких сценариев для двух крупных немецких портов: Киль и Варнемюнде (Росток). В оба порта круизные суда могут заходить как по расписанию, так и случайным образом. Информация об инфраструктуре портов размещена на их официальных сайтах [20, 21].

В 2026 г. в Киль ожидается 203 судозахода в течение всего года (за исключением ноября), а в Росток — 150 судозаходов с марта по декабрь. Пиковые месяцы по загруженности этих двух портов отличаются. В Ростке ожидается пик в июле, как и в остальных крупнейших портах Балтийского региона, и составит 30 судов за месяц, а пиковая нагрузка на терминал в Киле ожидается в сентябре и составит 37 судов за месяц (рис. 7). Ожидаемая средняя длина круизного судна в 2026 г., в порту Росток составляет 249 м, а среднее время обслуживания — 13 ч 48 мин. В порту Киль эти же показатели составляют 283 м и 11 ч 10 мин.

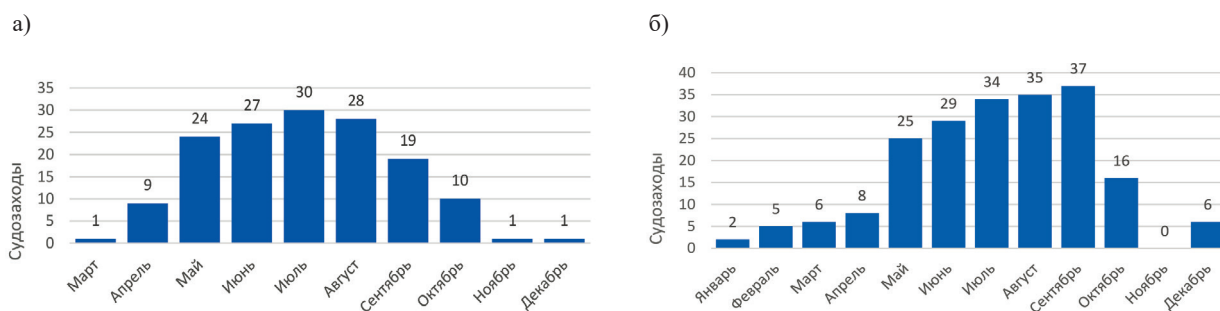


Рис. 7. Гистограммы планируемых прибытий:

а — на терминале Варнемюнде — Росток в 2026 г.; б — на терминале Киль в 2026 г.

В пассажирском терминале Варнемюнде (Росток) можно выделить четыре причала согласно данным табл. 4.



Таблица 4

**Характеристики причалов портов Варнемюнде (Росток) и Киль**

| Номер причала                      | Длина причального фронта, м |
|------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Причалы Варнемюнде (Росток)</i> |                             |
| P1–P5                              | 240                         |
| P6                                 | 150                         |
| P7                                 | 300                         |
| P8                                 | 330                         |
| <i>Причалы порта Киль</i>          |                             |
| P1                                 | 395                         |
| P22                                | 175                         |
| P27                                | 355                         |
| P28                                | 285                         |

Длина причала ограничивает максимально возможную длину принимаемого судна. Для причалов P1–P6 необходимо согласование швартовки судна длиной свыше 150 м, а для целей моделирования крайне небольшие причалы P1–P5 длиной 50 м объединены в один крупный длиной 240 м. Порт Киль способен принимать более крупные круизные суда, но также имеет четыре причала для круизных судов (см. рис. 4).

С помощью разработанной универсальной имитационной модели морского пассажирского порта и разработанной программы ЭВМ<sup>2</sup> можно проводить обыкновенные эксперименты (прогоны модели), демонстрирующие моделирование выбранного периода навигации и определяющие ключевые показатели работы порта, очереди и коэффициент загрузки причалов с помощью выполнения многосценарного моделирования, которые являются основой для обоснованных предложений по оценке загруженности причалов и вариантов модернизации.

**Результаты (Results)**

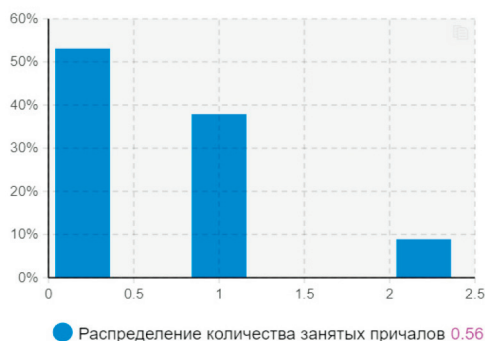
В ходе исследования были проведены серии экспериментов для двух сценариев по каждому из выбранных морских пассажирских портов. В первом сценарии прогон цифровой модели осуществлялся только с приемом судов по расписанию. Расписание выбиралось за месяц с пиковой интенсивностью. В данных экспериментах были получены данные о производительности порта в соответствии с планируемым расписанием. Таким образом, расписание проверяется на ошибки и несостыковки.

Во втором сценарии совершалась серия прогонов, где в дополнение к расписанию находился случайный поток незапланированных судов с интенсивностью, составляющей 50 % от ожидаемых по расписанию судозаходов (в случайном потоке распределение времени обслуживания и размеров судов основано на распределениях этих величин в расписании).

При моделировании порта Киль, на основе анализа моделирования сценариев, нарушений в расписании обнаружено не было. В течение всего месяца полностью отсутствовала очередь, а коэффициент загрузки порта составил 14,9 %. В среднем в порту было занято 0,58 причалов. Распределение занятости на рис. 7 свидетельствует о том, что не возникало ситуации, когда были заняты все причалы. В большинстве ситуаций порт был абсолютно свободен. Модель также представляет гистограмму времени стоянки и рассчитывает среднее значение. Среднее время стоянки судна в порту 0,46 сут, что составляет 11 ч (рис. 8).

<sup>2</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660487 Российская Федерация. Программа для моделирования загруженности причалов морского пассажирского порта с учетом различных приоритетов круизных или паромных судов / М. Р. Язвенко; заяв. и патентообл. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»; заявл. 07.05.2024; опубл. 07.05.2024. EDN DDLUCU.

а)



б)



Рис. 8. Гистограммы занятости причалов (а) и распределения времени стоянки судов (б) на терминале Киль в сентябре 2026 г.

Визуализация 2D позволяет отследить корректность заполнения данных о причалах морского пассажирского порта (рис. 9).

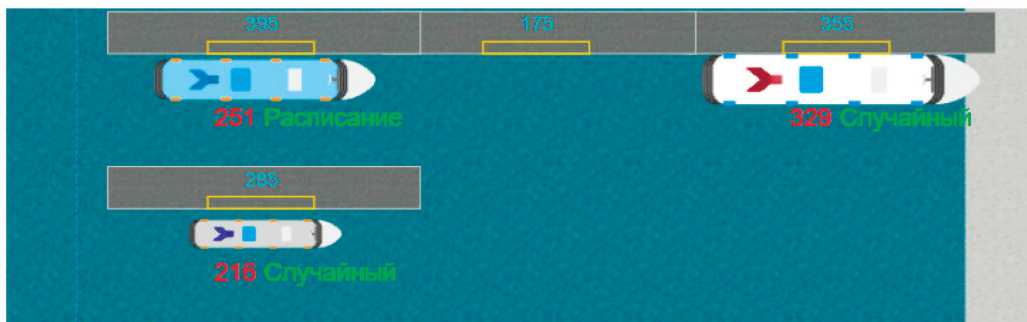


Рис. 9. Визуализация 2D фрагмента акватории терминала Киль с выделением длин причалов

Моделирование приема круизных судов портом Киль с расписанием и случайными заходами показывает следующие результаты с учетом доверительного интервала в 95 % (табл. 5).

Таблица 5

**Результаты моделирования месяца работы порта Киль со случайными заходами**

| Значение | Случайные прибытия | Максимальная длина очереди | Средняя длина очереди | Максимальное время в очереди, ч | Среднее время в очереди, ч | Коэффициент загрузки |
|----------|--------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------|
| От       | 16.20              | 1,09                       | 0,01                  | 7,01                            | 0,22                       | 0,21                 |
| Среднее  | 18.10              | 1,30                       | 0,02                  | 8,21                            | 0,29                       | 0,22                 |
| До       | 20.00              | 1,51                       | 0,02                  | 9,41                            | 0,35                       | 0,23                 |

На основе выполненного моделирования было выявлено, что Порт Киль выполнил обработку судов при увеличении интенсивности потока круизных судов в 1,5 раза. В среднем каждый месяц создавалась одна модельная ситуация, когда судну требовалось ждать обслуживания. Средняя максимальная длина очереди составила 1,3 судна. Это свидетельствует о том, что при приеме случайного потока с интенсивностью 18 судов в месяц при запланированных 37 судозаходах можно ожидать, что потребуется место для накопления двух судов в очереди. В среднем случайно заходящие круизные или паромные суда находились в очереди около 30 мин, а максимальное время в очереди можно ожидать на уровне 8,5 ч. Следует отметить, что показатели очереди не влияют на поток судов, принимаемых по расписанию, поскольку последние имеют абсолютный приоритет.

При моделировании другого терминала Варнемюнде (Росток) были обнаружены две несостыковки в расписании, которые приводили к накоплению очереди. За весь месяц дважды возникала очередь, а коэффициент загрузки порта составил 14 %. В среднем в порту было занято 0,56 причалов. Распределение занятости на рис. 10 показывает, что не возникало ситуации, когда были заняты все причалы. Причалы порта меньше пустовали, чем на терминале Киль. Среднее время стоянки судна в порту составило 0,57 сут (около 13 ч 40 мин).

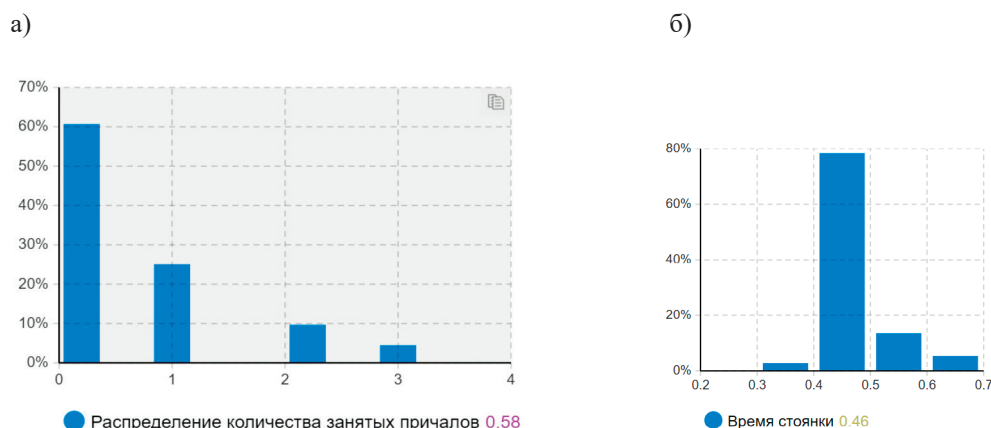


Рис. 10. Гистограммы распределения количества занятых причалов (а) и распределения времени стоянки судов (б) на терминале Варнемюнде (Росток) в июле 2026 г.

Моделирование приема судов терминалом Варнемюнде (Росток) с расписанием и случайными заходами показывает следующие результаты с учетом доверительного интервала, равного 95 % (табл. 6).

Таблица 6

**Результаты моделирования месяца работы порта Варнемюнде (Росток)  
со случайными заходами**

| Значение | Случайные прибытия | Максимальная длина очереди | Средняя длина очереди | Максимальное время в очереди, ч | Среднее время в очереди, ч | Коэффициент загрузки |
|----------|--------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------|
| От       | 12.77              | 0,29                       | 0,01                  | 0,97                            | 0                          | 0,20                 |
| Среднее  | 14.60              | 0,60                       | 0,02                  | 2,57                            | 1,06                       | 0,20                 |
| До       | 16.43              | 0,91                       | 0,03                  | 4,16                            | 2,27                       | 0,21                 |

Порт города Росток справился с загруженностью с увеличением интенсивности потока в 1,5 раза. В среднем каждый месяц создавалась хотя бы одна ситуация, где судну требовалось ждать обслуживания. Средняя максимальная длина очереди составила 0,6 судов. Это свидетельствует о том, что при приеме случайного потока с интенсивностью 15 судов в месяц при запланированных 30 судозаходах можно ожидать, что потребуются место для нахождения в очереди одного судна в очереди при нормальных условиях и двух только при очень неблагоприятном стечении обстоятельств. В серии экспериментов, в 50 % случаев очередь не создавалась вовсе. Несмотря на это данные, полученные с учетом доверительного интервала, показывают, что появление очереди более вероятно, чем ее отсутствие. В среднем случайно заходящие суда находились в очереди практически час, что в 2 раза превышает показатель порта Киль. Максимальное время в очереди, наоборот, значительно меньше и его можно ожидать на уровне трех часов.

**Обсуждение (Discussion)**

Разработанный программный комплекс позволяет проигрывать различные сценарии с различными морскими пассажирскими портами. В данной работе были описаны два сценария: прием

только по расписанию и прием случайных вместе с расписанием. Однако возможности разработанного программного инструментария не ограничиваются только ими. С его помощью можно выполнять следующие действия:

- рассматривать увеличение или уменьшение интенсивности случайного потока;
- полностью отключить расписание и рассматривать только случайные заходы с заданной интенсивностью, как в классической СМО;
- рассматривать другие математические распределения входного потока;
- рассматривать изменение инфраструктуры порта: увеличение длины причального фронта или строительство новых причалов;
- рассматривать прием паромных (круизных) судов;
- рассматривать другие временные промежутки, например, весь период навигации.

Результаты всех модельных экспериментов выводятся на экран в виде наглядных гистограмм и графиков. Трех- и двухмерная визуализации позволяют визуально контролировать процесс захода судов для поиска проблемных ситуаций.

Проведенное моделирование двух портов показывает, что цифровая модель претендует на универсальность, при корректно составленных исходных данных. В ходе исследования с использованием программного комплекса было выявлено, что составленное расписание на июль 2026 г. в порту города Росток имеет две «несостыковки», когда порт не может справиться с поступающими круизными и паромными судами и образуется очередь.

Активное влияние внешней среды, а также региональных, экономических и политических факторов, трендов в сфере строительства новых круизных лайнеров и стремительного роста пассажиропотока формирует необходимость учета новых переменных, трансформирования принятия решений при неопределенности, что требует разработки более комплексных имитационных моделей, отражающих взаимодействие систем *морская паромная / круизная линия – морской пассажирский порт*. Лицу, принимающему решение, недостаточно только данных за навигацию, ему необходимо дополнительно использовать цифровые двойники для выполнения многосценарного моделирования.

### Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования выполнено следующее:

1. Разработана новая имитационная модель с учетом новых модулей интеграции данных (модули баз данных), для оценки пропускной способности морского пассажирского порта, принимающего в модельных сценариях суда как по заранее составленному расписанию (известному на навигацию), так и при условии возникновения случайного потока судов.
2. Представлена разработанная новая модель приоритизации обслуживания входящего потока паромных и круизных судов в морской пассажирский порт.
3. Представленные результаты исследования различных сценариев входного потока круизных судов двух морских пассажирских портов Балтийского региона выявили достаточность данных для последующей работы лиц, принимающих решения по прогнозированию развития.
4. На основе анализа результатов многосценарного моделирования установлено, что разработанный модуль может быть успешно использован для моделирования случайного входного потока в системе массового обслуживания.
5. Сформированные данные (см. табл. 6) о распределении количества занятых причалов, распределении времени стоянки судов позволяют оценивать различные варианты работы морского пассажирского порта и определять положение порта в регионе моря.
6. Разработанный программный инструментарий значительно улучшает практические возможности получения данных *многосценарного моделирования*. На основе полученных результатов подтверждено, что прогнозирование возможных колебаний судопотока позволяет снизить неопределенность и заранее подготовиться к принятию соответствующих управленческих решений как при операционном управлении, так и в процессе решения задачи модернизации инфраструктуры.

7. Использование разработанного программного модуля позволяет для лиц, принимающих решение, получить полную группу данных многосценарного моделирования: среднюю и максимальную длину очереди, максимальное и среднее время нахождения в очереди, распределение времени стоянки, график очереди, коэффициент загрузки причалов и др. На основе созданной имитационной модели появляется возможность исследовать систему морского пассажирского порта с абсолютным приоритетом, с относительным приоритетом, с ограниченным временем пребывания судна в очереди, с ограничением по длине очереди и ряд других необходимых сценариев.

8. Разработанная имитационная модель и разработанная программа ЭВМ для морских пассажирских портов позволяют увеличить возможности существующих моделей и методов при снижении времени на моделирование. Несмотря на некоторые теоретические условности во входных данных инфраструктуры порта, путем перехода к модели «условного порта», точность получаемых данных получилась на высоком уровне. Эффективность моделирования морского пассажирского порта для лица, принимающего решение, и руководителя морского пассажирского порта позволяет добиться высокой скорости получения данных многосценарного моделирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krile S. The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals / S. Krile, N. Maiorov // *Transport Problems*. — 2020. — Vol. 15 — Is. 4 — Part 2. — Pp. 203–214.
2. Ćorluka G. Cruise Port Passenger Flow Analysis: a Cruise Port Governance Perspective / G. Ćorluka, I. Peronja, D. Tubić // *Naše more*. — 2020. — Vol. 67. — Is. 3. — Pp. 181–191. DOI: 10.17818/nm/2020/3.1.
3. Язвенко М. Р. Универсальная имитационная модель потока поступления круизных и паромных судов в морской пассажирский порт / М. Р. Язвенко // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364. — EDN FKUCBB.
4. London W. R. Power in the context of cruise destination stakeholders' interrelationships / W. R. London, G. Lohmann // *Research in Transportation Business & Management*. — 2014. — Vol. 13. — Pp. 24–35. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
5. Dorigatti J. Cruise Industry Trends and Cruise Ships' Navigational Practices in the Central and South Part of the Adriatic East Coast Affecting Navigational Safety and Sustainable Development / J. Dorigatti, T. Perić, G. J. Mrčelić // *Applied Sciences*. — 2022. — Vol. 12. — Is. 14. DOI: 10.3390/app12146884.
6. Бродецкий Г. Л. Системный анализ в логистике. Принятие решений в условиях неопределенности. / Г. Л. Бродецкий — М.: Academia, 2010. — 336 с.
7. Андреева Л. А. Задачи совершенствования методов технологического проектирования морских торговых портов в новых условиях / Л. А. Андреева, А. Л. Кузнецов, А. М. Сампиев, А. Д. Семенов // *Транспортное дело России*. — 2024. — № 1. — С. 164–166. — EDN CERHHD.
8. Marcussen C. H. Visualising the network of cruise destinations in the Baltic Sea — a multidimensional scaling approach / C. H. Marcussen // *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*. — 2017. — Vol. 17. — Is. 2. — Pp. 208–222. DOI: 10.1080/15022250.2016.1142893.
9. Русинов И. А. Применение теории массового обслуживания для оценки пропускной способности специализированных терминалов / И. А. Русинов // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2009. — № 3(57). — С. 3–5. — EDN KXIRQF.
10. Язвенко М. Р. Исследование загрузки причалов морского пассажирского порта на основе моделирования / М. Р. Язвенко // *Системный анализ и логистика*. — 2021. — № 2(28). — С. 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113. — EDN EJHUOQ.
11. Китиков А. Н. Ограничения при расчёте морского фронта методами теории массового обслуживания / А. Н. Китиков, А. Л. Кузнецов, И. А. Русинов // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2013. — № 1(71). — С. 3–6. — EDN RVCCJN.
12. Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602. — EDN TRJAZE.



13. Майоров Н. Н. Исследование операционных процессов обслуживания пассажиров в морском пассажирском терминале с использованием моделирования / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6(40). — С. 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80. — EDN XHLRJH.
14. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении / Д. Ю. Каталевский. — М.: Издательский дом «Дело»: РАНХиГС, 2015. — 496 с.
15. Джейсуол Н. К. Очереди с приоритетами / Пер. с англ. И. С. Нефедовой, В. С. Манусевича. — М.: Мир, 1973. — 280 с.
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: Сборник статей XXVI Международная научная конференция. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 29 мая — 02 2023 года. Том Часть 3. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. — С. 107–112. — EDN PEZXTZ.
17. Майоров Н. Н. Исследование и разработка информационно-измерительной системы для многоприоритетных потоков / Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. — С. 204–205. — EDN KZZHLW.
18. Maiorov N. N. Research and Development of an Algorithm for Multi-Priority Flows in Transportation Systems / N. N. Maiorov, M. R. Yazvenko // 2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF) — 2024. — С. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10564652.
19. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. И. И. Грушко. — М.: Машиностроение, 1979. — 432 с.
20. Our Terminals — PORT OF KIEL [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.portofkiel.com/harbours-terminals.html> (Дата обращения: 01.10.2025)
21. Rostock Port: Portplan [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.rostock-port.de/en/habour-plan> (Дата обращения: 01.10.2025).

## REFERENCES

1. Krile, S. and N. Maiorov. “The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals.” *Transport Problems* 15.4 part 2 (2020): 203–214.
2. G. Ćorluka, I. Peronja and D. Tubić. “Cruise Port Passenger Flow Analysis: a Cruise Port Governance Perspective.” *Naše more* 67.3 (2020): 181–191. DOI: 10.17818/nm/2020/3.1.
3. Yazvenko, M. R. “Universal simulation model of cruise and ferry ships flow to a sea passenger port.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364.
4. London, W. R. and G. Lohmann. “Power in the context of cruise destination stakeholders’ interrelationships.” *Research in Transportation Business & Management* 13 (2014): 24–35. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
5. Dorigatti, J., T. Perić and G. J. Mrčelić. “Cruise Industry Trends and Cruise Ships’ Navigational Practices in the Central and South Part of the Adriatic East Coast Affecting Navigational Safety and Sustainable Development.” *Applied Sciences* 12.14 (2022). DOI: 10.3390/app12146884.
6. Brodetskiy, G. L. *Systemniy analiz i logistica. Priniatie resheniy v usloviakh neopredelennosti*. М.: Academia, 2010: 336.
7. Andreeva, L. A., A. L. Kuznetsov, A. M. Sampiev and A. D. Semenov. “Tasks of improving methods of technological design of trade sea ports in new conditions.” *Transport Business of Russia* 1 (2024): 164–166.
8. Marcussen, C. H. “Visualising the network of cruise destinations in the Baltic Sea — a multidimensional scaling approach.” *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism* 17.2 (2017): 208–222. DOI: 10.1080/15022250.2016.1142893.
9. Rusinov, I. A. “Primenenie teorii massovogo obsluzhivaniya dlya otsenki propusknoy sposobnosti spetsializirovannykh terminalov.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(57) (2009): 3–5.
10. Yazvenko, M. R. “Research of berths utilization at sea passenger port on the basis of modeling.” *System Analysis and Logistics* 2(28) (2021): 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.

11. Kitikov, A. N., A. L. Kuznetsov and I. A. Rusinov. "Limitation of the queuing theory techniques for the assessment of sea port front." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(71) (2013): 3–6.
12. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin and G. B. Popov. "Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.
13. Mayorov, N. N. and V. A. Fetisov. "Research of operational processes passenger services in the marine passenger terminal using simulation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 6(40) (2016): 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80.
14. Katalevsky, D. Yu. *Osnovy imitacionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii* M.: Izdatel'skiy dom «Delo»: RANHiGS, 2015.
15. Jaiswal, N. K. *Priority Queues Mathematics in science and engineering*; v. 50. New York, Academic Press, 1968: 240.
16. A Dobrovolskaia, N. N. Maiorov, M. R. Yazvenko, "Decision-making under uncertainty in forecasting the development of a sea passenger port based on the modeling of different priorities of ships" *Wave electronics and infocommunication systems: Proceedings of the XXVI International Scientific Conference*. Volume 3, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2023. — p. 107–112.
17. Mayorov, N. N. and M. R. Yazvenko. "Research and development of an information modification system for multi-priority streams." *Metrologicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy: Sbornik statey VII Mezhdunarodnogo foruma, Sankt-Peterburg, 04 marta 2025 goda*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2025: 204–205.
18. Maiorov, N. N. and M. R. Yazvenko. "Research and Development of an Algorithm for Multi-Priority Flows in Transportation Systems." *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)* — 2024: 1–4. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10564652.
19. Kleinrock, Leonard. *Queueing Systems*, Volume 1: Theory. New York: John Wiley & Sons, 1975.
20. Our Terminals — PORT OF KIEL. Web. 1 October 2025 <<https://www.portofkiel.com/harbours-terminals.html>>.
21. Rostock Port: Portplan. Web. 1 October 2025 <<https://www.rostock-port.de/en/habour-plan>>.

#### 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](mailto: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: [fetlvtad@yandex.ru](mailto:fetlvtad@yandex.ru)

##### Язвенко Максим Романович —

аспирант  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет аэрокосмического  
приборостроения»  
190000, Россия, Санкт-Петербург,  
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А  
e-mail: [YazvenkoM@guap.ru](mailto:YazvenkoM@guap.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Maiorov, Nikolai N. —

Grand PhD in 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](mailto:nmsoft@yandex.ru)

##### Fetisov, Vladimir A. —

Grand PhD in Technical Sciences, Professor  
Saint-Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation  
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,  
St. Petersburg, 190000,  
Russian Federation  
e-mail: [fetlvtad@yandex.ru](mailto:fetlvtad@yandex.ru)

##### Yazvenko Maksim Romanovich —

Postgraduate Student  
Saint-Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation  
SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str.,  
Saint-Petersburg, 190000,  
Russian Federation  
e-mail: [YazvenkoM@guap.ru](mailto:YazvenkoM@guap.ru)