

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-169-180

## STOCHASTIC MODEL FOR FORECASTING OF CRUISE OR FERRY SHIP ARRIVAL AT SEAPORT FOR INFRASTRUCTURE ASSESSMENT

**N. N. Maiorov, V. A. Fetisov, A. A. Dobrovolskaia**

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

*The topic of the research is the development of new models and methods to assess the efficiency of port operations of sea passenger ports and terminals in order to effectively plan the work and accurate forecasting of infrastructure development. It is noted that changes in cruise and ferry route networks, especially relevant in the conditions of passenger traffic recovery after the gradual lifting of restrictions due to Covid-19, will directly affect port congestion. It is proposed to include into the sphere of decision-making on management of the sea passenger port the models based on consideration of probabilistic processes of cruise or ferry vessels calls. The Baltic Sea region is chosen as an object of research. The main modern directions in the sphere of sea passenger transportations confirming the gradual recovery of the route networks operation are presented. The flow of cruise and ferry vessels of the sea passenger port "Passenger port St. Petersburg "Marine Facade" is chosen as an object of research. The analysis of loading of berths, the analysis of the size of cruise and ferry ships, the route networks of ferry and cruise lines are carried out. As a result of the research a new stochastic model is presented and comparison with known distribution laws is carried out. Based on the data obtained, a confidence zone for making decisions on port congestion is determined. This area is formed on the basis of an assessment of the study of the dynamics of ship traffic nonstationary intensity, followed by the application of correlation-regression analysis and the characteristics of the random function describing the intervals between individual arrivals of cruise and ferry ships. The proposed model includes the ability to consider different priorities, primarily in terms of vessel length. Digital transport model is built in AnyLogic environment for port congestion study. The received data are used for optimization experiments in AnyLogic software environment with the purpose of complex estimation of the seaport operation for a year. Based on the optimization experiment and simulation, data are generated considering different distribution laws and used for decision making in case of uncertainty for infrastructure modernization. The presented model can be used for substantiation of management decisions both on strategic and tactical levels for assessing the efficiency of investment projects on development of sea passenger ports and terminals.*

*Keywords: ferry network, maritime ferry transportation, pie charts of intensities, Baltic Sea, intensities, port system.*

**For citation:**

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.

**УДК 65.012.1, 656.072**

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИБЫТИЯ КРУИЗНЫХ ИЛИ ПАРОМНЫХ СУДОВ В МОРСКОЙ ПОРТ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФРАСТРУКТУРЫ

**Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Добровольская**

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

*Темой исследования является вопрос разработки новых моделей и методов для оценки эффективности портовых операций морских пассажирских портов и терминалов в целях эффективного планирования работы и точного прогнозирования развития инфраструктуры. Отмечается, что изменения в маршрутных круизных и паромных сетях, особенно актуальные в условиях восстановления пассажиропотока после*

постепенного снятия ограничений по причине Covid-19, непосредственно отражаются на загруженности порта. Предлагается в сферу принятия решений по управлению морским пассажирским портом включить модели на основе рассмотрения вероятностных процессов заходов круизных или паромных судов. В качестве объекта исследования выбран регион Балтийского моря. Представлены основные современные направления в сфере морских пассажирских перевозок, подтверждающие постепенное восстановление работы маршрутных сетей. Объектом исследования выбран поток круизных и паромных судов морского пассажирского порта Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» (Санкт-Петербург). Выполнен анализ загруженности причалов, анализ размеров круизных и паромных судов, исследованы маршрутные сети паромных и круизных линий. В результате исследования представлена новая стохастическая модель и проведено сравнение с известными законами распределения. На основе полученных данных определена доверительная область принятия решений по загруженности порта. Рассматриваемая зона формируется на основе оценки исследования динамики нестационарной интенсивности движения судов с последующим применением корреляционно-регрессионного анализа и характеристик случайной функции, описывающей интервалы между отдельными прибытиями круизных и паромных судов. В предлагаемую модель включена возможность рассмотрения различных приоритетов, в первую очередь, по длине судна. Для выполнения исследования загруженности порта была построена цифровая транспортная модель в среде AnyLogic. Полученные данные используются для оптимизационных экспериментов в программной среде AnyLogic с целью комплексной оценки работы морского порта за год. На основе оптимизационного эксперимента и моделирования с учетом различных законов распределения формируются данные, которые используются для принятия решений при неопределенности для модернизации инфраструктуры. Представленная модель может быть использована для обоснования управленческих решений как на стратегическом, так и на тактическом уровне для оценки эффективности инвестиционных проектов по развитию морских пассажирских портов и терминалов.

*Ключевые слова:* паромная сеть, морские паромные перевозки, круговые диаграммы интенсивностей, Балтийское море, интенсивности, система портов.

**Для цитирования:**

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.

### Введение (Introduction)

Актуальность проблемы исследования обусловлена постоянно возрастающей ролью морских пассажирских портов в глобальных транспортно-экономических системах. Несмотря на ситуацию, наблюдающуюся с 2019 г. в сфере морских пассажирских перевозок в связи с ограничениями по причине Covid-19, сохраняется очень большая востребованность и актуальность перевозок круизными лайнерами и паромами. В настоящее время происходит постепенное восстановление работы морских круизных и паромных линий согласно данным, приведенным в открытых аналитических источниках [1]. Динамика в сфере морских паромных перевозок показана на рис. 1, на рис. 2 приведены диаграммы интенсивности работы выбранных портов Балтийского моря.

На основе данных портов в течение первых двух месяцев 2022 г. пассажиропоток порта Таллин составил 220 013 чел., порта Стокгольм — 26 000 чел. На основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что наблюдается постепенное восстановление направлений морских паромных линий в регионе. В глобальном масштабе индустрия морских круизов имеет ежегодные совокупные темпы роста пассажиров, которые, согласно данным аналитических отчетов [1], [2], в период 1990–2020 гг. составили 6,63 %. Данная отрасль является одной из наиболее динамичных и быстрорастущих отраслей международного туризма [2], [3]. В последние два десятилетия в связи с быстрым ростом круизного рынка круизные суда курсируют по всему миру, выполняя рейсы во многих географических районах — от Карибского бассейна, Средиземноморья до Аляски и Азии. Из рис. 1 видно, что происходит постепенное восстановление маршрутных сетей паромных и круизных линий. К сожалению, такая ситуация сегодня не наблюдается повсеместно. В первую очередь происходит восстановление локальной мобильности

пассажиропотока в регионах морей. Если рассматривать, например, расписание прибытия судов Пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад» (далее — Пассажирский порт Санкт-Петербург [4], то последним круизным судном, прибывшим в порт, был лайнер AIDAaura, который находился там 21 октября 2019 г. На сегодняшний день расписание круизных судов в порту не восстановлено. При рассмотрении современной ситуации в сфере морских паромных перевозок прослеживаются два основных варианта:

1-й вариант — постепенное восстановление маршрутных паромных и круизных сетей на основе существующих направлений;

2-й вариант — создание новых круизных маршрутов, строительство новых портов и терминалов в уже существующие маршруты, позволяющее привлечь пассажиропоток в уже существующие маршруты.

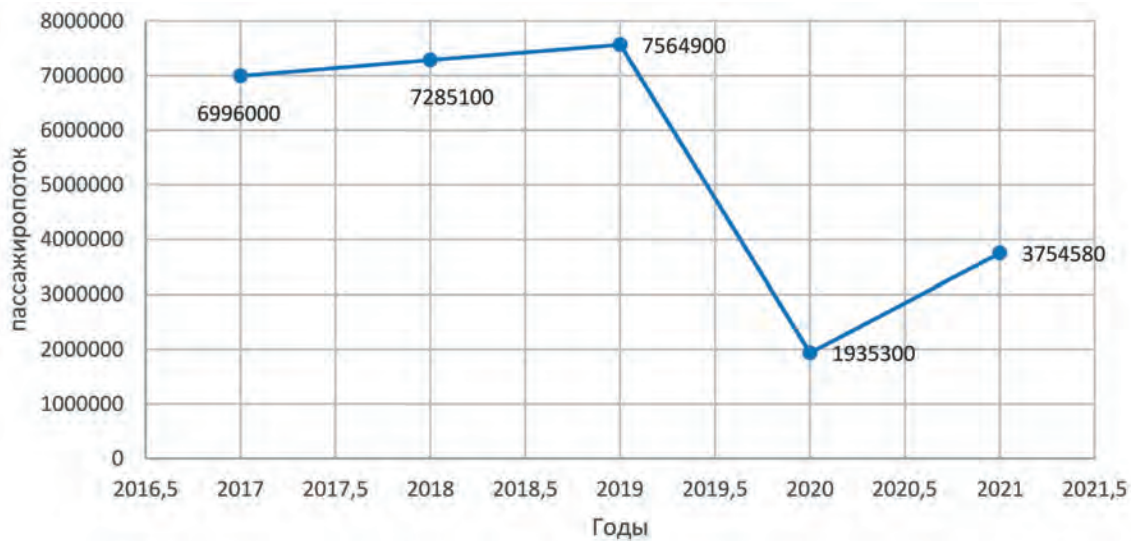


Рис. 1. Динамика перевезенных круизными и паромными линиями пассажиров в период 2017–2021 гг. для Европы и региона Балтийского моря

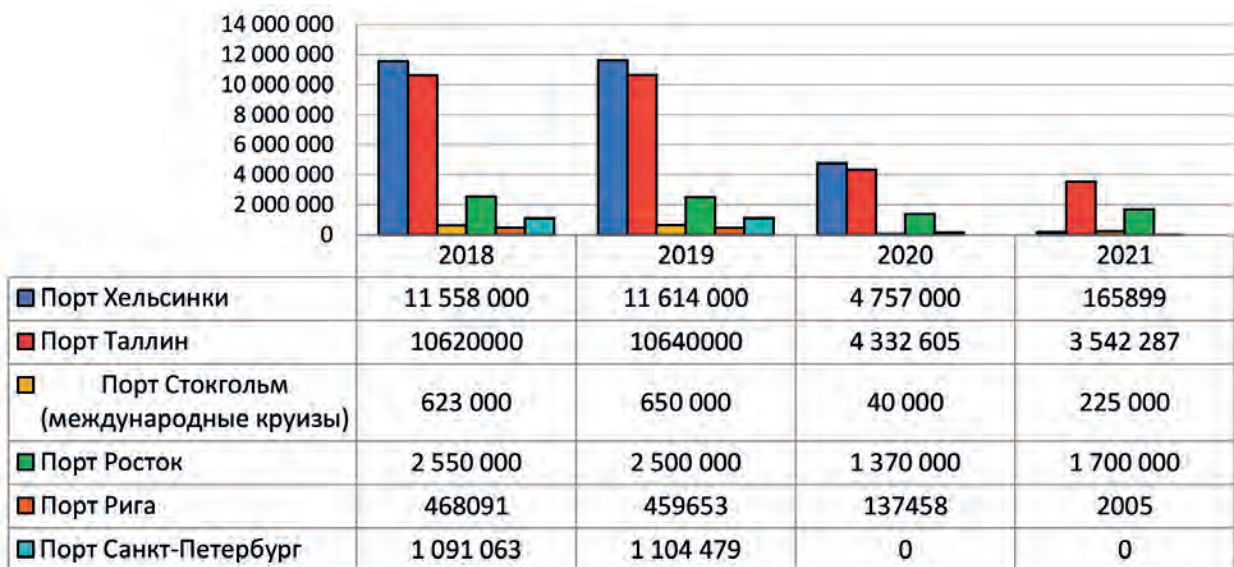


Рис. 2. Анализ пассажиропотока морских пассажирских портов Балтийского моря в период 2018–2022 гг.



Именно второй вариант является в настоящее время наиболее востребованным ввиду необходимости не только восстановления регулярности направлений, но и привлечения новых потоков пассажиров. Ввиду длительных ограничений, вызванных эпидемией Covid-19, потенциал рынка и отложенная востребованность являются достаточно высокими. При создании нового круизного маршрута (например, в регионе Балтийского моря) будет наблюдаться ситуация изменения положения морского порта относительно других. В работах [5], [6] представлены математическая модель в форме диаграммы Circos и программная реализация для определения положения порта в регионе относительно других при введении нового круизного маршрута. В работе обоснована необходимость оценки модернизации порта на основе изменений со стороны внешней среды, которые носят случайный характер. Однако изменение положения порта отразится на интенсивности работы линии и загруженности причалов. Благодаря современной тенденции увеличения размеров круизных и паромных судов перед руководителями порта в определенный момент времени приобретет актуальность задача модернизации инфраструктуры, увеличения причалов и их длины. Поэтому необходимо получить максимально возможное количество различных сценариев загруженности порта. В определенных условиях, ввиду загруженности основных причалов основного пассажирского терминала, может возникнуть ситуация, когда для круизного судна будет выделен другой причал в рамках имеющихся в Пассажирском порту Санкт-Петербурга. Данный вариант с определенной периодичностью наблюдается в портах Балтийского моря.

Переход от известных детерминированных моделей в сфере исследования пассажирских морских перевозок к применению вероятностных моделей сейчас находится в центре внимания ввиду изменяющегося влияния внешней среды. Необходимо отметить, что использование вероятностных моделей является актуальным также при вводе нового морского пассажирского терминала или модернизации нескольких причалов. Несмотря на известный график прибытия судов в порт в начале навигации, для модернизации инфраструктуры необходимо иметь данные, полученные на основе моделирования различных вариантов загруженности причалов. Для получения таких данных необходимо использовать имитационное моделирование, выполненное на основе как детерминированных, так и вероятностных моделей.

В настоящей работе предлагается использовать стохастическое моделирование как один из вариантов учета различных сценариев для определения вариантов загрузки причалов. При этом проверка предлагаемого математического аппарата и метода производится на основе известных данных расписаний приходов круизных и паромных судов за период навигации 2017–2021 гг.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Потоки круизных и паромных судов, транспортные и пассажирские потоки являются ключевым элементом для исследования работы морского пассажирского порта. Наличие данных элементов является необходимым условием его непрерывной деятельности. Поэтому от характеристик транспортных потоков, в частности их интенсивности и стабильности, напрямую зависит общая загруженность пассажирского порта и, как следствие, эффективность и равномерность использования всех его ресурсов. Исследование потоков и разработка их математических моделей могут существенно повысить эффективность управления портом и его ресурсами как на стратегическом, так и на оперативном уровне. Ключевую роль в таких исследованиях должны дополнительно играть стохастические модели, учитывающие фактор неопределенности и характеризующие его влияние на деятельность порта. Использование только детерминированных моделей ограничивает зону принятия решений, использование стохастических моделей позволяет повысить надежность функционирования портовой системы за счет включения различных сценариев. Несмотря на наличие графиков прибытия судов в начале навигации, а также развитую координацию графиков и планов работы круизных и паромных компаний при решении задачи прогнозирования развития необходимо переходить к моделированию различных сценариев, базирующихся на цифровых транспортных моделях, к которым можно отнести имитационную модель морского пассажирского порта в среде Anylogic [7].

Транспортный поток оказывает существенное влияние на процесс работы порта [8]–[10]. Например, на основании уведомлений капитанов судов об ожидаемом времени прибытия, порт планирует их техническое обслуживание и погрузочно-разгрузочные работы, внося соответствующую информацию в месячные и декадные графики и выделяя необходимые ресурсы. Персонал и службы порта стремятся упорядочить обработку паромных судов для обеспечения наиболее эффективной работы и использования ресурсов. Традиционные методы управления не в полной мере нивелируют влияние случайных прибытий судов на его деятельность. Отсюда возникает задача разработки методов и моделей для оценки возможных параметров потоков судов и связанных с ними пассажиро- и грузопотоков, что позволит впоследствии существенно снизить масштаб неопределенности. Прежде всего необходимо оценить имеющуюся интенсивность судозаходов круизных и паромных судов. В табл. 1 приведена ежемесячная статистика прибытия судов в Пассажирский порт Санкт-Петербург в навигационный период 2015–2019 гг. (по имеющимся данным расписания [4]).

Таблица 1

**Интенсивность судозаходов круизных и паромных судов  
в морской пассажирский порт**

Месяц	Рассматриваемый период				
	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Апрель	0	0	0	1	1
Май	35	36	42	47	47
Июнь	54	44	57	63	54
Июль	60	61	68	54	68
Август	54	45	56	65	58
Сентябрь	22	20	21	34	31
Октябрь	4	3	5	7	7
Ноябрь	0	0	0	0	0
Декабрь	1	0	0	0	0
Общее количество заходов круизных и паромных судов	230	209	249	270	265

На основе данных интенсивности работы были определены размеры каждого круизного или паромного судна, а также рассчитана частота швартовки к причалам для определения их приоритета. На рис. 3 показан график использования причалов № 1–7 морского Пассажирского порта Санкт-Петербург. На диаграмме рис. 4 показан результат анализа длины круизных и паромных судов для Пассажирского порта Санкт-Петербурга.

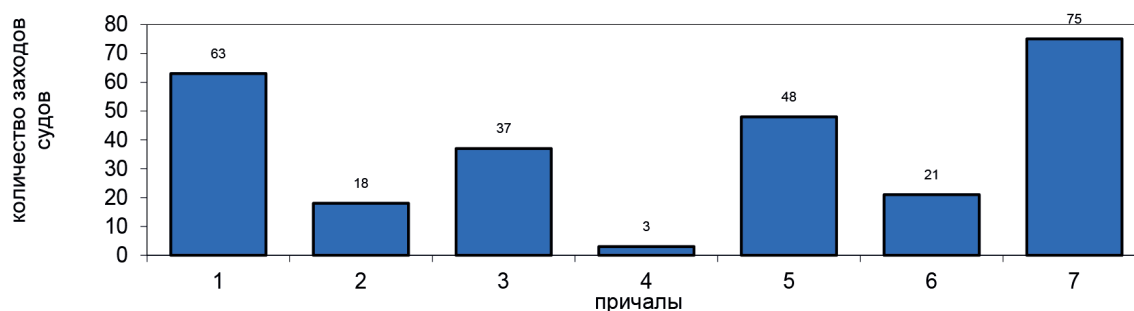


Рис. 3. Распределение прибытий круизных и паромных судов в Пассажирский порт Санкт-Петербург



Рис. 4. Анализ длины круизных и паромных судов для Пассажи́рского порта Санкт-Петербург за 2019 г.

На основе анализа размеров и тоннажа круизных судов было установлено, что большинство круизных судов в Пассажи́рском порту Санкт-Петербург имеют длину более 218 м, почти половина из них более 288 м. Следовательно, нагрузка на причалы № 1 и 7 в морском порту должна быть повышенной. Кроме того, эти причалы находятся ближе всего к морю, что упрощает маневрирование судов. Это подтверждает диаграмма распределения судов по причалам, представленная на рис. 1.

На основе анализа загрузки причалов установлено, что крупные суда длиной 218–288 м швартуются у причалов № 3 и 5. Такая конфигурация может принять наибольшее количество крупных лайнеров в порту. Причал № 4 очень редко принимает суда (три судна в течение 2019 г.). В случае одновременного прибытия нескольких круизных и паромных судов длиной более 300 м (333 м) следует рассматривать вероятность швартовки судна на другом причале в рамках имеющихся причалов Пассажи́рского порта Санкт-Петербург. Выполненный анализ подтверждает необходимость оценки вероятностных параметров интенсивностей круизных и паромных судов ввиду тренда на большие лайнеры для формирования прогнозного плана по модернизации инфраструктуры.

Моделирование различных вариантов заходов круизных и паромных судов в порту необходимо выполнять для прогнозирования и обоснования будущих изменений инфраструктуры порта [11], [12]. Классическая модель оценки интенсивности движения основана на пуассоновском законе распределения (на основе моделей систем массового обслуживания), следовательно, интервал между прибытиями судов подчиняется следующему экспоненциальному распределению с плотностью

$$f_k(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где  $t \geq 0$  — интервал между приходами круизных судов;

$\lambda$  — интенсивность входящего потока судов.

Известно, что пуассоновский поток является стационарным, ординарным, не имеющим последствия. Если круизные суда работают на линии, то время прибытия (захода) в порт известно с определенной точностью. Тем не менее не исключены действия неблагоприятных случайных факторов, которые могут привести к задержке прибытия круизного судна, а также возможность относительно небольших отклонений от расписания. На самом деле, интенсивность движения может изменяться под воздействием различных факторов внешней среды. При этом на практике необходимо использовать различные законы распределения для получения большего набора данных.

При моделировании в цифровой среде Anylogic за счет вычислительных мощностей можно рассматривать не только стационарный поток, но и стохастический, учитывающий последствие различных внешних факторов. Для выполнения исследования выбираем пуассоновский и нормальный законы распределения. Дополнительно для учета стохастических процессов предлагаем рассматривать прибытие судов на основе гамма-распределения.

Необходимо вначале получить функцию интенсивности круизных и паромных судов, а затем можно перейти к анализу нестационарного потока судов. Рассмотрим предлагаемую математическую модель в следующем виде:

$$f(t_v) = \frac{\lambda(t_0 + t_v)(\Lambda_{t_0, t_0 + t_v})^{r-1} e^{-\Lambda_{t_0, t_0 + t_v}}}{\Gamma(r)}, \quad (2)$$

где  $t_v \geq 0$  — интервал между приходами круизных судов;

$\lambda$  — интенсивность входящего потока судов;  
 $r$  — закон распределения ( $r > 0$ );  
 $\Gamma(r)$  — гамма-распределение.

### Результаты моделирования (Simulation results)

Учитывая ранее указанные свойства потока судов, можно предположить, что интервалы между их прибытиями подчиняются экспоненциальному, или гамма-распределению, а интенсивность  $\lambda$  будет принята переменной. Для сравнения результатов рассмотрение следует дополнить нормальным законом распределения. Для того чтобы правильно смоделировать поток круизных и паромных судов, необходимо выполнить следующее:

- 1) собрать статистические данные о прибытии судов в порт за определенный период времени и сгруппировать их по направлениям перевозок и причалам;
- 2) разделить рассматриваемый промежуток времени на интервалы, рассчитав для каждого из них интенсивность потока судов как отношение числа прибытий судов за определенный интервал к его продолжительности (такой метод позволяет увидеть четкую и устойчивую динамику);
- 3) определить функцию, которая с достаточной точностью характеризует зависимость интенсивности потока судов от времени;
- 4) оценить последствия случайных прибытий судов (формула (2));
- 5) проверить статистическую гипотезу о соответствии эмпирических данных выбранным распределениям с помощью критерия согласия;
- 6) ввести полученные данные в имитационную модель в программе AnyLogic и получить данные моделирования.

Отдельно в имитационную модель включена практическая реализация оптимизационного эксперимента. Для этого в программное обеспечение Anylogic добавлен новый отдельный программный модуль для нахождения текущего годового количества прибытий круизных или паромных судов и результата оптимизационного эксперимента с учетом законов распределения. При разработке модели были использованы функции программирования языка программирования Java.

Оконная форма цифровой модели Пассажирского порта Санкт-Петербург приведена на рис. 5 — показана практическая реализация в AnyLogic графиков функции интенсивности паромных и круизных судов на основе аналитических данных пассажирского порта, а также результатов моделирования работы морского пассажирского порта с учетом реализации выбора различных законов распределения (нормального и пуассоновского законов распределения, а также гамма-распределения).

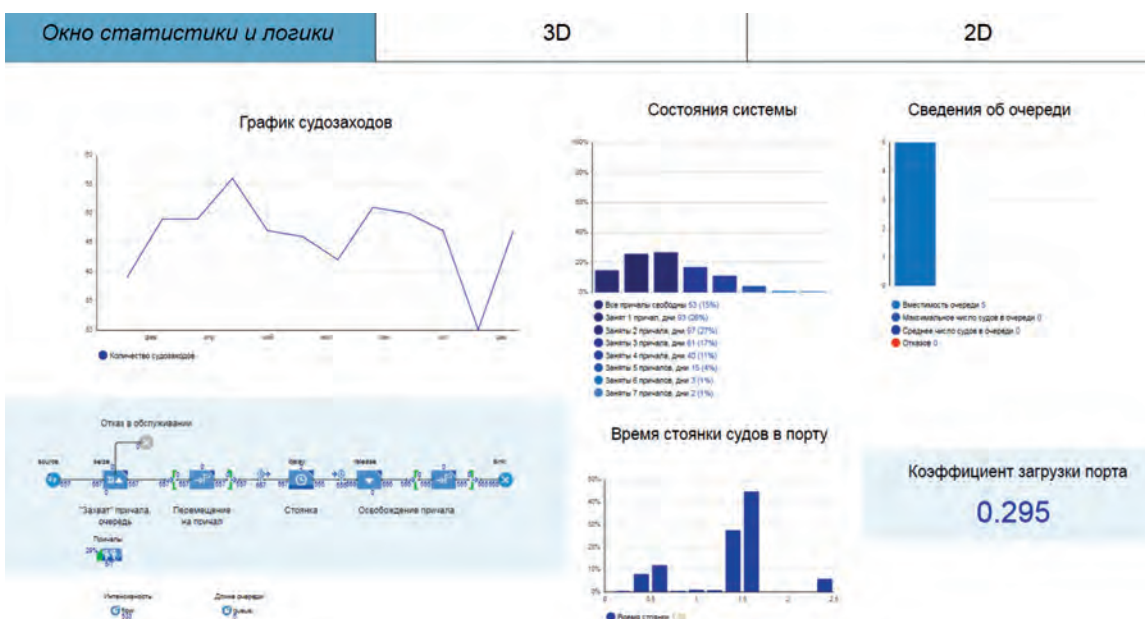


Рис. 5. Практическая реализация в AnyLogic графиков функции интенсивности паромных и круизных судов



Полученные результаты моделирования в среде Anylogic приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты моделирования различных сценариев  
интенсивности круизных и паромных судов**

№ п/п.	Гамма- распределение, шт.	Пуассоновское распределение, шт.	Нормальное распределение, шт.	Гамма- распределение, шт.	Пуассоновское распределение, шт.	Нормальное распределение, шт.
11	247	263	249	261	221	290
22	289	221	240	259	249	263
33	240	269	242	308	265	248
44	297	273	264	269	264	358
55	280	320	284	281	234	356
66	264	317	266	295	277	240
77	262	295	257	279	276	256
88	315	274	252	271	257	267
99	273	291	275	265	266	274
110	10257	299	280	270	269	272
111	261	221	290	–	–	–

На основе полученных данных составим графики отдельных состояний, на которых будет выделено отклонение результатов от среднего значения для оценки их диапазона в случае применения каждого из распределений. Результаты моделирования и выделение доверительной области приведены на рис. 6.

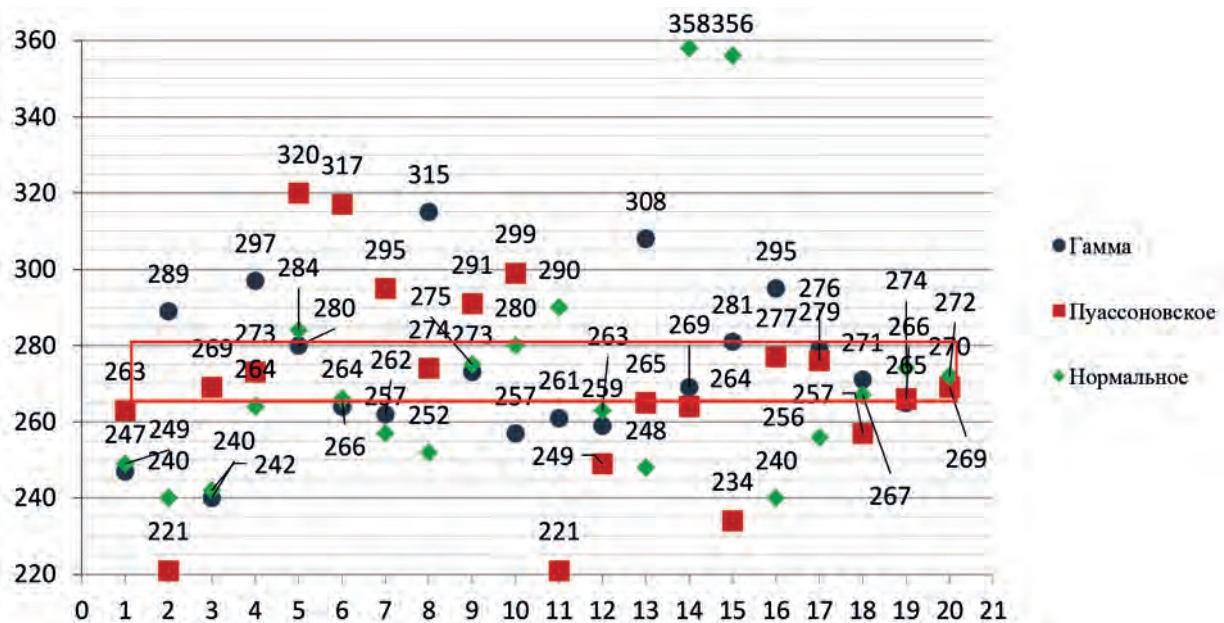


Рис. 6. Экспериментальные результаты моделирования судоходов круизных и паромных судов при использовании различных распределений

На рис. 7 приведены результаты итогового оптимизационного эксперимента для определения на основе выбора закона распределения наилучшего количества круизных судов различной длины, которые может обработать морской пассажирский порт.

Доверительный интервал, представленный на рис. 6, составляет от 265 до 282 судов в год. При этом необходимо отметить, что в ходе моделирования интенсивностей в порту не создавалось очереди.



Поиск максимально возможного входного потока

	Текущее	Лучшее
Итерация:	504	247
Обслужено судов:	668	536.9
<b>Параметры</b>		Copy best
<b>Интенсивность</b>	676	536
Длина очереди	1	1
Тип распределения	1	1

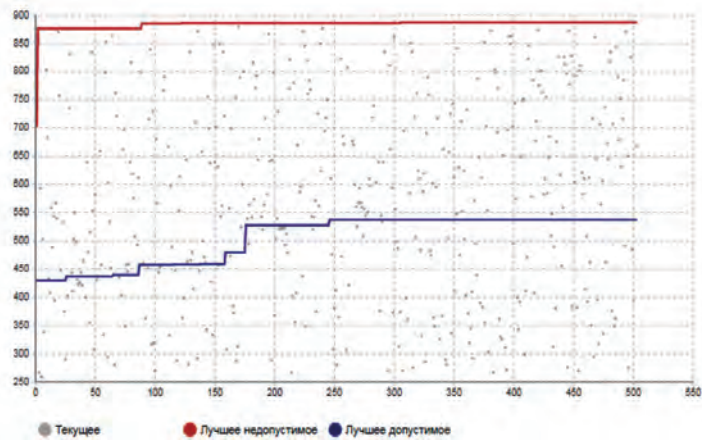


Рис. 7. Результат оптимизационного эксперимента в среде AnyLogic

Ранее изложенное позволяет сделать вывод о том, что входной поток судов может колебаться в пределах от 247–287 судов в год, которые рассматриваемый порт может принимать без сбоев в работе. Представленные результаты позволяют перейти к принятию решений по модернизации инфраструктуры при неопределенности.

**Обсуждение (Discussion)**

В выполненном исследовании рассмотрен подход, в основе которого находится учет вероятностных процессов прибытий круизных судов в морской пассажирский порт. Выполнен анализ приоритетов причалов с учетом технологий обслуживания и размеров круизных судов. Несмотря на существующее расписание движения круизных и паромных судов в начале навигации представлен подход, отличающийся от детерминированных моделей, позволяющий получить различный набор состояний морского пассажирского порта.

Согласно теории принятия решений, при неопределенности [13] набор полученных значений интенсивности (см. рис. 6) можно использовать в данном случае на основе таких критериев, как критерий Гурвица, Лапласа и др., формируя тем самым переход на стратегический уровень. Необходимо отметить, что особенностью представленных моделей является то, что в их основе заложены вероятностные законы, используется принцип приоритетности причалов, а также рассматриваются различные размеры круизных и паромных судов.

Ввиду тенденции к увеличению круизных и паромных судов в отношении пассажирских портов и терминалов в ближайшем будущем может возникнуть вопрос увеличения длины причалов, так как в противном случае придется либо согласовать такого рода изменения с компанией-перевозчиком в расписании, либо в крайнем случае исключать возможность судозахода. Несмотря на маловероятность такого сценария, он может произойти в случае интенсивности и увеличения габаритов судов.

При строительстве нового морского пассажирского порта необходимо использовать предлагаемые вероятностные модели, так как это поможет скорректировать базовые параметры загрузки причалов, которые вносятся на этапе проектирования. Помимо этого круизные и паромные компании стремятся разрабатывать новые маршруты для привлечения туристов и максимизации прибыли. Создание нового маршрута может изменить положение морских пассажирских портов в регионе относительно других. Тем самым произойдет смена лидеров в регионе, что вызовет необходимость модернизации и наращивания инфраструктуры.

Рассмотренная модель прошла апробацию с использованием данных интенсивности за прошедшие периоды навигации. Результаты моделирования подтвердили правильность работы

имитационной модели как с учетом детерминированного процесса, так и при вероятностных заходах круизных или паромных судов.

### Результаты (Results)

Разработанная модель позволяет проверить любой график прибытия судов и вероятности внепланового прибытия круизных судов в соответствии с теоретическими распределениями. В процессе реализации модели были использованы следующие варианты моделирования:

1-й вариант — моделирование работы морского пассажирского порта на основе известного расписания прибытия круизных и паромных судов за прошедшие периоды (за основу были взяты данные открытых расписаний работы морского пассажирского порта).

2-й вариант — моделирование различных вариантов интенсивности прибытия круизных и паромных судов в порт — в данном случае использовались нормальный, экспоненциальный законы распределения и было предложено использовать гамма-распределение.

Результаты модели включают интенсивность потока круизных и паромных судов, распределение времени стоянки судов у причалов, а также распределение судов к определенному причалу. На основе моделирования определяются коэффициенты загрузки всего порта и отдельно выбранного причала. В модели учитывается, что круизные суда различаются по размеру, при этом созданы условия, при которых разрешается швартовка судна у определенного причала в зависимости от его длины. Использование различных стохастических процессов позволяет получить большее количество данных для формирования решений по развитию инфраструктуры порта с учетом принятия решений при неопределенности. Дополнительно на основе имитационной модели можно оценить потери порта из-за простоя, вызванного отменой круизного или паромного судна.

Полученные данные являются полными, так как позволяют исследовать любой сценарий, требующий модернизации инфраструктуры. Разработанная модель в программе Anylogic также может быть использована для верификации выбранной стратегии развития морского пассажирского порта и принятия решения о модернизации инфраструктуры. Представленную модель необходимо использовать вместе с детерминированными, так как в данном случае с учетом вероятностных процессов повышается точность принятия решений.

### Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнена аналитическая оценка изменений в сфере морских паромных перевозок применительно к региону Балтийского моря и обоснована тенденция постепенного восстановления интенсивностей работы.

2. Выполнен анализ пассажиропотока через морские пассажирские порты и терминалы региона Балтийского моря и определена ситуация, когда для привлечения пассажиропотока будут созданы новые круизные или паромные маршруты.

3. Ввиду тенденции к увеличению размеров круизных и паромных судов с учетом выделения отдельных причалов для них рассмотрена задача моделирования загруженности причалов на основе вероятностных законов с учетом приоритетов.

4. Создана цифровая имитационная модель морского пассажирского порта, правильность работы которой подтверждена серией экспериментов на основе имеющихся расписаний судовых заходов.

5. При помощи моделирования определены числовые значения количества круизных и паромных судов за навигацию с учетом приоритета причалов и использования различных законов распределения.

6. На базе выполненной модели сформирован оптимизационный эксперимент в среде Anylogic, позволяющий повысить точность моделирования на основе вероятностных законов.

7. На основе выполненных экспериментов можно определить, что вероятности состояний морского пассажирского порта близки к экспериментальным значениям загрузки. Наибольшая интенсивность круизных и паромных судов была достигнута при использовании гамма-распределения.

8. Сформированные данные по интенсивностям судозаходов позволяют повысить точность принятия решений в вопросах модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта в зависимости от внешних факторов, к которым относятся стратегия изменения порта в регионе моря, в маршрутных сетях паромных и круизных линий, а также изменения, вызванные влиянием внешней среды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 01.02.2022).
2. Ćorluka G. Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective / G. Ćorluka, 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.
3. Krile S. Work analysis of maritime passenger terminals for particular region based on circos plot / S. Krile, N. N. Maiorov // NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo. — 2019. — Vol. 66. — Is. 2. — Pp. 57–61. DOI: 10.17818/NM/2019/2.2.
4. Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.portspb.ru/O\\_porte/about](https://www.portspb.ru/O_porte/about) (дата обращения 20.01.2022).
5. 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.
6. 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.
7. AnyLogic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.anylogic.com> (дата обращения: 20.01.2022).
8. 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.
9. Yan S. Optimal scheduling models for ferry companies under alliances / S. Yan, C. H. Chen, H. Y. Chen, T. C. Lou // Journal of Marine Science and Technology. — 2007. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 8. DOI: 10.51400/2709-6998.2033.
10. Chen M. J. Itinerary planning: Modeling cruise lines' length of stay in ports / M. J. Chen, P. Nijkamp // International Journal of Hospitality Management. — 2018. — Vol. 73. — Pp. 55–63. DOI: 10.1016/j.ijhm.2018.02.005.
11. Воевудский Е. Н. Стохастические модели в проектировании и управлении деятельностью портов / Е. Н. Воевудский, М. Я. Постан. — М.: Транспорт, 1987. — 318 с.
12. Dragovic B. Simulation Modelling of Ship-Berth Link with Priority Service / B. Dragovic, N. K. Park, Z. Radmilović, V. Maraš // Maritime Economics & Logistics. — 2005. — Vol. 7. — Is. 4. — Pp. 316–335. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100141.
13. Бродецкий Г. Л. Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности / Г. Л. Бродецкий. — М.: Academia, 2010. — 336 с.

### REFERENCES

1. Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry. Web. 1 Feb. 2022 <<https://cruisemarketwatch.com/growth/>>.
2. 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.
3. Krile, Srećko, and N. N. Maiorov. “Work analysis of maritime passenger terminals for particular region based on circos plot.” *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo* 66.2 (2019): 57–61. DOI: 10.17818/NM/2019/2.2.

4. Passenger Port of Saint Petersburg. Web. 20 Jan. 2022 <[https://www.portspb.ru/en/about/info\\_about\\_port](https://www.portspb.ru/en/about/info_about_port)>.
5. 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.
6. 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.
7. Anylogic. Web. 20 Jan. 2022 <<https://www.anylogic.com>>.
8. 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.
9. Yan, Shangyao, Chia-Hung Chen, Hsin-Yen Chen, and Tze-Chiang Lou. "Optimal scheduling models for ferry companies under alliances." *Journal of Marine Science and Technology* 15.1 (2007): 8. DOI: 10.51400/2709-6998.2033.
10. Chen, Jamie M., and Peter Nijkamp. "Itinerary planning: Modeling cruise lines' length of stay in ports." *International Journal of Hospitality Management* 73 (2018): 55–63. DOI: 10.1016/j.ijhm.2018.02.005.
11. Voevodskii, E. N., and M. Ya. Postan. *Stokhasticheskie modeli v proektirovanii i upravlenii deyatel'nost'yu portov*. M.: Transport, 1987.
12. Dragović, Branislav, Nam Kyu Park, Zoran Radmilović, and Vladislav Maraš. "Simulation modelling of ship-berth link with priority service." *Maritime Economics & Logistics* 7.4 (2005): 316–335. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100141.
13. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybor v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010.

#### 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: [FetI@aanet.ru](mailto:FetI@aanet.ru)

**Добровольская 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](mailto: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, 90000,  
Russian Federation  
e-mail: [nmsoft@yandex.ru](mailto: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, 90000,  
Russian Federation  
email: [FetI@aanet.ru](mailto:FetI@aanet.ru)

**Dobrovolskaia, 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](mailto:angd999@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 18 марта 2022 г.  
Received: March 18, 2022.