

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909

**RESEARCH OF DATA GENERATION OPTIONS BASED ON MULTI-SCENARIO
MODELLING FOR DECISION-MAKING UNDER UNCERTAINTY
IN THE DEVELOPMENT OF MARITIME PASSENGER TERMINAL****N. N. Maiorov, M. R. Yazvenko**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

The topic of the paper is the study of decision-making options under uncertainty, as well as in practical situations of working with limited data in conditions of stochastic, variable influence of the external environment in the sphere of maritime passenger transportation. Attention is drawn to the fact that in this case, making a decision on modernization only on the basis of the experience of the port manager or some industry experience, on the one hand, is quite limited in the choice of alternatives, and on the other hand, may lead to incorrect decisions in the field of development forecasting, formation of measures to change the position of the marine passenger port in the sea region in relation to other terminals and evaluation of the target function of the port. It is noted that one of the tools for data collection is continuous monitoring of changes in route ferry and cruise networks and analyzing changes in the infrastructure of other passenger ports in the region. For completeness of data it is proposed to use multi-scenario modeling in the digital twin of the sea passenger port developed in AnyLogic environment, as well as to perform optimization experiments to obtain a set of values for the number of cruise and ferry vessels for the upcoming navigation. It is noted that the use of a simulation model makes it possible to include such an influence of the external environment as the trend of increasing size of cruise and ferry ships, which forms new infrastructure requirements for the creation of new or modernization of existing berths. In this case, the introduction of prioritization in the model of the incoming flow of ships is reasonably proposed. The object of the study is the incoming flow of cruise and ferry ships with prioritization in the queue. A comparative analysis of applicability of different mathematical distributions of mass service systems for incoming ship flows into the sea passenger port system with prioritization is presented. The developed simulation model is based on the available real data on the passenger port infrastructure of marine "Passenger Port of St. Petersburg 'Sea Facade' and ship calls for the past years. A multi-scenario random input flow of cruise and ferry ships with several priority characteristics is considered. As a result of modeling a set of data is formed, which for the port manager is a necessary field of utility and a basis for the use of decision-making models under uncertainty. As a result of multi-scenario simulation, the obtained throughput simulation data under different flow distributions were analyzed. Based on the performed experiments, the efficiency of using the beta distribution was determined. Based on the simulation results, the applicability boundaries for each distribution were determined and a confidence interval of maximum intensity was obtained, which can be used as a reference for making decisions on port infrastructure modernization. The methodology of data formation on the basis of multiscenario modeling allows to form the necessary set of data taking into account the influence of the external environment for decision-making on the model of marine passenger terminal development. The presented methodology can be extended to the study of systems: "sea ferry / cruise lines — sea passenger port — land infrastructure".

Keywords: discrete event modeling, priority queue, multi-priority queue, throughput, seaports, queuing system.

For citation:

Maiorov, Nikolai N. and M. R. Yazvenko "Research of data generation options based on multi-scenario modelling for decision-making under uncertainty in the development of maritime passenger terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 898–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909.

УДК 65.012.1, 656.072**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДАННЫХ
НА ОСНОВЕ МНОГОСЦЕНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПО РАЗВИТИЮ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТЕРМИНАЛА
ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ****Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко**ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование вариантов принятия решений при неопределенности, а также в практических ситуациях работы с ограниченными данными в условиях стохастического, изменчивого влияния внешней среды в сфере морских пассажирских перевозок. Обращается внимание на то, что в данном случае принятие решения по модернизации только на основе опыта руководителя порта или некоторого опыта отрасли, с одной стороны, достаточно ограничено в выборе альтернатив, а с другой — может привести к неправильным решениям в области прогнозирования развития, формированию мер, направленных на изменение положения морского пассажирского порта в регионе моря по отношению к другим терминалам и оценке целевой функции порта. Отмечается, что одним из инструментов сбора данных является непрерывный мониторинг изменений в маршрутных паромных и круизных сетях и анализ изменений инфраструктуры других пассажирских портов в регионе. Для полноты данных предлагается использование многосценарного моделирования в цифровом двойнике морского пассажирского порта, разработанного в среде AnyLogic, а также выполнение оптимизационных экспериментов, позволяющих получить набор значений по количеству круизных и паромных судов на предстоящую навигацию. Отмечается, что использование имитационной модели дает возможность включить такое влияние внешней среды, как тенденция к увеличению размеров круизных и паромных судов, тем самым формируя современные инфраструктурные требования к созданию новых или модернизации существующих причалов. В данной случае обоснованно предлагается введение приоритетности в модели входящего потока судов. Объектом исследования выступает входящий поток круизных и паромных судов с выделением приоритетности в очереди. Представлен сравнительный анализ применимости различных математических распределений систем массового обслуживания для входных потоков судов в систему морского пассажирского порта с приоритетами. Разработанная имитационная модель выполнена на основе имеющихся реальных данных по инфраструктуре пассажирского порта АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» и судозаходам за прошедшие годы. Рассмотрен многосценарный случайный входной поток круизных и паромных судов, имеющий несколько приоритетных характеристик. В результате моделирования формируется набор данных, который для руководителя порта является необходимым полем полезности и основой для использования моделей принятия решений при неопределенности. В результате многосценарного моделирования проведен анализ полученных данных моделирования пропускной способности при различных распределениях потока. На основе выполненных экспериментов определена эффективность использования бета-распределения. По результатам моделирования определены границы применимости по каждому распределению и получен доверительный интервал максимальной интенсивности, на который можно ориентироваться при принятии решений по модернизации инфраструктуры порта. Методика формирования данных на основе многосценарного моделирования позволяет сформировать необходимый набор данных с учетом влияния внешней среды для принятия решений в отношении модели развития морского пассажирского терминала. Представленная методика может быть распространена на исследование систем: «морская паромная / круизная линии – морской пассажирский порт – наземная инфраструктура».

Ключевые слова: дискретно-событийное моделирование, очередь с приоритетами, многоприоритетная очередь, пропускная способность, морские порты, система массового обслуживания.

Для цитирования:

Майоров Н. Н. Исследование вариантов формирования данных на основе многосценарного моделирования по развитию морского пассажирского терминала для принятия решений при неопределенности / Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 898–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909.

Введение (Introduction)

Современный морской пассажирский порт находится под постоянным воздействием многих факторов и условий, формирующих новые требования по его операционной работе и прогнозированию развития. С позиций системного анализа морской пассажирский терминал можно рассматривать как сложную техническую систему, выполнять аналитические исследования, но результатом будет определенное состояние или конечный набор состояний, которые могут измениться под воздействием внешней среды или возникновения конкуренции между терминалами в регионе моря. Перед руководителем морского пассажирского порта появляется новая задача сбора данных по входящему потоку, выполнения непрерывного мониторинга с фиксацией изменений в маршрутных сетях, а также исследования влияния трендов отрасли и конкурентной среды за пассажиропотоки между терминала в регионе моря. Таким образом, задачей руководителя морского пассажирского порта является не просто сбор данных, которые в свою очередь могут быть разнород-

ными, но и поиск программных средств и путей исследования взаимодействия систем «морская паромная / круизная линии — морской пассажирский порт» [1]–[3]. При этом необходимо обратить внимание на то, что часть собранных данных может быть необходима для анализа текущего положения морского пассажирского порта, что сокращает выборку прогнозных сценариев. Однако для решения задачи прогнозирования развития необходимо иметь набор данных многосценарного моделирования, который позволит представить различные сценарии работы морского пассажирского порта и применять аппарат принятия решений при неопределенности [4].

Для формирования набора данных предлагается использовать многосценарное моделирование, основанное на аппарате систем массового обслуживания. Классическое описание систем массового обслуживания базируется на процессах обслуживания, в которых заявки, поступающие на обслуживание, принадлежат одному классу [5]. В реальных транспортных системах массового обслуживания существует особенность, которая значительно увеличивает требуемые объемы вычислений и усложняет прогнозирование их работы. В данных системах наблюдается как неоднородность входного потока судов, так и неоднородность каналов обслуживания системы. Не все поступающие заявки могут быть обслужены во всех частях системы из-за несовместимости характеристик каналов и заявок. Если строго разделять типы заявок и типы каналов, то может возникнуть две ситуации:

- каналы будут простаивать при отсутствии достаточной интенсивности;
- очередь каналов будет перегружена при высокой интенсивности, поскольку строгое разделение не позволит заявкам отправиться в другую часть системы.

В связи с этим необходимо создать алгоритм, способный распределить поступающие заявки в системе наиболее выгодным способом с учетом их характеристик. Примером такой системы может служить морской пассажирский порт, принимающий круизные лайнеры различных размеров и классов, а также имеющий специализированные причалы для обслуживания судов типа *ро-ро*. Поступающие суда различаются своими характеристиками и необходимым обслуживанием. Они имеют различную осадку, длину и ширину, ограничивающие список возможных причалов, к которым можно направить данное судно. В силу топографических и экономических особенностей причалы могут иметь определенную длину печального фронта, ограничивающую максимальную длину судна, которое можно принять на данном причале. Также пассажирские суда могут быть различных подвидов и иметь особенности, как, например, судно *ро-ро*, для которого необходим отдельный причал для выгрузки автомобилей. Усложнение системы с неоднородностью и многоприоритетностью, по сравнению с простыми системами, значительно увеличивает количество возможных состояний, что существенно усложняет аналитическое прогнозирование изменений инфраструктуры системы или входного потока.

АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» — специализированный пассажирский порт, расположенный в Санкт-Петербурге на намывных территориях Васильевского острова. Комплекс порта [6] включает семь причалов для приема океанских лайнеров, три круизных и один специализированный круизно-паромный терминал¹. Порт принимает суда на основании расписания, которое составляется на год, а также может принять суда, прибывающие вне расписания, если это не противоречит расписанию, расположенному в общем доступе на его официальном сайте. Анализ расписания движения судов порта за 2019 г. показал, что в нем было обслужено в среднем не более 265 судов за год, а прибытия судов имели сезонность с пиковой интенсивностью в июле, когда порт принял 68 судов.

С позиций систем массового обслуживания морской пассажирский порт может быть представлен как система массового обслуживания с семью каналами. С теоретической точки зрения на заходы круизных и паромных судов могут оказывать влияние различные факторы. В ряде случаев может быть рассмотрена ситуация появления в потоке нового (внепланового) судна, которое требует отдельного причала. Таким образом, возможны ситуации, когда может появиться как отказ

¹ Правила приема и обслуживания судов Открытым акционерным обществом «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». СПб., 2009. 13 с.

в обслуживании, так и появление нового судна вне расписания. Для прогнозирования работы порта необходимо точно понимать максимально возможное количество круизных или паромных судов, которое может принять порт. Данные ситуации определяют необходимость выполнения многосценарного моделирования и чем лучше будут описаны различные варианты интенсивности потоков и распределения по причалам, тем точнее можно будет определить допустимые интервалы в поле полезности. Дополнительно появляется возможность определить наилучшие и наихудшие ситуации (утопические и антиутопические точки), которые могут определять граничные значения областей выбора принятия решений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Полнота наличия сценарных данных дает возможность оценить возможные критические точки (экстремума), где под воздействием внешней среды будет формироваться некоторое отклонение, что не позволит достигнуть целевых показателей. На рис. 1 приведена сборочная модель развития морского пассажирского порта и определения его системы управления с учетом внешних и внутренних процессов, влияния внешней среды и трендов, а также уровней, которые будут отражать его положение в регионе моря.

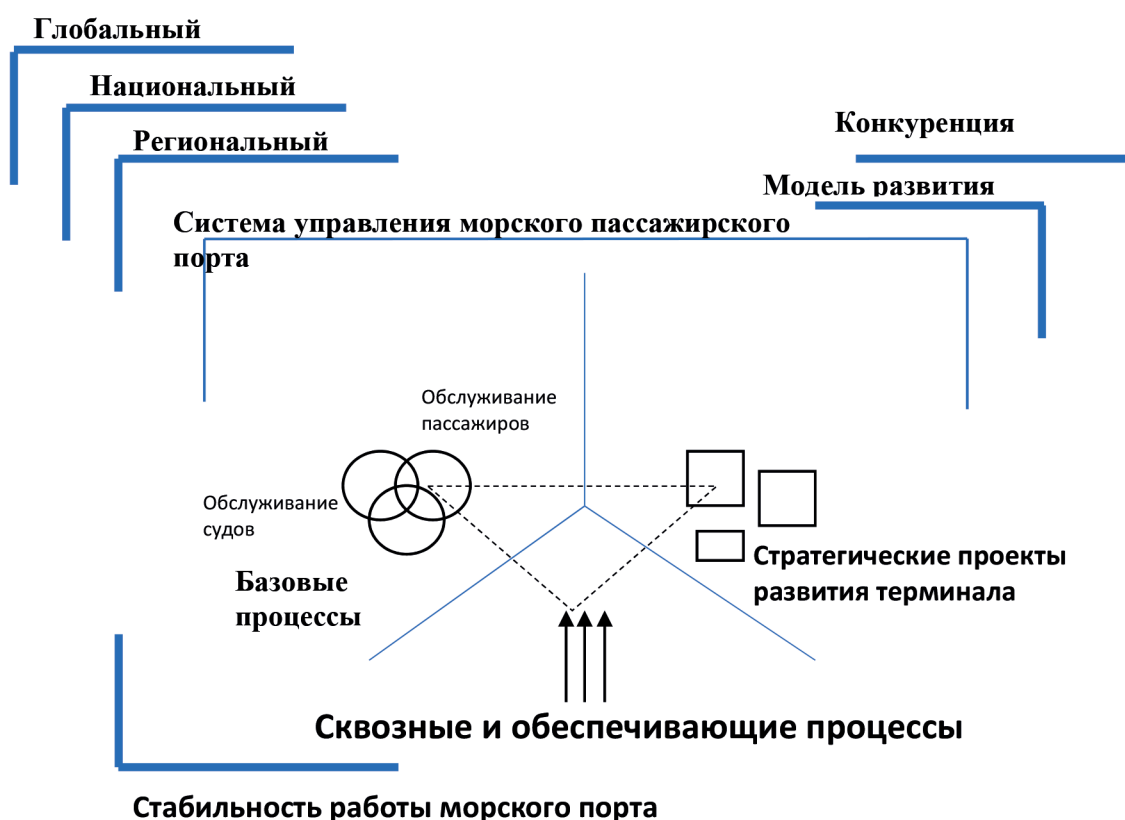


Рис. 1. Комплексная модель развития морского пассажирского порта с учетом внешних и внутренних процессов

Согласно модели, приведенной на рис. 1, принятие решения по изменению положения морского пассажирского порта в регионе моря требует улучшения базовых процессов по обслуживанию как пассажиров, так и круизных и паромных судов, а также запуска стратегических новых инфраструктурных изменений, позволяющих выйти на новый уровень работы и обеспечивающих лидерские позиции, например, в регионе моря в сфере пассажирских перевозок. Выбор одного варианта развития порта не может означать 100 %-е достижение поставленных целей, так как невозможно достигнуть идеальных условий. Поэтому необходим переход к моделям принятия решений при неопределенности.

Для выполнения многосценарного моделирования был выбран аппарат систем массового обслуживания и различные виды распределений. На основе анализа работ [7]–[10] и представленных результатов работы цифровой модели морского пассажирского порта определяется набор состояний по интенсивностям, формирующим поля полезности. Объектом выступает входной поток, интенсивности круизных и паромных судов. На практике для описания входных потоков, как правило, используют пуассоновское распределение, как показано в работах [8], [11]. Однако для выполнения многосценарного моделирования необходимо включать рассмотрение также и других распределений. Рассмотрим применимость еще четырех дополнительных математических распределений, используемых для описания случайных процессов: гамма, нормального, треугольного и бета-распределений [12], [13].

Выбранные математические модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Выбранные модели распределения для моделирования
и получения экспериментальных данных по интенсивностям**

Пуассоновское распределение	$F(t) = e^{-\lambda} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda^i}{i!}, t \geq 0,$ $\lambda — \text{среднее число заявок простейшего потока, которые поступают в систему в единицу времени};$ $P_k(t) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, k \in \{0, 1, \dots\}$
Нормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$ где μ — математическое ожидание; σ — дисперсия
Гамма-распределение	$f(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{r-1} e^{-\lambda t}}{\Gamma(r)},$ где $t \geq 0$ — интервал между судозаходами; λ — интенсивность входящего потока; r — порядок распределения ($r > 0$); $\Gamma(r)$ — гамма-функция
Треугольное распределение	$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & x \in [a, c]; \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)}, & x \in [c, b]; \\ 0, & x \notin [a, b] \end{cases}$
Бета-распределение	$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$ где $\alpha, \beta > 0$ — произвольные параметры; $B(\alpha, \beta)$ — бета-функция.

Разработанная имитационная модель морского пассажирского порта (цифровой двойник)² выполнена в среде AnyLogic [14] и выделение задачи приоритетности представлено в работе [3]. Поступающие на обслуживание заявки (суда) можно сортировать по приоритету. Приоритет — число, которое является показателем важности этой заявки. Выбор этого показателя остается за лицом, принимающим решения (далее — ЛПР). На усмотрение ЛПР можно задавать любой другой параметр: время обслуживания или штрафы за простой.

В классических описаниях очередей с приоритетами рассматриваются системы, в которых только заявки являются неоднородными. В рассматриваемой системе морского пассажирского

² AnyLogic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru> // (дата обращения: 01.11.2024).

порта имеется неоднородность потока и каналов обслуживания. В модели используется алгоритм организации многоприоритетной очереди, представленный в работах [15], [16].

Для выполнения исследования рассмотрим максимальную пропускную способность системы морского пассажирского порта при применении схемы обслуживания с приоритетами. Это будет проводиться с помощью оптимизационных экспериментов в AnyLogic, созданные в разработанной цифровой модели морского пассажирского порта. Максимизируем количество успешно прошедших через систему судов. В качестве ограничений установим следующие теоретические условия. Допустим, что системе порта для недопущения крупных экономических издержек необходимо поддерживать следующие характеристики очереди: не должно возникать ситуаций, когда судно ожидает очереди дольше 24 ч; среднее время ожидания для судов не должно превышать двух часов (0,09 сут).

В результате работы и выбора различных законов распределения будет в каждом случае определяться наилучший набор значений интенсивностей судозаходов и данных по загруженности причалов за месяц навигации. Объединением полученных значений на едином графике функций формируется построение «поля полезности», к которому можно применять анализ на основе моделей принятия решений при неопределенности. На основе выполненного анализа по критериям Гурвица, Лапласа и др., а также определения линий уровня, утопических и антиутопических точек формируются целевые значения, которые руководитель морского пассажирского порта должен выбрать как стратегическую цель, которую необходимо достигнуть по изменению положения порта в регионе моря.

Результаты (Results)

На основе выполнения многосценарного моделирования различных интенсивностей круизных и паромных судов представим выборку наиболее характерных двадцати результатов экспериментов. Основными параметрами исследования будет количество прошедших через порт круизных и паромных судов и интенсивность потока, которая была задана перед началом моделирования. Полученные результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты опытных многосценарных экспериментов
в среде Anylogic для морского пассажирского порта**

№ п/п.	Пуассоновское распределение		Гамма-распреде- ление		Нормальное распределение		Треугольное распределение		Бета-распреде- ление	
	Обслу- живание	Интервал	Обслу- живание	Интервал	Обслу- живание	Интервал	Обслу- живание	Интервал	Обслу- живание	Интервал
1	92	86	95	87	89	86	91	83	95	100
2	94	91	95	113	90	82	93	94	95	115
3	94	102	96	115	92	89	94	103	95	114
4	98	96	97	110	93	95	94	128	96	103
5	98	90	97	89	94	86	94	107	98	97
6	99	133	98	97	94	92	95	95	99	101
7	99	109	98	96	96	86	97	103	100	97
8	99	121	100	125	98	102	98	98	100	110
9	101	88	101	106	101	87	98	91	100	96
10	102	94	101	85	102	123	98	122	101	94
11	102	103	101	123	102	100	99	122	101	93
12	103	107	101	124	104	107	99	125	102	91
13	103	92	102	124	104	112	100	112	102	96
14	104	105	102	109	104	127	101	118	103	93
15	105	123	103	109	105	92	103	96	104	114
16	106	106	103	148	106	119	105	100	107	136
17	107	116	104	86	109	120	107	106	108	127
18	107	111	105	106	111	121	107	124	108	125
19	109	113	105	108	111	112	108	98	109	106
20	110	122	113	128	115	114	112	106	116	103

Результаты оценки доверительного интервала приведены в табл. 3. Использование имитационной модели морского порта позволяет динамично менять параметры модели и вносить дополнения на основе влияния внешней среды, а также оперативно вносить изменения во входной поток.

Таблица 3

Оценка экспериментального доверительного интервала

Интервал	Пуассоновское распределение		Гамма-распределение		Нормальное распределение		Треугольное распределение		Бета-распределение	
	Обслуживание	Интервал	Обслуживание	Интервал	Обслуживание	Интервал	Обслуживание	Интервал	Обслуживание	Интервал
Среднее значение	101,60	105,40	100,85	109,40	101,00	102,60	99,65	106,55	101,95	105,55
Стандартное отклонение	5,02	13,27	4,25	16,47	7,51	14,90	5,73	12,89	5,47	12,71
Доверительный интервал	2,20	5,82	1,86	7,22	3,29	6,53	2,51	5,65	2,40	5,57
От	99,40	99,58	98,99	102,18	97,71	96,07	97,14	100,90	99,55	99,98
До	103,80	111,22	102,71	116,62	104,29	109,13	102,16	112,20	104,35	111,12

Определить границы применимости можно при помощи доверительного интервала, позволяющего выявить наиболее вероятный результат применения каждого из типов распределений входного потока и избавиться от существенно выделяющихся результатов, которые содержат значительные отклонения. Для определения доверительного интервала рассчитывается среднее значение и стандартное отклонение результатов экспериментов. Уровень доверия интервала выбирается равным 95 %. Результаты расчетов приведены в табл. 2. На рис. 2 и 3 приведены результаты экспериментов в виде графиков с выделением полученных доверительных интервалов (полей полезности) при различных распределениях.

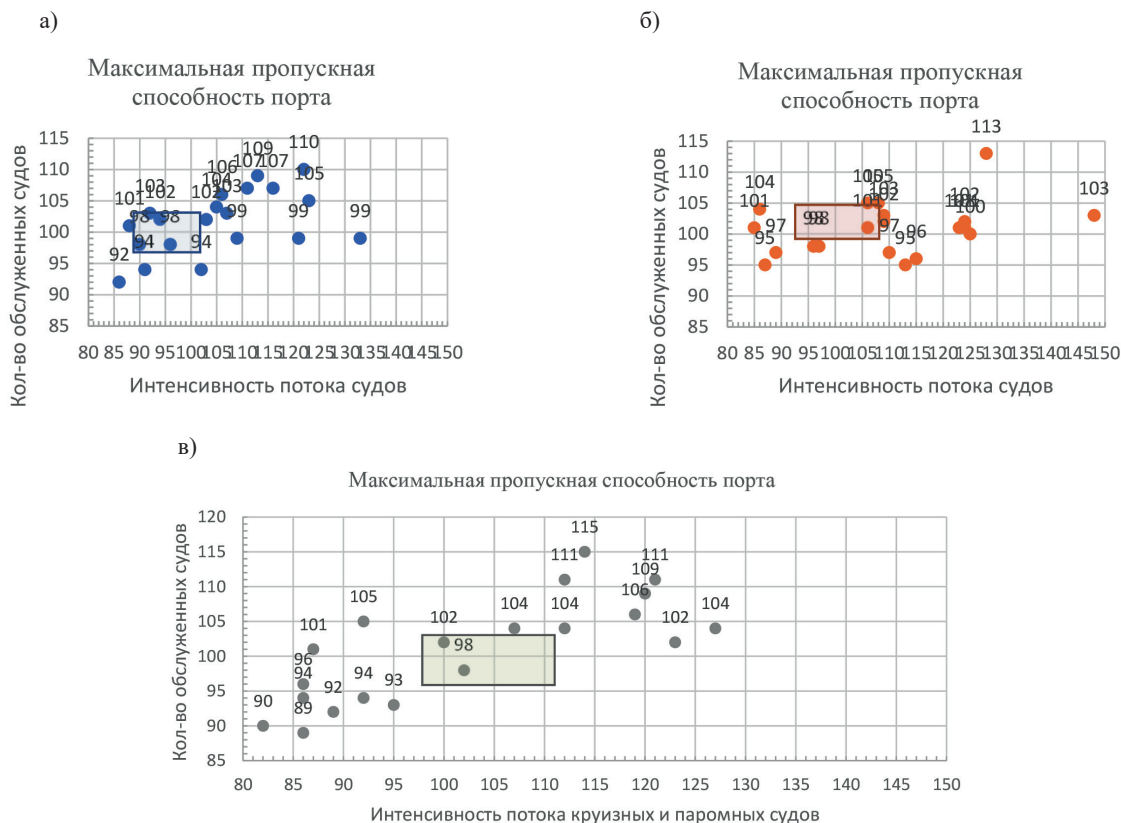
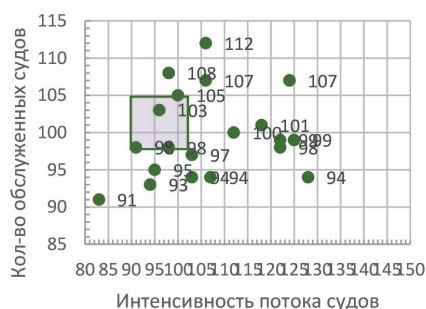


Рис. 2. Максимальная пропускная способность морского пассажирского порта по каждому из распределений: а — Пуассоновское распределение; б — гамма распределение; в — нормальное распределение

а)

Максимальная пропускная
способность порта



б)

Максимальная пропускная
способность порта

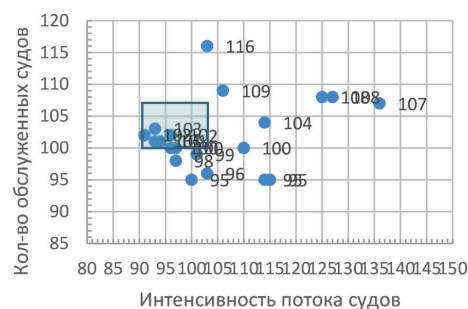


Рис. 3. Максимальная пропускная способность порта
по каждому из распределений:

а — треугольное распределение; б — бета- распределение

На основе выполненного анализа доверительных интервалов лицом, принимающим решение, формируется набор полей полезности, выполняется объединение результатов на едином сборочном графике для получения пересечения, определяющее интенсивности, при которых морской пассажирский порт будет работать стабильно. Однако при выборе стратегии развития порта лицо, принимающее решение, выбирает набор наилучших значений и выполняет последующий анализ набора показателей достижимости входной интенсивности, для ситуации раскрывает типы судов, которые определяли входной поток и определяет параметры характеристики загруженности причалов. Следящим этапом выполняется анализ возможностей и соответствия инфраструктуры порта по приему данного количества круизных и паромных судов, определения задачи по модернизации существующих или строительства новых.

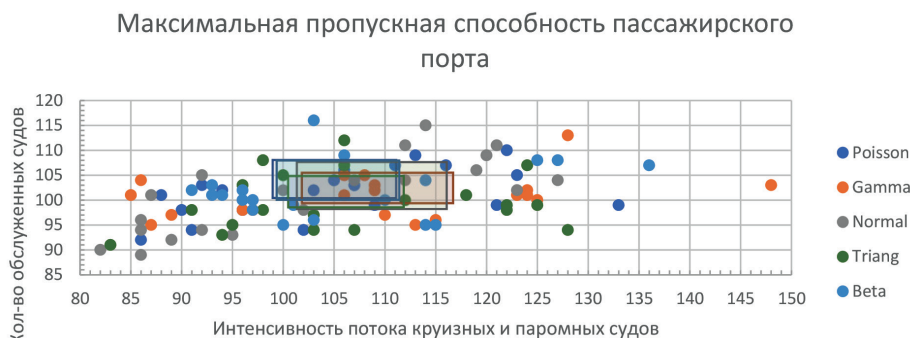
Обсуждение (Discussion)

Наименьшее отклонение количества фактически прошедших через порт круизных и паромных судов показало применение гамма-распределения, за ним Пуассоновское, достаточно близки треугольное и бета-распределения, а отклонение результатов при применении нормального почти в 1,5 раза выше, чем при применении гамма-распределения. При рассмотрении отклонения интенсивности потока формируется совершенно другая картина. Гамма-распределение показывает наибольшее отклонение, в то время как наименьшее — бета-распределение.

Средние значения при применении выбранных распределений достаточно близки и в среднем составляют 101,01 судов в месяц. Как показывают дополнительные вычисления, средняя разница между прошедшим количеством судов и предварительно ожидаемой интенсивностью — 4,57 %. Разница вызвана отсутствием учета уже пришедших, но необслуженных судов, а также некоторым фактором случайности потока.

При рассмотрении области, ограниченной как интенсивностью, так и количеством обслуженных судов, можно заметить, что число попавших результатов в эти области по каждому виду распределений невелико. Больше всего у нормального — 3, что также вызвано случайностью прибытий и учетом только обслуженных. Однако, если рассмотреть зоны рис. 1 только по количеству обслуженных судов, то картина изменится. Попаданий результатов в данный интервал Пуассоновского — 6; гамма-нормального — 7; треугольного — 8 и бета-распределения — 10. Бета-распределение показало наибольшее количество результатов несмотря на третье из наименьших отклонений результатов. Важно отметить, что бета-распределение показало наибольшее среднее число обслуженных судов из всех распределений, что может свидетельствовать о достаточно равномерном прибытии судов в порт, наиболее приближенным к заранее просчитанному расписанию. Все распределения показали хорошую точность, а наиболее удачными показали себя классическое Пуассоновское распределение и бета-распределение.

Для оценки необходимости принятия решений в условиях неопределенности необходимо с достаточной точностью знать возможные колебания входного потока. Наибольшую точность даст объединение доверительных интервалов всех распределений. Таким образом, на выходе получается доверительный интервал, удовлетворяющий всем распределениям. Данный интервал и будет являться наиболее вероятным прогнозом возможного количества поступающих в порт судов. По полученным данным составим совмещенный график, на котором будет выделен доверительный интервал интенсивности входного потока по всем распределениям (рис. 3).



На рис. 3 представлены различные поля полезности. Итоговый интервал выделен на рис. 3 пересечением интервалов всех распределений и лежит в пределах от 99 до 102 судов в месяц при интенсивности от 102 до 109 судов в месяц. Это позволяет сделать для лица, принимающего решение, вывод о том, что входной поток судов может колебаться в пределах 102–109 судов в месяц за навигацию, которые рассматриваемый порт может принимать без серьезных сбоев в работе. Значения интенсивностей, находящиеся за пределами выбранных интервалов, вызывают необходимость использования оптимизационных моделей в расписании судозаходов или при еще большем количестве определяет необходимость специализации причалов.

Согласно моделям принятия решений при неопределенности, каждое состояние на рис. 3 при выборе необходимых целевых установок может преобразовываться в стратегическую цель, которая требует модернизации инфраструктуры. Для лица, принимающего решение, открывается возможность рассматривать как итоговое объединение полей полезности, так и работать с результатами по отдельности. На основе своих целевых установок и моделей развития порта интервалы могут быть как расширены, так и изменены. На основе полученных результатов руководитель морского пассажирского порта может определить дополнительно возможную «утопическую» и «антиутопические точки» (наилучшие и наихудшие сценарии, необходимые для определения значения работы порта).

Заключение (Conclusion)

Представленная в статье модель формирования данных на основе многосценарного моделирования как на основе реальных данных, так и прогнозных, в цифровом двойнике морского пассажирского порта в среде Anylogic позволяет обеспечить достаточность данных для комплексного принятия решений при неопределенности по прогнозированию развития и определению положения порта в регионе. На основе анализа результатов рис. 3 можно сделать следующие выводы:

1. Сформирована комплексная модель развития морского пассажирского порта с учетом внешних и внутренних процессов, граничных и рамочных условий позиционирования в регионе моря, позволяющая определить основные стратегические цели морского пассажирского порта в регионе;
2. Доказана ограниченность использования аналитических моделей для исследования различных сценариев интенсивностей судозаходов и распределения по причалам морского пассажирского порта и необходимость получения данных на основе многосценарного моделирования;

3. На основе анализа результатов установлено, что бета-распределение может быть успешно использовано для моделирования случайного входного потока в системе массового обслуживания;
4. На основе полученных в ходе моделирования результатов был спрогнозирован новый интервал максимально возможного количества прибывающих судов в порт в течение месяца, при котором будут выполняться поставленные условия обслуживания.
5. Сформированные новые поля полезностей (см. рис. 3) позволяют оценивать различные варианты работы морского пассажирского порта и определять положение порта в регионе моря;
6. На основе полученных результатов подтверждено, что прогнозирование возможных колебаний судопотока, особенно в условиях современной обстановки в сфере морских пассажирских перевозок, позволяет снизить неопределенность и заранее подготовиться к принятию соответствующих управленческих решений по модернизации инфраструктуры;
7. Сформированные поля полезности позволяют определить наилучшие и наихудшие значения по пропускным способностям и количеству судов и выбрать возможные сценарии развития, а также сформировать области для оценки путей увеличения интенсивностей входящего потока судов.
8. Выполненное многосценарное моделирование и анализ полей полезности могут быть распространены при исследовании взаимодействия систем «морская паромная / круизная линии – морской пассажирский порт – наземная инфраструктура» с оценкой околотерминальной городской инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *London, W. R.* Power in the context of cruise destination stakeholder's interrelationships / W. R. London, G. Lohmann // Res. Transp. Bus. Manag. — 2014. — Vol. 13. — Pp. 24–35. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
3. *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 им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 197–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211. — EDN ANFAKG.
4. *Бродецкий Г. Л.* Системный анализ в логистике. Принятие решений в условиях неопределенности. / Г. Л. Бродецкий — М.: Academia, 2010. — 336 с.
5. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания / Пер. с англ. канд. техн. наук И. И. Грушко / Л. Клейнрок. — М.: Машиностроение, 1979. — 432 с.
6. Общая информация — Пассажирский порт Санкт-Петербург Морской фасад. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.portspb.ru/O_porte/about (дата обращения 10.11.2024).
7. *Язвенко М. Р.* Исследование загруженности 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.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *Майоров Н. Н.* Планирование работы морского пассажирского терминала на основе исследования интенсивностей заходов круизных судов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 3. — С. 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128. — EDN LMZQEO.

12. Tsamboulas D. How to forecast cruise ship arrivals for a new port-of-call destination / D. Tsamboulas, P. Moraiti, G. Koulopoulou // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. — 2013. — Is. 2330. — Pp. 24–30. DOI: 10.3141/2330-04.
13. Krile S. Efficient Heuristic for Non-linear Transportation Problem on the Route with Multiple Ports. / S. Krile // *Polish Maritime Research*. Gdansk. Poland. — 2013. — Vol. 20, No. 4. — Pp. 80–86. DOI: 10.2478/pomr-2013-0044.
14. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении / Д. Ю. Каталевский. — М.: Издательский дом «Дело»: РАНХиГС, 2015. — 496 с.
15. 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. — EDN PCABYR.
16. 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)*, St. Petersburg, Russian Federation. — 2024. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10564652.

REFERENCES

1. 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.
2. London, Wendy R., and Gui 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.
3. Majorov, N. N., V. A. Fetisov and A. A. Silina “Modelirovanie raboty morskogo passazhirskogo porta na osnove tsifrovoj transportnoj modeli s uchetom razlichnykh prioritetov kruiznykh i paromnykh sudov.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 197–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211.
4. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybor v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010.
5. Kleinrock, L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. M.: Mashinostroenie, 1979.
6. Obshchaya informatsiya — Passazhirskij port Sankt-Peterburg Morskoj fasad. Web. 10 Nov. 2024 <https://www.portspb.ru/O_porte/about>.
7. Yazvenko, M. R. “Issledovanie zagruzhennosti prichalov morskogo passazhirskogo porta na osnove modelirovaniya.” *Sistemnyj analiz i logistika* 2(28) (2021): 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.
8. Majorov, N. N. and V. A. Fetisov “Issledovanie operatsionnykh protsessov obsluzhivaniya passazhirov v morskoy m passazhirskom terminale s ispolzovaniem modelirovaniya.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80.
9. Krile, S., N. Maiorov, and V. 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.
10. Fernández-Gámez, M. A., Valcarce-Ruiz L., Becerra-Vicario R. and Diéguez-Soto J. “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.
11. Majorov, N. N. and V. A. Fetisov “Planirovanie raboty morskogo passazhirskogo terminala na osnove issledovaniya intensivnostej zakhodov kruiznykh sudov.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 3 (2019): 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128.
12. Tsamboulas, D., P. Moraiti, Koulopoulou G. “How to forecast cruise ship arrivals for a new port-of-call destination” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2330 (2013):24–30. DOI: 10.3141/2330-04.
13. Krile S. “Efficient Heuristic for Non-linear Transportation Problem on the Route with Multiple Ports”. *Polish Maritime Research*. Gdansk. Poland 20.4. (2013): 80–86. DOI: 10.2478/pomr-2013-0044.
14. Katalevsky, D. Yu. *Osnovy imitacionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii* M.: Izdatel'skij dom «Delo»: RANEPa, 2015.

15. Yazvenko, M. R. and A. G. Morozkov “Modelirovanie morskogo gruzovogo porta kak sistemy massovogo obsluzhivaniya v srede AnyLogic.” *Sistemnyy analiz i logistika* 4(26) (2020): 59–66. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-4-59-66.

16. Maiorov, Nikolai N., and Yazvenko Maksim R., “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.

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

Язвенко Максим Романович — аспирант
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения» 190000, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: YazvenkoM@guap.ru

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

Yazvenko, Maksim R. — Postgraduate student
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation
e-mail: YazvenkoM@guap.ru

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.

Received: Nov. 12, 2024.