



Вестник

Уральского
государственного
университета
путей сообщения

Научный журнал

Herald
of the Ural State University
of Railway Transport

Scientific journal



УДК 656.212:519.872.5

*А. Л. Казаков, М. Л. Жарков, А. В. Супруновский***О моделировании трансграничных российско-монгольских железнодорожных перевозок**

UDC 656.212:519.872.5

*A. L. Kazakov, M. L. Zharkov, A. V. Suprunovskiy***On modeling of cross-border russian-mongolian railway transportation****Аннотация**

Статья посвящена тематическому моделированию трансграничных железнодорожных перевозок между Россией и Монголией. В качестве объекта исследования выбран участок пути от станции Наушки (Россия) до станции Сухэ-Батор (Монголия), на котором имеется пакетное движение и выполняются таможенные функции с пассажирскими и грузовыми поездами. В статье построена математическая модель движения транспорта по этому участку. Она имеет вид сети массового обслужива-

ния с групповым обслуживанием заявок. Поступление пакетов поездов с разных направлений описывается с помощью нескольких ВМАР (Branch Markovian Arrival Process) потоков. Применение этого математического аппарата позволяет учесть различные параметры работы станций и путей между ними, а также случайные факторы, оказывающие значительное влияние на перевозочный процесс. Для исследования полученной математической модели использовались численные методы, в частности, имитационное моделирование. С его

помощью проведены два вычислительных эксперимента с текущим и максимальным плановым поездопотоком. На основе полученных результатов установлено узкое место в структуре системы и оценены способы увеличения ее пропускной способности.

Ключевые слова: трансграничные железнодорожные перевозки, транспортный поток, математическая модель, теория массового обслуживания, вычислительный эксперимент.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-23-32

Статья рекомендована к публикации М. Б. Петровым, д-ром техн. наук, руководителем Центра развития и размещения производительных сил Института экономики УрО РАН. E-mail: michpetrov@mail.ru.

Александр Леонидович Казаков, д-р. физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник; Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН, кафедра «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения; г. Иркутск, Россия. E-mail: kazakov@icc.ru ORCID 0000-0002-3047-1650.

Максим Леонидович Жарков, канд. техн. наук, научный сотрудник; Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН; г. Иркутск, Россия. E-mail: zharkm@mail.ru ORCID 0000-0003-4981-338X.

Антон Викторович Супруновский, старший преподаватель; кафедра «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения; г. Иркутск, Россия. E-mail: as.irgups@gmail.com ORCID 0000-0001-8356-4271.

© А. Л. Казаков, М. Л. Жарков, А. В. Супруновский, 2022

The article is recommended for publishing by M. B. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Center for the Development and Placement of Productive Forces of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: michpetrov@mail.ru.

Alexander Leonidovich Kazakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher; V. M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS, Department of Operational Work Management, Irkutsk State University of Railway Engineering; Irkutsk, Russia. E-mail: kazakov@icc.ru ORCID 0000-0002-3047-1650.

Maxim Leonidovich Zharkov, Candidate of Technical Sciences, Researcher; V. M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS; Irkutsk, Russia. E-mail: zharkm@mail.ru ORCID 0000-0003-4981-338X.

Anton Viktorovich Suprunovskiy, Senior Lecturer; Department of «Operational Work Management» of Irkutsk State University of Railway Transport; Irkutsk, Russia. E-mail: as.irgups@gmail.com ORCID 0000-0001-8356-4271.

© A. L. Kazakov, M. L. Zharkov, A. V. Suprunovskiy, 2022

Abstract

The article is devoted to mathematical modeling of cross-border railway transportation between Russia and Mongolia. As the object of the study, a section of the railway track from the station of Naushki (Russia) to the station of Sukhbaatar (Mongolia) was selected, on which there is package traffic and customs functions are performed with passenger and freight trains. The article presents a mathematical model of traffic on this section. It has the form of a queuing network with

group service of applications. The arrival of train packages from different directions is described using several BMAP (Branch Markovian Arrival Process) streams. The use of this mathematical apparatus makes it possible to take into account various parameters of the operation of stations and tracks between them, as well as random factors which have a significant impact on the transportation process. Numerical methods, in particular, simulation modeling, were used to study the resulting mathematical

model. By means of that, two computational experiments were carried out with the current and maximum planned train traffic. Based on the results obtained, a bottleneck in the system structure was identified and ways to increase its throughput were evaluated.

Keywords: cross-border railway transportation, traffic flow, mathematical model, queuing theory, computational experiment.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-23-32

В настоящее время Россия переориентирует цепи поставок с Европы на Азию, прежде всего на Китай [1]. В первую очередь это касается железнодорожных перевозок как наиболее экономически выгодных в соотношении «скорость/цена» на дальних расстояниях [2]. Кратчайший маршрут из Центральной России в Северо-Восточный Китай проходит через территорию Монголии и включает в себя Трансмонгольскую железную дорогу (Трансмонгольскую магистраль, ТМЖД), которая соединяет российский г. Улан-Удэ и китайский г. Тяньцзинь. Общая протяженность ТМЖД составляет 2215 км, причем половина (1108 км) проходит по территории Монголии (рис. 1) [3].



Рис. 1. Трансмонгольская железная дорога

Проблематика, связанная с трансграничными российско-монгольскими железнодорожными перевозками, обычно рассматривается в научной литературе в контексте транспортных коридоров между Россией и Китаем [4] или даже более широко – между Европой и Северо-Восточной Азией [5]. Последняя работа особенно интересна, поскольку в ней представлены взгляды китайской стороны. Между тем, товароборот между Россией и Монголией, несмотря на резкое падение после распада СССР и ликвидации СЭВ, продолжает сохраняться на достаточно высоком уровне и даже в предпандемийные годы имел тенденцию к росту [6]. Но зачастую этот аспект не учитывается при исследовании железнодорожных перевозок через территорию Монголии, в лучшем случае проводится качественный анализ экономических показателей [6, 7]. С другой стороны, при разработке планов реконструкции ТМЖД прогнозирование транспортных потоков обычно сводится к построению линейного тренда [8].

Авторам не удалось найти в научной литературе работ, которые были бы посвящены математическому моделированию трансграничных российско-монгольских перевозок. Но глубокий научный анализ технико-экономической проблемы подобного уровня

без использования современного математического и программно-алгоритмического аппарата чрезвычайно сложен, если не невозможен.

Монгольская часть ТМЖД не электрифицирована и имеет однопутную систему движения [8], что не характерно для российских железных дорог. При этом из-за скачкообразных изменений цепей поставок (из-за пандемии COVID-19 [4], влияния геополитических факторов и т.п.) структура поездопотоков и их объемы подвержены значительным и резким колебаниям. При столь сложном сочетании неблагоприятных факторов для эффективного прогнозирования и планирования перевозок необходимо учитывать случайные факторы.

Рассмотрим участок пути от станции Наушки (Россия) до станции Сухэ-Батор (Монголия), от которого зависит пропускная способность ТМЖД. Обе станции расположены около границы и на них осуществляются таможенные функции. На этих объектах используется пакетное движение поездов из-за однопутной системы движения на ТМЖД [8]. Под «пакетом» понимается группа от одного до четырех поездов, следующих друг за другом с относительно небольшим интервалом времени.

На железнодорожном транспорте чаще применяются оптимизационные математические модели [2, 9–12]. В частности, при решении задач оптимизации специалисты находят абсолютную пропускную способность железнодорожных систем [2, 9, 13]. Однако в реальности последняя достижима далеко не во всех случаях, поскольку такие модели строятся для идеальных условий функционирования системы. Поэтому необходимо использовать вероятностные модели [9, 10, 13].

Для долгосрочного прогнозирования работы железнодорожного транспорта в условиях неопределенности [2, 14] применяются модели, основанные на методах теории массового обслуживания (ТМО), в частности, на сетях массового обслуживания (СеМО) [15].

СеМО оказались удобными для описания частей железнодорожной сети [16], развязок и крупных станций [17, 18]. Именно на основе такого подхода нами разработана методика моделирования работы как отдельных сортировочных железнодорожных станций [19, 20], так и участка железнодорожной сети [21].

В настоящей работе созданный авторами подход применяется для моделирования движения поездов по участкам железной дороги с пакетным движением поездов, причем используется несколько независимых ВМАР [20] для описания поступления пакетов поездов с различных направлений. Получаемые модели сложны для аналитического исследования, поэтому для их анализа применяются численные методы, в частности, статистическое и имитационное моделирование [22].

По объему выполняемых работ станции Наушки и Сухэ-Батор являются внеклассными (рис. 2).

Станция Наушки состоит из приемо-отправочного парка (ПОП), грузового двора и досмотрового парка. ПОП включает 13 путей, из которых два – главный ход, два предназначены для приема и пропуска пассажирских поездов и девять – для обработки грузовых поездов. В парке работает одна бригада обслуживания поездов, состоящая из одной группы технического осмотра и одной группы таможенного. Обработка грузовых поездов в ПОП по станции Наушки – 180–280 мин (в среднем 230 мин), из которых 100–120 мин приходится на таможенные операции. Обработка пассажирских поездов по станции Наушки – 90–110 мин. Грузовой двор включает шесть путей, на которых может быть размещен один поезд. Среднее время его обработки составляет одни сутки. Досмотровый парк включает пять путей, из них один – главный ход, остальные предназначены для отстоя вагонов и таможенного осмотра. Как правило, этот парк практически не влияет на работу станции, поэтому далее в модели мы его не учитываем.



Рис. 2. Схема железнодорожного участка Наушки – Сухэ-Батор

Станция Сухэ-Батор состоит из одного парка (23 пути). Первые три пути предназначены для пассажирских поездов. Прием и отправление грузовых поездов осуществляется на путях с 4 по 12. Пути 13 и 14 – главный ход, 15–23 – погрузочно-разгрузочные пути. Технический и таможенный осмотр поездов выполняется одной бригадой, как и на станции Наушки.

Среднее время хода от станции Наушки до Сухэ-Батор – 45 мин. Минимальный интервал между отправляемыми поездами в пакете составляет 18 мин.

Поездотоки. Количество пассажирских поездов на Монголию – 3-4 поезда в сутки и столько же обратно. Максимально по графику из России на станцию Наушки можно отправить 16 грузовых поездов (и столько же обратно), со станции Наушки до станции Сухэ-Батор – 12. Фактически же по стыку Наушки – Сухэ-Батор в настоящее время следуют семь-восемь грузовых поездов в сутки в каждом направлении. Поезда прибывают пакетами, как правило, их максимальный размер составляет четыре поезда. Средний размер пакета для направления Россия – Монголия составляет 2,75 поездов, обратно – 2,59.

Построение модели выбранного объекта происходит в три этапа: 1) описание входящих поездотоков, 2) моделирование работы инфраструктурных

элементов, 3) учет в модели маршрутов движения поездов в системе и других ее особенностей [21].

Математическое описание входящих поездотоков

Поезда поступают с двух направлений, каждое из которых описывается с помощью отдельного ВМАР-потока. Под заявкой понимается весь поезд целиком. Тогда группа заявок – это один пакет поездов. Примем, что его размер описывается биномиальным распределением $B(4, 0,69)$, где первый параметр (число испытаний) равен максимальному размеру пакета, а второй (вероятность успеха) подобран так, чтобы среднее значение этой случайной величины соответствовало среднему размеру пакета. Интенсивность поступления пакетов – 4 в сутки, или 0,17 в час. Тогда ВМАР-потоки будут задаваться матрицами

$$\begin{aligned} D_{R0} &= (-0,170), D_{R1} = (0,0140), \\ D_{R2} &= (0,0464), D_{R3} = (0,0692), \\ D_{R4} &= (0,0374); \\ D_{M0} &= (-0,170), D_{M1} = (0,0194), \\ D_{M2} &= (0,0539), D_{M3} = (0,0665), \\ D_{M4} &= (0,0302), \end{aligned} \quad (1)$$

где D_{Ri} – поездоток из России; D_{Mi} – из Монголии.

Математическое описание функционирования структурных элементов

Каждый элемент рассматриваемого железнодорожного участка в зависимости от типа описывается одной или более системами массового обслуживания (СМО, или узлы).

Приемоотправочный парк на ст. Наушки принимает/отправляет поезда с двух направлений, поэтому каждый парк описывается двумя многоканальными СМО без очереди (узлы 1 и 2). Их каналы моделируют работу путей. Время обслуживания в канале описывается нормальным распределением и соответствует времени обработки поезда бригадой: для пассажирских $N(100; 3)$, для грузовых – $N(230; 16)$. Первый параметр (математическое ожидание) соответствует среднему времени обслуживания соответствующего поезда, второй (ср. квадратическое отклонение) подобран по правилу трех сигм. Здесь и далее все параметры измеряются в минутах.

Грузовой двор на станции Наушки может вместить лишь один поезд, поэтому его работа описывается одноканальной СМО без очереди (узел 3). Распределение времени обслуживания в канале $N(1440; 180)$.

По единственному железнодорожному пути между станциями поезда следуют в двух направлениях. Для описания его функционирования используются две одноканальные СМО без очереди и с групповым обслуживанием (узлы 4 и 5). Размер группы соответствует максимальному размеру «пачки». Среднее время обслуживания в этих СМО увеличено в два раза по сравнению с фактическим временем движения пакета по данному пути, тогда распределение времени обслуживания в каналах узлов 4 и 5 будет $N(87; 10)$.

Станция Сухэ-Батор имеет только один ПОП, в составе которого входят погрузочно-разгрузочные пути. Они применяются для обслуживания местного поездопотока. Нам не удалось найти

в открытых источниках данных об их использовании, поэтому в модели их не учитываем. Работу остальных путей ПОП моделируем двумя многоканальными СМО без очереди (узлы 6 и 7). Время обслуживания пассажирских поездов описывается $N(100; 3)$, грузовых – $N(230; 16)$.

Таким образом, структурные элементы железнодорожного участка Наушки – Сухэ-Батор мы описываем семью узлами. К ним добавим еще два фиктивных узла, которые выступают в качестве источников потоков заявок: узел 0 для ВМАР-1, узел 8 для ВМАР-2. Формальное описание модели имеет следующий вид:

узел 0 – источник ВМАР-1;

узел 1 – ВМАР-1 $/G/8/0$ и узел 2 – $*/G/5/0$ – описывают работу ПОП при станции Наушки в двух направлениях;

узел 3 – грузовой двор Наушки – $*/G/1/0$;

узлы 4 и 5 – $*/G^X/1/0$ – описывают работу пути между станциями;

узел 6 – $*/G/6/0$ и узел 7 – ВМАР-2 $/G/8/0$ – ПОП при ст. Сухэ-Батор;

узел 8 – источник ВМАР-2.

Описание маршрутов движения поездов строится в виде матрицы. Она будет разреженной, поскольку поезда могут передвигаться между станциями только одному пути, следовательно, неинформативной. Поэтому маршрутную матрицу мы не приводим, а вероятности переходов между узлами представлены на рис. 3 в виде весов. В узлах СеМО применяются временные блокировки работы каналов для предотвращения потерь заявок между узлами.

Для численного исследования полученной математической модели авторами разработана имитационная модель работы СеМО в виде программного модуля на основе дискретно-событийного подхода к моделированию и методов Монте-Карло. Для программной реализации использовались среда Delphi EX8, язык программирования Object Pascal. Программный модуль предназначен для нахождения показателей эффективности выбранной СеМО.

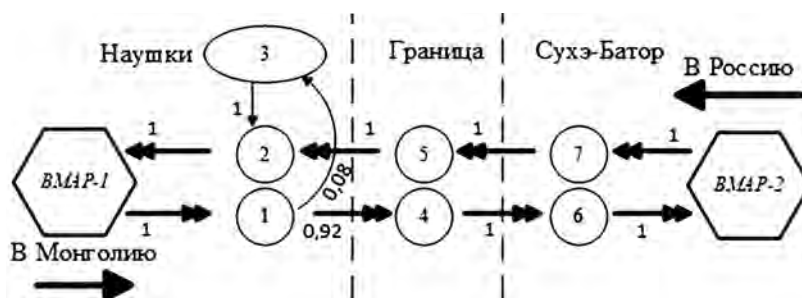


Рис. 3. Схема СеМО

В ней могут присутствовать до ста узлов и несколько независимых ВМАР-потоков. Число каналов и длина очереди различны для каждого узла. Каналы работают независимо друг от друга, возможны разные законы распределения времени обслуживания и размеров обслуживаемых групп заявок в каналах. Дополнительно программный модуль может отображать процесс работы СеМО в табличном виде и сохранять результаты в MS Excel.

Результаты двух модельных экспериментов представлены в таблицах 1 и 2. В каждой таблице отображены средние результаты за десять пусков имитационной модели. Виртуальное время каждого пуска составило 21 день. Это минимальное значение, за которое имитационная модель может вычислить показатели эффективности данной СеМО.

Модельный эксперимент 1. В таблице 1 представлены результаты исследования предложенной модели при поступлении восьми грузовых и трех

пассажирских поездов с каждого направления; поездопоток описывается матрицами (1).

Среднее время прохождения технического и таможенного контроля составляет чуть более 10 часов (узлы 1 и 7), основная часть из которых – ожидание бригады осмотра и освобождения пути между станциями. Этот временной промежуток – узкое место, что можно видеть по максимальному значению коэффициента занятости каналов в узлах 4 и 5 по отношению к данному параметру в узлах 1, 2, 6 и 7. Грузовой двор (узел 3) хоть и имеет наибольшие коэффициент занятости каналов и среднее время в узле, но практически не влияет на систему в целом, так как объем поездопотока здесь незначительный. В предложенной модели не учитывается наличие диспетчерского управления, поэтому вероятность отказа мы интерпретируем как процент остановки поездов на соседних станциях из-за занятости путей на станциях Наушки

Таблица 1

Результаты эксперимента 1

Поступило	Групп	Заявок	Отказ.	Групп	Заявок	Вероят. отказа	0,057
	167,25	467,38		8,00	26,75		
Характеристика узлов	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7
Коэф. занятости каналов	0,21	0,26	0,78	0,39	0,41	0,18	0,21
Ср. время в узле (мин)	613,32	233,36	1521,22	58,42	56,78	212,13	639,85
Сумм. кол-во заявок в узле	222,38	168,75	15,38	203,75	217,13	156,13	218,25
Ср. вр. блокировки одной заявки (мин)	26,31	–	3,20	0,19	2,89	–	30,34

или Сухэ-Батор. В данном эксперименте 5,7 % поездов могут быть остановлены, что не является критическим значением.

Можно заключить, что железнодорожный участок Наушки – Сухэ-Батор имеет достаточную пропускную способность для текущего объема поездопотоков. Однако для пропуска максимального объема поездопотока (по графику суммарно 32 поезда) текущей производительности будет недостаточно, требуется увеличить число бригад на станциях и повысить среднюю скорость движения поездов по путям.

Модельный эксперимент 2. По сравнению с экспериментом 1, увеличим интенсивность поступления до 16 поездов в сутки с каждого направления (0,238 групп поездов в час), сократим время обслуживания грузовых поездов в каналах узлов 1, 2, 6 и 7 на 50 %, что соответствует добавлению по одной бригаде на рассматриваемых станциях, в узлах 4 и 5 снизим время обслуживания на 10 % и увеличим максимальный размер обслуживаемой группы заявок до 5. Результаты исследования обновленной модели представлены в таблице 2.

Увеличение числа бригад позволило сократить среднее время прохождения таможенного контроля на 28 %, но это слабо влияет на пропускную способность системы в целом. Для повышения пропускной способности участка Наушки – Сухэ-Батор (без существенных финансовых затрат) нужно увеличить

скорость движения поездов по нему. Но это не принесет существенной выгоды из-за конструктивных ограничений участка (прежде всего, однопутного движения). Таким образом, для эффективного увеличения пропускной способности данного участка требуется проведение мероприятий по его реконструкции, в числе которых могут быть постройка дополнительных разъездов, оборудование линии автоблокировкой, а в перспективе – строительство второго главного пути.

В ходе проведенных исследований была построена и численно исследована математическая модель, описывающая трансграничные железнодорожные перевозки между Россией и Монголией. Ее отличительной особенностью является то, что она имеет вид сети массового обслуживания, а не оптимизационной задачи, как это обычно бывает в подобных случаях. Применение этого математического аппарата позволяет учесть случайные факторы, которые в условиях хронических сбоев в логистических цепях поставок, характерных для последних двух лет, оказывают значительное влияние на перевозочный процесс.

Модель программно реализована, выполнен вычислительный эксперимент, позволивший сделать некоторые предварительные выводы. В частности, его результаты косвенно подтверждают мнение специалистов, что для развития ТМЖД необходима поэтапная реконструкция ее монгольской части [8],

Таблица 2

Результаты эксперимента 2

Поступило	Групп	Заявок	Отказано	Групп	Заявок	Вероят. отказа	0,070
	226,83	633,83		14,00	44,33		
Характеристика узлов	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7
Коэф. занятости каналов	0,20	0,28	0,83	0,42	0,43	0,21	0,19
Ср. время в узле (мин)	458,96	222,37	1528,01	45,02	44,47	213,64	445,10
Сумм. кол-во заявок в узле	299,17	189,67	16,33	280,83	289,00	181,17	289,67
Ср. вр. блокировки одной заявки (мин)	21,20	–	1,91	0,56	3,01	–	17,99

в противном случае увеличить объемы транзита Россия – Монголия – Китай будет чрезвычайно сложно.

Дальнейшие исследования связаны с построением на той же методической основе полной модели железнодорожного участка Наушки – Улан-Батор со

всеми действующими на нем станциями и далее – всей монгольской части ТМЖД. Это позволит определять участки, которые нуждаются в приоритетной реконструкции в условиях ограниченного финансирования. ■

Литература

1. О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107030001> (дата обращения: 01.09.2022).
2. Морозов В. Н., Шапкин И. Н. Эффективные методы и модели управления процессами перевозок на железнодорожном транспорте (теория, практика, перспективы). М. : Финансы и статистика, 2019. 486 с. ISBN 978-5-00184-052-7.
3. Самуйлов В. М., Ткачева Т. Н., Калашников А. Е. Развитие проекта «Новый шелковый путь»: функционирование в период пандемии и рост контейнерных перевозок // Инновационный транспорт. 2021. № 2 (40). С. 8–13. ISSN 2311-164X.
4. Макаров А. В., Макарова Е. В., Андреев А. Б. Монгольский коридор: проблемы и перспективы развития транзитно-транспортной сети Монголии // ЭКО. 2020. № 10. С. 34–49. ISSN 0131-7652.
5. Чэнь Цюэце. Современное состояние и проблемы развития трансграничных логистических маршрутов в Северо-Восточной Азии // Регионалистика. 2021. Т. 8. № 5. С. 18–27. eISSN 2313-0881.
6. Намжилова В. О. Российско-монгольские торгово-экономические отношения: дальневосточные перспективы // Регионалистика. 2021. Т. 8. № 1. С. 29–38. eISSN 2313-0881.
7. Национальные интересы России и Монголии в треугольнике Россия – Монголия – Китай: проблемы, противоречия и сценарии / В. В. Грайворонский, Т. Дорж, А. П. Суходолов [и др.]. Иркутск : «Развитие», 2021. 466 с. ISBN 978-5-6047137-0-9.
8. Батурин А. П., Балжир М. Выбор оптимального варианта развития Улан-Баторской железной дороги // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 2 (57). С. 154–165. ISSN 1992-3252.
9. Акулиничев В. М., Кудрявцев В. А., Корешков А. Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог. М. : Транспорт, 1981. 223 с.
10. Поттгофф Г. Учение о транспортных потоках / Пер. с нем. В. И. Шейко, В. Н. Воскресенского ; под ред. Е. П. Нестерова. М. : Транспорт, 1975. 343 с.
11. Казаков А. Л., Лемперт А. А., Бухаров Д. С. Об одном численном методе решения некоторых задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 6 (53). С. 6–12. eISSN 2500-1590.
12. Брусянин Д. А., Казаков А. Л., Маслов А. М. Оптимизация региональной маршрутной сети междугородных и пригородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов // Транспорт Урала. 2012. № 1 (32). С. 106–109. ISSN 1815-9400.
13. Weik N., Nießen N. Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors // J. Rail Transport Planning Management. 2019. V. 15. Pp. 100237. ISSN 2210-9706.
14. Казаков А. Л., Маслов А. М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 27–32. ISSN 1813-9108.
15. Medhi J. Stochastic Models in Queuing Theory. San Diego : Academic Press, 2002. 482 p. ISBN 0-12-487462-2.
16. Huisman T., Boucherie R. J., Van Dijk N. M. A solvable queueing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands // European Journal Operational Research. 2002. V. 142. Pp. 30–51. ISSN 0377-2217.
17. Marinov M., Viegas J. A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations // Simulation Modelling Practice and Theory. 2009. V. 17. Issue 6. Pp. 1106–1129. ISSN 1569-190X.

18. Любченко А. А., Бартош С. В., Смирнов В. А., Castillo P. А. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 3. С. 87–92. ISSN 2310-9793.
19. Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В., Павидис М. М. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания // Вестник УрГУПС. 2021. № 3 (51). С. 4–14. ISSN 2079-0392.
20. Vychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of railway stations based on queuing networks // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11 (5). 2425. eISSN 2076-3417.
21. Жарков М. Л., Супруновский А. В. О моделировании железнодорожных узлов на основе теории массового обслуживания // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 1 (25). С. 120–132. ISSN 2413-0133.
22. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. СПб : Питер, 2004. 847 с. ISBN 5-94723-981-7.

List of references

1. On the National Security Strategy of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 400 dated 02.07.2021 [O Strategii natsional'noj bezopasnosti Rossijskoj Federatsii: Ukaz Prezidenta RF ot 02.07.2021 № 400]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107030001> (accessed on: 01.09.2022).
2. Morozov V. N., Shapkin I. N. Effective methods and models of management of transportation processes in railway transport (theory, practice, prospects) [Ehffektivnye metody i modeli upravleniya protsessami perevozok na zheleznodorozhnom transporte (teoriya, praktika, perspektivy)]. M. : Finansy i statistika]. M. : Finance and Statistics, 2019. 486 p. ISBN 978-5-00184-052-7.
3. Samuylov V. M., Tkacheva T. N., Kalashnikov A. E. Development of the New Silk Road project: functioning during the pandemic and the growth of container transportation // Innovative Transport [Razvitie proekta «Novyj shelkovyj put'»: funkcionirovanie v period pandemii i rost kontejnernykh perevozok // Innovatsionnyj transport]. 2021. № 2 (40). Pp. 8–13. ISSN 2311-164X.
4. Makarov A. V., Makarova E. V., Andreyev A. B. The Mongolian corridor: problems and prospects of development of the transit and transport network of Mongolia // ECO [Mongol'skij koridor: problemy i perspektivy razvitiya tranzitno-transportnoj seti Mongolii // EKO]. 2020. № 10. Pp. 34–49. ISSN 0131-7652.
5. Chen Qiujie. Current state and problems of development of cross-border logistics routes in Northeast Asia // Regionalism [Sovremennoe sostoyanie i problemy razvitiya transgranichnykh logisticheskikh marshrutov v Severo-Vostochnoj Azii // Regionalistika]. 2021. Vol. 8. № 5. Pp. 18–27. eISSN 2313-0881.
6. Namzhilova V. O. Russian-Mongolian trade and economic relations: Far Eastern prospects // Regionalism [Rossijsko-mongol'skie torgovo-ehkonomicheskie otnosheniya: dal'nevostochnye perspektivy // Regionalistika]. 2021. Vol. 8. № 1. Pp. 29–38. eISSN 2313-0881.
7. National interests of Russia and Mongolia in the triangle Russia – Mongolia – China: problems, contradictions and scenarios / V. V. Grayvoronsky, T. Dorzh, A. P. Sukhodolov [et al.]. Irkutsk: «Razvitie» [Natsional'nye interesy Rossii i Mongolii v treugol'nike Rossiya – Mongoliya – Kitaj: problemy, protivorechiya i stsenarii / V. V. Grayvoronskij, T. Dorzh, A. P. Sukhodolov [i dr.]]. Irkutsk : «Razvitie», 2021. 466 p. ISBN 978-5-6047137-0-9.
8. Baturin A. P., Balzhir M. Choosing the optimal option for the development of the Ulaanbaatar railway // Mir transporta [Vybor optimal'nogo varianta razvitiya Ulan-Batorskoj zheleznoj dorogi // Mir transporta]. 2015. Vol. 13. № 2 (57). Pp. 154–165. ISSN 1992-3252.
9. Akulinichev V. M., Kudryavtsev V. A., Koreshkov A. N. Mathematical methods in the operation of railways. M. : Transport [Matematicheskie metody v ehkspluatatsii zheleznykh dorog. M. : Transport], 1981. 223 p.
10. Potthoff G. The doctrine of transport flows / Translated from German by V. I. Sheiko, V. N. Voskresensky ; edited by E. P. Nesterov. M. : Transport [Uchenie o transportnykh potokakh / Perevod s nemetskogo V. I. Shejko, V. N. Voskresenskogo ; pod red. E. P. Nesterova. M. : Transport], 1975. 343 p.
11. Kazakov A. L., Lempert A. A., Bukharov D. S. On numerical method for solving some optimization problems arising in transport logistics // Bulletin of the Irkutsk State Technical University [Ob odnom chislennom metode resheniya nekotorykh zadach optimizatsii,

- voznikayushhikh v transportnoj logistike // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2011. № 6 (53). Pp. 6–12. eISSN 2500-1590.
12. Brusyanin D. A., Kazakov A. L., Maslov A. M. Optimization of the regional route network of intercity and suburban passenger transportation using logistic principles // Transport of the Urals [Optimizatsiya regional'noj marshrutnoj seti mezhdugorodnykh i prigorodnykh passazhirskikh perevozok s ispol'zovaniem logisticheskikh printsipov // Transport Urala]. 2012. № 1 (32). Pp. 106–109. ISSN 1815-9400.
 13. Weik N., Nießen N. Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors // J. Rail Transport Planning Management. 2019. V. 15. Pp. 100237. ISSN 2210-9706.
 14. Kazakov A. L., Maslov A. M. Constructing a model of uneven traffic flow on the example of a railway freight station // Modern technologies. System analysis. Modeling [Postroenie modeli neravnomernogo transportnogo potoka na primere zheleznodorozhnoj gruzovoy stantsii // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie]. 2009. № 3 (23). Pp. 27–32. ISSN 1813-9108.
 15. Medhi J. Stochastic Models in Queuing Theory. San Diego : Academic Press, 2002. 482 p. ISBN 0-12-487462-2.
 16. Huisman T., Boucherie R. J., Van Dijk N. M. A solvable queuing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands // European Journal Operational Research. 2002. V. 142. Pp. 30–51. ISSN 0377-2217.
 17. Marinov M., Viegas J. A simulation modeling methodology for evaluating flat-shunted yard operations // Simulation Modeling Practice and Theory. 2009. V. 17. Issue 6. Pp. 1106–1129. ISSN 1569-190X.
 18. Lyubchenko A. A., Bartosh S. V., Smirnov V. A., Castillo P. A. Discrete-event model of a railway junction in AnyLogic environment // Dynamics of systems, mechanisms and machines [Diskretno-sobytniyaya model' zheleznodorozhnogo uzla v srede AnyLogic // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin]. 2016. № 3. Pp. 87–92. ISSN 2310-9793.
 19. Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V., Pavlidis M. M. Modeling of the world's largest railway marshalling yard using queuing theory // Herald of USURT [Modelirovanie krupnejshej v mire zheleznodorozhnoj sortirovochnoj stantsii s ispol'zovaniem teorii massovogo obsluzhivaniya // Vestnik UrGUPS]. 2021. № 3 (51). C. 4–14. ISSN 2079-0392.
 20. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of railway stations based on queuing networks // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11 (5). 2425. eISSN 2076-3417.
 21. Zharkov M. L., Suprunovsky A. V. On modeling railway junctions based on the theory of queuing // Information and mathematical technologies in science and management [O modelirovanii zheleznodorozhnykh uzlov na osnove teorii massovogo obsluzhivaniya // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii]. 2022. № 1 (25). Pp. 120–132. ISSN 2413-0133.
 22. Kelton V., Low A. Simulation modeling. Classic CS. St. Petersburg : Peter [Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS. SPb : Piter], 2004. 847 p. ISBN 5-94723-981-7.

Статья сдана в редакцию 1 сентября 2022 года