

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная научная статья
УДК 656.22: 519.872: 004.94
EDN: <https://elibrary.ru/krmjmj>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-111-122>
Научная специальность: 2.9.4. Управление процессами перевозок



Оценка эксплуатационных характеристик железнодорожной станции на Транссибирской магистрали с использованием имитационного моделирования

М. А. Власов¹, А. Л. Казаков^{1,2}, А. В. Супруновский¹✉

¹Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
Иркутск, Российская Федерация

²Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН),
Иркутск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с переориентацией ключевых грузопотоков России с европейского направления на азиатское, актуальной задачей является повышение пропускной способности Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей, на которые возлагается наибольший объем перевозок в восточном направлении. Для решения этой задачи необходима комплексная оценка состояния объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Целью исследования является анализ эксплуатационных характеристик и определение максимальной пропускной способности железнодорожной станции, которая расположена на горно-перевальном участке Транссибирской магистрали и является ее лимитирующим элементом. Авторами предложен и применен оригинальный комплексный инструментальный для моделирования работы железнодорожной станции, позволяющий повысить достоверность результатов исследования.

Материалы и методы. В качестве основного инструмента исследования используется имитационное моделирование. Для повышения достоверности результатов применяется два альтернативных подхода: первый основан на использовании программного обеспечения AnyLogic, а второй — на теории массового обслуживания с разработкой авторского программно-алгоритмического аппарата.

Результаты. Построены две взаимодополняющие имитационные модели, с их помощью проведены вычислительные эксперименты, по результатам которых выполнен сценарный анализ работы станции, в том числе определены показатели эффективности при различных интервалах движения поездов.

Обсуждение и заключение. Установлено, что рассмотренная станция способна обеспечить пропуск поездопотока при интервале движения поездов от 11 мин и более. Для его уменьшения потребуется реконструкция станции. Показано, что для исследования работы железнодорожных станций можно использовать аппарат теории массового обслуживания, позволяющий сократить трудоемкость построения и анализа модели.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожная станция, имитационное моделирование, математическое моделирование, теория массового обслуживания, вычислительный эксперимент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Власов М. А., Казаков А. Л., Супруновский А. В. Оценка эксплуатационных характеристик железнодорожной станции на Транссибирской магистрали с использованием имитационного моделирования // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 111–122. EDN: <https://elibrary.ru/krmjmj>.



TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article

UDK 656.22: 519.872: 004.94

EDN: <https://elibrary.ru/krmmjj>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-111-122>

Scientific specialty: 2.9.4. Transportation process management



Operational characteristics of railway station located on the Trans-Siberian Railway using simulation modeling

Matvey A. Vlasov¹, Alexander L. Kazakov^{1,2}, Anton V. Suprunovsky¹✉

¹Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation

²Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS,
Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Due to the redirection of key logistics flows in Russia to the East (Asia Pacific), increasing throughput capacity of the Trans-Siberian Railway is an urgent task. Addressing this challenge requires a comprehensive assessment of the state of railway transport infrastructure facilities. The aim of this study is to analyse the operational characteristics and determine the maximum throughput capacity of the railway station located in a mountain-pass section of the Trans-Siberian Railway, which acts as its bottleneck. The authors proposed and applied an original comprehensive tool for railway station operation modeling, which enables to increase the reliability of the research results.

Materials and methods. Simulation was employed as the main research tool. In order to enhance the reliability of the results, two alternative approaches were applied. The first is based on the use of AnyLogic software. The second relies on queuing theory, with the development of the authors' own software and algorithmic framework.

Results. Two complementary simulation models were developed and used to conduct computational experiments. Based on the results, a scenario analysis of the station operation was performed, including the determination of efficiency indicators for various headways.

Discussion and conclusion. It is established that the considered station is capable of handling train traffic with headways of 11 min or more. Station reconstruction would be required to reduce it. The queuing theory mathematical apparatus may be used to study railway stations operation, which reduces the complexity of model construction and analysis.

KEYWORDS: railway station, simulation, mathematical modeling, queueing theory, computational experiment

FOR CITATION: Vlasov M.A., Kazakov A.L., Suprunovsky A.V. Operational characteristics of railway station located on the Trans-Siberian Railway using simulation modeling. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):111–122. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-111-122>.

✉ as.irgups@gmail.com (A. V. Suprunovsky)

© Vlasov M. A., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V., 2026

Введение. В настоящее время ключевые логистические потоки в Российской Федерации переориентированы с европейского направления на азиатское. Основными путями доставки грузов в страны Азиатско-Тихоокеанского региона являются Транссибирская и Байкало-Амурская магистрали, на сегодняшний день их загрузка приблизилась к максимальным значениям [1]. Для повышения пропускных и провозных способностей магистралей необходима комплексная оценка текущего состояния объектов железнодорожной инфраструктуры.

В современной научно-технической литературе анализ функционирования объектов транспортной инфраструктуры преимущественно базируется на методах имитационного моделирования [2–3]. Значительную роль в реализации методологических подходов играет применение общецелевых систем AnyLogic, Arena, Plant Simulation [4–5] и др., а также специализированного программного инструментария ИМЕТРА (имитационное моделирование единой транспортной работы), ИСТРА (имитационная система транспорта), ИСУЖТ (интеллектуальная система управления железнодорожным транспортом). Подобные системы позволяют решать широкий спектр прикладных задач, выполняя диагностику «узких» мест, оценку необходимости модернизации инфраструктуры, оптимизацию технологических операций и учет влияния случайных факторов [6–7].

Дать исчерпывающий обзор публикаций по данной тематике не представляется возможным. Отметим наиболее близкие к данному исследованию работы, в которых используются системы имитационного моделирования. Работа [8] посвящена созданию модели приграничной станции с оценкой ее загрузки, учитывающей операции перевалки грузов с автомобильного транспорта. В [9] рассмотрен выбор оптимальных маршрутов движения поездов и путей назначения. В [10–11] предложены модели участковых станций, которые детально воспроизводят характерные технологические операции (смену локомотивов, технический и коммерческий осмотры, отцепку вагонов), при этом одна из станций расположена на Байкало-Амурской магистрали (далее — БАМ). В работе [12] имитационное моделирование используется для оценки проектов по реконструкции путевого развития внутризаводских станций и перегонов.

При всех достоинствах программных комплексов, встречаются случаи, когда описание функционирования объектов транспортной инфраструктуры с их помощью выполнить проблематично или даже невозможно. Тогда для исследования необходимо разрабатывать оригинальный модельно-алгоритмический и программный инструментарий. Зачастую в качестве математического базиса здесь выступает теория массового

обслуживания (далее — ТМО), еще с 1960-х гг. применяющаяся в области железнодорожного транспорта [13]. Представим современные и близкие к данному исследованию работы.

Наиболее часто ТМО используется при исследовании железнодорожных станций и перегонов. В [14] представлена модель сортировочной станции, в [15–16] — грузовых станций с учетом особенностей работы сортировочных устройств и путей необщего пользования. В [17] проведено моделирование лимитирующих участков при организации пропуска поездопотоков по однопутным линиям. Данный аппарат также используется для анализа пропускной способности железнодорожных линий [18–19]. Отдельно стоит упомянуть работы авторов, в которых строятся и исследуются модели сортировочных станций и однопутного участка БАМ [20–22].

Целью данного исследования является оценка эксплуатационного состояния железнодорожной станции Большой Луг с использованием методов имитационного моделирования. Эта станция является ключевой на лимитирующем горно-перевальном участке Транссибирской магистрали (далее — Транссиб), где из-за крутого подъема для движения тяжеловесных поездов в гору используются подталкивающие локомотивы, что существенно усложняет технологию работы и не позволяет применять стандартные подходы.

Научная новизна исследования определяется тем, что, во-первых, модель AnyLogic построена для нового (чрезвычайно важного для Транссиба) транспортного объекта, который ранее в этой парадигме не рассматривался, при этом использован не только агентный [5], но и дискретно-событийный подход, что позволяет повысить эффективность моделирования движения транспортных потоков. Во-вторых, построены математическая и имитационная модели рассмотренной станции на основе ТМО, которые также обладают новизной за счет учета возможности перехода к диспетчерскому управлению посредством допущения отказа. Наконец, помимо описания инструментария, была проведена его апробация посредством комплексных расчетов, которые позволили оценить эффективность работы станции, в результате чего было получено близкое соответствие между результатами моделирования по разным методам, что косвенным образом свидетельствует об их надежности и достоверности.

Отметим, что ситуации, когда моделирование работы станции только одним стандартным способом не позволяет подтвердить достоверность результатов расчета вследствие невозможности оценить их адекватность, встречаются нередко. В таких случаях необходимо проводить сравнение с реальными данными, что не всегда доступно, либо выполнять моделирование при помощи двух или более (в особых случаях) различных подходов.

Объект исследования. Станция Большой Луг находится на Восточно-Сибирской железной дороге. По характеру работы она является промежуточной и предназначена для выполнения следующих операций: безостановочный пропуск всех категорий поездов, прием и отправление грузовых поездов, прицепка-отцепка подталкивающих локомотивов, технический и коммерческий осмотр вагонов, работа с местными вагонами, посадка-высадка пассажиров пригородных поездов.

Станция включает 3 главных пути — для приема пассажирских и пригородных поездов с возможным пропуском транзитных поездов, 6 приемоотправочных путей — для транзитных и грузовых поездов с последующей прицепкой подталкивающего локомотива, а также пути необщего пользования.

На станцию прибывают поезда с двух направлений, всего 120 пар/сут с интервалом в 12 мин. Поездопоток с западного направления состоит на 75% из грузовых поездов с подталкиванием и на 25% — из транзитных без подталкивания. С восточного — обратное соотношение между поездами с подталкиванием и без. Согласно технологии работы станции и в соответствии с нормативным графиком движения поездов время движения поездов в горловинах станции T_1 составляет от 1 до 3 мин, время обработки с прицепкой (отцепкой) подталкивающего локомотива в головную часть состава T_2 — от 18 до 24 мин, в хвостовую часть T_3 — от 9 до 15 мин.

Материалы и методы. В рамках данного исследования для оценки работоспособности станции Большой Луг применяются два способа имитационного моделирования.

Первый способ основан на использовании среды разработки AnyLogic [4–5], которая обеспечивает возможность моделирования как на микроуровне с детализацией отдельных элементов станции, так и на макроуровне с агрегированием характерных свойств исследуемого объекта.

Второй способ основан на применении математического аппарата ТМО, а именно — сетей массового обслуживания (далее — СеМО), которые представляют собой совокупность конечного числа взаимодействующих систем массового обслуживания (далее — СМО, узлов) и являются эффективным аппаратом для анализа сложных транспортных систем [18–20].

Далее опишем общие предположения и допущения, которые используются при построении моделей двумя способами.

Для описания поездопотока применяется детерминированная модель, отображающая минимально возможный межпоездной интервал при идеальных эксплуатационных условиях. Если в получаемой модели пропускная способность недостаточна при заданном интервале, то в реальности с неизбежными

отклонениями она будет ниже. Такой подход задает «потолок», на основании которого можно произвести оценку пропускной способности станции. Отметим также, что детерминированные модели применяются в современных исследованиях. В [23] при моделировании движения поездов на участке используются 8- и 5-минутные межпоездные интервалы. В [24] анализируются потоки пассажирских поездов в различных режимах движения.

При моделировании каждым из способов выделяются только те структурные элементы станции, которые непосредственно взаимодействуют с поездами. Для каждого из них учитываются вместимость, специализация и выполняемые технологические операции с поездами. В модели такого элемента отображается суммарная продолжительность всех выполняемых в нем операций как время обслуживания, которое имеет вид случайной величины. Ее параметры разыгрывания подбираются согласно технологическому процессу с учетом минимального и максимального допустимых значений. Это позволяет косвенно учесть не только всю последовательность операций, но и различные случайные факторы, в частности продолжительность времени на приготовление маршрута, разное время движения поезда в горловинах станции в зависимости от его категории, случайный промежуток времени между моментом замыкания стрелочных переводов в маршруте и моментом прохождения поезда по ним.

Модели отдельных элементов образуют иерархическую структуру, которая соответствует структуре станции и позволяет учесть последовательность операций, проходящих в разных элементах станции. В частности, интервал попутного прибытия учитывается в модели входящего потока, и он «наследуется» моделью, которая описывает движение прибывающего поезда по горловине. Аналогично интервал попутного отправления отображается косвенно, через модели, описывающие работу путей станции и движение отправляющегося поезда по горловине. Между элементами присутствуют обратные связи, которые имеют вид временной блокировки работы текущего элемента до тех пор, пока в следующем не освободится место.

Для описания особенностей обращения подталкивающих локомотивов необходимо комплексно рассмотреть работу всего участка Большой Луг — Слюдянка-1, что выходит за рамки данного исследования. Поэтому при моделировании работы станции Большой Луг применяются следующие допущения:

- технологические операции с толкачами, производимые непосредственно на рассматриваемой станции (маневры, прицепка и др.), описываются как время обслуживания;

- предполагается, что подталкивающие локомотивы всегда имеются в достаточном количестве на станции;

- время обращения толкачей и число действующих на участке единиц не учитываются.

Операции по пропуску поездов и подстановке толкачей выполняются на разных путях и в рамках одной модели описываются различными элементами. При этом неявно учитывается приоритет по пропуску транзитных поездов и поездов с подталкиванием за счет иерархической структуры имитационных моделей.

На участке Иркутск-Сортировочный – Слюдянка-1 нередко возникают нештатные ситуации, когда составы не могут быть приняты из-за занятости станции и требуется диспетчерское вмешательство. Наступление подобной ситуации не описывается в моделях явно, а опосредованно учитывается как отказ в обслуживании. В данном исследовании отказ означает выход за рамки применимости моделей. С точки зрения объекта исследования это означает, что для движения поезда требуется диспетчерское управление. Чтобы нештатные ситуации не оказывали существенного влияния на работу всего участка, предусмотрена небольшая вероятность отказа. Подробнее этот момент описан при проведении вычислительного эксперимента.

Модель в среде AnyLogic. Начнем с описания имитационной модели AnyLogic Rail Station (далее – ARS), которая была построена авторами статьи в среде разработки AnyLogic на основе агентного и дискретно-событийного подходов к моделированию. Данная модель отображает технологический процесс обработки поездов разных категорий на станции Большой Луг, поэтому учитываются только поездопотоки и работа

основных структурных элементов — горловин и путей станции. В ARS под агентом понимается поезд целиком и используются следующие блоки:

- source — генерирует моменты времени поступления агентов;
- selectOutput — определяет дальнейший маршрут агента в системе;
- queue — отвечает за накопление агентов, ожидающих принятия в следующий блок;
- delay — выполняет задержку агента на случайный промежуток времени в соответствии с заданным распределением;
- sink — удаляет агентов, попавших в блок, и фиксирует их количество;
- tStart и tEnd — хранят времена поступления агента в блок и выход из него.

В основе работы модели лежит генерация двух встречных потоков агентов — блоки source1 и source2, моделирующие поездопотоки с запада и востока. Блоки selectOutput определяют тип агента (пассажирский, транзитный грузовой поезд, с подталкиванием) и направляют его в следующий элемент согласно маршруту (рис. 1). Ключевым принципом работы является проверка состояния блоков delay1 и delay2 (западной и восточной горловин соответственно): если они заняты, агент направляется в sink1 и удаляется, что имитирует отказ в приеме поезда. Если агент прошел от блока source до sink2, то считается, что поезд был принят, обслужен на станции, а затем покинул ее. При движении агента внутри системы учитывается загрузка ее элементов, в частности, если блок queue1 переполнен, то агенты могут быть направлены в queue2. Например, в ситуации, когда главные пути заняты и транзитные поезда принимаются на приемоотправочные пути.

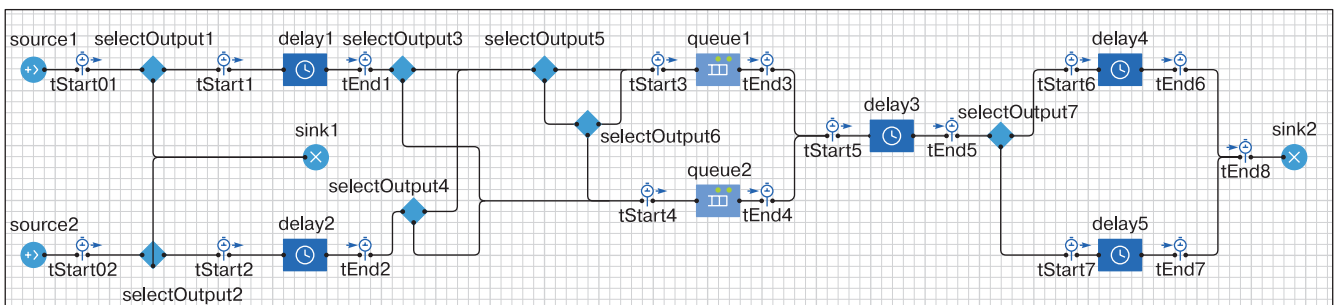


Рис. 1. Модель ARS станции Большой Луг (блоки)*:

source1, 2 — генерация поездопотоков; selectOutput1–7 — определение типа агента и его маршрута; delay1, 2 — работа горловин станции; queue1, 2 — пути парка станции; delay3–5 — выполнение операций с поездами; sink1, 2 — удаление агентов и учет их количества; tStart01, 02, 1–7 и tEnd1–8 — учет времени нахождения агента в блоках

* Источник: данные авторов

Fig. 1. ARS model of the Bolshoy Lug station (blocks)*:

source1, 2 — train flow generation; selectOutput1–7 — agent type and route determination; delay1, 2 — operation of the station throats; queue1, 2 — station yard tracks; delay3–5 — train operations; sink1, 2 — agent deletion and agent counting; tStart01, 02, 1–7 and tEnd1–8 — agent dwell time accounting in blocks

* Source: authors' data

Блоки delay моделируют время выполнения технических операций (движение в горловинах, обработка состава на путях), которое подчиняется равномерному распределению $U(\min; \max)$, где \min и \max — минимальное и максимальное значение времени в минутах для T_1 , T_2 или T_3 , за счет чего учитывается случайный характер работы объекта. Сбор статистических данных (время поступления агента в блок и выхода из него) происходит в tStart и tEnd. Таким образом, модель позволяет оценить пропускную способность станции и эффективность обработки поездов в зависимости от загрузки ее основных элементов. Схема авторской модели ARS приведена на рис. 1.

Математическое описание станции Большой Луг в СеМО. При описании работы станции с помощью методов ТМО выделяются три ее компонента: входящие поездопотоки, структурные элементы станции и маршруты движения поездов между ними.

Входящие поездопотоки. Под заявкой на обслуживание понимается весь поезд. Поездопотоки с запада и востока независимы, поэтому они моделируются отдельными входящими потоками заявок D_1 и D_2 , в которых время между поступлениями фиксировано и равно 12 мин.

Структурные элементы станции описываются в виде СМО с отказами (узлами СеМО), выбор которых обусловлен тем, что станция Большой Луг рассматривается обособленно, без учета соседних перегонов. Это необходимо, так как при текущей интенсивности поездопотоков остановка одного поезда на перегоне приводит к задержкам в движении на всем участке и появлению нештатных ситуаций.

Через горловину в одном направлении может одновременно следовать только один поезд, поэтому две горловины описываются узлами 1, 2, 6 и 7 — одноканальными СМО. Пути станции имеют разную специализацию, и на них выполняются три типа операций с существенно разной продолжительностью времени в минутах (T_1 , T_2 или T_3). Для моделирования их работы используются три узла: узел 3 — трехканальная СМО отображает вместимость главных путей, узел 4 — шестиканальная СМО отображает вместимость приемоотправочных путей, узел 5 — двухканальная СМО, в которой распределение времени обслуживания меняется в зависимости от категорий и направления следования поездов.

Выбор конкретного распределения вероятностей поездопотоков p происходит случайным образом в момент поступления заявки в узел: $p_1 = 0,5$ для T_1 , $p_2 = p_3 = 0,25$ для T_2 и T_3 . Значения вероятностей распределения поездопотоков определяют на основании графика движения поездов. Распределение времени обслуживания в представленных СМО выбрано на основе технологии работы соответствующих элементов

станции. Описание узлов СеМО представлено в табл. 1 в виде кода Кендалла — Башарина:

$$D_i/G/n/m,$$

где D_i — детерминированные потоки заявок, описывающие поступление нечетных ($i = 1$) и четных ($i = 2$) поездопотоков;

символ «#» на первой позиции означает, что параметры входящего в узел потока заявок не могут быть определены по тем или иным причинам;

G — произвольное распределение времени обслуживания;

n — число каналов;

m — число мест в очереди.

Маршруты движения поездов хранятся в маршрутной матрице P . Ее элементы $P_{x,y}$ — вероятности перехода заявки из узла x в узел y — рассчитываются по формуле:

$$P_{x,y} = \frac{n}{N}, \tag{1}$$

где n — число поездов, поступающих в структурный элемент станции за сутки;

N — суммарное число поездов за сутки, движущихся в одном направлении.

Таблица 1

Описание узлов СеМО*

Table 1

Description of queuing network nodes*

Узел	Элемент	Модель	Время обслуживания, мин
1	Движение прибывающего поезда по западной горловине станции	$D_1/G/1/0$	$U(1; 3)$
2	Движение прибывающего поезда по восточной горловине станции	$D_2/G/1/0$	$U(1; 3)$
3	Главные пути	$\#/G/3/0$	Const = 1/60
4	Приемоотправочные пути	$\#/G/6/0$	Const = 1/60
5	Обслуживание транзитного поезда (в т. ч. пассажирский, пригородный)	$\#/G/2/0$	$U(1; 3); p_1 = 0,5$
	Прицепка подталкивающего локомотива в головную часть грузового поезда		$U(18; 24); p_2 = 0,25$
	Прицепка подталкивающего локомотива в хвостовую часть грузового поезда		$U(9; 15); p_3 = 0,25$
6 и 7	Движение отправляющегося поезда по восточной и западной горловинам станции	$\#/G/1/0$	$U(1; 3)$

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Значения поездопотока для формулы (1) определяются из графика движения поездов. Особенность работы железнодорожных станций заключается в том, что транзитные поезда могут приниматься на приемоотправочные пути, если главные заняты. Это учитывается в модели тем, что вероятности переходов поездопотоков с подталкиванием и без составляют $P_{1,3} = 0,75$ и $P_{2,3} = 0,25$, соответственно, вероятности противоположных событий вычисляются как $P_{1,4} = 1 - P_{1,3} = 0,25$ и $P_{2,4} = 1 - P_{2,3} = 0,75$ при наличии свободных мест в узле 3, иначе $P_{1,3} = 0$, $P_{2,3} = 0$. Маршрутная матрица имеет следующий вид:

$$P = \begin{matrix} & O_1 & O_2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \begin{matrix} O_1 \\ O_2 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{1,3} & P_{1,4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{2,3} & P_{2,4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \end{matrix}, \quad (2)$$

где O_i — источники заявок (фиктивные узлы);
1, 2, 3...7 — номера узлов.

На рис. 2 кругами обозначены узлы, стрелками — направление движения заявок, веса 1, 1/2 — ненулевые элементы маршрутной матрицы (2).

Таким образом, в представленной модели в виде СеМО описывается вместимость и продолжительность технологических операций в ключевых элемен-

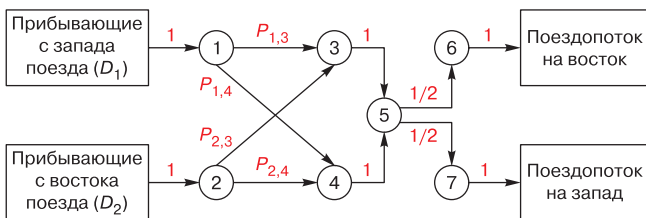


Рис. 2. Схема СеМО*:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — узлы СеМО; $P_{1,3}$, $P_{2,4}$, $P_{2,3}$, $P_{1,4}$ — вероятности перехода поездопотоков из узла в узел; 1, 1/2 — веса заявок (красный цвет)

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Scheme of the queuing network nodes*:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — queuing network nodes; $P_{1,3}$, $P_{2,4}$, $P_{2,3}$, $P_{1,4}$ — probabilities of train flows moving from one node to another; 1, 1/2 — weight matrices (red)

* Source: authors' data

тах станции, непосредственно взаимодействующих с поездопотоком, явно отображаются иерархическая структура системы и прямые и обратные связи между ее частями, для транзитных и грузовых поездов с подталкиванием учитываются разные маршруты внутри станции, включая их динамическое изменение при заполнении конкретных элементов. В итоге модель отображает основной технологический процесс работы станции.

Для исследования построенной модели далее используется имитационная модель работы СеМО, основанная на дискретно-событийном подходе моделирования и методе Монте-Карло и реализованная в виде программы для ЭВМ с использованием авторского алгоритмического аппарата¹ [25].

Вычислительный эксперимент. С помощью построенных моделей выполнены два вычислительных эксперимента. В первом сравниваются результаты моделирования, полученные с помощью обеих моделей, и делаются выводы об их адекватности. Во втором проводится оценка работы станции при уменьшении интервала движения поездов. Для каждого эксперимента выполнялось по 10 пусков программ. Усредненные результаты представлены далее в таблицах. Виртуальное время моделирования каждого пуска — 30 сут.

Эксперимент 1. Проведем сравнительный анализ результатов моделирования, полученных с использованием моделей ARS и СеМО.

Обозначения в табл. 2:

t_i — среднее время нахождения агентов в блоке (заявок в узлах для СеМО), мин;

t_s — среднее время нахождения заявки в системе, мин;

R_i — среднее число агентов, находящихся в блоке в единицу времени (для ARS);

K_i — среднее число заявок в узле (число занятых каналов);

P_{ARS} и P_{QN} — вероятности отказа, полученные с помощью соответствующих моделей;

Δ — относительное отклонение, %.

Время между поступлением поездов T составляет 12 мин.

При построении модели ARS использовалась комбинация агентного и дискретно-событийного подходов, тогда как имитационная модель СеМО реализована исключительно в рамках дискретно-событийной парадигмы. Для разработки моделей применялось различное программное обеспечение: среда AnyLogic и авторское программное обеспечение, созданное

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684839 Российская Федерация. Программа расчета показателей эффективности транспортных объектов и сетей на основе теории массового обслуживания: № 2023683916: заявл. 14.11.2023; опубл. 21.11.2023 / Х. З. Ву, М. Л. Жарков, А. Л. Казаков; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет». EDN: <https://elibrary.ru/vxpvxj>.

Таблица 2

Результаты Эксперимента 1*

Table 2

Experiment 1 results*

Узел	Элемент модели i	Среднее время нахождения агентов в блоке, модель ARS t_i , мин	Среднее время нахождения заявок в блоке, модель СеМО t_i , мин	Относительное отклонение Δ , %	Среднее число агентов, находящихся в блоке в единицу времени R_i , 1/мин	Среднее число заявок в узле K_i	Относительное отклонение Δ , %
1	delay1	2,01	2,01	0	0,17	0,17	0
2	delay2	2,01	2,01	0	0,17	0,17	0
3	queue1	4,13	4,09	0,97	0,34	0,34	0
4	queue2	4,41	4,44	0,68	0,37	0,37	0
5	delay3	9,39	9,41	0,21	1,57	1,56	0,64
6	delay4	1,99	2	0,50	0,17	0,17	0
7	delay5	2,01	2	0,50	0,17	0,17	0
—	—	17,66 ¹	17,70 ¹	0,23	—	—	—

¹ среднее время нахождения заявки в системе t_s , мин

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

на языке С# (Си-шарп). Относительное расхождение результатов моделирования во всех случаях не превышает 1,25%. Полученные показатели согласуются с известными эксплуатационными данными станции Большой Луг, что позволяет сделать вывод о достаточной адекватности разработанных моделей реальному технологическому процессу.

Под отказом в обслуживании понимается ситуация, когда поезд выбивается из расписания и остается на соседней станции из-за занятости рассматриваемой. Через некоторое время он может получить новое расписание и продолжить следование по маршруту. Для рассматриваемого горно-перевального участка Транссиба значения вероятности отказа не должны превышать 0,006. Они составили по расчетам для модели ARS — $P_{ARS} = 0,000247$, для СеМО — $P_{QN} = 0,000250$ ($\Delta = 1,21\%$), т. е. в среднем 1,8 поезда в месяц не будут приняты. Предельное значение вероятности отказа было получено на основе экспертных оценок специалистов по управлению движением ОАО «РЖД».

Среднее число занятых главных (R_3 и K_3) и приемоотправочных (R_4 и K_4) путей значительно меньше, чем их максимальное количество ($R_3 = K_3 = 0,34 < 3$, $R_4 = K_4 = 0,37 < 6$), где 3 и 6 — число главных и приемоотправочных путей согласно техническому описанию станции. Среднее время пребывания (прохождение) поезда на станции не превышает 18 мин. Таким образом, станция работает в штатном режиме и имеет запас пропускной способности. В следующем эксперименте оценим имеющийся запас производительности системы.

Эксперимент 2. Рассмотрим задачу, аналогичную Эксперименту 1. В данном случае отличие состоит в том, что время между поступлением заявок T в потоках D_1 и D_2 последовательно уменьшается с 11 до 9 мин. В табл. 3 представлены результаты моделирования, где P_{loss} — вероятность отказа в соответствующей модели.

Интерпретируем представленные в табл. 3 результаты для станции Большой Луг. При $T = 11$ мин поездопоток составит 131 пару поездов/сут, т. е. на 9,2% больше текущего значения. В этом случае наблюдается незначительный рост вероятности отказа P_{loss} и времени пребывания поезда в системе t_s , что свидетельствует о штатной работе станции (в табл. 3 выделено цветом). При $T = 10$ мин вероятность отказа превышает допустимое значение в 3 раза, а t_s приближается к 28 мин, что на 10 мин больше по сравнению с Экспериментом 1. Это можно расценивать как приближение загрузки станции к ее максимальной пропускной способности. Дальнейший рост объемов транспортной работы, который ожидается к 2035 году, потребует изменения технологии работы и/или проведения реконструкции объекта.

Выводы об эффективности моделей. При $T = 10$ мин в работе отдельных элементов двух моделей появляются значимые различия, которые, тем не менее, не оказывают существенного влияния на конечный результат (P_{loss} и t_s). Такие различия свидетельствуют, что при приближении загрузки системы к некоторому критическому значению структура модели и особенности ее работы становятся ключевым фактором для изучения внутренних процессов выбранного объекта.

Таблица 3

Результаты Эксперимента 2*

Table 3

Experiment 2 results*

Время между поступлением заявок T , мин	Имитационная модель и относительное отклонение Δ , %	Среднее время нахождения агентов (заявок) в блоке (узле), мин							Среднее время нахождения заявки в системе t_s , мин	Вероятность отказа P_{loss}
		1, t_1	2, t_2	3, t_3	4, t_4	5, t_5	6, t_6	7, t_7		
11	ARS	2,06	2,04	6,73	8,47	9,44	2	2	21,78	0,00236
11	CeMO	2,07	2,04	6,85	8,46	9,43	2,01	2	21,15	0,00243
11	Δ , %	0,49	0	1,78	0,12	0,11	0,50	0	2,89	2,97
10	ARS	2,3	2,21	10,69	17,7	9,4	2	2	28,03	0,01836
10	CeMO	2,38	2,22	11,29	16,54	9,46	2	2	27,81	0,01829
10	Δ , %	3,48	0,45	5,61	6,55	0,64	0	0	0,78	0,38
9	ARS	3,15	2,72	14,39	31,09	9,42	2	2	37,73	0,07086
9	CeMO	3,27	2,66	15,93	28,27	9,47	2,01	2	37,18	0,07129
9	Δ , %	3,81	2,21	10,70	9,07	0,53	0,50	0	1,46	0,61

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Тем не менее, регулярно возникают задачи, в которых требуется анализ этого объекта в составе более крупной системы и достаточно найти наиболее значимые параметры его работы, например, при моделировании работы всего железнодорожного участка (Большой Луг – Слюдянка-1). В таком случае можно использовать более простой и универсальный аппарат, позволяющий сократить трудоемкость построения и анализа модели. В данной работе таким инструментом является ТМО, что еще раз подтверждает ее эффективность при исследовании железнодорожных систем.

Обсуждение и заключение. Проанализированы подходы к решению задачи оценки эксплуатационных характеристик железнодорожной станции Большой Луг при условии уменьшения интервала прибытия поездов. В качестве инструментов использованы математическое и компьютерное (имитационное) моделирование. Разработаны две модели работы станции. Первая из них построена в программной среде AnyLogic. Вторая — на основе теории массового обслуживания и авторского программного обеспечения. Модели рассмотрены при определенных упрощающих допущениях, однако даже с учетом этого задачи их разработки и исследования оказались весьма затруднительными.

С помощью построенных моделей были выполнены численные эксперименты по изучению эффективности работы станции и допустимой загрузке при увеличении поездопотоков. На основе полученных результатов установлено, что станция Большой Луг при текущем техническом оснащении способна обрабатывать в штатном режиме поездопоток с интервалом дви-

жения поездов в 11 мин, что соответствует поступлению 131 пары поездов в сутки. Это позволит увеличить грузовое движение на 9,2%, что обеспечит заметный положительный эффект в условиях растущих объемов перевозок на Восточном полигоне, однако полученное значение является предельным, и дальнейший рост поездопотока потребует изменения технологии работы и/или проведения реконструкции станции.

Перспективным направлением для дальнейшего исследования может стать построение и исследование моделей крупных инфраструктурных объектов железных дорог, в частности, всего горно-перевального участка. Вторым возможным направлением является усложнение модельного аппарата, например, анализ внутренних (переходных) процессов, происходящих на станции в результате нарушения графика движения поездов. Возможность применения моделей, приведенных в данной статье, на цифровой железнодорожной станции требует дополнительных исследований.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В. Оценка пропускной способности однопутного участка БАМа с использованием теории массового обслуживания // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 4. С. 370–384. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384>. EDN: <https://elibrary.ru/omugju>.
2. Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V. Estimation of line capacity of single-track section of Baikal-Amur Mainline using mass service theory. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(4):370–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384>. EDN: <https://elibrary.ru/omugju>.
3. Сотников Е. А., Гоник М. М., Хомяков С. В., Михайлов С. В. Имитационная модель определения рациональных размеров неснижаемого резерва локомотивов на станциях их оборота // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 3. С. 157–164. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-157-164>. EDN: <https://elibrary.ru/xrroeh>.
4. Sotnikov E. A., Gonik M. M., Khomyakov S. V., Mikhaylov S. V. Simulation model for determining the rational dimensions of the irreducible reserve of locomotives at the stations of their turnover. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(3):157–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-157-164>. EDN: <https://elibrary.ru/xrroeh>.
5. Козлов П. А., Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Методы исследования проектов развития объектов транспортной инфраструктуры // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной науч.-практ. конф., посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г. М.: РУТ МИИТ, 2021. С. 174–181. <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.25>. EDN: <https://elibrary.ru/wylmqv>.
6. Kozlov P. A., Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Research methods of projects for the development of transport infrastructure facilities. *Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov, the founder of transport science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 22nd October, 2021*. Moscow: Russian University of Transport; 2022. P. 174–181. (In Russ.). <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.25>. EDN: <https://elibrary.ru/wylmqv>.
7. Любченко А. А., Бартош С. В., Смирнов В. А., Castillo P. Á. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 3. С. 87–92. EDN: <https://elibrary.ru/xbfksh>.
8. Lyubchenko A. A., Bartosh S. V., Smirnov V. A., Castillo P. Á. Discrete-event model of a railway junction in the AnyLogic environment. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2016;(3):87–92. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xbfksh>.
9. Рахмангулов А. Н., Корнилов С. Н., Мишкuroв П. Н., Александрин Д. В. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (55). С. 43–59. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-43-59>. EDN: <https://elibrary.ru/hhjeee>.
10. Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N., Mishkurov P. N., Alexandrin D. V. Simulation models in digital twins of railway junctions. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2022;(3(55)):43–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-43-59>. EDN: <https://elibrary.ru/hhjeee>.
11. Александров А. Э., Ковалев И. А., Пермикин В. Ю., Сурин А. В., Лесных В. В. Логическая верификация оптимизационной модели переработки вагонопотоков на сортировочной станции // Транспорт Урала. 2022. № 2 (73). С. 17–22. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2022-2-17-22>. EDN: <https://elibrary.ru/oxnzrs>.
12. Alexandrov A. E., Kovalev I. A., Permikin V. Yu., Surin A. V., Lesnykh V. V. Logic verification of optimization model of car traffic processing at marshalling station. *Transport of the Urals*. 2022;(2(73)):17–22. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oxnzrs>.
13. Бессоненко С. А., Осипов Н. И., Медведев В. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 21–29. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2023_67_21. EDN: <https://elibrary.ru/getujp>.
14. Bessonenko S. A., Osipov N. I., Medvedev V. I. Evaluating the effectiveness of interval train control as an alternative to the constructing second main tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(4(67)):21–29. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/1815-9265_2023_67_21. EDN: <https://elibrary.ru/getujp>.
15. Король Р. Г., Числов О. Н. Моделирование терминально-логистических процессов переработки внешнеторговых грузов на пограничной станции Гродеково // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 258–266. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266>. EDN: <https://elibrary.ru/cgqhjd>.
16. Korol' R. G., Chislov O. N. Simulation of terminal and logistics processes of foreign trade cargo processing at the Grodekovo border station. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):258–266. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266>. EDN: <https://elibrary.ru/cgqhjd>.
17. Багинова В. В., Кузьмин Д. В. Применение алгоритмов маршрутизации агента при разработке дискретно-событийных имитационных моделей с использованием инструментов железнодорожной библиотеки AnyLogic // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (58). С. 109–118. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2023-2-109-118>. EDN: <https://elibrary.ru/pziltm>.
18. Baginova V. V., Kuzmin D. V. Application of agent routing algorithms in the development of discrete-event simulation models using AnyLogic Railway Library tools. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2023;(2(58)):109–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2023-2-109-118>. EDN: <https://elibrary.ru/pziltm>.
19. Власов М. А., Казаков А. Л., Супруновский А. В. Моделирование участковой железнодорожной станции Байкало-Амурской магистрали в среде AnyLogic // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (67). С. 41–52. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2025-3-41-52>. EDN: <https://elibrary.ru/oajteh>.
20. Vlasov M. A., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V. Modeling of a district railway station of the Baikal-Amur Mainline in the AnyLogic environment. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2025;(3(67)):41–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2025-3-41-52>. EDN: <https://elibrary.ru/oajteh>.
21. Дудакова А. В., Упырь Р. Ю. Моделирование технологических процессов на примере работы приемо-отправочного парка участковой станции с использованием среды имитационного моделирования AnyLogic // Общество. 2023. № 3-1 (30). С. 37–40. EDN: <https://elibrary.ru/epqmdp>.
22. Dudakova A. V., Upyr R. Yu. Modeling of technological processes on the example of the operation receiving-departure yard train station using AnyLogic simulation environment. *Society*. 2023;(3-1(30)):37–40. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/epqmdp>.
23. Корнилов С. Н., Мишкuroв П. Н., Антонов А. Н. Оптимизация работы промышленного железнодорожного транспорта в условиях реконструкции на металлургических предприятиях // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 5 (113). С. 78–84. EDN: <https://elibrary.ru/xbijhk>.
24. Kornilov S. N., Mishkurov P. N., Antonov A. N. Optimization of the work of industrial railway transport in the conditions of reconstruction at metallurgical enterprises. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2025;(5(113)):78–84. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xbijhk>.
25. Сотников И. Б. Взаимодействие станций и участков железных дорог. М.: Транспорт, 1976. 270 с.
26. Sotnikov I. B. *Interaction of railway stations and sections*. Moscow: Transport; 1976. 270 p. (In Russ.).

14. Dorda M., Teichmann D. Modelling of Freight Trains Classification Using Queueing System Subject to Breakdowns. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013;2013(1):1–11. <https://doi.org/10.1155/2013/307652>.

15. Шабельников А. Н., Шаповалова Ю. В. Моделирование систем технического обслуживания объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на основе теории массового обслуживания // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 3. С. 165–171. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-165-171>. EDN: <https://elibrary.ru/xgroep>.

Shabel'nikov A. N., Shapovalova Yu. V. Modeling of maintenance systems for railway infrastructure facilities based on the theory of mass service. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(3):165–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-165-171>. EDN: <https://elibrary.ru/xgroep>.

16. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., Грузд А. А. Научно-методический подход к интеграции цифровых технологий в работу железнодорожных грузовых станций и примыкающих путей необщего пользования // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2025. № 3 (118). С. 43–47. EDN: <https://elibrary.ru/xgbqlt>.

Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E., Gruzd A. A. Scientific and methodological approach to integrating digital technologies in railway freight stations and private tracks. *Transport of the Russian Federation*. 2025;(3(118)):43–47. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xgbqlt>.

17. Карасев С. В., Калидова А. Д. Моделирование пропуска поездопотоков через однопутный лимитирующий элемент трассы при организации скоростного движения с использованием существующей инфраструктуры // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 1. С. 34–43. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-34-43>. EDN: <https://elibrary.ru/yrmrxq>.

Karasev S. V., Kalidova A. D. Modeling of train flow handling through a limiting single-track section of the route at the organization of high-speed operation using the existing infrastructure. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(1):34–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-34-43>. EDN: <https://elibrary.ru/yrmrxq>.

18. Weik N., Niebel N., Nießen N. Capacity analysis of railway lines in Germany — A rigorous discussion of the queueing based approach. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2016;6(2):99–115. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.06.001>.

Weik N., Nießen N. Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2020;15(5):100203. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100203>.

20. Казаков А. Л., Пavidис М. М. О современных методах моделирования работы сортировочной станции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 1. С. 110–117. EDN: <https://elibrary.ru/zrnuts>.

Kazakov A. L., Pavidis M. M. On modern methods of studying the operation of a marshalling yard. *Transport infrastructure of the Siberian region*. 2019;1:110–117. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/zrnuts>.

21. Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В., Пavidис М. М. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (51). С. 4–14. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-3-4-14>. EDN: <https://elibrary.ru/jfibuc>.

Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V., Pavidis M. M. Simulation of the world's largest railway marshalling yard using queueing theory. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2021;(3(51)):4–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-3-4-14>. EDN: <https://elibrary.ru/jfibuc>.

22. Бычков И. В., Жарков М. Л., Казаков А. Л. Оценка технико-технологических решений по использованию инфраструктуры на однопутном участке Восточного полигона // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2025. № 1-2. С. 41–51.

Bychkov I. V., Zharkov M. L., Kazakov A. L. Assessment of technical and technological solutions to the operation of infrastructure on the single-track section of the Eastern polygon. *Bulletin of the Unified Scientific Council of JSC "RZD"*. 2025;(1-2):41–51. (In Russ.).

23. Бушуев С. В., Ковалев И. А. Восстановление движения после отказов с применением виртуальной сцепки поездов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10, № 1. С. 64–73. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73>. EDN: <https://elibrary.ru/rxirjc>.

Bushuev S. V., Kovalev I. A. Restoration of traffic after failures using a virtual train coupling. *Transport automation research*. 2024;10(1):64–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73>. EDN: <https://elibrary.ru/rxirjc>.

24. Weik N. Macroscopic traffic flow in railway systems — A discussion of the applicability of fundamental diagrams. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022;23(5):100330. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100330>.

25. Лемперт А. А., Жарков М. Л., Казаков А. Л., Ву Х. З. Моделирование морского контейнерного терминала с использованием сети массового обслуживания // Управление большими системами. 2024. № 112. С. 310–337. <https://doi.org/10.25728/ubs.2024.112.15>. EDN: <https://elibrary.ru/dclwoc>.

Lempert A. A., Zharkov M. L., Kazakov A. L., Vu G. Z. Modeling of a sea container terminal using a queueing network. *Large-Scale Systems Control*. 2024;(112):310–337. (In Russ.). <https://doi.org/10.25728/ubs.2024.112.15>. EDN: <https://elibrary.ru/dclwoc>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвей Алексеевич ВЛАСОВ,

аспирант, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), SPIN-код: 7817-9451, <https://orcid.org/0009-0000-5881-6270>

Александр Леонидович КАЗАКОВ,

д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134); профессор, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), SPIN-код: 8101-9424, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1650>

Антон Викторович СУПРУНОВСКИЙ,

старший преподаватель, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), SPIN-код: 3416-9461, <https://orcid.org/0000-0001-8356-4271>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matvey A. VLASOV,

Postgraduate, Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.), SPIN-code: 7817-9451, <https://orcid.org/0009-0000-5881-6270>

Alexander L. KAZAKOV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (664033, Irkutsk, 134, Lermontova St.); Professor, Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.), SPIN-code: 8101-9424, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1650>

Anton V. SUPRUNOVSKY,

Senior Lecturer, Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.), SPIN-code: 3416-9461, <https://orcid.org/0000-0001-8356-4271>

Alexander L. KAZAKOV. Research direction development, goal setting, problem, conclusions, and recommendations formulation, article editing (40 %).

Anton V. SUPRUNOVSKY. Description of the research object and interpretation of experimental results, article editing (30 %).

ВКЛАД АВТОРОВ

Матвей Алексеевич ВЛАСОВ. Построение моделей. Сбор и подготовка данных для их работы. Проведение вычислительных экспериментов, написание текста статьи, формирование выводов (30 %).

Александр Леонидович КАЗАКОВ. Формирование направления исследования, определение цели, постановка задачи, выводов и рекомендаций, редактирование текста статьи (40 %).

Антон Викторович СУПРУНОВСКИЙ. Описание объекта исследования, интерпретация результатов экспериментов, редактирование текста статьи (30 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Matvey A. VLASOV. Model construction. Data collection and preparation. Computational experiments conduction, article writing, and drawing conclusions (30 %).

Статья поступила в редакцию 24.02.2026, рецензия от первого рецензента получена 12.03.2026, рецензия от второго рецензента получена 16.03.2026, принята к публикации 05.05.2026.

The article was submitted 24.02.2026, first review received 12.03.2026, second review received 16.03.2026, accepted for publication 05.05.2026.