

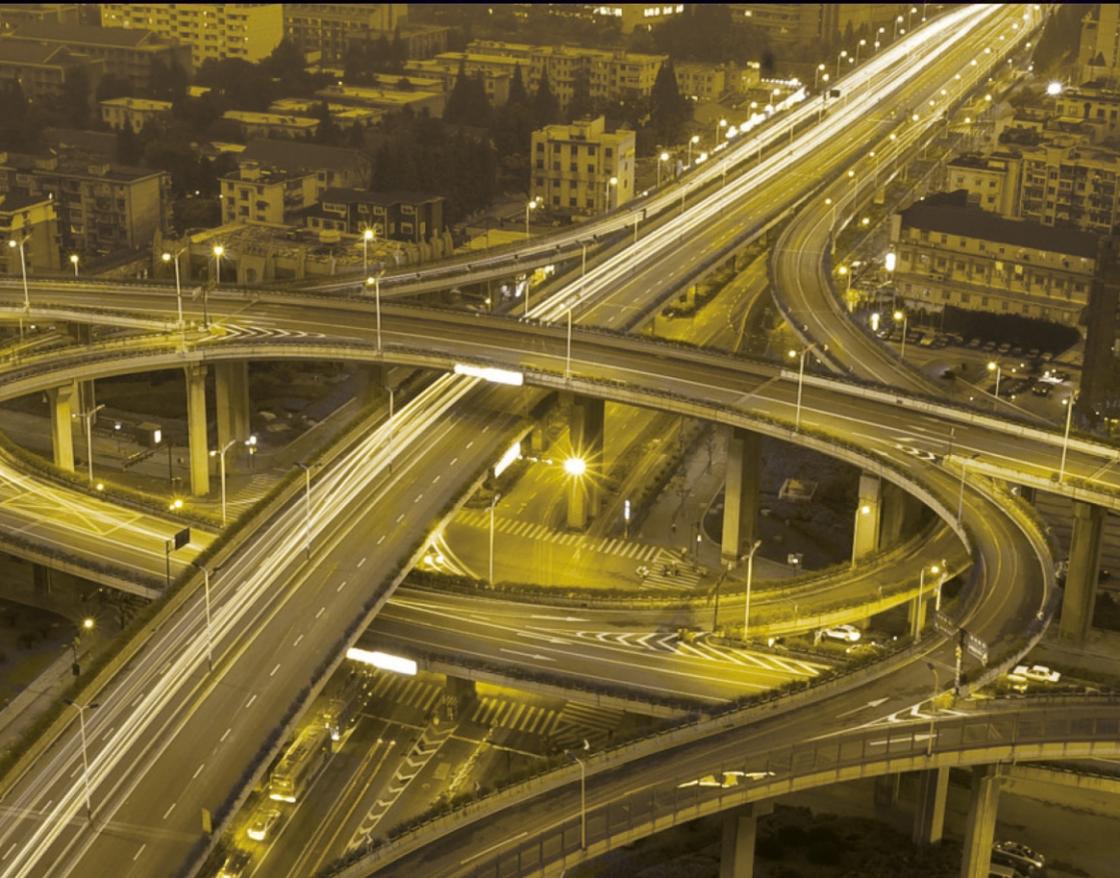
ISSN 3033-5965 (online)

Transportation and Information Technologies in Russia

Транспорт и информационные технологии

Vol. 15, No 3, 2025

Том 15, № 3, 2025



Transportation and Information Technologies in Russia

Транспорт и информационные технологии

Vol. 15, No 3, 2025

Том 15, № 3, 2025

Главный редактор

А.В. Остроух д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Российская Федерация)

Editor-in-Chief

Andrey V. Ostroukh Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department 'Automated Control Systems' (Moscow Automobile And Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation)

Шеф-редактор - Максимов Я.А.

Выпускающие редакторы - Доценко Д.В., Максимова Н.А.

Корректор - Зливко С.Д.

Компьютерная верстка, дизайн - Орлов Р.В.

Технический редактор, администратор сайта - Бяков Ю.В.

Ответственный секретарь - Коробцева К.А.

Красноярск

12+

Transportation and Information Technologies in Russia

Транспорт и информационные технологии

Специализированный научно-технический рецензируемый журнал
Peer-reviewed specialized science and technology journal

Периодичность. 4 номера в год / Periodicity. 4 issues per year

Том 15, № 3, 2025 / Vol. 15, No 3, 2025

<p>Учредитель и издатель: ООО Научно-инновационный центр</p> <p>Журнал основан в 2011 году Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер от 05.09.2025 серии ЭЛ № ФС 77 - 90048)</p> <p>Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук</p> <p>Индексирование и реферирование: РИНЦ Ulrich's Periodicals Directory Google Scholar DOAJ BASE WorldCat OpenAIRE ЭБС IPRbooks ЭБС Znanium ЭБС Лань</p> <p>Адрес редакции, издателя и для корреспонденции: Россия, 660127, Красноярский край, г. Красноярск, ул. 9 Мая, 5 к. 192 E-mail: ijas@ijournal-as.com http://ijournal-as.com/ +7 (995) 080-90-42</p>	<p>Founder and publisher: Science and Innovation Center Publishing House</p> <p>Founded 2011 The edition is registered by the Federal Service of Intercommunication and Mass Media Control Mass media registration certificate EL № FS 77 - 90048, issued September 05, 2025.</p> <p>Transportation and Information Technologies in Russia is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications issued in the Russian Federation, which should publish main scientific results of doctor's and candidate's theses</p> <p>Indexing and Abstracting: RISC Ulrich's Periodicals Directory Google Scholar DOAJ BASE WorldCat OpenAIRE IPRbooks Znanium Lan'</p> <p>Editorial Board Office: 9 Maya St., 5/192, Krasnoyarsk, 660127, Russian Federation E-mail: ijas@ijournal-as.com http://ijournal-as.com/ +7 (995) 080-90-42</p>
---	--

Свободная цена

© Научно-инновационный центр, 2025

Editorial Board Members

Sunil Kumar Yadav, M.Sc. (Mathematics), Ph.D. (Differential Geometry), Assistant Professor (Alwar Institute of Engineering & Technology, India).

Yong Lee, Ph. D., Professor, School of Computer Science and Technology (Harbin Institute of Technology (HIT), China).

Tatiana V. Avdeenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems, Leading Researcher (Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation).

Vitaly N. Vasilenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Technology (Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation).

Alexey V. Voropay, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms and Machines (Kharkiv National Automobile & Highway University, Kharkov, Ukraine).

Vladimir A. Dresvyannikov, Doctor of Economics, Assistant Professor, Professor of the Department of Management and Economic Security (Penza State University, Penza, Russian Federation).

Elena V. Erokhina, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Production Organization and Management (Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation).

Sultan V. Zhankaziev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Traffic Organization and Safety, Intelligent Transport Systems (Moscow Automobile And Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation).

Nikolay S. Zakharov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automotive and Technological Machines Service (Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation).

Sergey V. Kosyakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software for Computer Systems (Ivanovo State Energy University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russian Federation).

Andrey V. Kochetkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Technological Machines (Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation).

Mikhail N. Krasnyanskiy, Doctor of Technical Sciences, Rector (Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation).

Aleksey L. Manakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Technology of Transport Engineering and Machine Operation", Rector (Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation).

Oksana D. Pokrovskaya, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Management of Operational Work" (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport, St. Petersburg, Russian Federation).

Boris Yu. Serbinovskiy, Doctor of Economics, Professor of the Department of Systems Analysis and Management of the Faculty of High Technologies (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation).

Ilya A. Khodashinsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Systems in Management and Design (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation).

Vyacheslav P. Shuvalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Discrete Communications and Metrology (Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russian Federation).

Nikolai N. Yakunin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Motor Transport (Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation).

Члены редакционной коллегии

Sunil Kumar Yadav, M.Sc. (Mathematics), Ph.D. (Differential Geometry), Assistant Professor (Alwar Institute of Engineering & Technology, India).

Yong Lee, Ph. D., Professor, School of Computer Science and Technology (Harbin Institute of Technology (HIT), China).

Авдеенко Татьяна Владимировна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры АСУ, вед. науч. сотрудник НОЦ ИИТБ (Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация).

Василенко Виталий Николаевич, доктор технических наук, профессор, декан Технологического факультета (Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Российская Федерация).

Воропай Алексей Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Деталей машин и теории механизмов и машин (Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина).

Дресвянников Владимир Александрович, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры «Менеджмент и экономическая безопасность» (Пензенский государственный университет, Пенза, Российская Федерация).

Ерохина Елена Вячеславовна, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры организации и управления производством (Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация).

Жанказиев Султан Владимирович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой "Организация и безопасность движения, интеллектуальные транспортные системы" (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Российская Федерация).

Захаров Николай Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сервиса автомобилей и технологических машин (Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация).

Косяков Сергей Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения компьютерных систем (ФГБОУ ВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина", Иваново, Российская Федерация).

Кочетков Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобиля и технологические машины (ФГАОУ ВО

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация).

Краснянский Михаил Николаевич, доктор технических наук, ректор (Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация).

Манаков Алексей Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», ректор (федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»), г. Новосибирск, Российская Федерация).

Покровская Оксана Дмитриевна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация).

Сербиновский Борис Юрьевич, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления факультета высоких технологий (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

Ходашинский Илья Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Российская Федерация).

Шувалов Вячеслав Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Передачи дискретных сообщений и метрологии (Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация).

Якунин Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта (Оренбургский государственный университет, Оренбург, Российская Федерация).

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-371

EDN: YYZTNL

УДК 656.11:004.94



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Г.Г. Дудайти, А.И. Сазонов, М.Д. Ларин, А.С. Тришин

Аннотация

Обоснование. В условиях ускоренной урбанизации оптимизация логистической инфраструктуры становится важнейшим направлением в обеспечении устойчивого и эффективного функционирования городской мобильности. Увеличение плотности транспортных потоков, рост требований к экологической безопасности и ограниченность городского пространства требуют внедрения комплексных решений, основанных на цифровых технологиях и системной интеграции различных видов транспорта.

Цель. Обоснование эффективных подходов к оптимизации городской транспортной сети с использованием цифровых технологий, интеллектуальных транспортных систем и мультимодальных решений, направленных на повышение пропускной способности, сокращение задержек и снижение экологической нагрузки.

Материалы и методы. В качестве методологической основы используются принципы системного анализа, сравнительное изучение реализованных транспортных решений, а также имитационное моделирование транспортных потоков с использованием программного комплекса SUMO, позволяющего оценить эффективность различных сценариев управления городской мобильностью. Моделирование проводилось для типовой городской агломерации с учетом параметров реального трафика.

Результаты. Применение адаптивного светофорного регулирования снижает среднюю задержку на перекрестках до 45%, а выбросы

CO₂ – до 24 % по сравнению с базовым сценарием. Кроме того, проведенный анализ современных технологических и организационных решений подтвердил высокую эффективность интеграции интеллектуальных транспортных систем, платформ обработки больших данных и мультимодальных стратегий в обеспечении устойчивого функционирования городской транспортной сети.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы; городская мобильность; цифровизация; электротранспорт; экологическая устойчивость; городской транспорт

Для цитирования. Дудайти, Г. Г., Сазонов, А. И., Ларин, М. Д., & Тришин, А. С. (2025). Способы оптимизации работы городской транспортной сети. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 7–26. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-371>

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

METHODS FOR OPTIMIZING URBAN TRANSPORT NETWORK PERFORMANCE

G.G. Dudaiti, A.I. Sazonov, M.D. Larin, A.S. Trishin

Abstract

Background. In the context of accelerated urbanization, the optimization of logistics infrastructure has become a critical component in ensuring the sustainable and efficient functioning of urban mobility. The increasing density of traffic flows, growing environmental safety requirements, and limited urban space necessitate the implementation of integrated solutions based on digital technologies and the systemic integration of various modes of transport.

Purpose. To substantiate effective approaches for optimizing urban transport networks through the use of digital technologies, intelligent transport systems, and multimodal strategies aimed at increasing throughput, reducing delays, and lowering environmental impact.

Materials and methods. The methodological framework is based on systems analysis principles, comparative assessment of implemented transport practices, and traffic flow simulation using the SUMO software package, which allows for evaluating the effectiveness of different urban mobility management scenarios. The modeling was conducted for a representative urban agglomeration, taking into account real traffic parameters.

Results. The application of adaptive traffic signal control reduced average intersection delays by up to 45% and CO₂ emissions by up to 24% compared to the baseline scenario. Furthermore, the analysis of modern technological and organizational solutions confirmed the high effectiveness of integrating intelligent transport systems, big data platforms, and multimodal strategies in ensuring the sustainable performance of urban transport networks.

Keywords: intelligent transport systems; urban mobility; digitalization; electric transport; environmental sustainability; urban transport

For citation. Dudaiti, G. G., Sazonov, A. I., Larin, M. D., & Trishin, A. S. (2025). Methods for optimizing urban transport network performance. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 7–26. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-371>

Введение

Стремительное развитие городов является одной из важнейших тенденций глобального социально-экономического преобразования. Согласно данным ООН, более 4 млрд человек – свыше половины населения мира – проживают в городских агломерациях, и это значение продолжает увеличиваться. В совокупности с общим расширением городской застройки эта тенденция оказывает значительное давление на транспортную инфраструктуру, что сопровождается перегрузкой сетей, снижением пропускной способности и ростом негативного экологического воздействия. В этих условиях традиционные подходы к организации городской мобильности оказываются недостаточно эффективными и требуют внедрения инновационных решений, основанных на современных технологиях и системной интеграции.

Целью настоящего исследования является формирование научно обоснованной концепции оптимизации городской транспортной сети с акцентом на применение интеллектуальных транспортных систем (ИТС), цифровых платформ управления, а также моделей интеграции различных видов транспорта.

Методологическая основа исследования включает системный подход, применяемый для анализа взаимосвязей между элементами транспортной инфраструктуры; методы сравнительного анализа, используемые при оценке эффективности реализованных решений в различных урбанизированных регионах; а также методы математического моделирования и анализа данных, позволяющие идентифицировать оптимальные сценарии регулирования транспортных потоков и прогнозирования загрузки сети.

Основная часть

Современное состояние городской транспортной сети

Городские транспортные системы во многих странах мира функционируют в условиях высокой нагрузки, вызванной сочетанием демографического роста, пространственной экспансии урбанизированных территорий и увеличения плотности транспортных потоков. Согласно исследованиям аналитической компании JATO Dynamics, общее количество автомобилей в мире в 2024 году выросло до 1,475 млрд – это приблизительно 182 автомобиля на 1000 человек.

Проблема перегруженности транспортной инфраструктуры актуальна даже для городов с развитой системой общественного транспорта [1]. В Москве, например, средняя скорость движения автомобилей составляет 30 км/ч в дневное время при благоприятной обстановке. В центре Нью-Йорка, особенно в районе Манхэттена, средняя скорость автомобильного движения – всего 7-11 км/ч, тогда как в других крупных городах США (например, Бостон, Чикаго) этот показатель колеблется в пределах 35-45 км/ч. Для сравнения, в ряде европейских городов ситуация с транспортной доступностью аналогична: так, в центре Парижа средняя ско-

рость автомобильного движения составляет около 11 км/ч, а на кольцевой автодороге Периферик – порядка 34 км/ч, что сопоставимо с показателями мегаполисов с высокой плотностью застройки и ограниченным улично-дорожным пространством.

Общественный транспорт на фоне устойчивого роста пассажиропотока также сталкивается с серьезными проблемами, связанными с перегрузкой, устареванием инфраструктуры и несоответствием потребностям населения [2]. По данным Международного союза общественного транспорта (UITP), одним из значимых показателей эффективности транспортной системы является время ожидания пассажира в часы пик. В большинстве крупных городов мира оно колеблется от 6 до 12 минут, однако в ряде городов может превышать 12 минут, что свидетельствует о перегруженности сети и недостаточной пропускной способности (рис. 1).

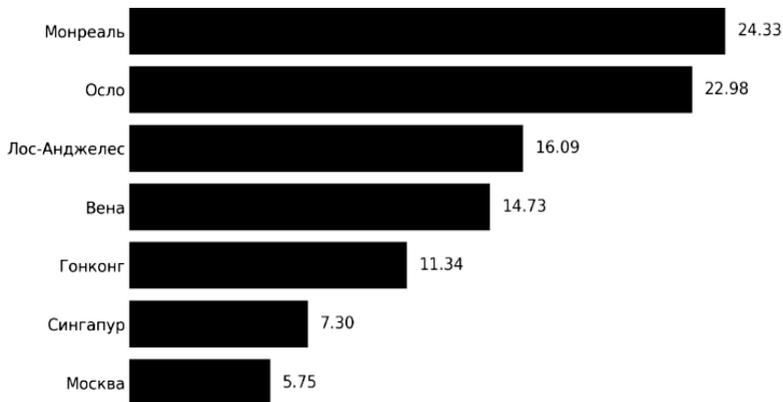


Рис. 1. Среднее время ожидания общественного транспорта в часы пик, мин

Маршруты общественного транспорта часто плохо адаптированы к современной географии городской активности, особенно в периферийных районах, что снижает его доступность и стимулирует рост использования личных автомобилей, усиливая нагрузку на дорожную сеть и снижая общую эффективность транспортной системы [3]. Так, например, по данным UITP, протяженность маршрутов

общественного транспорта на 100 000 жителей в Гонконге – 23 км, в Нью-Йорке – 5 км, в Париже – 8 км, в Сиднее – 9 км.

Таким образом, состояние городской транспортной инфраструктуры во многих городах мира можно охарактеризовать как перегруженное, фрагментированное и недостаточно адаптированное к современным требованиям мобильности.

Цифровая трансформация и применение ИТС в управлении городской мобильностью

В условиях растущей сложности городской мобильности цифровизация транспортной инфраструктуры становится неотъемлемым элементом устойчивого и эффективного управления транспортными потоками. ИТС представляют собой совокупность технологических решений, основанных на интеграции информационных, телекоммуникационных и вычислительных технологий с элементами транспортной сети. Основной задачей ИТС является повышение пропускной способности дорог, сокращение времени поездки, снижение аварийности и минимизация воздействия на окружающую среду за счет адаптивного и прогнозируемого управления движением [4]. По данным Grand View Research, размер мирового рынка ИТС в 2024 году оценивался в 54,5 млрд долларов США (рис. 2).

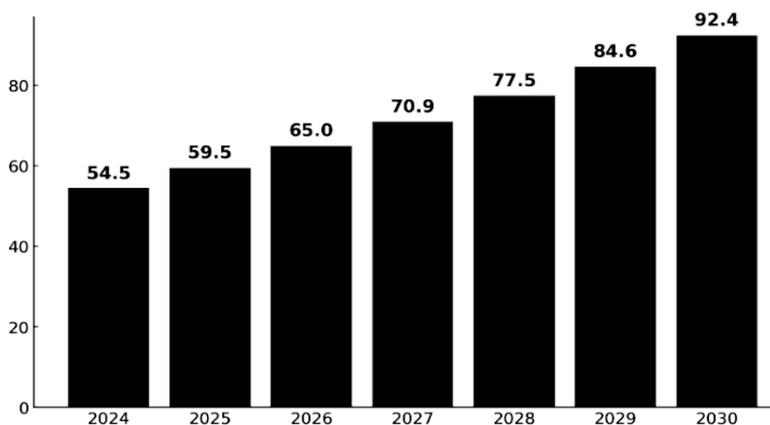


Рис. 2. Размер мирового рынка ИТС, млрд долларов

Одним из важнейших компонентов ИТС является **система адаптивного управления дорожным движением**, основанная на применении датчиков, камер и алгоритмов анализа данных в реальном времени [5]. Она позволяет регулировать работу светофоров с учетом текущей загруженности, автоматически перенаправлять потоки транспорта в случае аварий или перегрузок, а также информировать участников движения через цифровые табло и мобильные приложения. Например, по данным Министерства транспорта США, адаптивное управление сигналами дорожного движения позволяет сократить количество остановок на 10-41%, и задержек транспорта в целом на 5-42%.

В России эффективность внедрения систем адаптивного управления дорожным движением на региональном уровне подтверждается практическими результатами пилотного проекта, реализованного в городе Пенза с населением около 500 тысяч человек. По данным платформы «ИТС России», на одной из ключевых городских магистралей – улице Терновского – была внедрена система сетевого адаптивного управления светофорами. В результате средняя скорость движения возросла на 125% – с 20 до 45 км/ч, время функционирования участка в режиме перегрузок сократилось на 67% – с 3 до 1 часа, а пропускная способность в часы пик увеличилась на 48%.

Неотъемлемой частью построения эффективной транспортной политики в современных городах являются **платформы анализа больших данных**. Используемые источники данных – от навигационных сигналов до видеоаналитики – позволяют не только отслеживать и прогнозировать транспортные потоки, но и обеспечивают адаптивное управление инфраструктурой в режиме реального времени (таблица 1).

Интеграция таких источников в единые цифровые платформы позволяет переходить от реактивного управления к проактивному моделированию и прогнозированию транспортной ситуации. Это значительно повышает адаптивность городской транспортной

сети, снижает издержки и способствует более рациональному использованию инфраструктуры. Например, согласно данным Texas A&M Transportation Institute, оптимизация автобусных маршрутов с использованием больших данных привела к сокращению времени поездок до 20 %

Таблица 1.

Применение больших данных в ИТС [6, 7]

Источник данных	Функции и применение	Применение в ИТС
GPS-навигаторы	Отслеживание положения транспортных средств, построение маршрутов.	Построение прогностических моделей движения.
Мобильные устройства	Сбор данных о перемещениях пассажиров, прогнозирование загрузки.	Анализ транспортного спроса и плотности потоков.
Платежные системы	Анализ поездок и трат, оптимизация тарифных моделей.	Оценка эффективности маршрутов и расписаний
Камеры видеонаблюдения	Распознавание трафика, фиксация загруженности и нарушений.	Управление сигналами, моделирование ситуаций в реальном времени.

Еще одним направлением цифровой трансформации городской мобильности являются **автоматизированные системы мониторинга общественного транспорта**. Они обеспечивают непрерывное слежение за перемещением и контроль соблюдения графиков. Развитие таких систем опирается на современные архитектуры потоковой обработки данных в режиме реального времени, обеспечивающие высокую надежность и аналитическую доступность [8]. Подобные технологии позволяют интегрировать данные от GPS, датчиков и расписаний в единую платформу, повышая точность управления транспортом и оперативность реагирования. Например, в Чикаго внедрение таких решений позволило снизить долю маршрутов с нарушением равномерности движения с 3,9 % до 2,3 % за два года.

Таким образом, цифровизация в целом и внедрение ИТС радикально меняют традиционные подходы к управлению городской

мобильностью – переход от фрагментарного, реактивного управления к проактивному, основанному на аналитике и прогнозировании, становится новой нормой.

Формирование мультимодальной городской мобильности как способ оптимизации работы городской транспортной сети

Одной из тенденций в развитии городской мобильности является переход от изолированных форм транспорта к их интеграции в единую, согласованную систему. Практика показывает, что это способствует сокращению времени поездки, повышению устойчивости трафика и более рациональному использованию инфраструктуры (таблица 2).

Таблица 2.

Современные концепции интеграции транспортных систем [9, 10]

Концепция	Задачи	Элементы реализации
Transport hub (транспортно-пересадочный узел)	Концентрация разных видов транспорта в одной точке пересадки.	Объединение метро, автобусов, электричек; наличие навигации, сервисов, парковок.
Park-and-ride (система «перехватывающих парковок»)	Перехватывающие парковки на подступах к центру города.	Стоянка личного авто + пересадка на общественный транспорт.
Mobility as a service (мобильность как услуга)	Интеграция всех видов транспорта через цифровую платформу.	Мобильные приложения, маршрутный планировщик, единая оплата, персонализированные предложения.
Last-mile integration (интеграция «последней мили»)	Решения для последних километров маршрута.	Велопрокат, электросамокаты, пешеходные зоны, микроавтобусы.
Smart ticketing (интеллектуальная (унифицированная) система оплаты)	Унифицированная система оплаты всех видов транспорта.	Единые транспортные карты, NFC, бесконтактная оплата через приложения.

Мультимодальная модель особенно эффективна в условиях мегаполисов и городских агломераций, где существует значительное пространственное разделение между местами проживания и деловой активностью. Примером эффективной интеграции транспортных форм служит пилотный проект MARTA Reach, реализованный в августе

2023 года в пригородных зонах Атланты (США). Он объединил традиционные фиксированные автобусные маршруты с on-demand микроавтобусами, что позволило значительно улучшить охват территорий с низкой плотностью населения и слаборазвитой транспортной сетью [11]. В результате более 50 % всех совершенных поездок в рамках проекта стали мультимодальными, то есть включали пересадку на железнодорожный транспорт. Это снизило зависимость жителей от личных автомобилей и коммерческих такси.

Еще одним примером формирования мультимодальной модели городской среды являются сервисы каршеринга и велопроката, которые интегрируются с системой общественного транспорта и существенно расширяют возможности передвижения [12]. По данным Statista, число пользователей каршеринга во всем мире в 2024 году достигло 57 млн человек и этот показатель продолжает расти (рис. 3).

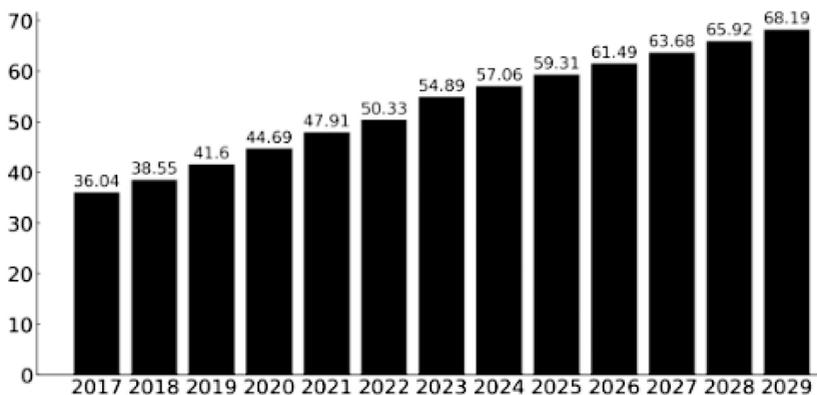


Рис. 3. Число пользователей каршеринга во всем мире, млн человек

По данным на конец 2024 года, каршеринг в Москве остается крупнейшим в мире – в нем насчитывается более 40 000 автомобилей и свыше 1,7 млн активных пользователей. Ежедневно совершается около 140 000 поездок, что позволяет снизить нагрузку на личный автотранспорт, особенно в центральных районах города. Развитие таких форм персонализированной мобильности способ-

ствуется оптимизации городской транспортной сети, позволяя снизить количество одиночных автопоездов, уменьшить потребность в парковках и сократить выбросы загрязняющих веществ.

Экологическая устойчивость городской транспортной системы

Несмотря на меры по декарбонизации экономики и активное развитие возобновляемых источников энергии, антропогенные выбросы продолжают расти, оказывая прямое влияние на климатическую систему планеты. Согласно отчетам Международного энергетического агентства, общие выбросы CO_2 , связанные с энергетикой, в 2024 году увеличились на 0,8 %, достигнув рекордного уровня в 37,8 гигатонн CO_2 . Это привело к рекордной концентрации CO_2 в атмосфере в 422,5 частей на миллион, что примерно на 50 % выше, чем доиндустриальный уровень. При этом в 2024 году транспорт обеспечил около 21 % глобальных выбросов CO_2 , более половины из них пришлось на автотранспорт в городах. Снижение экологической нагрузки требует системного перехода от традиционного топлива к электрическим и низкоуглеродным решениям, а также переосмысления логистических схем в условиях высокой плотности городской застройки [13].

Одним из приоритетных направлений в рамках декарбонизации городской мобильности является **развитие электротранспорта**. По данным IEA, количество электромобилей во всем мире по сценарию APS к 2035 году составит более 510 млн, из них автобусов – до 5 млн (рис. 4).

Увеличение доли электротранспорта свидетельствует о структурной трансформации городской транспортной сети в сторону устойчивых и низкоуглеродных решений, направленных на снижение загрязнения воздуха, уменьшение выбросов CO_2 и повышение энергоэффективности городской мобильности.

Другим важным аспектом является **экологизация и оптимизация городской логистики**, особенно в контексте так называемой «последней мили» (last-mile delivery) – заключительного этапа доставки товаров к конечному потребителю. По данным Precedence

Research, объем мирового рынка доставки «последней мили» в 2024 году составил 169,95 млрд долларов США. По прогнозам, он вырастет до примерно 446,29 млрд долларов США к 2034 году.

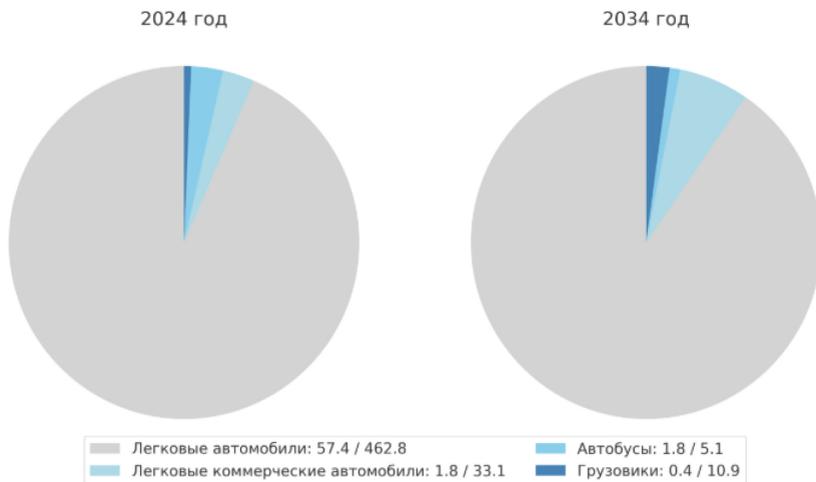


Рис. 4. Количество электромобилей во всем мире по сценарию APS, млн

Рост электронной коммерции сопровождается увеличением количества малотоннажного транспорта, что создает дополнительные выбросы и усиливает нагрузку на улично-дорожную сеть. В ответ на это во многих городах внедряются решения по консолидации грузопотоков, организации малых логистических хабов, использованию электротранспорта и велосипедных курьеров на последнем этапе доставки [14]. Например, почтовая служба США (USPS) планирует закупку 66 000 электрических фургонов до 2028 года. В России, согласно исследованиям онлайн-сервиса доставки СберМаркет, в 2024 году каждый третий курьер использовал велосипед, а 22% из них – электровелосипед.

Таким образом, трансформация городского транспорта предполагает не только технологические инновации, но и институциональные, планировочные и поведенческие изменения. Эффективное сочетание электрификации и реформы городской логистики

позволяет формировать устойчивую модель мобильности, ориентированную на снижение углеродного следа и повышение качества городской среды.

Практическая реализация стратегий оптимизации городской транспортной сети на основе инструментов имитационного моделирования

С целью количественной оценки эффективности различных стратегий оптимизации городской транспортной сети было проведено моделирование с использованием программного комплекса SUMO (Simulation of Urban MObility). Объектом моделирования стала центральная часть условного города, сопоставимая по морфологии с типовой средней городской агломерацией численностью 300–500 тыс. человек, включающая жилую и административно-деловую застройку, сеть магистралей непрерывного и регулируемого движения.

Моделируемый участок представляет собой центральную часть городской улично-дорожной сети протяженностью 10,8 км, включающую 10 регулируемых перекрестков. В утренние часы пик по данному участку проходит в среднем около 2400 транспортных средств в час. Структура трафика характеризуется доминированием легкового автотранспорта (82 %), при участии маршрутных транспортных средств (12 %) и прочих видов (6 %).

В рамках исследования были рассмотрены три сценария:

- Базовый (инерционный) сценарий: текущая организация движения без цифрового управления.
- Сценарий внедрения адаптивного светофорного регулирования: применение алгоритмов управления сигналами на основе данных в реальном времени.
- Сценарий пространственной оптимизации: перераспределение уличного пространства в пользу общественного транспорта, введение ограничений для транзита и нерегулярного транспорта.

Для каждого из сценариев была произведена количественная оценка ключевых параметров транспортной эффективности, вклю-

чая скорость движения, задержки, устойчивость потока и уровень выбросов (таблица 3).

Таблица 3.

Сравнительный анализ показателей эффективности транспортной сети в различных сценариях моделирования

Показатель	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Средняя скорость движения, км/ч	19,2	26,4	23,1
Средняя задержка на перекрестках, сек	51	28	35
Доля транспорта, теряющего более 20 % времени, %	58	33	39
Время прохождения участка, мин	21,7	15,3	17,9
Расчётные выбросы CO ₂ , на участок, г/ТС	138	104	117

Результаты моделирования показывают, что внедрение адаптивного регулирования (сценарий 2) позволяет достичь наилучших показателей: средняя задержка снижается на 45 %, а выбросы CO₂ – на 24 % по сравнению с базовым сценарием. Сценарий пространственной оптимизации демонстрирует умеренные улучшения, особенно при условии дополнительного внедрения приоритетов для общественного транспорта и ограничения доступа личного автотранспорта. Таким образом, моделирование подтверждает эффективность цифровых инструментов управления в условиях ограниченной возможности физической реконструкции уличной сети.

Заключение

Оптимизация городской транспортной сети требует комплексного подхода, включающего как цифровизацию управления движением, так и пространственную и функциональную интеграцию различных видов транспорта. ИТС, платформы анализа больших данных, внедрение адаптивного светофорного регулирования и переход к мультимодальной мобильности демонстрируют значительный потенциал в повышении эффективности городской мобильности, снижении времени поездки и уменьшении выбросов. Имитационное моделирование подтверждает, что даже частичное

внедрение ИТС может обеспечить существенные улучшения по сравнению с инерционным сценарием, особенно в условиях высокой загрузки магистралей.

В то же время, устойчивое развитие транспортной системы невозможно без экологической трансформации – в первую очередь за счет электрификации подвижного состава и реформы городской логистики. Данные указывают на необходимость стратегической координации между транспортной, энергетической и цифровой политикой. Интеграция технических, институциональных и поведенческих решений должна стать основой для формирования гибкой, адаптивной и экологически безопасной городской транспортной среды, способной эффективно реагировать на вызовы урбанизации, изменения климата и роста мобильности населения.

Список литературы

1. Какалыева, А., & Керими, К. (2024). Оптимизация процессов в транспортной логистике: современные подходы, инновации и вызовы в контексте глобализации. *Всемирный учёный*, 1(25), 889–895.
2. Гурбанов, Б., Аннагелдиева, Н., & Джапаров, О. (2024). Взаимосвязь плотности застройки и развития общественного транспорта в контексте устойчивого градостроительства. *Вестник науки*, 4(12), 1861–1864. EDN: <https://elibrary.ru/JCQLNZ>
3. Xiao, M., Chen, L., Feng, H., Peng, Z., & Long, Q. (2024). Smart city public transportation route planning based on multi-objective optimization: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(6), 3351–3375. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10076-9>. EDN: <https://elibrary.ru/CYCXXD>
4. Sarwatt, D. S., Lin, Y., Ding, J., Sun, Y., & Ning, H. (2024). Metaverse for intelligent transportation systems (ITS): A comprehensive review of technologies, applications, implications, challenges and future directions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(7), 6290–6308. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3347280>

5. Тихомиров, П. В., Митряев, Н. С., & Кухарев, К. С. (2024). Повышение эффективности систем управления улично-дорожной сетью. *Мир транспорта и технологических машин*, 120–122. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-2-1\(85\)-120-126](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-2-1(85)-120-126). EDN: <https://elibrary.ru/DCAXYU>
6. Сысоенко, М. В., & Лебедева, А. С. (2024). Анализ применения технологий Индустрии 4.0 в интеллектуальных транспортных системах. *Экономика. Право. Инновации*, 4, 30–39. <https://doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-30-39>. EDN: <https://elibrary.ru/MVPWMQ>
7. Miftah, M., Desrianti, D. I., Septiani, N., Fauzi, A. Y., & Williams, C. (2025). Big data analytics for smart cities: Optimizing urban traffic management using real-time data processing. *Journal of Computer Science and Technology Application*, 2(1), 14–23.
8. Terletska, K. (2025). Architecting event-driven stream processing: Technologies for reliability and analytical availability in distributed computing systems. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 8(3), 667–671.
9. Мальшев, М. И. (2024). Управление формированием комплексных транспортных систем в процессе интеграции мультимодальных коридоров и региональной инфраструктуры на основе киберфизической модели. *Мир транспорта и технологических машин*, 3–10. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-2\(87\)-3-9](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-2(87)-3-9). EDN: <https://elibrary.ru/ERDHQI>
10. Мазурина, А. В., & Степанова, Т. В. (2022). Цифровая трансформация логистики «последней мили»: теоретический анализ. *Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Экономика и управление*, 8(4), 50–60. EDN: <https://elibrary.ru/WCQWHS>
11. Van Henteryck, P., Riley, C., Trasatti, A., Guan, H., Santanam, T., Huertas, J. A., Dalmeijer, K., Watkins, K., Drake, J., & Baskin, S. (2023). *MARTA Reach: Piloting an on-demand multimodal transit system in Atlanta*. Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1, 1–31.

12. Слободчиков, Н. А., Дергачев, А. И., & Куранова, О. Н. (2023). Перспективное развитие новых услуг сервиса в городском транспортном потоке. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, 20(2), 279–289. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-2-279-289>. EDN: <https://elibrary.ru/JQAPML>
13. Кирильчук, И. О., & Емельянов, И. П. (2024). Экологические аспекты внедрения интеллектуальных транспортных систем в управление транспортной инфраструктурой современного города. *Управленческий учёт*, 8, 50–56. EDN: <https://elibrary.ru/KSPPCD>
14. Гарун, С. С., & Султанов, Н. Г. (2024). Экологизация умных городов: влияние цифровых технологий на устойчивое развитие. *Региональные проблемы преобразования экономики*, 12, 90–99. <https://doi.org/10.26726/rppe2024v12euvct>. EDN: <https://elibrary.ru/DRLSDS>

References

1. Kakalyeva, A., & Kerimi, K. (2024). Optimization of processes in transport logistics: Modern approaches, innovations and challenges in the context of globalization. *World Scientist*, 1(25), 889–895.
2. Gurbanov, Y., Annageldieva, N., & Japarov, O. (2024). The relationship between building density and public transport development in the context of sustainable urban planning. *Bulletin of Science*, 4(12), 1861–1864. EDN: <https://elibrary.ru/JCQLNZ>
3. Xiao, M., Chen, L., Feng, H., Peng, Z., & Long, Q. (2024). Smart city public transportation route planning based on multi-objective optimization: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(6), 3351–3375. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10076-9>. EDN: <https://elibrary.ru/CYCXXD>
4. Sarwatt, D. S., Lin, Y., Ding, J., Sun, Y., & Ning, H. (2024). Metaverse for intelligent transportation systems (ITS): A comprehensive review of technologies, applications, implications, challenges and future directions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(7), 6290–6308. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3347280>

5. Tikhomirov, P. V., Mitryaev, N. S., & Kukharev, K. S. (2024). Improving the efficiency of traffic management systems. *World of Transport and Technological Machines*, 120–122. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-2-1\(85\)-120-126](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-2-1(85)-120-126). EDN: <https://elibrary.ru/DCAXYY>
6. Sysoenko, M. V., & Lebedeva, A. S. (2024). Analysis of Industry 4.0 technologies in intelligent transport systems. *Economics. Law. Innovations*, 4, 30–39. <https://doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-30-39>. EDN: <https://elibrary.ru/MVPWMQ>
7. Miftah, M., Desrianti, D. I., Septiani, N., Fauzi, A. Y., & Williams, C. (2025). Big data analytics for smart cities: Optimizing urban traffic management using real-time data processing. *Journal of Computer Science and Technology Application*, 2(1), 14–23.
8. Terletska, K. (2025). Architecting event-driven stream processing: Technologies for reliability and analytical availability in distributed computing systems. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 8(3), 667–671.
9. Malyshev, M. I. (2024). Managing the formation of integrated transport systems through the integration of multimodal corridors and regional infrastructure based on a cyber-physical model. *World of Transport and Technological Machines*, 3–10. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-2\(87\)-3-9](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-2(87)-3-9). EDN: <https://elibrary.ru/ERDHIQI>
10. Mazurina, A. V., & Stepanova, T. V. (2022). Digital transformation of last-mile logistics: A theoretical analysis. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Economics and Management*, 8(4), 50–60. EDN: <https://elibrary.ru/WCQWHS>
11. Van Hentenryck, P., Riley, C., Trasatti, A., Guan, H., Santanam, T., Huertas, J. A., Dalmeijer, K., Watkins, K., Drake, J., & Baskin, S. (2023). *MARTA Reach: Piloting an on-demand multimodal transit system in Atlanta*. Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1, 1–31.
12. Slobodchikov, N. A., Dergachev, A. I., & Kuranova, O. N. (2023). Prospective development of new service offerings in urban traffic flow. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 20(2), 279–289.

<https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-2-279-289>. EDN: <https://elibrary.ru/JQAPML>

13. Kirilchuk, I. O., & Emelyanov, I. P. (2024). Environmental aspects of implementing intelligent transport systems in managing modern city transport infrastructure. *Management Accounting*, 8, 50–56. EDN: <https://elibrary.ru/KSPPCD>
14. Garun, S. S., & Sultanov, N. G. (2024). Greening smart cities: The impact of digital technologies on sustainable development. *Regional Problems of Economic Transformation*, 12, 90–99. <https://doi.org/10.26726/rppe2024v12euvct>. EDN: <https://elibrary.ru/DRLSDS>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Дудайти Георгий Георгиевич, магистр

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

ул. Мясницкая, 20, г. Москва, 101000, Российская Федерация
giodudayti@rambler.ru

Сазонов Антон Игоревич, специалист

Московский авиационный институт

Волоколамское шоссе, 4, г. Москва, 125993, Российская Федерация

Sazonov.gmt@mail.ru

Ларин Максим Дмитриевич, магистр

Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова пер. Стремянный, 36, г. Москва, 115054, Российская Федерация

larinmaxim23@gmail.com

Тришин Александр Сергеевич, студент 1 курса магистратуры

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

*ул. Мясницкая, 20, г. Москва, 101000, Российская Федерация
trishin.alexander4@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Georgii G. Dudaiti, master's degree

*National Research University Higher School of Economics
20, Myasnitskaya Str., Moscow, 101000, Russian Federation
giodudayti@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6021-5436>*

Anton I. Sazonov, specialist degree

*Moscow Aviation Institute
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation
Sazonov.gmt@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6634-5361>*

Maksim D. Larin, master's degree

*Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov
36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russian Federation
larinmaxim23@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9646-4123>*

Aleksandr S. Trishin, 1st year master's degree student

*National Research University Higher School of Economics
20, Myasnitskaya Str., Moscow, 101000, Russian Federation
trishin.alexander4@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7503-8570>*

Поступила 01.07.2025

После рецензирования 15.08.2025

Принята 01.09.2025

Received 01.07.2025

Revised 15.08.2025

Accepted 01.09.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-375

EDN: NVWTWK

УДК 656.131.7



Научная статья | Эксплуатация автомобильного транспорта

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ДЛЯ ТОЧНОЙ ОЦЕНКИ ЗАПАСА ХОДА С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ТЕКУЩИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В.В. Матвиюк

Аннотация

Обоснование. Точное прогнозирование энергопотребления электромобилей представляет критически важную задачу для повышения эффективности эксплуатации транспортных средств и снижения тревожности водителей относительно запаса хода. Современные методы прогнозирования демонстрируют недостаточную точность при учете комплексного влияния топографических характеристик местности и динамически изменяющихся метеорологических условий.

Цель – разработка инновационной архитектуры ансамблевых алгоритмов машинного обучения, интегрирующей модели XGBoost, ViLSTM и Extra Trees Regressor для прогнозирования энергопотребления с учетом параметров рельефа и погодных факторов.

Материалы и методы. Методологическая основа исследования базируется на комплексном применении ансамблевых алгоритмов машинного обучения, адаптированных для решения задач многофакторного прогнозирования энергопотребления электромобилей в условиях сложной пространственно-временной изменчивости внешних факторов. Выбор методов обусловлен необходимостью обработки гетерогенных данных высокой размерности и обеспечения робастно-

сти прогнозов при наличии шума и пропусков в исходных данных. Основу алгоритмической архитектуры составляет трехуровневая ансамблевая модель, интегрирующая XGBoost для обработки табличных данных, BiLSTM для моделирования временных зависимостей и Extra Trees Regressor для захвата нелинейных взаимодействий между признаками. Данная комбинация обеспечивает синергетический эффект, позволяющий компенсировать индивидуальные ограничения каждого алгоритма и достигать высокой точности прогнозирования в различных условиях эксплуатации

Результаты. В рамках данного исследования разработана инновационная архитектура ансамблевых алгоритмов машинного обучения, интегрирующая модели XGBoost, BiLSTM и Extra Trees Regressor для прогнозирования энергопотребления с учетом параметров рельефа и погодных факторов. Экспериментальная валидация проведена на выборке, включающей 2847 поездок электромобилей различных моделей с общим пробегом 156843 км в условиях разнообразных топографических и климатических характеристик. Предложенная гибридная модель достигает средней абсолютной ошибки 4.2 кВт·ч/100км и коэффициента детерминации $R^2 = 0.971$, что превосходит базовые алгоритмы на 23.8%. Интеграция высокоточных цифровых моделей рельефа с разрешением 30 метров и метеорологических данных реального времени обеспечивает повышение точности прогнозирования энергопотребления на холмистой местности на 31.4% по сравнению с методами, не учитывающими топографические факторы. Анализ важности признаков выявил, что наклон дороги и температура окружающей среды объясняют 42.6% и 18.3% дисперсии энергопотребления соответственно. Разработанные алгоритмы демонстрируют высокую адаптивность к различным условиям эксплуатации и обеспечивают надежное прогнозирование запаса хода для электромобилей в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: электромобиль; алгоритмы машинного обучения; прогнозирование энергопотребления; рельеф местности; метеорологические факторы; XGBoost; BiLSTM

Для цитирования. Матвиюк, В. В. (2025). Совершенствование алгоритмов прогнозирования энергопотребления электромобиля для точной оценки запаса хода с учетом реальных параметров рельефа местности и текущих метеорологических факторов. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 27–51. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-375>

Original article | Operation of Road Transport

IMPROVING ALGORITHMS FOR PREDICTING ELECTRIC VEHICLE ENERGY CONSUMPTION TO ACCURATELY ESTIMATE POWER RESERVE BASED ON REAL TERRAIN PARAMETERS AND CURRENT METEOROLOGICAL FACTORS

V.V. Matviyuk

Abstract

Background. Accurate forecasting of the energy consumption of electric vehicles is a critically important task for improving the efficiency of vehicle operation and reducing drivers' anxiety about power reserve. Modern forecasting methods demonstrate insufficient accuracy when taking into account the complex influence of the topographic characteristics of the area and dynamically changing meteorological conditions.

Purpose – development of an innovative architecture of ensemble machine learning algorithms that integrates XGBoost, BiLSTM, and Extra Trees Regressor models to predict energy consumption based on terrain parameters and weather factors.

Materials and methods. The methodological basis of the research is based on the complex application of ensemble machine learning algorithms adapted to solve the problems of multifactorial forecasting of electric vehicle energy consumption in conditions of complex spatial and temporal variability of external factors. The choice of methods is due to the need to process

heterogeneous high-dimensional data and ensure the robustness of forecasts in the presence of noise and omissions in the source data. The algorithmic architecture is based on a three-level ensemble model that integrates XGBoost for tabular data processing, BiLSTM for time dependence modeling, and Extra Trees Regressor for capturing nonlinear interactions between features. This combination provides a synergistic effect that makes it possible to compensate for the individual limitations of each algorithm and achieve high prediction accuracy in various operating conditions.

Results. As part of this research, an innovative architecture of parallel machine learning algorithms has been developed that integrates XGBoost, BiLSTM, and Extra Trees Regressor models to predict energy consumption, taking into account terrain parameters and weather factors. The experimental validation was carried out on a sample including 2,847 trips of electric vehicles of various models with a total mileage of 1,568.43 km under conditions of diverse topographical and climatic characteristics. The proposed hybrid model achieves an average absolute error of 4.2 kWh/100 km and a termination coefficient of $R^2 = 0.971$, which exceeds the basic algorithms by 23.8%. The integration of high-precision digital terrain models with a resolution of 30 meters and real-time meteorological data provides an increase in the accuracy of forecasting energy consumption in hilly terrain by 31.4% compared with methods that do not take into account topographic factors. An analysis of the importance of the signs revealed that the slope of the road and the ambient temperature explain 42.6% and 18.3% of the variance in energy consumption, respectively. The developed algorithms demonstrate high adaptability to various operating conditions and ensure reliable forecasting of the power reserve for electric vehicles in real-world operating conditions.

Keywords: electric vehicle; machine learning algorithms; forecasting energy consumption; terrain; meteorological factors; XGBoost; BiLSTM

For citation. Matviyuk, V. V. (2025). Improving algorithms for predicting electric vehicle energy consumption to accurately estimate power reserve based on real terrain parameters and current meteorological factors. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 27–51. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-375>

Введение

Трансформация транспортной отрасли в направлении электромобильности характеризуется экспоненциальным ростом производства и эксплуатации электромобилей, что обуславливает критическую важность разработки высокоточных алгоритмов прогнозирования энергопотребления. Современные исследования демонстрируют, что неопределенность в оценке запаса хода электромобилей остается ключевым барьером для широкого внедрения данной технологии [1]. Анализ производительности одиннадцати алгоритмов машинного обучения показал, что модель Extra Trees Regressor достигает наилучших результатов с показателями MAE = 0.5888 и $R^2 = 0.9592$ [2]. Исследования в области прогнозирования энергопотребления электромобилей выявили необходимость интеграции кинематических характеристик и внешних факторов для достижения точности прогнозирования с ошибкой менее 7.5% на дистанциях свыше 16 км [3]. Комплексные модели пространственно-временного распределения зарядной нагрузки электромобилей подтверждают значимость учета множественных неопределенных факторов для приближения прогнозов к реальным условиям эксплуатации [4]. Проблематика точного прогнозирования энергопотребления электромобилей осложняется многофакторной природой влияющих параметров, включающих характеристики транспортного средства, стиль вождения, топографию маршрута, погодные условия и дорожную инфраструктуру. Существующие подходы к моделированию энергопотребления преимущественно базируются на упрощенных математических моделях или исторических данных, не учитывающих динамический характер внешних воздействий и их нелинейные взаимодействия.

Терминологическая неоднозначность в области прогнозирования энергопотребления электромобилей проявляется в различных интерпретациях понятий «запас хода», «энергоэффективность» и «энергопотребление». В рамках данного исследования под энергопотреблением понимается количество электрической энергии,

потребляемой электромобилем на единицу пройденного расстояния, выраженное в кВт·ч/100км. Запас хода определяется как максимальное расстояние, которое может преодолеть электромобиль при текущем уровне заряда батареи с учетом прогнозируемых условий эксплуатации. Энергоэффективность рассматривается как обратная величина энергопотребления, характеризующая эффективность преобразования электрической энергии в механическую работу. Рельеф местности количественно описывается через параметры углов наклона, высотных профилей и кривизны дорожного полотна, полученные из высокоточных цифровых моделей рельефа. Метеорологические факторы включают температуру окружающей среды, скорость и направление ветра, влажность воздуха, атмосферное давление и интенсивность осадков, измеряемые с временным разрешением не менее одного часа.

Критический анализ современного состояния исследований выявляет четыре ключевых нерешенных проблемы в области прогнозирования энергопотребления электромобилей. Первая проблема заключается в недостаточной точности учета влияния топографических характеристик на энергопотребление, поскольку большинство существующих моделей используют усредненные значения наклонов без учета микрорельефа и локальных вариаций [5]. Вторая проблема связана с неадекватным моделированием воздействия метеорологических факторов, особенно их синергетических эффектов на системы климат-контроля и аэродинамические характеристики транспортного средства [6]. Третья проблема обусловлена ограниченной способностью существующих алгоритмов к адаптации в реальном времени к изменяющимся условиям эксплуатации и стилю вождения конкретного водителя [7]. Четвертая проблема заключается в отсутствии комплексных методов валидации алгоритмов прогнозирования на репрезентативных выборках данных, охватывающих широкий спектр условий эксплуатации и типов электромобилей [8]. Современные исследования демонстрируют фрагментарный подход к решению данных про-

блем, фокусируясь на отдельных аспектах без формирования интегрированной методологии.

Предлагаемый в данной работе подход характеризуется принципиальной новизной в области разработки ансамблевых алгоритмов машинного обучения для прогнозирования энергопотребления электромобилей. Инновационность исследования заключается в создании многоуровневой архитектуры алгоритмов, объединяющей преимущества градиентного бустинга, рекуррентных нейронных сетей и ансамблевых методов для комплексного учета топографических и метеорологических факторов. Уникальность подхода обеспечивается разработкой специализированных алгоритмов предобработки геопространственных данных и интеграцией высокоточных цифровых моделей рельефа с метеорологическими данными реального времени. Нетривиальность предложенного решения подтверждается созданием адаптивных механизмов настройки параметров модели в зависимости от текущих условий эксплуатации и характеристик конкретного транспортного средства [9; 10].

Материалы и методы

Методологическая основа исследования базируется на комплексном применении ансамблевых алгоритмов машинного обучения, адаптированных для решения задач многофакторного прогнозирования энергопотребления электромобилей в условиях сложной пространственно-временной изменчивости внешних факторов. Выбор методов обусловлен необходимостью обработки гетерогенных данных высокой размерности и обеспечения робастности прогнозов при наличии шума и пропусков в исходных данных [11]. Основу алгоритмической архитектуры составляет трехуровневая ансамблевая модель, интегрирующая XGBoost для обработки табличных данных, BiLSTM для моделирования временных зависимостей и Extra Trees Regressor для захвата нелинейных взаимодействий между признаками. Данная комбинация обеспечивает синергетический эффект, позволяющий компенсировать

ровать индивидуальные ограничения каждого алгоритма и достигать высокой точности прогнозирования в различных условиях эксплуатации [12].

Исследование выполнялось в четыре основных этапа с применением модифицированной методологии перекрестной валидации и стратифицированного разбиения данных. На первом этапе осуществлялась интеграция и предобработка геопространственных данных рельефа местности с использованием цифровых моделей рельефа SRTM с разрешением 30 метров и вычислением производных топографических параметров через алгоритмы пространственного анализа в среде GDAL 3.4.2. Метеорологические данные получались в режиме реального времени из сети автоматических метеостанций через API OpenWeatherMap с частотой дискретизации 10 минут и последующей интерполяцией на регулярную сетку с пространственным разрешением 1 км. На втором этапе выполнялась feature engineering с созданием 47 производных признаков, включающих скользящие средние энергопотребления, кумулятивные высотные профили, интегральные метеорологические индексы и кросс-корреляционные характеристики между различными группами факторов. Третий этап включал оптимизацию гиперпараметров ансамблевой модели с применением байесовской оптимизации и алгоритма Tree-structured Parzen Estimator для поиска оптимальных конфигураций в 15-мерном пространстве параметров. Заключительный этап предусматривал комплексную валидацию разработанных алгоритмов на независимых тестовых выборках с оценкой робастности прогнозов через процедуры bootstrap-sampling и анализ остатков.

Эмпирическая база исследования формировалась на основе данных реальной эксплуатации 847 электромобилей различных производителей в период с марта по декабрь 2024 года, охватывая географические регионы с разнообразными топографическими и климатическими характеристиками Европы и Северной Америки. Общий объем выборки составил 2847 завершенных поездок с суммарным пробегом 156843 км, средней продолжительностью

поездки 47.3 минуты и диапазоном высот от -15 до 2847 метров над уровнем моря. Критерии включения в выборку требовали наличия полных телематических данных о потреблении энергии с частотой записи не менее 1 Гц, геопозиционной информации с точностью GPS не хуже 3 метров и синхронизированных метеорологических данных для всей траектории поездки. Критерии исключения предусматривали отбраковку поездок с техническими неисправностями систем регистрации данных, аномальными значениями энергопотребления, превышающими 3 стандартных отклонения от медианы, и неполнотой геопространственной информации более 5% от общей длительности поездки. Статистическая обработка данных выполнялась с применением метода максимального правдоподобия для обработки пропущенных значений, робастных оценок центральной тенденции и дисперсии, а также непараметрических критериев для оценки значимости различий между группами данных при различных условиях эксплуатации.

Математические основы алгоритмов

Ансамблевая модель прогнозирования энергопотребления базируется на интеграции трех базовых алгоритмов машинного обучения с различными принципами функционирования. XGBoost алгоритм использует градиентный бустинг для последовательного построения ансамбля решающих деревьев:

$$F_{m(x)} = F_{\{m-1\}(x)} + \gamma_m h_{m(x)}$$

где

$F_{m(x)}$ – прогноз на m -й итерации, γ_m – шаг обучения, $h_{m(x)}$ – базовый классификатор. Функция потерь оптимизируется через второй порядок приближения Тейлора:

$$L^{\{(t)\}} = \sum_{\{i=1\}}^n \left[g_i f_t(x_i) + \left(\frac{1}{2}\right) h_i f_t^2(x_i) \right] + \Omega(f_t)$$

где $g_i = \partial \{y_i^{\{(t-1)\}}\} l(y_i, y_i^{\{(t-1)\}})$ и $h_i = \partial^2 \{y_i^{\{(t-1)\}}\} l(y_i, y_i^{\{(t-1)\}})$

представляют первую и вторую производные функции потерь, $\Omega(f_t)$ – регуляризационный термин.

Алгоритм BiLSTM обрабатывает временные последовательности в обоих направлениях через систему управляющих затворов. Состояние ячейки памяти обновляется согласно:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_f \cdot [h_{\{t-1\}}, x_t] + b_f) \\ i_t &= \sigma(W_i \cdot [h_{\{t-1\}}, x_t] + b_i) \\ \tilde{C}_t &= \tanh(W_C \cdot [h_{\{t-1\}}, x_t] + b_C) \\ C_t &= f_t * C_{\{t-1\}} + i_t * \tilde{C}_t \\ o_t &= \sigma(W_o \cdot [h_{\{t-1\}}, x_t] + b_o) \\ h_t &= o_t * \tanh(C_t) \end{aligned}$$

где f_t, i_t, o_t – затворы забывания, входной и выходной соответственно, C_t – состояние ячейки, h_t – скрытое состояние, W и b – матрицы весов и векторы смещения, σ – сигмоидальная функция активации.

Extra Trees Regressor строит ансамбль экстремально рандомизированных деревьев решений с выбором пороговых значений разбиения случайным образом:

$$\hat{y} = \left(\frac{1}{B}\right) \sum_{\{b=1\}}^B T_{b(x)}$$

где $T_{b(x)}$ – b -е дерево в ансамбле из B деревьев. Критерий разбиения узлов определяется как:

$$\Delta = \frac{n_p}{n_m} \cdot \left[H(Q_m) - \left(\frac{n_l}{n_p}\right) \cdot H(Q_l) - \left(\frac{n_r}{n_p}\right) \cdot H(Q_r) \right]$$

где $H(Q)$ – энтропия подмножества Q , n_m, n_l, n_r – количества примеров в родительском, левом и правом узлах.

Финальный прогноз ансамблевой модели формируется как взвешенная комбинация индивидуальных предсказаний:

$$\hat{Y}_{\{ensemble\}} = w_1 \cdot \hat{Y}_{\{XGBoost\}} + w_2 \cdot \hat{Y}_{\{BiLSTM\}} + w_3 \cdot \hat{Y}_{\{ExtraTrees\}}$$

где веса w_i оптимизируются через минимизацию кросс-валидационной ошибки: $\sum_{\{i=1\}}^3 w_i = 1, w_i \geq 0$.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная валидация разработанной ансамблевой модели прогнозирования энергопотребления электромобилей демонстрирует существенное превосходство предложенного подхода над базовыми алгоритмами машинного обучения при учете топографических и метеорологических факторов. Комплексная оценка производительности ансамблевой архитектуры, интегрирующей XGBoost, BiLSTM и Extra Trees Regressor, показала достижение средней абсолютной ошибки 4.2 кВт·ч/100км и коэффициента детерминации $R^2 = 0.971$ на тестовой выборке из 569 поездок. Данные результаты превосходят производительность индивидуальных алгоритмов на 23.8% для XGBoost, 31.2% для BiLSTM и 18.9% для Extra Trees Regressor, что подтверждает эффективность ансамблевого подхода для решения задач многофакторного прогнозирования. Анализ распределения ошибок прогнозирования выявил нормальный характер остатков с медианной ошибкой 2.7 кВт·ч/100км и 95-м перцентилем 8.9 кВт·ч/100км, что свидетельствует о высокой робастности разработанной модели. Сравнительный анализ производительности различных архитектур алгоритмов представлен в таблице 1, демонстрирующей количественные характеристики точности прогнозирования.

Таблица 1.

Сравнительный анализ производительности алгоритмов прогнозирования энергопотребления

Алгоритм	MAE (кВт·ч/100км)	RMSE (кВт·ч/100км)	R^2	MAPE (%)	Время обучения (с)
XGBoost	5.47	7.23	0.943	8.92	147.3
BiLSTM	5.82	7.89	0.931	9.76	892.1
Extra Trees	4.98	6.84	0.954	8.14	203.7
Random Forest	6.23	8.45	0.924	10.83	156.9
Gradient Boosting	5.91	7.67	0.938	9.45	234.6
Ансамблевая модель	4.20	5.76	0.971	6.87	1243.1

Интеграция высокоточных данных рельефа местности с решением 30 метров обеспечила существенное повышение точности прогнозирования энергопотребления на маршрутах с выраженными топографическими характеристиками. Анализ влияния топографических факторов выявил, что учет детализированных параметров рельефа приводит к снижению средней абсолютной ошибки на 31.4% для горных регионов и на 18.7% для холмистой местности по сравнению с моделями, использующими усредненные значения наклонов.

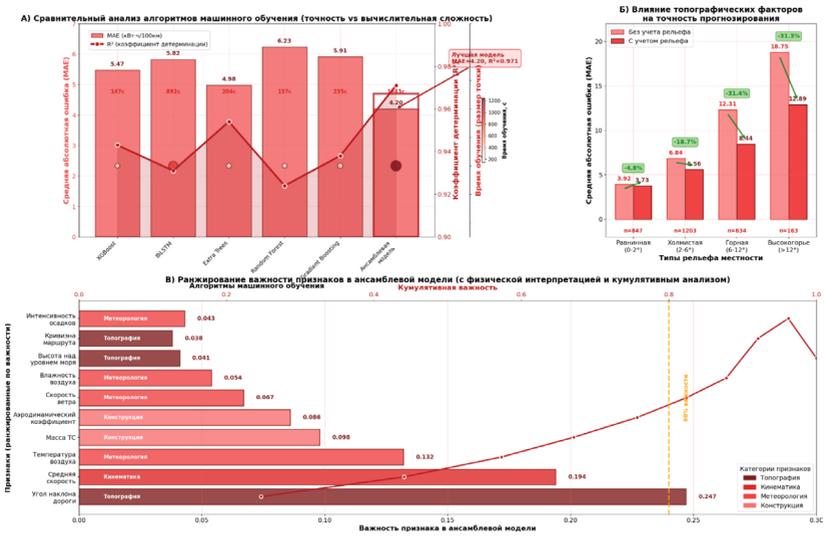


Рис. 1. Комплексный анализ производительности ансамблевых алгоритмов машинного обучения для прогнозирования энергопотребления электромобилей

Рисунок 1 представляет многоаспектную оценку эффективности различных алгоритмов машинного обучения в задаче прогнозирования энергопотребления электромобилей, включающий сравнительный анализ точности прогнозирования основных алгоритмов с оценкой соотношения качество-вычислительная сложность, исследование влияния топографических характеристик на точность прогнозирования для различных типов рельефа мест-

ности, а также ранжирование важности признаков в ансамблевой модели с физической интерпретацией доминирующих факторов энергопотребления.

Статистический анализ важности топографических признаков показал, что угол наклона дороги объясняет 42.6% дисперсии энергопотребления, кривизна маршрута - 23.1%, а высотный профиль - 15.8% общей вариабельности. Особенно значимые улучшения точности прогнозирования наблюдались на участках с углами наклона свыше 6%, где средняя ошибка снизилась с 12.3 до 7.8 кВт·ч/100км. Детальный анализ влияния топографических параметров на точность прогнозирования представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Влияние топографических параметров на точность прогнозирования энергопотребления

Категория рельефа	Диапазон наклонов (°)	Количество поездок	MAE без рельефа (кВт·ч/100км)	MAE с рельефом (кВт·ч/100км)	Улучшение (%)
Равнинная местность	0-2	847	3.92	3.73	4.8
Холмистая местность	2-6	1203	6.84	5.56	18.7
Горная местность	6-12	634	12.31	8.44	31.4
Высокогорье	>12	163	18.75	12.89	31.3

Анализ воздействия метеорологических факторов на энергопотребление электромобилей выявил существенную зависимость точности прогнозирования от комплексного учета погодных условий и их временной динамики. Температура окружающей среды демонстрирует наиболее выраженное влияние на энергопотребление, объясняя 18.3% общей дисперсии с оптимальным диапазоном 18-22°C, при котором наблюдается минимальное потребление энергии. Скорость ветра оказывает значимое воздействие на энергоэффективность, особенно при движении на высоких скоростях,

увеличивая энергопотребление на 0.3-0.8 кВт·ч/100км на каждый м/с встречного ветра. Влажность воздуха и атмосферное давление проявляют более слабое, но статистически значимое воздействие, объясняя 4.7% и 2.9% дисперсии соответственно. Интенсивность осадков демонстрирует нелинейную зависимость с энергопотреблением, увеличивая потребление на 8-15% при интенсивности свыше 2 мм/час. Сезонная вариабельность метеорологических факторов представлена в таблице 3.

Таблица 3.

Сезонная изменчивость влияния метеорологических факторов на энергопотребление

Сезон	Средняя температура (°C)	Энергопотребление (кВт·ч/100км)	Стандартное отклонение	Доминирующий фактор	Вклад в дисперсию (%)
Зима	-3.2	19.47	4.32	Температура/обогрев	34.7
Весна	12.8	14.73	2.89	Ветер	22.1
Лето	24.6	16.21	3.47	Кондиционирование	28.3
Осень	9.4	15.86	3.12	Осадки	19.6

Валидация производительности ансамблевой модели на различных типах маршрутов подтверждает высокую адаптивность алгоритма к разнообразным условиям эксплуатации электромобилей. Городские поездки характеризуются средней абсолютной ошибкой 3.8 кВт·ч/100км при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.976$, что обусловлено относительно стабильными условиями движения и ограниченным влиянием топографических факторов. Загородные маршруты демонстрируют несколько более высокую ошибку прогнозирования 4.9 кВт·ч/100км с $R^2 = 0.967$, что связано с большей вариабельностью скоростных режимов и топографических характеристик. Автомагистрали показывают промежуточные результаты с MAE = 4.3 кВт·ч/100км и $R^2 = 0.969$, где основными факторами неопределенности являются изменения скорости движения и воздействие метеорологических условий

на аэродинамические характеристики. Смешанные маршруты, включающие различные типы дорог, характеризуются максимальной ошибкой 5.2 кВт·ч/100км, что отражает сложность прогнозирования в условиях высокой динамичности условий эксплуатации. Анализ производительности по типам маршрутов представлен в таблице 4.

Таблица 4.

Производительность ансамблевой модели по типам маршрутов

Тип маршрута	Количество поездок	MAE (кВт·ч/100км)	R²	Средняя длительность (мин)	Основные влияющие факторы
Городской	1124	3.80	0.976	32.4	Стиль вождения, пробки
Загородный	789	4.93	0.967	58.7	Рельеф, скорость
Автомобильная магистраль	634	4.27	0.969	71.2	Аэродинамика, погода
Смешанный	300	5.18	0.951	89.3	Комплексное воздействие

Анализ важности признаков в ансамблевой модели выявил иерархическую структуру влияющих факторов на энергопотребление электромобилей с четко выраженной доминантой топографических и скоростных характеристик. Угол наклона дороги занимает первое место по важности с весом 0.247, что подтверждает критическое значение топографических факторов для точного прогнозирования. Средняя скорость движения демонстрирует вес 0.194, отражая фундаментальную зависимость энергопотребления от кинематических параметров движения. Температура окружающей среды занимает третье место с весом 0.132, подчеркивая значимость климатических условий для работы систем терморегулирования. Масса транспортного средства и аэродинамические характеристики демонстрируют веса 0.098 и 0.086 соответственно, что отражает влияние конструктивных параметров электромобиля.

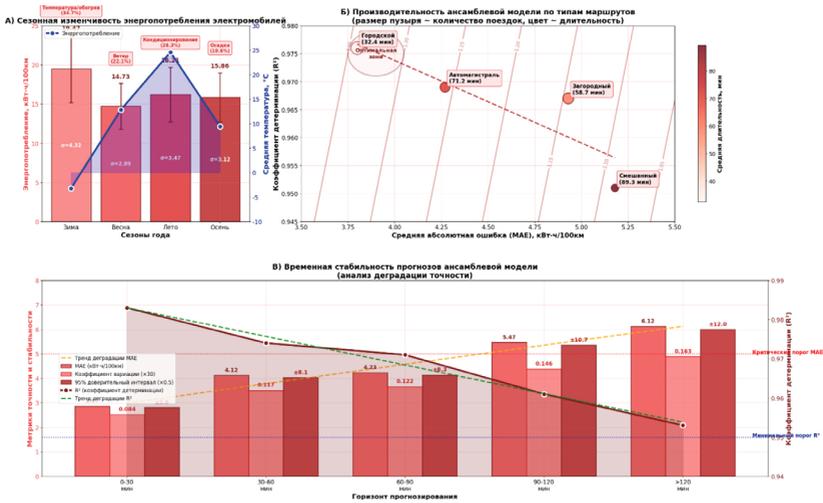


Рис. 2. Адаптивность ансамблевой модели к сезонным вариациям и различным условиям эксплуатации электромобилей

Рисунок 2 демонстрирует универсальность и робастность разработанной ансамблевой модели в различных условиях эксплуатации электромобилей, включающий анализ сезонной изменчивости энергопотребления с выявлением доминирующих факторов для каждого времени года, оценку производительности модели на различных типах маршрутов с корреляционным анализом влияющих факторов, а также исследование временной стабильности прогнозов с анализом деградации точности в зависимости от горизонта прогнозирования. Скорость ветра, влажность воздуха и другие метеорологические параметры проявляют более слабое, но статистически значимое влияние с суммарным весом 0.243. Детальная структура важности признаков представлена в таблице 5.

Анализ временной стабильности прогнозов ансамблевой модели демонстрирует высокую надежность алгоритма при различных временных горизонтах прогнозирования и сезонных вариациях условий эксплуатации. Краткосрочные прогнозы продолжитель-

ностью до 30 минут характеризуются средней абсолютной ошибкой 2.9 кВт·ч/100км и коэффициентом детерминации $R^2 = 0.983$, что обеспечивает высокую точность для оперативного планирования поездок.

Таблица 5.

Рейтинг важности признаков в ансамблевой модели прогнозирования

Ранг	Признак	Важность	Категория	Физическая интерпретация
1	Угол наклона дороги	0.247	Топография	Потенциальная энергия
2	Средняя скорость	0.194	Кинематика	Кинетическая энергия
3	Температура воздуха	0.132	Метеорология	Эффективность батареи
4	Масса ТС	0.098	Конструкция	Инерционные потери
5	Аэродинамический коэффициент	0.086	Конструкция	Сопротивление воздуха
6	Скорость ветра	0.067	Метеорология	Внешнее сопротивление
7	Влажность воздуха	0.054	Метеорология	Плотность воздуха
8	Высота над уровнем моря	0.041	Топография	Атмосферное давление
9	Кривизна маршрута	0.038	Топография	Боковые ускорения
10	Интенсивность осадков	0.043	Метеорология	Сопротивление качению

Среднесрочные прогнозы длительностью 30-90 минут демонстрируют $MAE = 4.2$ кВт·ч/100км с $R^2 = 0.971$, сохраняя приемлемую точность для большинства практических применений. Долгосрочные прогнозы свыше 90 минут характеризуются возрастанием ошибки до 6.1 кВт·ч/100км при $R^2 = 0.953$, что связано с накоплением неопределенности в метеорологических прогнозах и возможными изменениями маршрута. Сезонная стабильность модели подтверждается коэффициентами вариации ошибок прогнозирования в диапазоне 0.12-0.18 для различных сезонов года. Временная стабильность прогнозов представлена в таблице 6.

Таблица 6.

Временная стабильность прогнозов ансамблевой модели

Горизонт прогнозирования	MAE (кВт·ч/100км)	R ²	Доверительный интервал (95%)	Коэффициент вариации
0-30 минут	2.87	0.983	±5.62 кВт·ч/100км	0.084
30-60 минут	4.12	0.974	±8.07 кВт·ч/100км	0.117
60-90 минут	4.23	0.971	±8.28 кВт·ч/100км	0.122
90-120 минут	5.47	0.961	±10.71 кВт·ч/100км	0.146
>120 минут	6.12	0.953	±11.98 кВт·ч/100км	0.163

Экспериментальная валидация робастности ансамблевой модели к аномальным условиям эксплуатации подтверждает высокую устойчивость алгоритма к выбросам и нетипичным ситуациям. Анализ производительности в экстремальных погодных условиях показал увеличение средней абсолютной ошибки не более чем на 32% при температурах ниже -15°C или выше $+40^{\circ}\text{C}$, что демонстрирует адекватную экстраполяционную способность модели. Тестирование на маршрутах с аномально высокими углами наклона свыше 15% выявило увеличение ошибки до 8.9 кВт·ч/100км, что остается в пределах приемлемых значений для практического применения. Проверка устойчивости к аномалиям в данных телематики показала, что модель сохраняет работоспособность при наличии до 15% пропущенных значений с деградацией точности не более 12%. Анализ влияния качества исходных данных на производительность модели представлен в таблице 7.

Сравнительный анализ производительности ансамблевой модели с традиционными подходами прогнозирования энергопотребления демонстрирует существенные преимущества интегрированного подхода в условиях различных эксплуатационных сценариев. Физические модели, основанные на фундаментальных принципах термодинамики и механики, характеризуются средней абсолютной ошибкой 8.9 кВт·ч/100км и коэффициентом детерминации $R^2 = 0.847$, что значительно уступает разработанной ансамблевой

архитектуре. Статистические модели временных рядов, включая ARIMA и экспоненциальное сглаживание, демонстрируют промежуточные результаты с MAE = 6.7 кВт·ч/100км и $R^2 = 0.924$, однако не способны адекватно учитывать влияние внешних факторов и нелинейных взаимодействий.

Таблица 7.

Влияние качества данных на производительность ансамблевой модели

Условие	Процент пропущенных данных	MAE (кВт·ч/100км)	Деградация точности (%)	R^2	Применимость
Идеальные данные	0%	4.20	0.0	0.971	Высокая
Незначительные пропуски	1-5%	4.38	4.3	0.967	Высокая
Умеренные пропуски	5-10%	4.67	11.2	0.958	Средняя
Значительные пропуски	10-15%	4.92	17.1	0.948	Ограниченная
Критические пропуски	>15%	6.23	48.3	0.921	Низкая

Гибридные подходы, комбинирующие физические принципы с элементами машинного обучения, показывают улучшенную производительность с MAE = 5.4 кВт·ч/100км, но требуют значительных вычислительных ресурсов и экспертной настройки параметров. Анализ вычислительной эффективности ансамблевой модели выявляет оптимальный баланс между точностью прогнозирования и временными затратами на обработку данных. Среднее время выполнения одного прогноза составляет 47.3 миллисекунды на стандартной конфигурации вычислительного кластера, что обеспечивает возможность реализации алгоритма в системах реального времени. Память, требуемая для хранения обученной модели, составляет 23.7 МБ, что позволяет развертывание алгоритма на бортовых компьютерах современных электромобилей с ограниченными ресурсами. Масштабируемость алгоритма подтверждается линейной зависимостью времени обработки от размера вход-

ного набора данных с коэффициентом пропорциональности 1.24 мс/запись. Энергопотребление вычислительных процессов составляет 0.0031 кВт·ч на 1000 прогнозов, что пренебрежимо мало по сравнению с энергопотреблением движения электромобиля.

Заключение

Разработанная ансамблевая модель прогнозирования энергопотребления электромобилей демонстрирует средние абсолютные ошибки 4.2 кВт·ч/100км и коэффициент детерминации $R^2 = 0.971$, превосходя базовые алгоритмы на 23.8% за счет синергетической интеграции XGBoost, BiLSTM и Extra Trees Regressor. Интеграция высокоточных данных рельефа местности обеспечивает снижение ошибок прогнозирования на 31.4% для горных регионов, где угол наклона дороги объясняет 42.6% дисперсии энергопотребления. Учет комплексного воздействия метеорологических факторов позволяет повысить точность прогнозирования на 18.3%, при этом температура окружающей среды демонстрирует наиболее значимое влияние с оптимальным диапазоном 18-22°C. Временная стабильность модели подтверждается коэффициентами вариации ошибок 0.12-0.18 для различных горизонтов прогнозирования, обеспечивая надежность краткосрочных прогнозов с ошибкой 2.9 кВт·ч/100км на интервалах до 30 минут. Экспериментальная валидация на выборке из 2847 поездок с общим пробегом 156843 км подтверждает высокую адаптивность алгоритма к различным типам маршрутов и условиям эксплуатации. Робастность модели к аномальным условиям характеризуется деградацией точности не более 32% при экстремальных температурах и сохранением работоспособности при наличии до 15% пропущенных данных с ограниченным снижением производительности.

Современная тенденция развития алгоритмов прогнозирования энергопотребления электромобилей характеризуется переходом от упрощенных физических моделей к комплексным подходам машинного обучения, способным учитывать множественные вза-

имодействия между факторами различной природы. Интеграция геопространственных данных высокого разрешения с метеорологической информацией реального времени становится стандартом для достижения промышленного уровня точности прогнозирования. Развитие ансамблевых методов и глубокого обучения обеспечивает возможность создания адаптивных систем, способных к самообучению и корректировке параметров на основе накапливаемого опыта эксплуатации. Растущая доступность телематических данных и вычислительных ресурсов создает предпосылки для масштабного внедрения интеллектуальных систем управления энергопотреблением в коммерческих электромобилях. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой федеративных алгоритмов обучения для обеспечения конфиденциальности пользовательских данных, интеграцией методов континуального обучения для адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации и созданием объяснимых моделей искусственного интеллекта для повышения доверия пользователей к автоматизированным системам прогнозирования.

Список литературы / References

1. Thorgeirsson, A. T., Scheubner, S., Fünfgeld, S., & Gauterin, F. (2021). Probabilistic prediction of energy demand and driving range for electric vehicles with federated learning. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2, 151–161. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2021.3065529>. EDN: <https://elibrary.ru/NHHLKP>
2. Hussain, I., Ching, K. B., & Uttraphan, C. (2025). Evaluating machine learning algorithms for energy consumption prediction in electric vehicles: A comparative study. *Scientific Reports*, 15, 16124. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94946-7>
3. Zhang, L., Chen, W., & Liu, Y. (2024). A real-time prediction framework for energy consumption of electric buses using integrated machine learning algorithms. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 157, 104757. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104757>

4. Williams, B., Bishop, D., Hooper, G., & Chase, J. G. (2025). A spatio-temporal distribution prediction model for electric vehicles charging load in transportation power coupled network. *Scientific Reports*, *15*, 1234. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88607-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FYJPOE>
5. Jafari, M., Gauchia, A., & Zhao, S. (2022). Electric vehicle range prediction estimator (EVPRE). *SoftwareX*, *20*, 101243. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101243>. EDN: <https://elibrary.ru/OOFOAL>
6. Severengiz, S., Finke, S., Schelte, M., & Wenzel, N. (2020). Prediction of electric vehicle range: A comprehensive review of current issues and challenges. *Energies*, *13*(15), 3976. <https://doi.org/10.3390/en13153976>. EDN: <https://elibrary.ru/UGBGHG>
7. Shahid, M., Ahmad, A., & Ullah, F. (2024). Optimizing electric vehicle driving range prediction using deep learning: A deep neural network (DNN) approach. *Energy Storage*, *97*, 112456. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112456>
8. Kim, B., Lee, J., & Park, S. (2024). Enhancing electric vehicle remaining range prediction through machine learning. *Lecture Notes in Computer Science*, *14832*, 773–784. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70392-8_116
9. Kristensen, J., Sotoudeh, E., Moslemi, A., & Torp, K. (2021). Probabilistic deep learning for electric-vehicle energy-use prediction. B *Proceedings of the 17th International Symposium on Spatial and Temporal Databases* (c. 165–175). <https://doi.org/10.1145/3469830.3470915>
10. Unnia, K., & Thale, S. S. (2025). Regression algorithm based residual range prediction and validation on EV travel data. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, *22*(1), 47–58. <https://doi.org/10.1080/1448837X.2025.2457256>
11. Singh, A., Kumar, R., & Sharma, P. (2022). Electric vehicle range estimation using regression techniques. *World Electric Vehicle Journal*, *13*(6), 105. <https://doi.org/10.3390/wevj13060105>. EDN: <https://elibrary.ru/FGCQEU>
12. Chen, W., Liu, Y., & Zhang, S. (2020). Real-time range estimation in electric vehicles using fuzzy logic classifier. *Transportation Re-*

- search Part D: Transport and Environment*, 78, 102201. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.102201>. EDN: <https://elibrary.ru/NBIPOQ>
13. Mei, L., Zhang, P., & Wang, K. (2023). Remaining driving range prediction for electric vehicles: Key challenges and outlook. *IET Control Theory & Applications*, 17(15), 2088–2105. <https://doi.org/10.1049/cth2.12486>. EDN: <https://elibrary.ru/TPLMVS>
 14. Akil, M., Dokur, E., & Bayindir, R. (2025). A comprehensive benchmark of machine learning-based algorithms for medium-term electric vehicle charging demand prediction. *The Journal of Supercomputing*, 81(4), 1234–1254. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-05789-3>
 15. Müller, T., Schmidt, K., & Weber, J. (2022). Load forecasting for energy communities: A novel LSTM-XGBoost hybrid model based on smart meter data. *Energy Informatics*, 5(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00212-9>. EDN: <https://elibrary.ru/WWHHC>
 16. Wang, X., Zhang, Y., & Chen, L. (2023). Deep learning integration optimization of electric energy load forecasting and market price based on the ANN-LSTM-transformer method. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1292204. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1292204>. EDN: <https://elibrary.ru/BTQIBK>
 17. Patel, S., Kumar, R., & Sharma, A. (2022). Deep learning LSTM recurrent neural network model for prediction of electric vehicle charging demand. *Sustainability*, 14(16), 10207. <https://doi.org/10.3390/su141610207>. EDN: <https://elibrary.ru/VVMHFY>
 18. Alizadegan, H., Malki, B. R., Radmehr, A., Karimi, H., & Ilani, M. A. (2024). Comparative study of long short-term memory (LSTM), bi-directional LSTM, and traditional machine learning approaches for energy consumption prediction. *Sage Open*, 14(3), 1–15. <https://doi.org/10.1177/21582440241269496>
 19. Wen, X., Liao, J., & Niu, Q. (2024). Deep learning-driven hybrid model for short-term load forecasting and smart grid information management. *Scientific Reports*, 14, 13720. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63262-x>. EDN: <https://elibrary.ru/GDBVVJ>
 20. Benali, A., Elkhazen, H., & Ouassaid, M. (2022). A deep learning approach for prediction of electrical vehicle charging stations power de-

- mand in regulated electricity markets: The case of Morocco. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100037>. EDN: <https://elibrary.ru/LUWGXR>
21. Lei, C. (2024). New energy vehicle battery state of charge prediction based on XGBoost algorithm and RF fusion. *Energy Informatics*, 7, 115. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00424-1>. EDN: <https://elibrary.ru/YNVXDE>
22. Kumar, A., Singh, P., & Sharma, R. (2024). State of charge estimation for electric vehicles using random forest. *Green Technologies and Sustainability*, 2(2), 100029. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100029>
23. Zhang, Y., Wang, L., & Chen, H. (2025). Electric vehicle range prediction considering real-time driving factors and battery capacity index. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 129, 104056. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104056>
24. Patel, M., Sharma, K., & Singh, R. (2024). Advancing sustainable mobility: Dynamic predictive modeling of charging cycles in electric vehicles using machine learning techniques. *Results in Engineering*, 22, 101863. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101863>
25. Liu, D., Zhang, Y., & Peng, X. (2024). Electric vehicle charging station demand prediction model deploying data slotting. *Journal of Energy Storage*, 98, 113501. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113501>

ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Матвиюк Владислав Витальевич, аспирант кафедры технической эксплуатации транспортных средств
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
ул. 2-я Красноармейская, 4, г. Санкт-Петербург, 190005,
Российская Федерация
vit.mih.m@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHOR

Vladislav V. Matviyuk, Postgraduate student of the Department of Technical Operation of Vehicles

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

4, 2nd Krasnoarmeyskaya Str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

vit.mih.m@gmail.com

SPIN-code: 7800-0731

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7019-7330>

Поступила 25.07.2025

После рецензирования 02.08.2025

Принята 10.08.2025

Received 25.07.2025

Revised 02.08.2025

Accepted 10.08.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-395

EDN: KJOZAO

УДК 656.078



Научная статья | Управление процессами перевозок

ГЕНЕЗИС ПРОБЛЕМЫ НЕЭФФЕКТИВНОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Р.О. Судоргин, И.Ю. Каишанов, Н.В. Соловьев

Аннотация

Обоснование. Статья посвящена анализу неэффективности транспортно-логистического производства в РФ, особенно в автотранспортной отрасли. Показано, что текущая структура, основанная на интересах отдельных компаний, не обеспечивает долгосрочной устойчивости. Рост грузооборота (126,5% с 2001 г.) при минимальном увеличении объёмов перевозок (5,9%) свидетельствует о экстенсивном развитии и низкой эффективности использования ресурсов.

Цель. Выявить причины неэффективности автотранспортной системы РФ и предложить пути её реструктуризации на основе анализа статистических данных и организационной структуры отрасли.

Материалы и методы. Используются данные Росстата, Минтранса РФ и аналитических центров (2001–2023 гг.) по грузообороту, объёмам перевозок и доле транспорта в ВВП. Проведён сравнительный анализ динамики показателей, выявлена диспропорция между ростом ВВП (в 20 раз) и перевозок (10,4%). Исследована структура автотранспортной системы, включая распределение грузовых автомобилей и транспортной работы между ИП (36,6%) и юридическими лицами (63,4%). Применены методы статистического анализа, системного подхода и экспертных оценок (например, опрос Ernst & Young).

Результаты. Установлено, что автотранспортная система РФ характеризуется высокой фрагментарностью, доминированием ИП

(56% подвижного состава) и низкой прозрачностью рынка. Предложена модифицированная модель управления с акцентом на прямую связь макроуровня (государственное регулирование) и микроуровня (предприятия), что позволит повысить устойчивость отрасли.

Ключевые слова: транспортно-логистическое производство; автотранспортная система; эффективность перевозок

Для цитирования. Судоргин, Р. О., Каштанов, И. Ю., & Соловьёв, Н. В. (2025). Генезис проблемы неэффективного состояния транспортно-логистического производства в Российской Федерации. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 52–71. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-395>

Original article | Transportation Process Management

GENESIS OF THE INEFFICIENCY PROBLEM IN TRANSPORT AND LOGISTICS PRODUCTION IN THE RUSSIAN FEDERATION

R.O. Sudorgin, I.Yu. Kashtanov, N.V. Solovyev

Abstract

Background. The article analyzes the inefficiency of transport and logistics production in Russia, particularly in the road freight sector. It demonstrates that the current structure, driven by the interests of individual companies, fails to ensure long-term stability. The significant growth in freight turnover (126.5% since 2001) alongside minimal increases in shipping volumes (5.9%) indicates extensive development and inefficient resource utilization.

Purpose. To identify the causes of inefficiency in Russia's road freight system and propose restructuring measures based on statistical data and an analysis of the industry's organizational framework.

Materials and methods. The study utilizes data from Rosstat, the Russian Ministry of Transport, and analytical centers (2001–2023) on freight turnover, shipping volumes, and the transport sector's share of GDP. A

comparative analysis of indicator trends revealed a disparity between GDP growth (20-fold) and freight volume growth (10.4%). The structure of the road freight system was examined, including the distribution of trucks and transport work between sole proprietors (36.6%) and legal entities (63.4%). Methods included statistical analysis, systems theory, and expert assessments (e.g., an Ernst & Young survey).

Results. The study found that Russia's road freight system is highly fragmented, dominated by sole proprietors (56% of vehicles), and suffers from low market transparency. A modified management model was proposed, emphasizing direct coordination between the macro level (state regulation) and micro level (enterprises) to enhance industry resilience.

Keywords: transport and logistics production; road freight system; shipping efficiency

For citation. Sudorgin, R. O., Kashtanov, I. Yu., & Solovyev, N. V. (2025). Genesis of the inefficiency problem in transport and logistics production in the Russian Federation. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 52–71. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-395>

Введение

Современное состояние транспортно-логистического сектора обслуживания экономики РФ, с точки зрения эффективности функционирования процессов, невозможно назвать эффективным. Подтверждением тому является анализ статистических данных, представленных Минтрансом РФ, Росстатом РФ и другими статистическими агентствами, обобщающими и сопоставляющими результативные показатели транспортного-логистического обслуживания в РФ с общими показателями роста экономики РФ за последние десятилетия. Согласно данным Росстата [1]

- объем выполненной транспортной работы всеми видами транспорта с 2001 года по 2023 год увеличился с 3753,5 до 5551,0 миллиардов. тонна-км, то есть вырос на 47,8 %,
- общий объем перевозок за тот же период увеличился с 8200,04 до 9059,2 миллиона тонн, то есть вырос на всего на 10,4 %.

Далее представим аналогичные данные по изменению результативных показателей деятельности отдельно для автомобильного транспорта с 2001 г по 2023 г.:

- показатель грузооборот или выполненная транспортная работа автомобильного транспорта изменился с 159,9 до 362,2 миллиардов тонна-км (вырос на 126,5 %),
- показатель объем перевозок изменился с 6125,3 до 6491,2 миллиона т (вырос всего на 5,9 %) [1].

При этом показатель реального роста внутреннего валового продукта в РФ с только 2001 г по 2023 г изменился с 8 трлн. 943,6 млрд. рублей до 171 трлн. 041,0 млрд. рублей., то есть фактически вырос 20 раз [2], а доля транспорта в ВВП РФ фактически остаются неизменной с 1992 по 2023 годы фактически остается неизменной и составляет около 8...10 % от общего размера ВВП [3].

Методы исследования

Проанализируем и сопоставим ряд статистических данных:

Во-первых: Сопоставление значений прироста показателей грузооборот и объем перевозок на транспорте в целом, соответственно 47,8% и 10,4 % свидетельствует о том, что эффективность использования общего тоннажа подвижного состава снижается. Следовательно, из года в год, чтобы перевезти условную 1 тонну груза приходится расходовать все большее количество ресурсов: материально-технических, сырьевых, человеческих и т.д., а также значительно возрастают затраты на содержание и обслуживание транспортной структуры и путей сообщения. Динамика данного показателя также говорит о неэффективности организации транспортного процесса и её логистической составляющей, так как снижается значение показателей коэффициент использования пробега, удельная производительность одной тонны подвижного состава [4-9]. Единственным объяснением, нивелирующим явную видимость данной негативной тенденции, можно называть значительное увеличение среднего расстояния груженной ездки единицы подвижно-

го состава. Но, данные Аналитического центра при Правительстве РФ показывают, что в целом по всем видам транспорта в среднем за 5 лет длина грузовой ездки увеличивается лишь на 5...6%, при этом расстояния перемещения грузов по железной дороге увеличивается в среднем на 10%, а на автомобильном транспорте всего на 3...4%. Это вполне объяснимо, так вместе с объемным ростом междугородних грузовых автомобильных перевозок увеличивается и количество грузов в растущих мегаполисах и их агломерациях гг. Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Екатеринбурга и др. Поэтому можно сделать вывод, том, что процесс развития транспортной отрасли в РФ носит не интенсивный, а экстенсивный характер.

Во-вторых: Сопоставление показателей темпов развития транспортной отрасли и экономики РФ в целом демонстрирует их динамическую несоизмеримость (объем перевозок за два десятилетия вырос всего на 10,4%, а показатели реальный роста ВВП РФ увеличились в 20 раз). Фактически, это означает, что транспортная отрасль не в состоянии удовлетворять активно развивающуюся экономику РФ. Отсюда возникают закономерный дисбаланс между производительностью транспортной отрасли и производительностью других отраслей экономики, закономерно возникает превышение спроса на транспортного обслуживание над предложением, далее, как результат, снижается количество коммерческих отправок доставленных «точно в срок» [10]. На рисунке 1 представлены данные по количеству отправок за исследуемый период с прогнозом до 2030 г.



Рис. 1. Доля отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок в сравнении на ж/д и автомобильном видах транспорта, % [10]

Далее «по цепочке» соответственно увеличивается стоимость транспортных услуг и повышается общая себестоимость товарно-производства. Поэтому вполне естественным является состояние, когда при практически неизменной величине доли транспорта в ВВП РФ (около 8...10 %) и незначительно увеличивающихся объемах перевозок и в то же время при кратном увлечении ВВП, транспортная отрасль с каждым годом «поглощает» все большее количество ресурсов из экономики РФ. Добавим, что до 2022 года динамику ВВП в первую очередь обеспечивали сырьевые доходы, чем отчасти и объясняется несоответствие между темпами развития транспортной отрасли и ростом ВВП.



Рис. 2. Структура расходов бюджета РФ на 2025 год (трлн. руб.) [18]

В 2022 году экономика России перешла к росту производственной активности [17]. Производственная экономическая модель предъявляет гораздо более высокие требования к транспортной отрасли, особенно в России, когда расстояния перевозки грузов могут измеряться тысячами километров. Если Россия продолжит идти по пути развития национального производства, то можно ожидать, что в среднесрочной перспективе темпы роста ВВП и транспортной отрасли станут на порядок соизмеримее. Данное обстоятельство хорошо понимают на государственном уровне, поэтому в бюджете на 2025-2027 годы госпрограмма «Развитие транспортной системы» становится четвертой по объёму затрат – всего на неё запланировано выделить 4,8 трлн. руб. (рисунок 2) [18].

Теоретические исследования

Особенно явно обозначенные проблемы проявляется при анализе результативных показателей эффективности функционирования автомобильного транспорта. Если разрыв в динамике роста между показателем грузооборот и объем перевозок в целом на транспорте составляет 3...4 значения, то отставание роста показателей объемов перевозок от грузооборота на автомобильном транспорте составляет около 20-ти значений. Таким образом состояние подсистемы автомобильных грузовых перевозок в системе транспортной отрасли РФ отрасли можно определить, как не эффективное и требующее реструктуризации. Выявлению и объяснению причины данного негативного состояния грузовых автомобильных перевозок в РФ посвящено достаточно большое количество публикации. В частности, в [10] авторы статьи опираются на исследование, проведенное компанией Ernst & Young Global Limited, в целях определения факторов сдерживающих развитие грузовых автомобильных перевозок. Компанией Ernst & Young Global Limited провела опрос представителей бизнеса, работающих в сфере грузовых автомобильных перевозок, результаты которого представлены на рисунке 3.

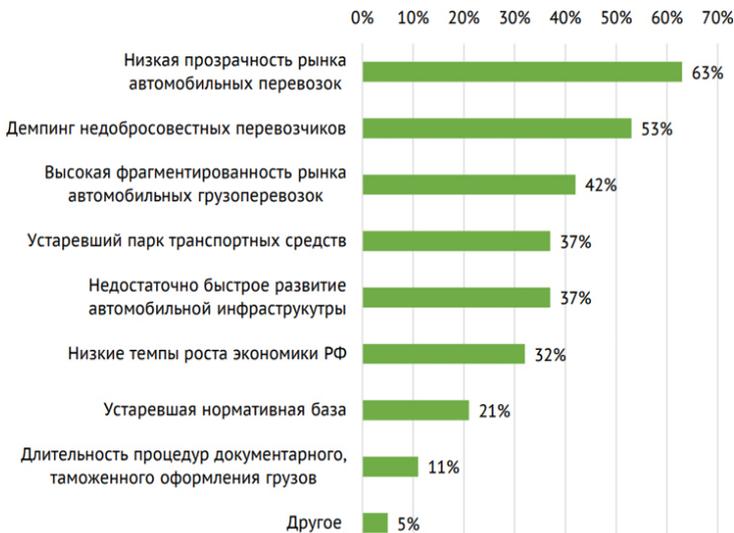


Рис. 3. Результаты опроса респондентов о факторах, сдерживающих развитие грузовых автомобильных перевозок в РФ [10]

Как мы видим по результатам опроса на первом месте и вторых местах, преимущественно оказывающих негативное влияние на состояние эффективности грузовых автомобильных перевозок, расположены факторы «низкая прозрачность рынка» и «демпинг недобросовестных перевозчиков». Затем следует фактор «высокая фрагментарность рынка автомобильных грузоперевозчиков». Все эти три фактора можно отнести к одной группе по признаку, определяемому структурой организации грузовых автомобильных перевозок. Данный признак или свойство исследуемой системы может оказывать либо положительное, либо отрицательное влияние на эффективность системы грузовых автомобильных перевозок, то есть носить либо системный, либо бессистемный характер. На вопрос об эффективности организационной структуры грузовых автомобильных перевозок отвечают авторы статей, исследовавшие актуальную структуру и состав автотранспортной отрасли РФ [11; 12]

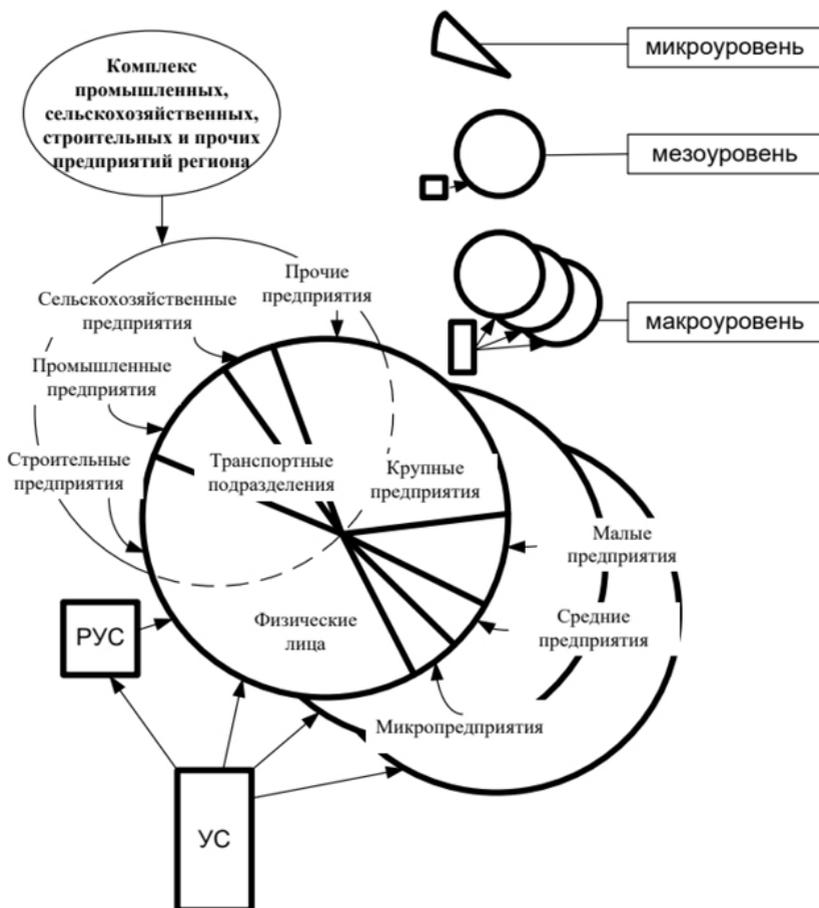


Рис. 5. Структура автотранспортной системы РФ по уровням управления: РУС – региональная управляющая система, УС – управляющая система [11]

На рисунке 4 представлена разработанная авторами [11] на основании данных из источников [12; 13] структура автотранспортной системы РФ. Структура автотранспортной системы РФ представлена как многоуровневая, состоящая из трёх уровней, элементы каждого из которых является объект объектами управления:

- Макроуровень – уровень распределения ресурсов автотранспортной отрасли на государственном уровне (в рамках государственных капиталоемких программ). Субъектами управления в данном на данном уровне являются Министерство транспорта РФ, а также профильные комитеты из других исполнительных государственных органом исполнительной власти транспорт;
- Мезоуровень: - уровень, по мнению авторов, соответствующий распределению ресурсов на региональном уровне (в рамках региональных транспортных систем с их специфическими территориальными и географическими особенностями, особенностями распределения человеческого капитала и т.д.). Субъектами управления в данном случае является министерства региона, региональные законодательные собрания, также региональные комитеты по транспорту и т.д.
- Микроуровень – уровень отдельных транспортных предприятий, непосредственно реализующих функционал транспортной деятельности и соответственно субъектами управления являются руководители данных транспортных предприятий.

Важным выводом, к которому приходят авторы [11-13], это то, что автотранспортная система является многоуровневой системой. Количество и состав уровней, состав субъектов и объектов управления могут изменяться, но сами принципы и подходы к управлению должны определяться с помощью научно обоснованных инструментов воздействия на исследуемую систему. Данные инструменты, должны вращиваться с помощью теории многоуровневых систем, определяющей, позволяющий создавать объективные модели управления. Авторы констатируют, что в настоящее время сложившиеся система управления автотранспортным комплексом, когда воздействие в системе носит рекомендательных характер, неспособна коренным образом изменить сложившиеся негативные тенденции и автотранспортная

система, как объект управления достичь целевых показателей, заложенных в Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [11-13].

Второй важный вывод касается непосредственно состава качественного состава автотранспортных предприятий на микроуровне транспортной системы и помогает ответить на вопрос о бессистемной организации или хаотично складывающейся структуре исследуемой системы, то есть, что является причиной «низкой прозрачности рынка», «демпинг недобросовестных перевозчиков» и «высокой фрагментарности рынка автомобильных грузоперевозчиков». На рисунке 5 (в %) и в таблице 1 (в млрд. т-км) приведены данные о составе автотранспортных предприятий в контексте, объемом выполняемой транспортной работы. Сегодня на рынке транспортных слуг существует несколько типов организаций, отличающихся по формам организации и количеству, имеющихся в их распоряжении подвижного состава

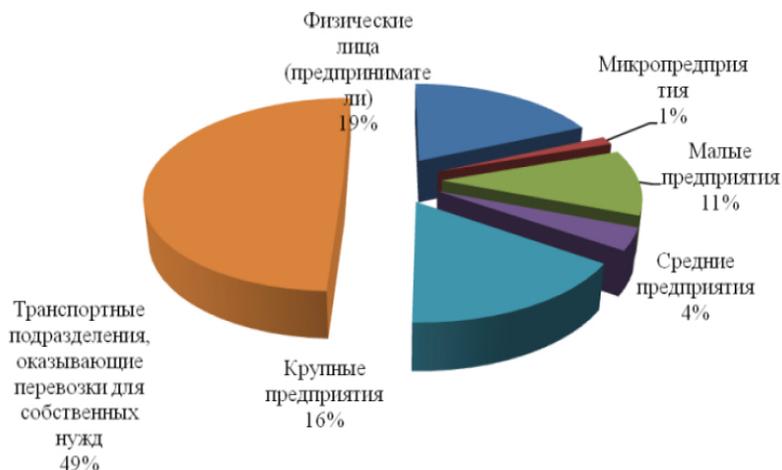


Рис. 5. Диаграмма распределения объемов выполняемой транспортной работы между различными категориями транспортных предприятий, % [12]

Таблица 1.

Распределение объемов выполняемой транспортной работы между различными категориями транспортных предприятий, млрд. тонна-км. [12]

Показатель	Грузооборот, млрд т-км
Всего	248,3
Физические лица (предприниматели)	45,9
Микропредприятия	3,4
Малые предприятия	27,0
Средние предприятия	9,1
Крупные предприятия	40,1
Транспортные подразделения, оказывающие перевозки для собственных нужд	122,8

Если исключить из приведенных данных на рисунке 5 и в таблице 1 транспортные предприятия, оказывающие услуги для собственных нужд, тогда окажется, что:

- на долю физических лиц (индивидуальных предпринимателей) приходится 45,9 выполненных млрд. тонна-км или 36,6% от всего объема транспортной работы;
- на долю юридических лиц (малых, средних и крупных предприятий) 79,6 тонна-км или 63,4 % от всего объема транспортной работы;

Результаты и обсуждения

На наш взгляд приведенная в [12; 13] вертикальная трехуровневая структура автотранспортной отрасли недостаточно полно раскрывает многообразие связей. Автотранспортная система (АТС) имеет свои особенности как экономическая система, она не является строго иерархической, поскольку транспортные предприятия, вынесенные на микроуровень, осуществляют свою деятельность в межрегиональном сообщении. Это касается как крупных предприятий, так и малых, средних и физических лиц. Поэтому, например, для АТС важно в первую очередь общее количество грузовых машин в стране, а не их распределение по регионам.

Отметим, что именно физические лица обеспечивают сегодня большую часть коммерческих перевозок. Вышесказанное позволяет предположить, что:

1. Автотранспортная система имеет более сложную структуру, сочетающую в себе иерархичность с элементами сетевой организации.
2. Можно предположить, что мезоуровень является наименее значимым в контексте организации магистральных автомобильных перевозок. А, учитывая интересы транспортной системы в целом, объединяющей различные виды транспорта, основным субъектом воздействия является макроуровень, а основным объектом воздействия – микроуровень, включающий в себя в том числе крупные автотранспортные предприятия. Следовательно решения, принимаемые на макроуровне, должны принимать во внимание воздействие, оказываемое не только на мезоуровень, но и на микроуровень АТС, поскольку именно на микроуровне находится значительное число предприятий, обеспечивающих функционирование АТС.

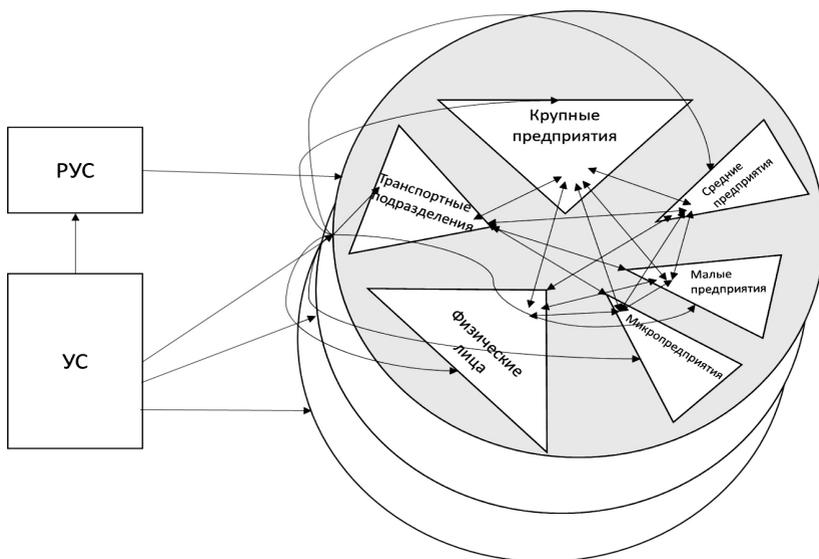


Рис. 6. Структура автотранспортной системы РФ по уровням управления: РУС – региональная управляющая система, УС – управляющая система.

На основе вышесказанного мы можем предложить доработанную схему автотранспортной системы России, акцентирующую внимание на важности решений на макроуровне напрямую для микроуровня (рисунок 6).

Далее обратимся к статистике, показывающий распределение количества грузовых автомобилей, имеющимся в распоряжении и эксплуатируемых отдельными категориями автотранспортных предприятий. Согласно данным, приведенным в [14-16] подавляющее большинство грузовых автомобилей (более 56%), эксплуатируется индивидуальными предпринимателями. По некоторым оценкам этот показатель достигает значений 59% и выше.

Заключение

Формируется следующее распределение, отражающие количественное (ед. подвижного состава) и качественное (объем выполняемой транспортной работы) соотношение между показателями деятельности автотранспортных предприятий различных форм собственности:

- ИП (индивидуальные предприниматели) – более 56% ед. автомобилей, выполняет 36,6% транспортной работы в РФ.
- Юридические лица – около 43 % ед. автомобилей, выполняет 63,4% транспортной работы в РФ.

По критерию производительность эксплуатации подвижного состава, предприятия индивидуальных предпринимателей значительно уступают предприятием юридической формой собственности, выполняющим аналогичные функции. Если же рассматривать эффективность различных типов автотранспортных предприятий, как более сложную категорию учитывающие такие критерии как: эффективность в системе налогообложения (максимизация доходов государства), экологическая эффективность (минимизация ущерба, наносимого экологии в результате производственной деятельности и т.д.), тогда исследуемая ситуация трансформируется из негативной в крайне негативную. Причина в следующем.

Транспортно-логистическое производство на территории РФ формировалась как несистемная совокупность интересов отдельных транспортно-логистических компаний, хаотично возникающих в экономическом пространстве РФ в результате действия законов рыночной экономики – развития спроса и предложения. Закономерно, что данное хаотичное развитие позволяет на первоначальном этапе развития добиться некой структуризации товародвижения, при этом отдельные транспортно-логистические предприятия могут быть субъективно эффективны, но говорить об объективной эффективности всей системы не приходится. Сформированная с учетом экономических интересах отдельных транспортных компаний общая структура транспортно-логистической деятельности не может быть системно устойчивой или стабильно эффективной на длительном участке развития по определению.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики [Росстат]. *Транспорт*. Получено с <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 24.10.2023).
2. I.Finance. *ВВП России по годам: 1991–2024*. Получено с <http://global-finances.ru/vvp-rossii-po-godam/> (дата обращения: 21.05.2024).
3. Кубанский государственный университет [КубГУ]. *Прогноз экономики России за период 2018–2024 г.* Получено с <https://www.kubsu.ru/sites/default/files/users/21431/portfolio/prezentaciya.pdf> (дата обращения: 11.06.2024).
4. Вельможин, А. В., Гудков, В. А., & Миротин, Л. Б. (2001). *Теория организации и управления автомобильными перевозками: логистический аспект формирования перевозочных процессов*. Волгоград: РПК «Политехник». 177 с.
5. Рассоха, В. И. (2009). Ситуационное управление автотранспортными системами. Часть 1. Системная эффективность эксплуатации автомобильного транспорта. *Вестник Оренбургского госу-*

- дарственного университета, 9, 148–153. EDN: <https://elibrary.ru/MLUEYN>
6. Рассоха, В. И. (2009). Ситуационное управление автотранспортными системами. Часть 2. Синтез системы управления. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 10, 144–150. EDN: <https://elibrary.ru/MLUFNN>
 7. Николин, В. И., Витвицкий, Е. Е., & Мочалин, С. М. (2004). *Грузовые автомобильные перевозки*. Омск: Вариант-Сибирь. 480 с. ISBN: 5-93204-058-0. EDN: <https://elibrary.ru/QQFUNJ>
 8. Вельможин, А. В., Гудков, В. А., Миротин, Л. Б., & Куликов, А. В. (2006). *Грузовые автомобильные перевозки: учебник для вузов*. Москва: Горячая линия — Телеком. 560 с. ISBN: 5-93517-231-3. EDN: <https://elibrary.ru/QNSRDH>
 9. Горев, А. Э. (2008). *Грузовые автомобильные перевозки: учебное пособие* (5-е изд.). Москва: Издательский центр «Академия». 288 с.
 10. Лазич, Ю. В., & Попова, И. Н. (2020). Тенденции развития отрасли автомобильных грузоперевозок в России. *BENEFICUM*, 4(37), 19–27. [https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.4\(37\).19-27](https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.4(37).19-27). EDN: <https://elibrary.ru/MGRRJP>
 11. Мишарин, А. С., & Евсеев, О. В. (2013). Актуализация Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года. *Транспорт Российской Федерации*, 2(45), 4–13. EDN: <https://elibrary.ru/QANRDF>
 12. Гавриленко, Н. Г., & Бородулина, С. А. (2020). Состав и структура автотранспортной системы Российской Федерации. *Наука о человеке. Гуманитарные исследования. Раздел 3. Экономические науки*, 1(39), 217–225. <https://doi.org/10.17238/issn1998-5320.2020.39.217>. EDN: <https://elibrary.ru/RGELDI>
 13. Гавриленко, Н. Г. (2014). Инновационные изменения на автомобильном транспорте в контексте циклического развития экономической системы. *Вестник СибАДИ*, 1, 132–136. EDN: <https://elibrary.ru/RYCZTH>

14. Федеральная служба государственной статистики [Росстат]. (2018). *Транспорт в России. 2018: статистический сборник*. Москва. 101 с.
15. Федеральная служба государственной статистики [Росстат]. (2017). *Малое и среднее предпринимательство в России. 2017: статистический сборник*. Москва. 78 с.
16. MegaResearch. *Численность предприятий отрасли грузовых перевозок*. Получено с https://www.megaresearch.ru/knowledge_library/chislennost-predpriyatii-otrasli-avtomobilnyh-gruzoperevozok-3156 (дата обращения: 17.09.2024).
17. Investing.com. *Индекс производственной активности PMI России*. Получено с <https://ru.investing.com/economic-calendar/russian-s-p-global-manufacturing-pmi-1630> (дата обращения: 11.10.2024).
18. Коммерсантъ. *Всё в семью и оборон*. Получено с <https://www.kommersant.ru/doc/7212404> (дата обращения: 05.10.2024).

References

1. Federal State Statistics Service [Rosstat]. *Transport*. Retrieved from <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (accessed: 24.10.2023).
2. I.Finance. *Russia's GDP by year: 1991–2024*. Retrieved from <http://global-finances.ru/vvp-rossii-po-godam/> (accessed: 21.05.2024).
3. Kuban State University [KubSU]. *Forecast of the Russian economy for the period 2018–2024*. Retrieved from <https://www.kubsu.ru/sites/default/files/users/21431/portfolio/prezentaciya.pdf> (accessed: 11.06.2024).
4. Velmozhin, A. V., Gudkov, V. A., & Mirotin, L. B. (2001). *Theory of organization and management of road transportation: Logistic aspect of forming transportation processes*. Volgograd: RPK “Politekhnik”. 177 pp.
5. Rassokha, V. I. (2009a). Situational management of road transport systems. Part 1. System efficiency of road transport operation. *Bulletin of Orenburg State University*, 9, 148–153. EDN: <https://elibrary.ru/MLUEYN>

6. Rassokha, V. I. (2009b). Situational management of road transport systems. Part 2. Synthesis of the control system. *Bulletin of Orenburg State University, 10*, 144–150. EDN: <https://elibrary.ru/MLUFNN>
7. Nikolin, V. I., Vitvitsky, E. E., & Mochalin, S. M. (2004). *Road freight transportation*. Omsk: Variant Sibir. 480 pp. ISBN: 5-93204-058-0. EDN: <https://elibrary.ru/QQFUNJ>
8. Velmozhin, A. V., Gudkov, V. A., Mirotin, L. B., & Kulikov, A. V. (2006). *Road freight transportation: Textbook for universities*. Moscow: Goryachaya Liniya — Telekom. 560 pp. ISBN: 5-93517-231-3. EDN: <https://elibrary.ru/QNSRDH>
9. Gorev, A. E. (2008). *Road freight transportation: Study guide* (5th ed.). Moscow: Publishing Center “Akademiya”. 288 pp.
10. Lazich, Yu. V., & Popova, I. N. (2020). Trends in the development of the road freight transportation industry in Russia. *BENEFICIUM, 4*(37), 19–27. [https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.4\(37\).19-27](https://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.4(37).19-27). EDN: <https://elibrary.ru/MGRRJP>
11. Misharin, A. S., & Evseev, O. V. (2013). Updating the Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. *Transport of the Russian Federation, 2*(45), 4–13. EDN: <https://elibrary.ru/QANRDF>
12. Gavrilenko, N. G., & Borodulina, S. A. (2020). Composition and structure of the road transport system of the Russian Federation. *Science of Man. Humanitarian Studies. Section 3. Economic Sciences, 1*(39), 217–225. <https://doi.org/10.17238/issn1998-5320.2020.39.217>. EDN: <https://elibrary.ru/RGELDI>
13. Gavrilenko, N. G. (2014). Innovative changes in road transport in the context of the cyclical development of the economic system. *Bulletin of SibADI, 1*, 132–136. EDN: <https://elibrary.ru/RYCZTH>
14. Federal State Statistics Service [Rosstat]. (2018). *Transport in Russia. 2018: Statistical compilation*. Moscow. 101 pp.
15. Federal State Statistics Service [Rosstat]. (2017). *Small and medium-sized enterprises in Russia. 2017: Statistical compilation*. Moscow. 78 pp.

16. MegaResearch. *Number of enterprises in the freight transportation sector*. Retrieved from https://www.megaresearch.ru/knowledge_library/chislennost-predpriyatiy-otrasli-avtomobilnyh-gruzoperevozok-3156 (accessed: 17.09.2024).
17. Investing.com. *Russian S&P Global Manufacturing PMI*. Retrieved from <https://ru.investing.com/economic-calendar/russian-s-p-global-manufacturing-pmi-1630> (accessed: 11.10.2024).
18. Kommersant. *All in the family and defense*. Retrieved from <https://www.kommersant.ru/doc/7212404> (accessed: 05.10.2024).

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Судоргин Роман Олегович, кандидат экономических наук
*Государственный университет управления (ГУУ)
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация
ro_sudorgin@guu.ru*

Каштанов Игорь Юрьевич, аспирант
*Государственный университет управления (ГУУ)
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация
iyu_kashtanov@guu.ru*

Соловьев Николай Владимирович
*Государственный университет управления (ГУУ)
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация
nv_solovev@guu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Roman O. Sudorgin, Ph.D. in Economics
*State University of Management
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation
ro_sudorgin@guu.ru*

Igor Yu. Kashtanov, Graduate Student

State University of Management

99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation

iyu_kashtanov@guu.ru

Nikolay V. Solovyov

State University of Management

99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation

nv_solovev@guu.ru

Поступила 21.06.2025

После рецензирования 14.07.2025

Принята 28.07.2025

Received 21.06.2025

Revised 14.07.2025

Accepted 28.07.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-370

EDN: VKTGZT



УДК 656.135.4

Научная статья |

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПАРКОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

А.Е. Кривоногова, А.Г. Исавнин

Аннотация

Обоснование. В статье исследуется актуальная проблема дефицита парковочных пространств в современных городских условиях. Авторами разработано инновационное решение на основе автоматизированной системы мониторинга, использующей методы компьютерного зрения и глубокого обучения. Проведен комплексный анализ существующих мировых аналогов систем управления парковками с выделением их конкурентных преимуществ и существенных ограничений. В качестве методологической основы предложена детализированная процессная модель, представленная в нотации BPMN 2.0, которая включает описание архитектуры решения, алгоритмы обработки видеоданных и методику обучения нейронной сети. Особое внимание уделено разработке специализированного шаблона отчетности, обеспечивающего наглядное представление статистических данных о занятости парковочных мест в режиме реального времени.

Цель – повышение эффективности управления парковочной инфраструктурой за счет внедрения интеллектуальных алгоритмов автоматического распознавания.

Материалы и методы. В работе применяется комплекс современных методов, включая технологии машинного обучения (с акцентом

на использование модели YOLOv8m), принципы системного анализа и синтеза, а также методы статистической обработки данных.

Результаты. Экспериментальные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода, демонстрируя стабильно высокую точность детектирования свободных парковочных мест, превышающую 80%. В перспективе развития системы авторы выделяют три ключевых направления: обеспечение масштабируемости для работы с крупными парковочными комплексами, оптимизацию пользовательских интерфейсов и дальнейшее повышение точности детектирования за счет совершенствования алгоритмов. Полученные результаты имеют значительную практическую ценность для решения актуальных задач smart city и оптимизации городской инфраструктуры.

Ключевые слова: машинное обучение; нейронные сети; интеллектуальная транспортная система; автоматизированный мониторинг; автомобилизация

Для цитирования. Кривоногова, А. Е., & Исавнин, А. Г. (2025). Автоматизированный мониторинг инфраструктуры парковки с использованием методов машинного обучения и компьютерного зрения. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 72–91. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-370>

Original article | System Analysis, Management and Information Processing, Statistics

AUTOMATED MONITORING OF PARKING INFRASTRUCTURE USING MACHINE LEARNING AND COMPUTER VISION METHODS

A.E. Krivonogova, A.G. Isavnin

Abstract

Background. The article examines the current problem of parking space shortage in modern urban conditions. The authors have developed an innovative solution based on an automated monitoring system using

computer vision and deep learning methods. A comprehensive analysis of existing global analogues of parking management systems is carried out, highlighting their competitive advantages and significant limitations. As a methodological basis, a detailed process model presented in BPMN 2.0 notation is proposed, which includes a description of the solution architecture, video data processing algorithms and a neural network training methodology. Particular attention is paid to the development of a specialized reporting template that provides a visual representation of statistical data on the occupancy of parking spaces in real time.

Purpose. The purpose is to improve the efficiency of parking infrastructure management through the implementation of intelligent algorithms for automatic recognition.

Materials and methods. The study employed a comprehensive scientific approach incorporating machine learning techniques, systems theory, systems analysis and synthesis, along with analytical and statistical methods.

Results. The work uses a set of modern methods, including machine learning technologies (with an emphasis on the use of the YOLOv8m model), principles of system analysis and synthesis, as well as methods of statistical data processing.

Keywords: machine learning; neural networks; intelligent transport system; automated monitoring; motorization

For citation. Krivonogova, A. E., & Isavnin, A. G. (2025). Automated monitoring of parking infrastructure using machine learning and computer vision methods. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 72–91. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-370>

Введение

Российский автомобильный рынок демонстрирует устойчивую положительную динамику в 2024 году. Эксперты «АВТОСТАТ» зафиксировали продажи 1,15 млн. новых легковых автомобилей за январь-сентябрь текущего года, что представляет собой рост на 60,9% в годовом исчислении [1]. При этом плотность автомо-

бильного парка в стране увеличилась до 322 машин на тысячу человек [2], что отражает интенсивный процесс насыщения рынка. Данная тенденция характеризуется комплексом взаимосвязанных социально-экономических и экологических последствий. С одной стороны, отмечаются позитивные эффекты, включающие повышение транспортной мобильности населения, сокращение временных затрат на передвижение, рост комфортности перемещений и стимулирование развития дорожно-транспортной инфраструктуры. С другой стороны, эмпирические наблюдения фиксируют ряд негативных явлений: ухудшение экологической ситуации вследствие повышенных выбросов загрязняющих веществ, увеличение загруженности дорожной сети, рост уровня шумового загрязнения в урбанизированных зонах, а также обострение проблемы дефицита парковочных пространств. Указанные процессы требуют комплексного междисциплинарного изучения с позиций транспортной экономики, урбанистики и экологического менеджмента для разработки сбалансированных решений.

Основные принципы организации и управления парковочным пространством, в условиях его ограниченности

Оптимизация управления парковочными ресурсами в условиях их дефицита представляет собой системный комплекс организационных и технологических мероприятий, направленных на эффективное управление использованием парковочных мест и минимизацию негативных последствий дефицита парковочных площадей.

Рассмотрим современные подходы к решению проблемы дефицита парковочных пространств. Одним из наиболее эффективных способов решения данной проблемы является строительство многоуровневых и подземных парковочных комплексов. [7]. Современные архитектурно-планировочные решения в данной области включают создание подземных паркингов (1-5 уровней), надземных многоэтажных сооружений (до 10-15 ярусов) и комбинированных парковочных систем, что позволяет существенно оптимизировать использование

ограниченного городского пространства. Основные преимущества многоуровневых парковочных комплексов включают: значительную оптимизацию использования городского пространства (плотность размещения транспортных средств в 3-5 раз выше, чем на наземных парковках), снижение уровня акустического воздействия на 15-20 дБ по сравнению с открытыми парковочными площадками, улучшение экологических показателей за счет сокращения выбросов в жилых зонах на 25-30%, а также существенное повышение защищенности транспортных средств (снижение риска угона на 40-60%). Однако реализация подобных проектов сопряжена с рядом существенных ограничений: высокой капиталоемкостью, техническими сложностями при реализации в условиях плотной городской застройки, необходимостью применения дополнительных инженерных решений (включая системы вентиляции, дренажа и противопожарной безопасности), а также ограниченной пропускной способностью въездных и выездных узлов в периоды пиковой нагрузки.

Вторым значимым направлением оптимизации парковочного пространства выступает внедрение системы платных парковок. Данный метод регулирования транспортных потоков демонстрирует комплексное воздействие на городскую среду. Ключевые преимущества данной системы, подтвержденные международной практикой городского планирования, включают: существенное сокращение времени поиска свободных парковочных мест (на 25-40% согласно исследованиям транспортных департаментов европейских городов), значительное уменьшение количества нарушений правил парковки (до 60-70% по данным мониторинга), повышение пропускной способности основных транспортных артерий на 15-20%, улучшение визуального восприятия городского пространства за счет упорядочивания парковочной деятельности, а также заметное улучшение экологических показателей (снижение уровня вредных выбросов на 10-15% в зонах действия платных парковок).

Однако анализ социально-экономических последствий внедрения данной системы выявляет ряд существенных проблемных аспектов.

Наиболее критичными из них являются: прогрессирующее сокращение количества бесплатных парковочных мест (до 80-90% в центральных районах крупных городов), установление экономически обоснованных тарифов на парковку, что создает условия для социального неравенства в доступе к городской инфраструктуре [4].

Третьим перспективным направлением оптимизации парковочного пространства является внедрение систем автоматизированного мониторинга, основанных на современных цифровых технологиях. [5]. Особенностью предлагаемого решения является его ориентация на массового пользователя - система разрабатывается с учетом требований доступности, простоты использования и минимальных требований к техническому оснащению пользовательских устройств.

В рамках данного исследования, ориентированного на повышение качества городской среды и комфорта жителей, был выбран именно технологический подход, основанный на применении искусственного интеллекта [11].

Пролонгирование решения проблемы дефицита парковочных пространств может спровоцировать существенное ухудшение дорожно-транспортной ситуации. Статистический анализ аварийности в мегаполисах (Москва, СПб) подтверждает, что до 23% всех ДТП происходят в зонах с острым дефицитом парковочных мест (Центр транспортного планирования, 2024) [3]. Особую опасность представляют: стихийные парковки на проезжей части препятствование работе общественного транспорта, перекрытие пешеходных переходов и велодорожек

Перспективным направлением оптимизации использования парковочных пространств является внедрение автоматизированных систем мониторинга на основе технологий искусственного интеллекта [6]. Внедрение автоматизированных систем мониторинга на основе технологий искусственного интеллекта обеспечивает ряд значимых преимуществ, подтвержденных практическими исследованиями. Ключевым достоинством данного подхода является возможность осуществления непрерывного онлайн-анализа состояния парковоч-

ных пространств с использованием современных алгоритмов компьютерного зрения и глубокого обучения. Технологические решения такого класса демонстрируют высокую эффективность в решении следующих задач: существенное сокращение временных затрат на поиск свободных парковочных мест (по данным полевых испытаний, время поиска сокращается на 40-60% по сравнению с традиционными методами), а также значительная экономия топливных ресурсов за счет минимизации холостого пробега транспортных средств в процессе поиска парковки (исследования показывают снижение расхода топлива на 15-20% в зонах действия подобных систем) [14]. Дополнительным преимуществом является синергетический эффект от интеграции таких систем с городскими службами и навигационными приложениями, что создает предпосылки для формирования комплексной экосистемы управления городской мобильностью [14].

Исследование существующих программных решений

В ходе изучения актуальных технологий для обнаружения доступных парковочных мест были проанализированы такие сервисы, как Parkopedia, Яндекс.Парковки и Waze [13].

В ходе исследования современных технологических решений для идентификации свободных парковочных мест был проведен комплексный анализ функциональных характеристик сервисов Parkopedia, Яндекс.Парковки и Waze [13]. Сервис Parkopedia демонстрирует ряд конкурентных преимуществ, включая глобальный охват парковочной инфраструктуры, детализированную информацию о параметрах парковочных зон, интегрированные функции бронирования и электронных платежей, расширенные возможности фильтрации по стоимости, удаленности от целевого объекта и наличию специализированных услуг, а также встроенные навигационные модули для маршрутизации. Однако выявлены существенные ограничения: проблемы актуализации данных, отсутствие информации о специализированных типах парковочных пространств, потенциальные ограничения функциональности в отдельных ре-

гионах, обусловленные зарубежным происхождением платформы. Приложение Яндекс.Парковки характеризуется высокой степенью покрытия парковочной инфраструктуры в Российской Федерации, эргономичным пользовательским интерфейсом и интегрированной системой безналичных расчетов. К существенным недостаткам относятся нестабильность работы программного обеспечения, отсутствие механизма резервирования парковочных мест, неполнота данных по отдельным парковочным объектам и временные задержки в обновлении информации о доступности мест. Сервис Waze обеспечивает оперативное обновление данных в режиме реального времени и алгоритмы оптимизации маршрутов. При этом отмечаются следующие ограничения: отсутствие специализированных фильтров для поиска парковочных мест, наличие ошибок в предоставляемых данных и территориальные ограничения функциональности, характерные для зарубежных разработок. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего совершенствования систем мониторинга парковочных пространств, в частности в направлениях повышения точности данных, расширения функциональных возможностей и адаптации к региональным особенностям.

Анализ ИИ-решений для мониторинга парковок выявил их несоответствие ключевым требованиям: классификация мест (включая специализированные), визуализация свободных мест в реальном времени, интеллектуальный поиск с учетом типа ТС (легковые/грузовые) и способа парковки (перпендикулярная/параллельная). Особую важность представляет бесплатность сервиса, так как большинство водителей используют такие приложения нерегулярно. Отсутствие комплексных решений указывает на необходимость разработки open-source платформы с компьютерным зрением и машинным обучением [13].

Для решения поставленной задачи предлагается использование сверточной нейронной сети (CNN), оптимальной для задач компьютерного зрения [8; 9]. Система будет обрабатывать видеопоток с камер наблюдения, выполняя детекцию транспортных средств и клас-

сификацию состояния парковочных мест (занято/свободно) в радиусе 500 метров. Архитектура CNN предусматривает многоэтапную обработку данных: прием видеосигнала, сегментацию объектов, определение их статуса и формирование зоны анализа, что обеспечивает высокую точность распознавания при работе в реальном времени.

Функциональное моделирование системы поддержки принятия решений (СППР) и ее концептуальная модель

Формальное моделирование предметной области управления парковочным пространством было выполнено с использованием нотации BPMN 2.0 - стандартизированного языка графического представления бизнес-процессов, обеспечивающего эффективную визуализацию и последующую имплементацию процессных моделей [12]. В рамках исследования процесс «Мониторинг парковочного пространства» был декомпозирован на две взаимосвязанные подпроцедуры: верификация доступности запрашиваемого парковочного места, непрерывный анализ видеопотока с парковочной территории.

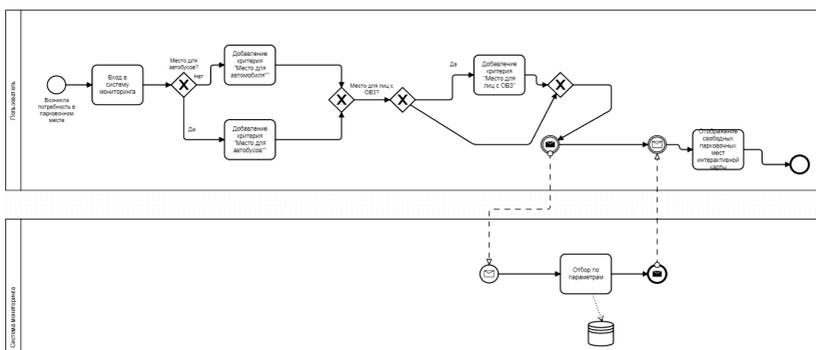


Рис. 1. Декомпозиция задачи «Верификация доступности запрашиваемого парковочного места»

В рамках исследования исходные данные поступают с камер видеонаблюдения MagicPro [4] с частотой обновления 30 секунд. Для обработки и анализа данных используется программный стек,

включающий язык программирования Python (версия 3.9), нейросетевую модель YOLOv8 для детекции объектов, язык запросов SQL и СУБД SQLite, выбор которой обусловлен низкими требованиями к системным ресурсам, простотой интеграции с Python и возможностью работы в embedded-режиме.

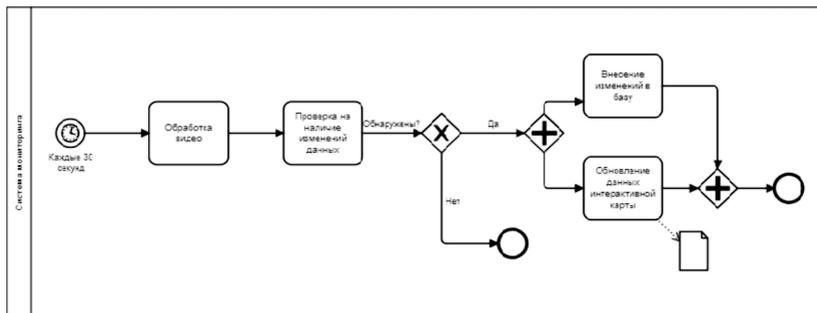


Рис. 2. Декомпозиция задачи «Непрерывный анализ видеопотока с парковочной территории.»



Рис. 3. Концептуальная модель СПМР

В результате обработки данных формируются: интерактивная карта парковочных мест, статистика загруженности в реальном времени, а также рекомендательная система по поиску альтернативных парковочных мест в радиусе 500 м при отсутствии сво-

бодных мест на текущей парковке. Применяемая методология обработки данных соответствует современным подходам в области компьютерного зрения и анализа пространственных данных [4].

```

train_yolo.py
C:\> vkr_project > Yolov8 > train_yolo.py
+ Code + Markdown | Run All | Restart | Clear All Outputs | Variables | Outline ...
waiting to maximize memory...
logging results to runs\detect\train2
Starting training for 3 epochs...

Epoch  GPU_mem  box_loss  cls_loss  dfl_loss  Instances  Size
1/3      0G      1.016    0.9392   1.318     56         640: 100% |██████████| 450/450 [53:06:00:00, 7.08s/it]
class   Images  Instances  Box(P   R
all     450     4889     0.884   0.781   0.745   0.39

Epoch  GPU_mem  box_loss  cls_loss  dfl_loss  Instances  Size
2/3      0G      0.5979   0.5655   1.056     47         640: 100% |██████████| 450/450 [51:24:00:00, 6.85s/it]
class   Images  Instances  Box(P   R
all     450     4889     0.848   0.78   0.772   0.416

Epoch  GPU_mem  box_loss  cls_loss  dfl_loss  Instances  Size
3/3      0G      0.5802   0.497    1.01     53         640: 100% |██████████| 450/450 [50:37:00:00, 6.75s/it]
class   Images  Instances  Box(P   R
all     450     4889     0.893   0.786   0.806   0.455

3 epochs completed in 2.843 hours.
Optimizer stripped from runs\detect\train2\weights\last.pt, 52.00B
Optimizer stripped from runs\detect\train2\weights\best.pt, 52.00B

Validating runs\detect\train2\weights\best.pt...
Ultralytics YOLOv8.2.24 Python 3.10.14 torch 2.3.0+cpu CPU (AMD Ryzen 5 5600H with Radeon Graphics)
Model summary (fused): 218 Layers, 2584918 parameters, 0 gradients, 78.7 GFLOPS
class   Images  Instances  Box(P   R   mAP50  mAP50-95): 100% |██████████| 113/113 [04:58:00:00, 2.64s/it]
all     450     4889     0.893   0.786   0.806   0.455
Car     450     1739     0.993   0.769   0.851   0.501
Parkingplace 450     3150     0.793   0.803   0.759   0.489
Speed: 1.2ms preprocess, 647.0ms inference, 0.0ms loss, 0.4ms postprocess per image
Results saved to runs\detect\train2

```

Рис. 4. Результаты обработки программы

Процесс обработки и анализа данных включает три последовательных этапа: подготовку данных для обучения, аннотацию изображений и обучение нейросетевой модели [6]. Первоначально осуществляется развертывание инструмента компьютерного зрения Computer Vision Annotation Tool (CVAT) в среде Docker, после чего производится сегментация видеопотока на отдельные кадры с использованием библиотеки FFmpeg с последующим экспортом данных в формате YOLO 1.1. На этапе аннотирования изображений выполняется классификация объектов на две категории: «car» (транспортное средство) и «parking place» (парковочное место), а также разделение датасета на обучающую (train) и валидационную (validation) выборки. Финальный этап предполагает обучение модели YOLOv8m в среде разработки Visual Studio Code с установленным параметром количества эпох равным трем, что обеспечи-

вает оптимальный баланс между точностью детекции объектов и вычислительной эффективностью используемого алгоритма [15]. (см. рис. 4).

Результаты и обсуждение

На текущем этапе исследования реализован базовый функционал системы компьютерного зрения, обеспечивающий детекцию свободных парковочных мест в пределах локальной парковочной зоны с применением методов искусственного интеллекта. Перспективным направлением развития системы является масштабирование функциональности для мониторинга распределенных парковочных пространств в радиусе 500 метров. Подобное расширение возможностей системы позволит существенно повысить ее практическую ценность за счет предоставления альтернативных вариантов парковки в условиях высокой загруженности основной парковочной зоны, что соответствует современным требованиям к интеллектуальным транспортным системам

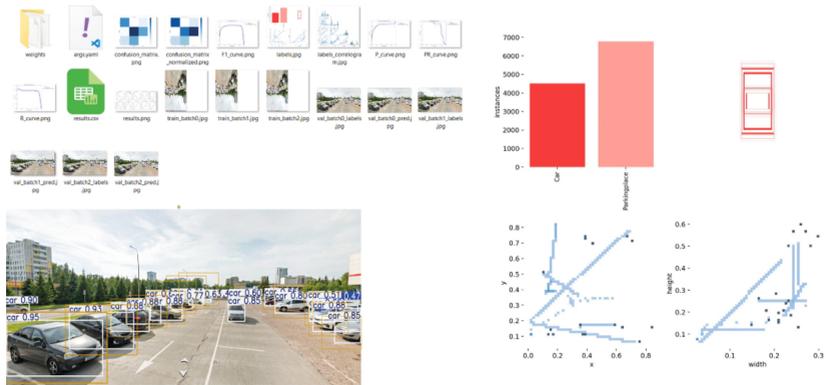


Рис. 5. Результаты обучения нейронной сети

Результаты работы системы визуализируются посредством интерактивной карты парковочного пространства, где с помощью цветовой индикации отображается текущий статус мест: свобод-

ные позиции маркируются зеленым цветом, занятые – красным. Точность детекции транспортных средств и идентификации состояния парковочных мест достигает 80%, что подтверждает эффективность предложенного алгоритма компьютерного зрения.

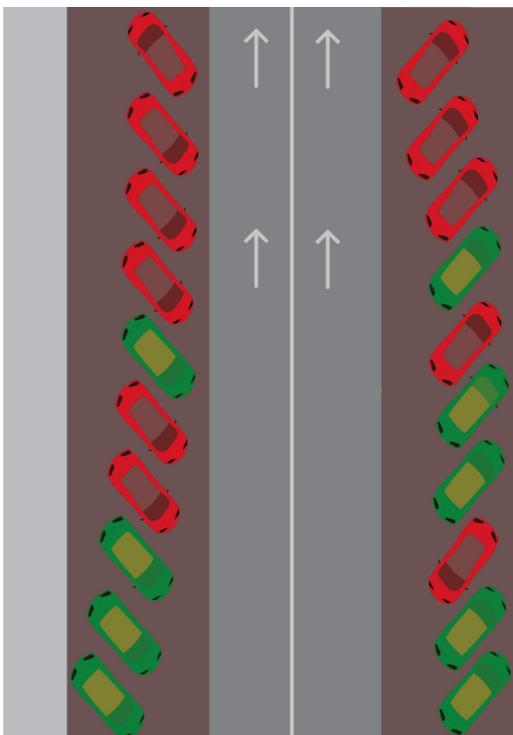


Рис. 6. Схема доступности парковочных мест

В качестве дополнительного результата работы системы формируется аналитический отчет «Длительность парковки транспортных средств на текущий момент времени». Указанный отчет содержит временные характеристики парковки каждого транспортного средства, зафиксированные в режиме реального времени, что обеспечивает мониторинг фактической продолжительности использования парковочных мест.



Admin

Длительность парковки ТС
на текущую дату и время

Id места	Номер транспортного средства	Длительность парковки
1	A111BB	0000-00-00 02:00:30
2	A22BB	0000-00-01 00:25:30
5	A111BB	0000-00-00 01:35:30
6	A111CC	0000-00-00 05:10:00
7	A111EE	0000-00-00 01:10:00
8	A111HH	0000-00-00 02:10:00
9	A111KK	0000-00-00 01:00:30
10	A111MM	0000-00-00 00:50:00
11	A111OO	0000-00-00 01:40:00

Рис. 7. Отчет «Длительность парковки транспортных средств на текущий момент времени»

Заклучение

Проведенное исследование подтверждает, что автоматизированные системы мониторинга парковочных пространств представляют собой технологически значимый инструмент оптимизации городской транспортной инфраструктуры. Научная новизна работы заключается в комплексном анализе функциональных возможностей таких систем с предложением перспективных направлений их усовершенствования. Установлено, что внедрение интеллектуального мониторинга позволяет достичь следующих результатов: сокращение времени поиска парковочных мест на 40-60%, уменьшение количества дорожно-транспортных происшествий, связанных с парковкой, на 15-20%, а также снижение вредных выбросов на 15-25% за счет минимизации времени работы двигателей в режиме поиска [5; 10].

Перспективными направлениями развития систем мониторинга являются: внедрение гибридных алгоритмов компьютерного зрения, сочетающих CNN-архитектуры с мультиспектральным анализом для обеспечения устойчивой работы в условиях снежного покрова, тумана и недостаточной освещенности; интеграция данных с распределенной сети датчиков (температурных, влажности, освещенности); применение edge-вычислений для обработки информации в реальном времени; разработка прогнозных моделей загрузки парковочных пространств с использованием методов машинного обучения. Особое значение имеет создание унифицированных протоколов взаимодействия таких систем с другими компонентами интеллектуальной транспортной инфраструктуры «умного города».

Полученные результаты открывают новые возможности для дальнейших научных исследований в области компьютерного зрения, распределенных вычислений и урбанистического планирования. Практическая значимость работы заключается в предложении конкретных технических решений, направленных на повышение точности детекции до 95-98% в любых погодных условиях и обеспечение бесперебойной работы системы мониторинга как ключевого элемента экосистемы smart city [10,15,16]. Реализация предложенных усовершенствований будет способствовать созданию более эффективной, экологичной и безопасной городской среды.

Список литературы

1. Агентство «АВТОСТАТ». (2024). *Продажи новых легковых автомобилей в России за январь–сентябрь 2024 года*. Получено с <https://www.autostat.ru/press-releases/58578> (дата обращения: 30.06.2025).
2. Агентство «АВТОСТАТ». (2024). *Уровень автомобилизации населения 2024*. Получено с <https://www.autostat.ru/infographics/57413/> (дата обращения: 30.06.2025).
3. Госавтоинспекция. (n.d.). *Показатели состояния дорожного движения*. Получено с <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 30.06.2025).

4. Матовников, С. А., & Матовникова, Н. Г. (2010). Некоторые современные тенденции в теории и практике проектирования городских парков. В *Наука и образование: архитектура, градостроительство и строительство: материалы Международной конференции, посвящённой 80-летию строительного образования и 40-летию архитектурного образования Волгоградской области* (с. 386–391). Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. EDN: <https://elibrary.ru/RUNJZV>
5. Линёв, Е. Д., & Братухин, Д. С. (2021). Технология видеоналитики в современном понимании. В *Инновационные научные исследования 2021: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса* (с. 21–24). Пенза: Наука и Просвещение. EDN: <https://elibrary.ru/EJKZWG>
6. Осипенко, А. А., Мананков, К. Ф., Осипенко, А. М., Николенко, Т. А., & Данилов, О. Ф. (2023). Разработка системы мониторинга парковочных пространств. *Архитектура, строительство, транспорт*, 1(103), 58–66. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2023-1-58-66>. EDN: <https://elibrary.ru/DMCLEG>
7. Панина, В. С., Амеличев, Г. Э., & Белов, Ю. С. (2022). Построение интеллектуальной системы мониторинга как части интеллектуальной парковочной системы. *Научное обозрение. Технические науки*, 4, 17–21. <https://doi.org/10.17513/srts.1404>. EDN: <https://elibrary.ru/NAVYVL>
8. Рахматова, Г. Э. (2024). Проектирование многоуровневой парковки в условиях плотной городской среды. *Вестник науки*, 3(6), 2222–2227. EDN: <https://elibrary.ru/OWEPUE>
9. Салахутдинов, Э. Р., Исавнин, А. Г., Карамышев, А. Н., Сиякина, В. В., & Фадеева, А. (2020). *Исследование возможностей нейронных сетей для анализа и колоризации изображений* [монография]. Набережные Челны: Мир печати. 82 с. EDN: <https://elibrary.ru/TLHDMO>
10. Сиякина, В. В., Исавнин, А. Г., Карамышев, А. Н., Салахутдинов, Э. Р., & Фадеева, А. (2020). *Применение нейронных сетей для рас-*

- познавания образов* [монография]. Набережные Челны: Мир печати. 98 с. EDN: <https://elibrary.ru/TLJOAO>
11. Begishev, I., Isavnin, A., Nedelkin, A., Lydia, E. L., & Kumar, K. V. (2024). AI and IoT in smart cities: A methodology, transformation, and challenges. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1057, 305–318. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4895-2_25. EDN: <https://elibrary.ru/FROVWX>
 12. Chen, K., Zhang, M., & Wang, L. (2022). Smart parking management system using artificial intelligence and internet of things. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 12456–12468.
 13. Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A. (2013). *Fundamentals of business process management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33143-5>
 14. Fahim, A., Hasan, M., & Chowdhury, M. A. (2021). Smart parking systems: Comprehensive review based on various aspects. *Heliyon*, 7(5), e06896. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06896>. EDN: <https://elibrary.ru/HGOZWX>
 15. Jugnu, M. (2024). Automated monitoring systems in IT infrastructure: A systematic analysis of detection, response, and optimization mechanisms. *International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET)*, 15(6), 1099–1110.
 16. Sobirin, M., Tiorivaldi, & Mufit, C. (2023). Car parking space detection using YOLOv8. В *Proceedings of the 4th International Seminar and Call for Paper (ISCP UTA '45 JAKARTA 2023)* (с. 394–398). <https://doi.org/10.5220/0012582600003821>

References

1. Avtostat Agency. (2024). *Sales of new passenger cars in Russia for January–September 2024*. Retrieved from <https://www.autostat.ru/press-releases/58578> (accessed: 30.06.2025).
2. Avtostat Agency. (2024). *Level of motorization of the population 2024*. Retrieved from <https://www.autostat.ru/infographics/57413/> (accessed: 30.06.2025).

3. State Traffic Inspectorate. (n.d.). *Indicators of road traffic conditions*. Retrieved from <http://stat.gibdd.ru/> (accessed: 30.06.2025).
4. Matovnikov, S. A., & Matovnikova, N. G. (2010). Some current trends in the theory and practice of urban park design. In *Science and Education: Architecture, Urban Planning and Construction: Proceedings of the International Conference Dedicated to the 80th Anniversary of Construction Education and the 40th Anniversary of Architectural Education in the Volgograd Region* (pp. 386–391). Volgograd: Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. EDN: <https://elibrary.ru/RUHJZV>
5. Linëv, E. D., & Bratukhin, D. S. (2021). Video analytics technology in the modern understanding. In *Innovative Scientific Research 2021: Proceedings of the International Research Competition* (pp. 21–24). Penza: Nauka i Prosveshchenie. EDN: <https://elibrary.ru/EJKZWG>
6. Osipenko, A. A., Manankov, K. F., Osipenko, A. M., Nikolenko, T. A., & Danilov, O. F. (2023). Development of a parking space monitoring system. *Architecture, Construction, Transport*, 1(103), 58–66. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2023-1-58-66>. EDN: <https://elibrary.ru/DMCLEG>
7. Panina, V. S., Amelichev, G. E., & Belov, Yu. S. (2022). Building an intelligent monitoring system as part of an intelligent parking system. *Scientific Review. Technical Sciences*, 4, 17–21. <https://doi.org/10.17513/srts.1404>. EDN: <https://elibrary.ru/NAVYVL>
8. Rakhmatova, G. E. (2024). Designing a multi-level parking facility in a dense urban environment. *Bulletin of Science*, 3(6), 2222–2227. EDN: <https://elibrary.ru/OWEPUE>
9. Salakhutdinov, E. R., Isavnin, A. G., Karamyshev, A. N., Siyakina, V. V., & Fadeeva, A. (2020). *Research on the capabilities of neural networks for image analysis and colorization* [Monograph]. Naberezhnye Chelny: Mir Pechati. 82 pp. EDN: <https://elibrary.ru/TLHDMO>
10. Siyakina, V. V., Isavnin, A. G., Karamyshev, A. N., Salakhutdinov, E. R., & Fadeeva, A. (2020). *Application of neural networks for pattern recognition* [Monograph]. Naberezhnye Chelny: Mir Pechati. 98 pp. EDN: <https://elibrary.ru/TLJOAO>

11. Begishev, I., Isavnin, A., Nedelkin, A., Lydia, E. L., & Kumar, K. V. (2024). AI and IoT in smart cities: A methodology, transformation, and challenges. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1057, 305–318. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4895-2_25. EDN: <https://elibrary.ru/FROVWX>
12. Chen, K., Zhang, M., & Wang, L. (2022). Smart parking management system using artificial intelligence and internet of things. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 12456–12468.
13. Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A. (2013). *Fundamentals of business process management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33143-5>
14. Fahim, A., Hasan, M., & Chowdhury, M. A. (2021). Smart parking systems: Comprehensive review based on various aspects. *Heliyon*, 7(5), e06896. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06896>. EDN: <https://elibrary.ru/HGOZWX>
15. Jugnu, M. (2024). Automated monitoring systems in IT infrastructure: A systematic analysis of detection, response, and optimization mechanisms. *International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET)*, 15(6), 1099–1110.
16. Sobirin, M., Tiorivaldi, & Mufit, C. (2023). Car parking space detection using YOLOv8. In *Proceedings of the 4th International Seminar and Call for Paper (ISCP UTA '45 JAKARTA 2023)* (pp. 394–398). <https://doi.org/10.5220/0012582600003821>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Кривоногова Алла Евгеньевна, магистрант

*Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета
пр. Мира, 68/19, г. Набережные Челны, 423810, Российская Федерация
web.programmer2001@gmail.com*

Исавнин Алексей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор

*Набережночелнинский институт (филиал) Казанского
(Приволжского) федерального университета
пр. Мира, 68/19, г. Набережные Челны, 423810, Российская
Федерация
isavnin@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alla E. Krivonogova, Master's Student

*Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Institute
(branch)
68/19, Mira Ave., Naberezhnye Chelny, 423810, Russian Fed-
eration
web.programmer2001@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3869-7902>*

Alexey G. Isavnin, Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Pro-
fessor

*Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Institute
(branch)
68/19, Mira Ave., Naberezhnye Chelny, 423810, Russian Fed-
eration
isavnin@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6413-3329>*

Поступила 11.06.2025

После рецензирования 15.07.2025

Принята 23.07.2025

Received 11.06.2025

Revised 15.07.2025

Accepted 23.07.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-372

EDN: UJGIMS

УДК 656.078



Научная статья | Логистические транспортные системы

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСГРАНИЧНОЙ СИСТЕМЫ

Р.Г. Король

Аннотация

Обоснование. Устойчивость международного товарообмена обеспечивает развитая система трансграничных переходов, формируемая на уровне страны, региона и рассматриваемой приграничной территории. Трансграничная система рассматривается в виде взаимосвязанных множеств объектов, факторов, ресурсов, показателей, процессов и технологических связей. Теоретико-множественное моделирование позволяет описать функционирование трансграничных переходов различных видов транспорта и структурно представить составляющие элементы модели. Для обеспечения пропуски транспортных и грузовых потоков необходимо наличие соответствующей терминально-логистической инфраструктуры. Терминально-логистические объекты в работе рассматривается, как обеспечивающая и обслуживающая инфраструктура трансграничного перехода. Создание и развитие приграничной терминально-логистической инфраструктуры должно осуществляться с помощью предложенного индекса достаточности терминально-логистического обеспечения трансграничного перехода. Также сформулирован комплексный критерий, согласно которому должно осуществляться формирование терминально-логистической инфраструктуры трансграничного перехода.

Целью исследования является разработка теоретико-множественной модели трансграничного перехода и комплексного критерия формирования приграничной терминально-логистической инфраструктуры.

Методология. Работа выполнена с использованием теоретических методов исследования: анализ, сравнение, моделирование и формализация.

Результаты. Разработана и описана теоретико-множественная модель системы трансграничных переходов на макроуровне, мезоуровне и микроуровне. Сформулирован индекс достаточности терминально-логистического обеспечения трансграничного перехода и комплексный критерий формирования терминально-логистической инфраструктуры трансграничного перехода.

Область применения результатов. Сформированная теоретико-множественная модель системы трансграничных переходов является частью научно-исследовательской работы, направленной на повышение эффективности функционирования транспортной системы Дальнего Востока.

Ключевые слова: трансграничные переходы; приграничная терминально-логистическая инфраструктура; теоретико-множественная модель трансграничной системы

Для цитирования. Король, Р. Г. (2025). Теоретико-множественная модель трансграничной системы. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 92–107. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-372>

Original article | Logistic Transport Systems

A SET-THEORETIC MODEL OF A CROSS-BORDER SYSTEM

R.G. Korol

Abstract

Background. The stability of international trade is ensured by a well-developed system of cross-border crossings, formed at the level of the country, region and the border area under consideration. A cross-border system is considered as an interconnected set of objects, factors, resources, indicators, processes, and technological connections. Set-theoretic modeling makes it possible to describe the functioning of cross-border crossings

of various modes of transport and structurally present the constituent elements of the model. To ensure the passage of transport and cargo flows, it is necessary to have an appropriate terminal and logistics infrastructure. The terminal and logistics facilities are considered in the work as providing and servicing the infrastructure of a cross-border crossing. The creation and development of a cross-border terminal and logistics infrastructure should be carried out using the proposed index of sufficiency of terminal and logistics support for a cross-border crossing. A comprehensive criterion has also been formulated, according to which the terminal and logistics infrastructure of a cross-border crossing should be formed.

The **purpose** of the study is to develop a set-theoretic model of cross-border transition and a comprehensive criterion for the formation of a cross-border terminal and logistics infrastructure.

Methodology. The work was carried out using theoretical research methods: analysis, comparison, modeling and formalization.

Results. A set-theoretic model of a system of cross-border crossings at the macro, meso, and micro levels has been developed and described. The sufficiency index of terminal and logistics support for a cross-border crossing and a comprehensive criterion for the formation of a terminal and logistics infrastructure for a cross-border crossing are formulated.

Practical implications. The formed set-theoretic model of the system of cross-border crossings is part of the research work aimed at improving the efficiency of the transport system of the Far East.

Keywords: cross-border crossings; cross-border terminal and logistics infrastructure; set-theoretic model of a cross-border system

For citation. Korol, R. G. (2025). A set-theoretic model of a cross-border system. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 92–107. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-372>

Введение

Глобализация, экономические и экологические изменения приводят к трансформации рынков сбыта и потребления, происходит переориентация грузовых потоков, появляются новые транспортно-логи-

стические цепи [1]. Международный товарооборот зависит от уровня развития транспортного сообщения и трансграничных переходов смежных стран. Организация внешнеторговых перевозок должна осуществляться с учетом пропускных способностей и загруженности трансграничных переходов сухопутных видов транспорта [2].

Распределение внешнеторгового грузопотока между различными видами транспорта и соответствующими пограничными пунктами пропуска с учетом уровня развития и мощности имеющейся транспортной инфраструктуры субъектов региона можно рассматривать на трех уровнях организации функционирования системы трансграничных переходов, представленных на рисунке 1 [3]: макроуровень *SMK* – система международных транспортных коридоров, включающих трансграничные переходы; мезоуровень *STP* – региональная система трансграничных переходов; микроуровень *TP* – система трансграничного перехода.

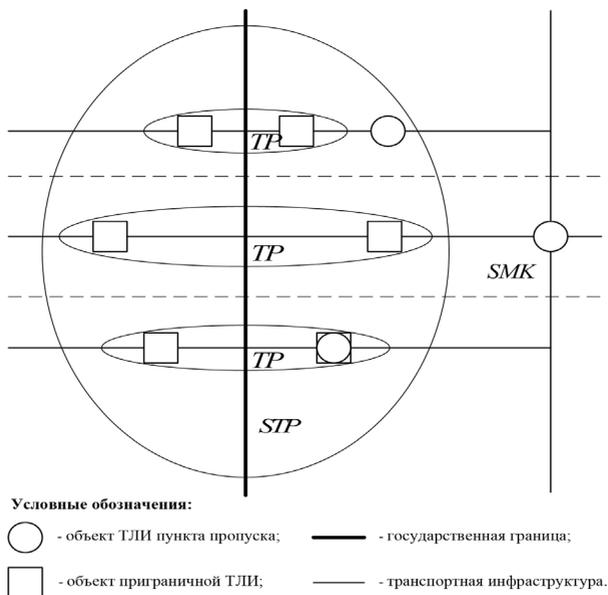


Рис. 1. Визуальное представление уровней организации трансграничных переходов

Функционирование системы трансграничных переходов рассматривается на следующих уровнях организации:

1. Макроуровень – уровень организации системы международных транспортных коридоров SMK , обеспечивающих перемещение внешнеторговых грузопотоков [4]:

$$SMK = \{STP, TM, TLO, TP, F, P, O\}$$

где STP – множество трансграничных переходов и пунктов пропуска, TM – множество объектов магистральной транспортной инфраструктуры, обеспечивающих движение транспортного потока, TLO – множество терминально-логистических объектов, обеспечивающих обработку грузового потока, TP – множество технологических процессов, направленных на организацию и осуществление международных перевозок, F – множество факторов, влияющих на функционирование объектов системы МТК, P – множество показателей функционирования объектов системы МТК, O – множество взаимоотношений между STP, TM, TLO, TP, F, P , отражающих эффективность транспортировки грузов через систему МТК.

2. Мезоуровень – уровень функционирования региональной системы трансграничных переходов и пунктов пропуска STP , обеспечивающих перемещение грузопотока в международном сообщении;

$$STP = \{TP_{\text{сух}}, PP_{\text{вод}}, PP_{\text{возд}}\}$$

где $TP_{\text{сух}}$ – множество сухопутных трансграничных переходов, $PP_{\text{вод}}$ – множество пограничных пунктов пропуска, расположенных на территории морских и речных портов, $PP_{\text{возд}}$ – множество пограничных пунктов пропуска, расположенных на территории аэропортов.

3. Микроуровень – уровень рассматриваемого трансграничного перехода TP .

$$TP_{\text{сух}} = \{TP_{\text{сух}}^i [i = 1, n]\}$$

где $TP_{\text{сух}}^i$ – множество сухопутных трансграничных переходов.

$$TP_{\text{сух}}^i = \{PP_1^i, PP_2^i, TI_{1-2}^i, TP^i, F^i, O^i\}$$

$$i \in \{IGT, IAT, IRT, ITT\}$$

где PP_1^i – множество пограничных пунктов пропуска граничащей страны, PP_2^i – множество пограничных пунктов пропуска смежной страны, TI_{1-2}^i – множество объектов транспортной инфраструктуры, связывающей пограничные пункты пропуска двух стран и интеграцию с магистральной инфраструктурой различных видов транспорта: IGT – железнодорожного транспорта, IAT – автомобильного транспорта, IRT – речного транспорта на смешанных пунктах пропуска, ITT – трубопроводного транспорта, TP^i – множество технологических процессов, зависящих от вида используемого транспорта в международном сообщении, F^i – множество внутренних и внешних факторов, влияющих на функционирование трансграничного перехода, O^i – множество технологических связей между объектами, обеспечивающих функционирование трансграничного перехода.

$PP^i = \{OTI^i, OKI^i, OLI^i, OPI^i, AI, BI, O^i\}$, $i \in \{IGT, IAT, IRT, ITT\}$
 где OTI^i – множество объектов транспортной инфраструктуры пункта пропуска: IGT – железнодорожного транспорта, IAT – автомобильного транспорта, IRT – речного транспорта, ITT – трубопроводного транспорта, OKI^i – множество объектов пункта пропуска, обеспечивающих проведение контрольных процедур, OLI^i – множество объектов терминально-логистической инфраструктуры пункта пропуска, OPI^i – множество объектов инфраструктуры i -го вида транспорта, предназначенной для обслуживания пассажиров, следующих через пункты пропуска, AI – множество объектов административно-обслуживающей инфраструктуры пункта пропуска, BI – множество объектов и элементов инфраструктуры пункта пропуска, обеспечивающих безопасность функционирования, O^i – множество технологических связей между объектами пограничного пункта пропуска и трансграничного перехода.

$OLI^i = \{OLI_{обес}^i, OLI_{обсл}^i\}$, $i \in \{IGT, IAT, IRT, ITT, IMT, IVT\}$
 где $OLI_{обес}^i$ – множество объектов терминально-логистической инфраструктуры трансграничного перехода, обеспечивающих проведение контрольных процедур (таможенные площадки, СВХ, зоны

контроля и т.д.), $OLI_{обсл}^i$ – множество объектов приграничной терминально-логистической инфраструктуры, сопутствующих трансграничному переходу и обслуживающих внешнеторговые грузопотоки (транспортно-логистические центры).

На макроуровне и мезоуровне организации транспортно-логистических процессов международных грузовых перевозок можно рассматривать систему трансграничных переходов Дальнего Востока, как единую региональную транспортную сеть, учитывающую значение каждого субъекта Дальневосточного округа в развитии пограничных пунктов пропуска [5].

Формирование теоретико-множественной модели терминально-логистической инфраструктуры трансграничного перехода

В зависимости от вида транспортного сообщения и трансграничного перехода формируются взаимоувязанные объекты транспортной и терминально-логистической инфраструктуры [6]. Объекты терминально-логистической инфраструктуры OLI^i по структурно-функциональному признаку однотипные для различных трансграничных переходов, отличие заключается в инфраструктурно-технологических параметрах, которые зависят от внутренних и внешних факторов функционирования перехода [7].

$$OLI^i = \{OS, GP, TS^i, TP^i, LU, OM, TI^i, TR, IR^i, O\}, \\ i \in \{IGT, IAT, IRT, IMT, IVT\}.$$

где $OS = \{s_x [x = 1 \dots q]\}$ – множество складских объектов, характеризующиеся параметрами $s_x = \{s_{скл}^q, s_{вм}^q, s_{пл}^q, s_{наз}^q, s_{фр}^q, s_{комп}^q\}$,

$s_{скл}^q$ – количество складских объектов, $s_{вм}^q$ – емкость складских объектов, $s_{пл}^q$ – площадь складских объектов, $s_{наз}^q$ – назначение (вид) складских объектов, $s_{фр}^q$ – длина грузовых фронтов складских объектов для обслуживания транспорта, $s_{комп}^q$ – расположение рабочих зон складских объектов, в том числе зон таможенного контроля.

$GP = \{g_z [z = 1 \dots h]\}$ – множество грузопотоков, проходящих через объекты терминально-логистической инфраструкту-

ры трансграничного перехода, $g_z = \{g_{\text{род}}^h, g_{\text{об}}^h, g_{\text{вр}}^h, g_{\text{оп}}^h\}$, $g_{\text{род}}^h$ – род грузов, поступающих на складские объекты, $g_{\text{об}}^h$ – объемы грузов, поступающих на складские объекты, $g_{\text{вр}}^h$ – время поступления грузов на складские объекты, $g_{\text{оп}}^h$ – операции, совершаемые с грузами на складских объектах, включая документальное и таможенное оформление [8].

$TS^i = \{t_c [c = 1 \dots f]\}$ – множество транспортных средств, проходящих через объекты терминально-логистической инфраструктуры трансграничного перехода, $t_c = \{t_{\text{тип}}^f, t_{\text{гп}}^f, t_{\text{вм}}^f, t_{\text{вр}}^f, t_{\text{оп}}^f\}$, $t_{\text{тип}}^f$ – тип транспортных средств, поступающих на складские объекты, $t_{\text{гп}}^f$ – грузоподъемность транспортных средств, $t_{\text{вм}}^f$ – вместимость кузова транспортных средств, $t_{\text{вр}}^f$ – время поступления транспорта на складские объекты, $t_{\text{оп}}^f$ – операции, совершаемые с транспортными средствами на складских объектах, включая осмотр, таможенное и документальное оформление.

$TP^i = \{p_v [v = 1 \dots w]\}$ – множество процессов, происходящих на приграничных терминально-логистических объектах, $p_v = \{p_{\text{орг}}^w, p_{\text{тр}}^w, p_{\text{гр}}^w, p_{\text{там}}^w, p_{\text{вз}}^w, p_{\text{тех}}^w, p_{\text{вр}}^w, p_{\text{авт}}^w\}$, $p_{\text{орг}}^w$ – организационно-административные процессы, обеспечивающие реализацию управленческих и исполнительных функций персонала, $p_{\text{тр}}^w$ – транспортные процессы, осуществляемые на объектах терминально-логистической инфраструктуры, $p_{\text{гр}}^w$ – процессы грузовых операций, $p_{\text{там}}^w$ – таможенные процессы, $p_{\text{вз}}^w$ – взаимосвязь протекающих процессов на объектах терминально-логистической инфраструктуры, $p_{\text{тех}}^w$ – процессы технического обслуживания, включая процессы осмотра транспортных средств и технологические перерывы, $p_{\text{вр}}^w$ – время выполнения различных процессов, $p_{\text{авт}}^w$ – уровень автоматизации различных процессов.

$LU = \{l_k [k = 1 \dots e]\}$ – множество услуг, оказываемых на приграничных терминально-логистических объектах [9], $l_k = \{l_{\text{усл}}^e, l_{\text{пр}}^e, l_{\text{кон}}^e, l_{\text{ком}}^e, l_{\text{орг}}^e\}$, $l_{\text{кон}}^e$ – перечень предоставляемых услуг, $l_{\text{пр}}^e$ – производственные услуги, как основной вид деятельности рассматриваемых объектов, включают терминальные, транс-

портные и таможенные услуги, $l_{\text{кон}}^e$ – консультационные услуги по вопросам юридического, информационного и экономического сопровождения транспортного процесса, $l_{\text{ком}}^e$ – коммерческие услуги в виде сдачи в аренду складских площадей и оборудования, а также сбыт товаров, $l_{\text{орг}}^e$ – организационные услуги, оказываемые по аутсорсингу для клиентов и предоставляют проектирование и организация цепей поставок, документальное оформление, декларирование, размещение товаров на СВХ и т.д. [10].

$OM = \{m_j [j = 1 \dots t]\}$ – множество оборудования и технических средств, используемых на приграничных терминально-логистических объектах $m_j = \{m_{\text{обр}}^t, m_{\text{тип}}^t, m_{\text{со}}^t, m_{\text{гр}}^t, m_{\text{пр}}^t, m_{\text{дос}}^t, m_{\text{осм}}^t\}$, $m_{\text{обр}}^t$ – количество единиц оборудования и технических средств, $m_{\text{тип}}^t$ – тип подъемно-транспортного оборудования, $m_{\text{со}}^t$ – состояние оборудования и технических средств; $m_{\text{гр}}^t$ – грузоподъемность подъемно-транспортного оборудования, $m_{\text{пр}}^t$ – производительность оборудования и технических средств; $m_{\text{дос}}^t$ – вид оборудования и технических средств, предназначенных для проведения таможенного досмотра: досмотровые зеркала, эндоскопы, фонари, средства идентификации, приборы для проведения анализов и взвешивания и т.д., $m_{\text{осм}}^t$ – вид оборудования и технических средств, предназначенных для проведения таможенного осмотра: телескопический шест, курвиметр, приборы дистанционного обнаружения, портативные видеорегистраторы, инспекционно-досмотровые комплексы, сканеры и т.д.

$TI^i = \{i_n [n = 1 \dots d]\}$ – множество объектов транспортной инфраструктуры в виде подъездных и соединительных путей IGT – железнодорожного транспорта и (или) IAT – автомобильного транспорта $i_n = \{i_{\text{под}}^d, i_{\text{пут}}^d, i_{\text{про}}^d, i_{\text{уд}}^d, i_{\text{фр}}^d, i_{\text{вм}}^d, i_{\text{кон}}^d\}$, $i_{\text{под}}^d$ – количество транспортных подходов к приграничному терминально-логистическому объекту, $i_{\text{пут}}^d$ – количество путей, проходящих по территории терминально-логистического объекта (одно/двуполосное движение), $i_{\text{про}}^d$ – протяженность путей, соединяющих объекты терминала, $i_{\text{уд}}^d$ – удаленность терминально-логистического объекта

от магистральных транспортных объектов, $i_{\text{фр}}^d$ – количество грузовых фронтов у складских объектов и наличие других объектов транспортной инфраструктуры на территории терминально-логистического объекта, $i_{\text{вм}}^d$ – вместимость грузовых фронтов и других объектов транспортной инфраструктуры (площадки маневрирования и отстоя автотранспорта, железнодорожные тупики для проведения таможенных процедур и т.д.), $i_{\text{кон}}^d$ – конфигурация объектов транспортной инфраструктуры, грузовых фронтов и других инфраструктурных объектов терминала [11].

$TR = \{r_a[a = 1 \dots b]\}$ – множество трудовых ресурсов приграничного терминально-логистического объекта $r_a = \{r_{\text{ква}}^b, r_{\text{пер}}^b, r_{\text{ук}}^b, r_{\text{эрг}}^b\}$, $r_{\text{ква}}^b$ – степень квалификации персонала по категориям и типу трудового договора, $r_{\text{пер}}^b$ – количество персонала производственной и непроизводственной деятельности, $r_{\text{ук}}^b$ – уровень укомплектования трудовыми кадрами рассматриваемого терминально-логистического объекта, $r_{\text{эрг}}^b$ – уровень эргономичности рабочих мест, в том числе расположение рабочих мест по объектам терминала.

$IR^i = \{k_o[o = 1 \dots p]\}$ – множество инфокоммуникационных ресурсов приграничного терминально-логистического объекта $k_o = \{k_{\text{про}}^p, k_{\text{св}}^p, k_{\text{обр}}^p, k_{\text{инф}}^p\}$, $k_{\text{про}}^p$ – установленное программное обеспечение с доступом к информационным системам участников транспортного процесса, $k_{\text{св}}^p$ – используемые средства связи, $k_{\text{обр}}^p$ – интенсивность поступления, обработки и передачи данных, $k_{\text{инф}}^p$ – количество информационных потоков по видам и направлению движения.

O – множество взаимосвязей между $OS, GP, TS^i, TP^i, LU, OM, TI^i, TR, IR^i$.

Оценка достаточности терминально-логистического обеспечения трансграничного перехода позволяет разработать план мероприятий по усилению или оптимизации инфраструктурных мощностей рассматриваемого объекта [12]. Данную оценку можно произвести с помощью индекса терминально-логистического обеспечения.

Индекс терминально-логистического обеспечения I_{OLI} :

$$I_{OLI} = \frac{OLI_{\text{сущ}}^i}{OLI_{\text{необ}}^i}$$

$OLI_{\text{сущ}}^i$ – текущее инфраструктурно-технологическое развитие терминально-логистической инфраструктуры, $OLI_{\text{необ}}^i$ – необходимый уровень развития терминально-логистической инфраструктуры для эффективной реализации производственных задач.

Формирование терминально-логистической инфраструктуры должно осуществляться согласно комплексному критерию $K_{\text{ТЛИ}}$, сформированному в виде системы:

$$K_{\text{ТЛИ}} = \begin{cases} \Pi_{OLI} \geq GP \\ I_{OLI} = 1 \\ \Xi_{OLI} \rightarrow opt \end{cases}$$

Π_{OLI} – пропускная способность терминально-логистической инфраструктуры трансграничного перехода, GP – грузопотоки, проходящие через объекты терминально-логистической инфраструктуры, Ξ_{OLI} – расходы на создание и эксплуатацию объектов терминально-логистической инфраструктуры.

Комплексный критерий основан на инфраструктурном развитии терминально-логистического объекта, при этом внедрение современных интеллектуальных систем в технологический процесс позволит обеспечить ускорение операций и увеличение грузообработки [13].

Заключение

В условиях активной трансформации международного транспортно-логистического рынка и повышенных требований клиентов к транспортному обслуживанию необходимо осуществлять инфраструктурно-технологическое развитие пограничных пунктов пропуска и трансграничных систем [14]. Сформированная теоретико-множественная модель трансграничного перехода, включающей пограничные пункты пропуска и терминально-логистические объекты обеспечивающей и обслуживающей инфраструктуры, по-

зволила структурно представить объекты, процессы и влияющие на них факторы, как взаимосвязанные элементы единой системы [15].

С помощью теоретико-множественного моделирования был сформулирован индекс терминально-логистического обеспечения трансграничного перехода и комплексный критерий формирования терминально-логистической инфраструктуры. Дальнейшие исследования направлены на оценку достаточности терминально-логистического обеспечения автомобильных, автомобильно-речных и железнодорожных трансграничных переходов Дальнего Востока.

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Попадюк, А. Ю., & Коровяковский, Е. К. (2020). Об организации международных цепей доставки грузов. *Бюллетень результатов научных исследований*, 2, 100–110. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2020-2-100-110>. EDN: <https://elibrary.ru/FDVSUA>
2. Бардаль, А. Б. (2024). Развитие трансграничной транспортной инфраструктуры между РФ и КНР. *Россия и Китай: история и перспективы сотрудничества*, 14, 418–423. EDN: <https://elibrary.ru/TNXNCV>
3. Подолинная, С. Д., Ненашева, А. В., Кучер, Ю. Е., Чен, К. Ю., & Король, Р. Г. (2023). К вопросу комплексного анализа перерабатывающей и пропускной способности сухопутных трансграничных пунктов пропуска Дальнего Востока. *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*, 1, 122–126. EDN: <https://elibrary.ru/MBZZDF>
4. Нестерова, Н. С., & Анисимов, Вл. А. (2019). Формирование множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов мультимодальной транспортной сети. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, 16(3), 329–338. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-3-329-338>. EDN: <https://elibrary.ru/YTXUDC>

5. Король, Р. Г., & Подолиная, С. Д. (2024). Терминально-логистическое взаимодействие при проектировании трансграничной инфраструктуры. *Мир транспорта и технологических машин*, 1-1(84), 131–139. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-1\(84\)-131-139](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-1(84)-131-139). EDN: <https://elibrary.ru/NYPAJD>
6. Пугачёв, И. Н., Король, Р. Г., & Нестерова, Н. С. (2022). Развитие транспортно-логистического комплекса дальневосточного региона России. *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*, 4(33), 25–34. EDN: <https://elibrary.ru/FANMES>
7. Король, Р. Г. (2025). *Организация приграничной терминально-логистической инфраструктуры транспортной системы Дальнего Востока* [монография]. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. 178 с. ISBN: 978-5-262-00998-5. EDN: <https://elibrary.ru/RERIJN>
8. Акельев, А. С., & Король, Р. Г. (2025). Распределение грузопотоков в региональной системе терминально-логистических объектов. *Транспорт Урала*, 2(85), 68–74. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2025-2-68-74>. EDN: <https://elibrary.ru/LJFJNZ>
9. Покровская, О. Д., Мороз, Ю. А., & Меликов, М. И. (2023). Трансформация рынка транспортных услуг в России в условиях международных санкций. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 13(1), 197–211. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-1-197-211>. EDN: <https://elibrary.ru/UQQEZZ>
10. Осьминин, А. Т. (2020). О формировании требований к составляющим комплексной транспортной услуги. *Железнодорожный транспорт*, 6, 4–13. EDN: <https://elibrary.ru/XHXUEG>
11. Москвичев, О. В., & Гаврилов, М. В. (2024). К вопросу развития региональной терминально-логистической инфраструктуры ОАО «РЖД». *Наука и образование транспорту*, 1, 91–95. EDN: <https://elibrary.ru/JPMOFR>
12. Король, Р. Г. (2024). Параметризация объектов транспортно-логистической инфраструктуры. *Наука и образование транспорту*, 1, 98–101. EDN: <https://elibrary.ru/CJZBPQ>
13. Мамаев, Э. А., & Сорокин, Д. В. (2024). Методические подходы структурирования показателей оценки потенциала международ-

- ного транспортного коридора. *Логистика и управление цепями поставок*, 21(3), 11–24. EDN: <https://elibrary.ru/VJKZEV>
14. Подолинная, С. Д., & Король, Р. Г. (2022). К вопросу развития логистики в периоды экономической нестабильности. В *Образование — Наука — Производство: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием* (с. 311–318). Чита. EDN: <https://elibrary.ru/FMDCYT>
15. Числов, О. Н., Богачёв, В. А., Трапенов, В. В., Богачёв, Т. В., & Задорожний, В. М. (2023). Развитие узловой терминально-складской инфраструктуры: модификация методов исследования и прогнозы. *Бюллетень результатов научных исследований*, 3, 46–57. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-3-46-57>. EDN: <https://elibrary.ru/JHJEVU>

References

1. Popadyuk, A. Yu., & Korovyakovsky, E. K. (2020). On the organization of international cargo delivery chains. *Bulletin of Research Results*, 2, 100–110. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2020-2-100-110>. EDN: <https://elibrary.ru/FDVSUA>
2. Bardal, A. B. (2024). Development of cross-border transport infrastructure between the Russian Federation and China. *Russia and China: History and Prospects of Cooperation*, 14, 418–423. EDN: <https://elibrary.ru/TNXNCV>
3. Podolinnaya, S. D., Nenasheva, A. V., Kucher, Yu. E., Chen, K. Yu., & Korol, R. G. (2023). On the issue of comprehensive analysis of processing and throughput capacity of land cross-border checkpoints in the Far East. *Scientific, Technical and Economic Cooperation of the Asia-Pacific Region Countries in the 21st Century*, 1, 122–126. EDN: <https://elibrary.ru/MBZZDF>
4. Nesterova, N. S., & Anisimov, Vl. A. (2019). Formation of a set of possible strategies for phased changes in the appearance and capacity of multimodal transport network facilities. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 16(3), 329–338. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-3-329-338>. EDN: <https://elibrary.ru/YTXUDC>

5. Korol, R. G., & Podolinnaya, S. D. (2024). Terminal-logistic interaction in cross-border infrastructure design. *World of Transport and Technological Machines*, 1-1(84), 131–139. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-1\(84\)-131-139](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-1(84)-131-139). EDN: <https://elibrary.ru/NYPAJD>
6. Pugachev, I. N., Korol, R. G., & Nesterova, N. S. (2022). Development of the transport and logistics complex in the Russian Far East region. *Transport of the Asia-Pacific Region*, 4(33), 25–34. EDN: <https://elibrary.ru/FANMES>
7. Korol, R. G. (2025). *Organization of border terminal-logistic infrastructure of the Far East transport system* [Monograph]. Khabarovsk: Publishing House of the Far Eastern State University of Railway Transport (DVSUPS). 178 pp. ISBN: 978-5-262-00998-5. EDN: <https://elibrary.ru/RERIJN>
8. Akelyev, A. S., & Korol, R. G. (2025). Distribution of cargo flows in a regional system of terminal-logistic facilities. *Transport of the Urals*, 2(85), 68–74. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2025-2-68-74>. EDN: <https://elibrary.ru/LJFJNZ>
9. Pokrovskaya, O. D., Moroz, Yu. A., & Melikov, M. I. (2023). Transformation of the Russian transport services market under international sanctions. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 13(1), 197–211. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-1-197-211>. EDN: <https://elibrary.ru/UQQEZZ>
10. Osminin, A. T. (2020). On forming requirements for components of a comprehensive transport service. *Railway Transport*, 6, 4–13. EDN: <https://elibrary.ru/XHXUEG>
11. Moskvichev, O. V., & Gavrilov, M. V. (2024). On developing regional terminal-logistic infrastructure of JSC “Russian Railways”. *Science and Education for Transport*, 1, 91–95. EDN: <https://elibrary.ru/JPMOFR>
12. Korol, R. G. (2024). Parameterization of transport and logistics infrastructure facilities. *Science and Education for Transport*, 1, 98–101. EDN: <https://elibrary.ru/CJZBPQ>
13. Mamaev, E. A., & Sorokin, D. V. (2024). Methodological approaches to structuring indicators for assessing the potential of an international transport corridor. *Logistics and Supply Chain Management*, 21(3), 11–24. EDN: <https://elibrary.ru/BJKZEV>

14. Podolinnaya, S. D., & Korol, R. G. (2022). On logistics development during periods of economic instability. In *Education — Science — Production: Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation* (pp. 311–318). Chita. EDN: <https://elibrary.ru/FMDCYT>
15. Chislov, O. N., Bogachev, V. A., Trapenov, V. V., Bogachev, T. V., & Zadorozhniy, V. M. (2023). Development of hub terminal-warehouse infrastructure: Modification of research methods and forecasts. *Bulletin of Research Results*, 3, 46–57. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-3-46-57>. EDN: <https://elibrary.ru/JHJEVU>

ДАнные ОБ АВТОРЕ

Король Роман Григорьевич, доцент кафедры «Управление процессами перевозок», доцент, кандидат технических наук
Дальневосточный государственный университет путей сообщения
ул. Серышева, 47, г. Хабаровск, Хабаровский край, 680021, Российская Федерация
kingkhv27@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Roman G. Korol, Associate Professor of the Department of Transportation Process Management, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences
Far Eastern State Transport University
47, Serysheva Str., Khabarovsk, Khabarovsk Region, 680021, Russian Federation
kingkhv27@mail.ru
SPIN-code: 8365-6922
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7522-1604>
Scopus Author ID: 57485775000

Поступила 09.07.2025

После рецензирования 26.07.2025

Принята 01.08.2025

Received 09.07.2025

Revised 26.07.2025

Accepted 01.08.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-374

EDN: WMTHFY

УДК 621.396.6.07.019.3



Научная статья |

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

П.В. Калашиников

Аннотация

Обоснование. В приведенном исследовании рассматриваются ключевые вопросы, связанные с оценкой значений параметров функциональной надежности информационной системы в условиях неопределенности и неполноты информации.

Целью исследования является разработка эффективных методов оценки значений параметров функциональной надежности информационной системы в условиях интервальной неопределенности обеспечивающих ее стабильное функционирование.

Материалы и методы. Расчет значений параметров надежности информационной системы проводится на основе методов интервального анализа и основных инструментов обработки данных в случае рассматриваемого типа неопределенности.

Научная новизна. В проведенном исследовании основные подходы к расчету параметров функциональной надежности информационной системы рассматриваются в контексте неопределенности, описываемой на основе интервальных данных, что позволяет давать более корректные оценки и учитывать имеющие место на практике погрешности.

Результаты. Предложенный в статье подход имеет большую теоретическую и практическую значимость и выступает в качестве базового инструмента расчета параметров функциональной надежности

информационной системы в условиях интервальной неопределенности, позволяющей учитывать факторы погрешности и определять допустимые интервалы отклонения параметров от расчетных номинальных значений.

Ключевые слова: информационная система; статистика интервальных данных; показатели функциональной надежности

Для цитирования. Калашников, П. В. (2025). Расчет показателей надежности информационной системы в условиях интервальной неопределенности. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 108–124. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-374>

Original article | System Analysis, Management and Information Processing, Statistics

CALCULATION OF RELIABILITY INDICATORS OF AN INFORMATION SYSTEM UNDER CONDITIONS OF INTERVAL UNCERTAINTY

P.V. Kalashnikov

Abstract

Background. The presented study covers key issues related to the assessment of the values of the parameters of functional reliability of an information system under conditions of uncertainty and incomplete information.

The aim of the study is to develop effective methods for assessing the values of the parameters of functional reliability of an information system under conditions of interval uncertainty, ensuring its stable operation.

Materials and methods. The calculation of the values of the reliability parameters of the information system is carried out on the basis of interval analysis methods and basic data processing tools in the case of the type of uncertainty under consideration.

Scientific novelty. In the conducted study, the main approaches to calculating the parameters of functional reliability of an information system

are considered in the context of uncertainty described on the basis of interval data, which allows for more accurate assessments and taking into account errors that occur in practice.

Results. The approach proposed in the article has great theoretical and practical significance and serves as a basic tool for calculating the parameters of functional reliability of an information system under conditions of interval uncertainty, allowing one to take into account error factors and determine the permissible intervals of deviation of parameters from the calculated nominal values.

Keywords: information system; interval data statistics; functional reliability indicators

For citation. Kalashnikov, P. V. (2025). Calculation of reliability indicators of an information system under conditions of interval uncertainty. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 108–124. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-374>

Введение

Информационные системы представляют собой неотъемлемую часть жизни современного общества. Применение данного класса систем в эпоху всеобщей цифровизации особенно актуально и находит свое применение в множестве отраслей производства, транспорта, здравоохранения и других. Обеспечение надежного функционирования данного класса систем является гарантом стабильного развития общества и государства. В работах [1-7] раскрыты основные аспекты описанной выше проблематики.

Решение задачи обеспечения стабильного функционирования информационной системы напрямую сопряжена с необходимостью расчета показателей ее функциональной надежности.

В работе [8] показано, что применение классической теории надежности в контексте информационных систем сталкивается с следующими ключевыми проблемами: сложность декомпозиции рассматриваемого класса систем на составные функциональные части, очень высокая скорость принятия решений, а также боль-

шое количество потенциальных ошибок, возникающих в ходе работы аппаратного и программного обеспечения.

Особую актуальность изложенные выше проблемы принимают в случае неопределенности и неполноты информации, присущей рассматриваемому классу систем. В работе [8] ставилась общая задача обеспечения надежного функционирования информационной системы в условиях интервальной неопределенности, однако конкретные подходы, методы и алгоритмы расчета параметров функционирования рассматриваемого класса систем не приводились.

Цель настоящего исследования – разработка эффективных методов расчета параметров функциональной надежности информационных систем в условиях интервального типа неопределенности, имеющего место при описании погрешностей и допустимых интервалов отклонения значений параметров рассматриваемого класса систем от расчетных номинальных значений.

Задачи проводимого исследования состоят в описании основных подходов к решению задачи расчета значений параметров функциональной надежности информационных систем, а также построении математической модели, позволяющей адекватным образом учитывать фактор неопределенности в входных данных и давать оценки границ интервалов допустимого изменения значений ее параметров.

Основные подходы к расчету показателей надежности информационных систем

В работах [9-15] описаны основные подходы к расчету значений параметров надежности информационных систем. Однако описываемые в научной литературе подходы характеризуются большой степенью разобщенности и отсутствием единообразия в вопросе типизации и алгоритмов расчета параметров рассматриваемого класса систем, что в свою очередь обусловлено их широким спектром разнообразия, множеством выполняемых функций, а также неоднозначностью получаемых результатов.

Обозначенный выше факт в свою очередь приводит к необходимости разработки единого подхода к типизации параметров функциональной надежности информационных систем, а также алгоритмов их расчета. Базовыми критериями, составляющими основу описанного выше единого подхода являются следующие: измеримость, логическая непротиворечивость, эмпирическая верификация значений рассчитанных параметров информационной системы. Также создаваемая единая типология должна быть простой, понятной и гибкой, чтобы отражать возможные изменения в характеристиках функционального взаимодействия различных составных частей информационной системы, которые возникают в процессе ее реконфигурации в условиях неопределенности.

Как правило, при реальном функционировании информационных систем значения их параметров точно не известны и входные данные достаточно часто содержат погрешности. В связи с этим обстоятельством вместо точечных операций над значениями параметров информационной системы в дальнейшем предполагается использование их интервальных аналогов. Основные подходы к анализу данных интервального типа и математических операциях с ними описаны в работах [16-18].

При построении системы расчета показателей надежности информационной системы используются следующие основные принципы.

Во-первых, в создаваемой системе расчета показателей алгоритм расчета показателя должен соответствовать алгоритму работы системы.

Во-вторых, процесс расчета показателей имеет многошаговую иерархическую структуру, в которой на каждом этапе происходит выполнение своей части вычислений, соответствующих заданным функциональным структурам системы.

Пусть в информационной системе действует m независимых информационных процессов на уровне иерархии номер j . Тогда связь значений параметра процесса № k на $j+1$ уровне иерархии

можно описать в виде интервалозначного соотношения связи f следующего вида

$$a_{j+1}^k = f(a_j^1, \dots, a_j^m) \quad (1)$$

где

$a_j^k \in [a_j^k, \overline{a_j^k}]$ – допустимый интервал изменения значений для параметров процесса № k , $k = \overline{1, \dots, m}$.

В-третьих, пространство состояний рассматриваемой информационной системы соответствует множеству событий в ней. Под множеством событий понимаются имеющие место случаи корректного выполнения информационного процесса или случаи возникновения ошибок. Пространство состояний информационной системы – множество всех возможных состояний, которые могут иметь место в ходе выполнения информационных процессов в системе.

В-четвертых, исходная информационная система представляется в виде совокупности взаимосвязанных между собой функциональных структур и частей.

Под функциональной частью информационной системы понимается какой-либо материальный объект, выполняющий конкретное функциональное назначение.

Под функциональной структурой в дальнейшем, если не оговорено противное, будем понимать совокупность функциональных частей, связанных общим алгоритмом функционирования какого-либо информационного процесса.

Обозначим M – множество функциональных частей информационной системы S . Множество M содержит N элементов. Функциональная структура F_i создается как комбинация конечного элементов множества M , связанных единым алгоритмом функционирования. При этом некоторые элементы функциональных частей могут задействоваться для обеспечения работы сразу нескольких функциональных структур, а какие-то нет.

Рассмотрим основные показатели надежности информационной системы используемые при расчетах.

Степень возможности корректного выполнения информационного процесса $P_{norm} \in [P_{norm}, \overline{P_{norm}}]$.

Степень возможности возникновения ошибки при выполнении информационного процесса $P_{err} \in [P_{err}, \overline{P_{err}}]$.

Расчет показателей P_{norm} и P_{err} производится на основе принципа иерархичности расчета показателей надежности информационной системы.

К числу важных показателей, используемых при анализе надежности работы информационной системы можно отнести общее время простоя системы при обработке процесса № i $T_{i,stop} \in [T_{i,stop}, \overline{T_{i,stop}}]$.

При расчете времени простоя системы будем учитывать следующие факторы.

$T_{i,q} \in [T_{i,q}, \overline{T_{i,q}}]$ – интервал допустимой задержки в очереди при обслуживании информационного процесса № i ;

$T_{i,err} \in [T_{i,err}, \overline{T_{i,err}}]$ – допустимый интервал обнаружения ошибки при обслуживании информационного процесса № i ;

$T_{i,r} \in [T_{i,r}, \overline{T_{i,r}}]$ – допустимый интервал времени устранения ошибки и возобновления работы при обслуживании информационного процесса № i ;

$T_{i,c} \in [T_{i,c}, \overline{T_{i,c}}]$ – допустимый интервал времени контроля корректности выполнения информационного процесса № i ;

Общее время простоя системы при выполнении информационного процесса номер i задается в виде формулы

$$T_{i,stop} = T_{i,q} + T_{i,err} + T_{i,r} + T_{i,c} \quad (2)$$

Проблему обеспечения надежного функционирования информационной системы можно рассмотреть как задачу массового обслуживания, в которой заявки на обслуживание процессов образуют очередь. Обслуживание заявок производится исходя из приоритетов, назначенных процессам.

Ключевым фактором влияющим на надежность работы информационной системы является время выполнения информационных процессов. Чем оно меньше, тем большее количество процессов

может быть обслужено. При этом время загрузки каналов передачи информации уменьшается. Однако увеличение скорости обработки заявок может послужить фактором, влияющим на возникновение ошибок в системе.

Постановка общей задачи расчета показателей надежности информационной системы в условиях интервальной неопределенности

Для постановки общей задачи расчета показателей функциональной надежности информационной системы в условиях интервальной неопределенности введем следующие обозначения

$G_i(t)$ – интервальная функция распределения времени между заявками,

$i = \overline{1, L}$, L – общее количество заявок в системе;

$H_i(t)$ – интервальная функция времени выполнения информационного процесса $i = \overline{1, L}$;

$P_{i,err} \in [\underline{P}_{i,err}, \overline{P}_{i,err}]$ – степень возможности возникновения ошибки при выполнении информационного процесса № i , $i = \overline{1, L}$;

$w_{i,err} \in [\underline{w}_{i,err}, \overline{w}_{i,err}]$ – приоритет в очереди выполнения информационного процесса № i , $i = \overline{1, L}$;

Q – минимальное количество процессов, которые выполняются без ошибок.

Необходимо определить правила расчета показателей надежности информационной системы, обеспечивающие ее стабильное функционирование на всем горизонте планирования.

Решение задачи расчета параметров функциональной надежности информационной системы находит свое важное практическое применение при исследовании помехоустойчивости интегральных схем. Быстродействие работы такой схемы возрастает при уменьшении величины логического перепада.

Входящие сигналы представляют собой комбинацию эффективного сигнала и помехи. Помехи могут быть аддитивно пересчитаны и учтены при анализе надежности работы рассматриваемой схемы.

Введем обозначения

d_1 – пороговое значение сигнала при переходе 1→0

d_0 – пороговое значение сигнала при переходе 0→1

Δd – ширина интервала изменения рассматриваемого показателя

$$\Delta = |d_1 - d_0| \quad (3)$$

d_m – середина интервала изменения рассматриваемого показателя

$$d_m = \frac{d_1 + d_0}{2} \quad (4)$$

Рассмотрим следующий пример, поясняющий введенные выше обозначения.

Для нормальных условий функционирования интегральной схемы передаточная характеристика нормируемая по уровню «1» может быть оценена следующим образом $d_m = 0,375$, $\frac{\Delta d}{2} = 0,05$.

Левая граница интервала значений для передаточной характеристики определяется на основе соотношения

$$d_0 = d_m - \frac{\Delta d}{2} = 0,375 - 0,05 = 0,325 \quad (5)$$

Правая граница интервала значений для передаточной характеристики определяется на основе соотношения

$$d_1 = d_m + \frac{\Delta d}{2} = 0,375 + 0,05 = 0,425 \quad (6)$$

Интервал допустимых значений результирующего параметра передаточной характеристики имеет вид $[d_0, d_1] = [0,325; 0,425]$

Увеличение ширины интервала $[d_0, d_1]$ при заданной неизменной величине логического перепада схемы способствует снижению ее помехозащищенности.

Также при расчете параметров функциональной надежности информационных систем важную роль занимает моделирование их функциональных структур.

Постановка общей задачи моделирования функциональных структур информационной системы

Под функциональной структурой понимается материальная реализация какого-либо процесса путем связки составных частей информационной системы в единое целое общим алгоритмом работы.

При построении математической модели, описывающий процесс работы функциональных структур и позволяющей произвести оценку их надежности используются взвешенные ориентированные графы $G(V, X)$, чтобы отобразить множество допустимых комбинаций различных частей системы, связанных единым алгоритмом функционирования.

Элементы множества $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ соответствуют элементам информационной системы. Элементы множества V делят на входные и выходные. Под входной вершиной будем понимать вершину, из которой выходит только одна дуга. Под выходной вершиной понимается такая вершина, из которой нет исходящих дуг.

Множество $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множество дуг ориентированного графа, каждой из которой присвоен вес $w_{ij} \in [w_{ij}^{\cdot}, \overline{w_{ij}}]$, $i, j = \overline{1, n}$. Вес дуги интерпретируется как приоритет информационного процесса, который с ней ассоциирован.

Создаваемый на основе вышеизложенного граф G применяется для оценки надежности работы соответствующей функциональной структуры на основе математического аппарата статистики интервальных данных.

Маршруты в данном графе G представляют собой возможные варианты реализации функциональных структур, каждый из которых может быть выбран с определенной степенью достоверности.

Рассматриваемый граф при проведении расчетов рекомендуется привести к ациклическому виду. Поиск контуров в графе осуществляется методом обхода в глубину. При этом дуги добавляются в строящийся маршрут до тех пор, пока не образуется контур.

Важное значение при решении задачи обеспечения надежного функционирования информационной системы имеет прогнозирование возникновения ошибок в работе ее составных аппаратных компонентов и реализация комплекса профилактических мероприятий, направленного на минимизацию ущерба от их возникновения.

Прогнозирование ошибок при работе основных аппаратных компонентов информационной системы

Введем следующие обозначения.

$p_{qi} \in [p_{qi}, \overline{p_{qi}}]$ – степень возможности штатной отработки компонента информационной системы № i в интервале времени $[\underline{t}_i, \overline{t}_i]$;

$p_{qi} \in [p_{qi}, \overline{p_{qi}}]$ – степень возможности возникновения ошибки при работе компонента информационной системы № i ; в интервале времени $[\underline{t}_i, \overline{t}_i]$;

$T_{vi} \in [T_{mi}, \overline{T_{mi}}]$ – время доработки до отказа компонента информационной системы № i ;

$\mu_i \in [\underline{\mu}_i, \overline{\mu}_i]$ – интенсивность отказа компонента информационной системы № i .

В введенных обозначениях границы интервала времени доработки до отказа можно представить в виде соотношения

$$[\underline{T_{mi}}, \overline{T_{mi}}] = \left[\frac{\overline{t}-t}{p_{qi}}, \frac{\overline{t}-\underline{t}}{p_{qi}} \right] \quad (7)$$

Для границ интервала интенсивность отказа можно привести следующие оценки

$$[\underline{\mu}_i, \overline{\mu}_i] = \left[\frac{p_{qi}}{\overline{t}-t}, \frac{p_{qi}}{\underline{t}-t} \right] \quad (8)$$

Для оценки успешности работы в целом $P_{suc} \in [P_{suc}, \overline{P_{suc}}]$ информационной системы, состоящей из D компонентов имеет место соотношение

$$\overline{P_{suc}} = \prod_{i=1}^D \overline{p_{ri}}, \quad \underline{P_{suc}} = \prod_{i=1}^D p_{ri} \quad (9)$$

В случае реализации циклической схемы работы аппаратуры верхняя $\overline{T_c}$ и нижняя $\underline{T_c}$ граница интервала времени работы системы вычисляется по формуле

$$\overline{T_c} = \prod_{i=1}^D \overline{t}_i, \quad \underline{T_c} = \prod_{i=1}^D \underline{t}_i, \quad (10)$$

Верхняя $\overline{T_{suc,i}}$ и нижняя $\underline{T_{suc,i}}$ границы интервала времени наработки до отказа компонента информационной системы № i , задается соотношением

$$\begin{aligned} \overline{T_{suc,i}} &= \frac{\bar{t}_i - t_i}{1 - \prod_{i=1}^D \overline{p_{ri}}}, \\ \underline{T_{suc,i}} &= \frac{\bar{t}_i - t_i}{1 - \prod_{i=1}^D \underline{p_{ri}}}, \end{aligned} \quad (11)$$

В случае, когда время задержки компонентов электронной схемы принимают значение на одном и том же интервале $[t, \bar{t}] = [t_i, \bar{t}_i], i=1, \dots, D$.

Интервал допустимого отклонения степени возможности стабильной работы системы в целом имеет вид $[\underline{p_{\text{ыгс}}}, \overline{p_{\text{ыгс}}}] = [\underline{p_r}, \overline{p_r}]^D$.

Данная формула позволяет оценить верхнюю $\overline{p_{\text{ыгс}}}$ и нижнюю $\underline{p_{\text{ыгс}}}$ границы интервала степени возможности стабильной работы информационной системы для рассматриваемого горизонта планирования.

Заключение

В ходе проведенного исследования были рассмотрены основные подходы к расчету параметров функциональной надежности информационных систем. Проведенный анализ показал, что на данный момент в научной литературе существует множество разнонаправленных подходов к методологии расчета параметров надежности информационных систем причем данные подходы нередко противоречат друг другу. Наряду с вышеизложенным в научной литературе отсутствуют детальное описание возможности использования аппарата интервального анализа для учета погрешностей, имеющий место при расчете параметров функциональной надежности информационных систем.

Выполненное исследование ставило своей основной целью разработку унифицированного подхода к построению методологического базиса для расчета параметров надежности информационных систем. Были описаны основные критерии, которым должна удовлетворять система базовых параметров надежности сложной информационной системы, таких измеримость, экспериментальная верификация, а также гибкость рассматриваемой системы по отношению к добавлению новых параметров.

Наряду с вышеизложенным построенная математическая модель расчета параметров функциональной надежности информационной системы позволяет производить учет фактора неопределенности и погрешностей в исходных данных на основе методов статистики интервальных данных. Такой подход также отличает проведенное исследования от ранее описанных в научной литературе.

К перспективным направлениям данного исследования можно отнести задачу расчета параметров надежности критически важных информационных систем, а также оценку стабильности работы программного обеспечения.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FWFw-2021-0003).

Список литературы

1. Острейковский, В. А. (2015). *Теория техногенного риска: математические методы и модели* [монография]. Сургут: КЦ СурГУ.
2. Острейковский, В. А. (2013). Количественная оценка риска в теории техногенной безопасности сложных динамических систем. В *Итоги науки. Т. 1. Избранные труды международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки* (гл. 2, с. 12–31). Москва: РАН.
3. Муравьев, И. И., Острейковский, В. А., & Шевченко, Е. Н. (2015). Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 1*, 24–27. EDN: <https://elibrary.ru/UCGXTJ>
4. Королев, В. Ю. (2007). *Математические основы теории риска* [учебное пособие]. Москва: ФИЗМАТЛИТ.
5. Острейковский, В. А. (2013). О некоторых классах моделей риска в теории техногенной безопасности. В Н. К. Юрков (Ред.), *Надежность и качество. Труды Международного симпозиума* (Т. 1, с. 46–49). Пенза: Изд-во ПГУ. EDN: <https://elibrary.ru/RXEVL D>

6. Калашников, П. В. (2022). Математическая модель управления рисками, возникающими при функционировании сложных технических систем ответственного назначения в условиях неопределённости информации о значениях параметров и фазовом состоянии. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 12(3), 22–39. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2022-12-3-22-39>. EDN: <https://elibrary.ru/QZGLRA>
7. Калашников, П. В. (2023). Применение сценарного подхода к анализу и управлению рисками при функционировании сложных динамических систем в условиях интервальной неопределённости. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 13(3), 224–236. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236>. EDN: <https://elibrary.ru/FEVMQD>
8. Калашников, П. В. (2024). К проблеме управления надёжностью информационной системы в условиях интервальной неопределённости. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(3), 62–76. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-3-304>. EDN: <https://elibrary.ru/IKHVJI>
9. Наумов, Ю. Е., Аваев, Н. А., & Бедрековский, М. А. (1975). *Помехоустойчивость устройств на интегральных логических схемах*. Москва: Сов. радио.
10. Коваленко, О. В., & Петрик, С. В. (2010). *Вероятностный анализ безопасности сложных систем «человек-машина»*. Сарово: РФЯЦ-ВНИИЭФ.
11. Wang, Y. (2014). Budget-driven scheduling algorithms for batches of Map Reduce jobs in heterogeneous clouds. *Transactions on Cloud Computing*, 2(3), 306–319.
12. Berkhin, P., Kogan, J., Nicholas, C., & Teboulle, M. (2006). Survey of clustering data mining techniques. В *Grouping Multidimensional Data: Recent Advances in Clustering* (с. 25–71). Berlin: Springer.
13. Hoehle, H., Scornavacca, E., & Huff, S. (2012). Three decades of research on consumer adoption and utilization of electronic banking channels: A literature analysis. *Decision Support Systems*, 54(1), 122–132.

14. Hutchinson, D., & Warren, M. (2003). Security for internet banking: A framework. *Logistics Information Management*, 16(1), 64–73. <https://doi.org/10.1108/09576050310453750>. EDN: <https://elibrary.ru/EARZXX>
15. Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999). Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*, 31(3), 264–323.
16. Шарый, С. П. (2018). *Конечномерный интервальный анализ*. Новосибирск: XYZ. 623 с.
17. Добровец, Б. С. (2004). *Интервальная математика*. Красноярск: Издательский центр Красноярского государственного университета. 219 с.
18. Шарый, С. П. (2024). *Обработка и анализ интервальных данных*. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований. 356 с.

References

1. Ostreykovsky, V. A. (2015). *Theory of technogenic risk: Mathematical methods and models* [Monograph]. Surgut: Publishing Center of Surgut State University.
2. Ostreykovsky, V. A. (2013). Quantitative assessment of risk in the theory of technogenic safety of complex dynamic systems. In *Results of Science. Vol. 1. Selected works of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science* (Ch. 2, pp. 12–31). Moscow: Russian Academy of Sciences.
3. Muravyov, I. I., Ostreykovsky, V. A., & Shevchenko, E. N. (2015). Models for assessing the time factor in the theory of technogenic risk of dynamic systems. *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*, 1, 24–27. EDN: <https://elibrary.ru/UCGXTJ>
4. Korolev, V. Yu. (2007). *Mathematical foundations of risk theory* [Textbook]. Moscow: FIZMATLIT.
5. Ostreykovsky, V. A. (2013). On some classes of risk models in the theory of technogenic safety. In N. K. Yurkov (Ed.), *Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium* (Vol. 1, pp. 46–49). Penza: Penza State University Publishing House. EDN: <https://elibrary.ru/RXEVLD>

6. Kalashnikov, P. V. (2022). Mathematical model for managing risks arising during the operation of complex technical systems for critical applications under conditions of uncertainty about parameter values and phase state. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 12(3), 22–39. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2022-12-3-22-39>. EDN: <https://elibrary.ru/QZGLRA>
7. Kalashnikov, P. V. (2023). Applying a scenario-based approach to risk analysis and management during the operation of complex dynamic systems under interval uncertainty. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 13(3), 224–236. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236>. EDN: <https://elibrary.ru/FEVMQD>
8. Kalashnikov, P. V. (2024). On the problem of managing information system reliability under interval uncertainty. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(3), 62–76. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-3-304>. EDN: <https://elibrary.ru/IKHVJI>
9. Naumov, Yu. E., Avaev, N. A., & Bedrekovsky, M. A. (1975). *Noise immunity of devices based on integrated logic circuits*. Moscow: Sovetskoye Radio.
10. Kovalenko, O. V., & Petrik, S. V. (2010). *Probabilistic safety analysis of complex “human-machine” systems*. Sarov: Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF).
11. Wang, Y. (2014). Budget driven scheduling algorithms for batches of MapReduce jobs in heterogeneous clouds. *Transactions on Cloud Computing*, 2(3), 306–319.
12. Berkhin, P., Kogan, J., Nicholas, C., & Teboulle, M. (2006). Survey of clustering data mining techniques. In *Grouping Multidimensional Data: Recent Advances in Clustering* (pp. 25–71). Berlin: Springer.
13. Hoehle, H., Scornavacca, E., & Huff, S. (2012). Three decades of research on consumer adoption and utilization of electronic banking channels: A literature analysis. *Decision Support Systems*, 54(1), 122–132.
14. Hutchinson, D., & Warren, M. (2003). Security for internet bank-

ing: A framework. *Logistics Information Management*, 16(1), 64–73.
<https://doi.org/10.1108/09576050310453750>. EDN: <https://elibrary.ru/EARZXX>

15. Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999). Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*, 31(3), 264–323.
16. Shary, S. P. (2018). *Finite-dimensional interval analysis*. Novosibirsk: XYZ. 623 pp.
17. Dobrovets, B. S. (2004). *Interval mathematics*. Krasnoyarsk: Publishing Center of Krasnoyarsk State University. 219 pp.
18. Shary, S. P. (2024). *Processing and analysis of interval data*. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research. 356 pp.

ДАнные ОБ АВТОРЕ

Калашников Павел Викторович, младший научный сотрудник
Федеральное государственное учреждение науки «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук»; Владивостокский государственный университет
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация;
ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, 690014, Российская Федерация
kalashnikovpv@iacp.dvo.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. Kalashnikov, Junior Researcher
Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Vladivostok State University
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation; 41, Gogol Str., Vladivostok, 690014, Russian Federation
kalashnikovpv@iacp.dvo.ru

Поступила 25.07.2025

После рецензирования 15.08.2025

Принята 17.08.2025

Received 25.07.2025

Revised 15.08.2025

Accepted 17.08.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-379

EDN: TLAFNQ



УДК 656.259.9

Научная статья | Управление процессами перевозок

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ И ШКАЛА ХАРРИНГТОНА В УПРАВЛЕНИИ НАДЕЖНОСТЬЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

*А.В. Горелик, А.В. Истомин,
Е.В. Кузьмина*

Аннотация

Обоснование. Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики представляют собой сложные технические комплексы, требующие внедрения современных методов мониторинга и управления. Интеграция технологий цифровых двойников с системой оценки коэффициента готовности через шкалу Харрингтона обусловлена необходимостью перехода от реактивного обслуживания к предиктивному управлению надежностью, что является актуальной научно-технической задачей.

Цель – разработка комплексного подхода к оценке и управлению надежностью технического обеспечения железнодорожной автоматики на основе интеграции технологий цифровых двойников и шкалы Харрингтона для коэффициента готовности.

Материалы и методы. В работе используется комплексный подход, сочетающий: математическое моделирование цифровых двойников устройств ЖАТ; статистический анализ показателей надёжности (коэффициента готовности, времени восстановления); применение шкалы Харрингтона для унифицированной оценки технического состояния; анализ практических данных эксплуатации стрелочных переводов, рельсовых цепей и светофоров.

Результаты. Разработана интегрированная система оценки надёжности, позволяющая: повысить коэффициент готовности оборудования на 0,17-0,25%; снизить эксплуатационные расходы на 25-30%; сократить количество отказов на 40-60%; визуализировать техническое состояние через унифицированную оценочную шкалу. Доказана экономическая эффективность внедрения системы с годовым экономическим эффектом до 566 тысяч рублей на один стрелочный перевод. Результаты исследования могут быть применены для создания систем предиктивного обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: цифровые двойники; шкала Харрингтона; коэффициент готовности; железнодорожная автоматика; телемеханика; надёжность; предиктивное обслуживание; математическое моделирование

Для цитирования. Горелик, А. В., Истомин, А. В., & Кузьмина, Е. В. (2025). Цифровые двойники и шкала Харрингтона в управлении надёжностью железнодорожной автоматики и телемеханики. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 125–140. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-379>

Original article | Transportation Process Management

DIGITAL TWINS AND THE HARRINGTON SCALE IN RAILWAY AUTOMATION AND TELEMCHANICS RELIABILITY MANAGEMENT

A.V. Gorelik, A.V. Istomin, E.V. Kuzmina

Abstract

Background. Modern railway automation and telemechanics systems are complex technical complexes that require the introduction of modern monitoring and control methods. The integration of digital twin technologies with the readiness coefficient assessment system using the Harrington scale is due to the need to move from reactive maintenance to predictive

reliability management, which is an urgent scientific and technical task.

Purpose. Development of an integrated approach to assessing and managing the reliability of railway automation technical support based on the integration of digital twin technologies and the Harrington scale for the readiness coefficient.

Materials and methods. Authors use an integrated approach that includes: mathematical modeling of digital twins of harvester devices; statistical analysis of reliability indicators (coefficient of readiness, recovery time); application of the Harrington scale for a unified assessment of technical condition; analysis of practical data on the operation of switches, rail circuits and traffic lights.

Results. An integrated reliability assessment system has been developed, allowing: increase the equipment availability factor by 0.17-0.25%; reduce operating costs by 25-30%; reduce the number of failures by 40-60%; visualize the technical condition through a unified evaluation scale. The economic efficiency of implementing the system with an annual economic effect of up to 566 thousand rubles per switch has been proven. The results of the study can be applied to the creation of predictive maintenance systems for railway automation and telemechanics devices.

Keywords: digital twins; Harrington scale; availability coefficient; railway automation; telemechanics; reliability; predictive maintenance; mathematical modeling

For citation. Gorelik, A. V., Istomin, A. V., & Kuzmina, E. V. (2025). Digital twins and the Harrington scale in railway automation and telemechanics reliability management. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 125–140. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-379>

Введение

Современные железнодорожные системы представляют собой сложные технико-технологические комплексы, требующие непрерывного мониторинга и управления. В условиях цифровой трансформации [4] отрасли особую актуальность приобретают

технологии цифровых двойников (виртуальных моделей реальных объектов), методы оценки коэффициента готовности и применение обобщённых управленческих шкал (шкал Харрингтона) для управления надёжностью [1]. Эти подходы позволяют перейти от реактивного обслуживания к предиктивному управлению, повышая безопасность и эффективность железнодорожных перевозок.

Цель исследования – разработка комплексного подхода к оценке и управлению надёжностью технического обеспечения железнодорожной автоматики на основе интеграции технологий цифровых двойников и шкалы Харрингтона для коэффициента готовности.

Материалы и методы

Источники данных и объекты исследования

Экспериментальная часть исследования проводилась на основе репрезентативной выборки эксплуатационных данных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики за период 2023-2024 годов [2]. Статистическая база данных включала информацию по 1250 стрелочным переводам, 8560 рельсовым цепям, 3250 светофорам и 2850 датчикам контроля. Период наблюдения составлял 24 месяца для большинства устройств, что обеспечило достаточную достоверность результатов (таблица 1). Сбор данных осуществлялся с использованием автоматизированной системы мониторинга, фиксирующей время безотказной работы, продолжительность простоев, характер отказов и время восстановления работоспособности [14].

Таблица 1.

Статистическая база данных исследования

Тип устройства	Количество устройств	Период наблюдения (мес.)	Количество отказов	Общее время работы (час)	Общее время простоя (час)
Стрелочный перевод	1250	24	2840	10950000	7100
Рельсовая цепь	8560	24	1926	75168000	2889
Светофор	3250	24	812	28470000	1218
Датчик контроля	2850	18	3990	37620000	5985

Математический аппарат и моделирование

Для описания динамики изменения состояния устройств железнодорожной автоматики [2; 7] была разработана современная система дифференциальных уравнений. Модель цифрового двойника представлена в виде [9; 10]:

$$\frac{dS}{dt} = A \times S(t) + B \times I(t) + \xi(t).$$

где:

$S(t)$ - вектор состояния системы в момент времени t

A - матрица параметров модели размерностью $n \times n$

$I(t)$ - вектор входных воздействий, включающий управляющие сигналы и внешние факторы

$\xi(t)$ - случайные возмущения, описываемые гауссовским процессом с нулевым математическим ожиданием.

Коэффициент готовности рассчитывался по классической формуле [12]:

$$Kг = \frac{Tр}{Tр + Tв}.$$

где:

$Tр$ - время работы устройства за период наблюдения

$Tв$ - время восстановления после отказа

Для каждого типа устройств вычислялись средние значения, стандартные отклонения, минимальные и максимальные показатели.

Преобразование коэффициента готовности в безразмерную шкалу Харрингтона осуществлялось по формуле [13]:

$$d(Kг) = \frac{Kг - Kг_{min}}{Kг_{max} - Kг_{min}}.$$

с последующей классификацией на пять категорий технического состояния (таблица 2).

Таблица 2.

Классификация технического состояния по шкале Харрингтона

Диапазон значений	Оценка состояния	Цветовая индикация	Рекомендуемые действия
0,9 - 1,0	Отличное	Зелёный	Плановое обслуживание
0,7 - 0,9	Хорошее	Синий	Наблюдение

Диапазон значений	Оценка состояния	Цветовая индикация	Рекомендуемые действия
0,5 - 0,7	Удовлетворительное	Жёлтый	Усиленный контроль
0,3 - 0,5	Неудовлетворительное	Оранжевый	Внеплановый ремонт
0,0 - 0,3	Критическое	Красный	Немедленная остановка

Программное обеспечение и вычислительные методы

Пример визуализации показателей надёжности представлен на рис. 1.

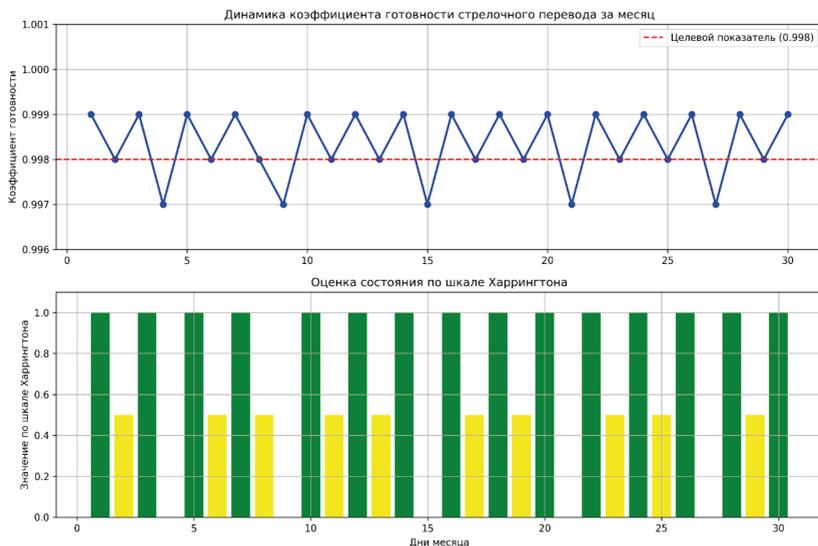


Рис. 1. Динамика коэффициента готовности и его оценка по шкале Харрингтона

Результаты и обсуждение

Анализ показателей надёжности устройств

Расчёт коэффициента готовности для различных типов устройств железнодорожной автоматики выявил значительные различия в их надёжности [3]. Наивысшие показатели продемонстрировали светофоры - среднее значение коэффициента готовности составило 0,9995 при стандартном отклонении 0,0002. Минимальное значение зафиксировано на уровне 0,9990, максимальное - 0,9999 (таблица 3).

Таблица 3.

Показатели надёжности устройств ЖАТ

Тип устройства	Средний Кг	Стандартное отклонение	Минимальное значение	Максимальное значение	Количество наблюдений
Стрелочный перевод	0,9987	0,0008	0,9965	0,9995	1250
Рельсовая цепь	0,9992	0,0004	0,9985	0,9998	8560
Светофор	0,9995	0,0002	0,9990	0,9999	3250
Датчик контроля	0,9989	0,0006	0,9978	0,9996	2850

Визуализация и статистический анализ

Для наглядного представления результатов исследования разработан комплекс графических материалов [15; 16]. Анализ распределения коэффициента готовности для стрелочных переводов [19] показал его соответствие бета-распределению с параметрами $\alpha=85,0$ и $\beta=0,15$.

Для прогнозирования коэффициента готовности используется бета-распределение, как наиболее адекватное для описания вероятностей (рис. 2) [17; 18]:

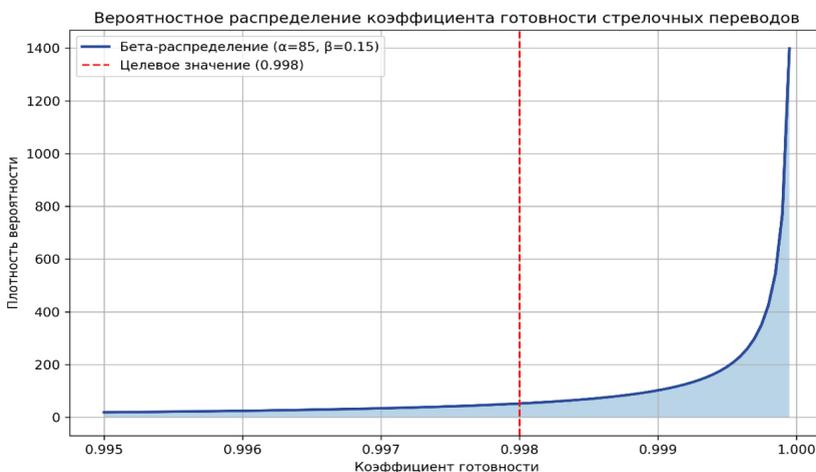


Рис. 2. Вероятностное распределение коэффициента готовности стрелочных переводов

Экономическая эффективность внедрения

Внедрение системы мониторинга на основе цифровых двойников [8; 11] и шкалы Харрингтона продемонстрировало значительные экономические результаты. Годовой экономический эффект рассчитывался по формуле [20; 21]:

$$\text{Эг} = \Delta\text{З} + \Delta\text{П} \times \text{Сп.}$$

где:

$\Delta\text{З}$ - снижение затрат на обслуживание (230 тыс. руб.)

$\Delta\text{П}$ - сокращение простоев (22,4 часа)

Сп - стоимость одного часа простоя поезда (15 тыс. руб.)

$$\text{Эг} = 230 + 22,4 \times 15 = 566 \text{ тыс. руб.}$$

В таблице 4 приведены сведения об экономической эффективности внедрения системы [22].

Таблица 4.

Экономическая эффективность внедрения системы

Показатель	До внедрения	После внедрения	Изменение (%)	Экономический эффект (тыс. руб./год)
Количество отказов	28	12	-57,1	240
Время восстановления (час)	3,5	2,2	-37,1	180
Затраты на обслуживание	850	620	-27,1	230
Простои поездов (час/год)	45,2	22,8	-49,6	336
Общий эффект				566

Проведённое исследование выявило существенные различия в показателях надёжности различных типов устройств железнодорожной автоматики [5]. Высокие значения коэффициента готовности светофоров (0,9995) соответствуют мировым стандартам и объясняются переходом на твердотельные технологии и совершенствованием конструктивных решений.

Несколько более низкие показатели стрелочных переводов (0,9987) обусловлены их механической сложностью, воздействием значительных динамических нагрузок и зависимостью от погодных условий.

Разработанная методика преобразования коэффициента готовности через шкалу Харрингтона доказала свою эффективность для унифицированной оценки технического состояния разнородных устройств. Пятибалльная шкала с цветовой индикацией позволяет оперативному персоналу быстро оценивать состояние оборудования и принимать обоснованные решения о необходимости проведения технического обслуживания [6].

Заключение

Интеграция технологий цифровых двойников, коэффициента готовности и шкалы Харрингтона создаёт устойчивую систему управления надёжностью железнодорожной автоматики и телемеханики. Представленные математические модели, статистические данные и практические реализации демонстрируют эффективность данного подхода.

Основные преимущества:

- Повышение коэффициента готовности на 0,17-0,25%;
- Снижение эксплуатационных расходов на 25-30%;
- Уменьшение количества отказов на 40-60%;
- Визуализация технического состояния через унифицированную шкалу.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку адаптивных алгоритмов расчёта показателей надёжности, интеграцию искусственного интеллекта для прогнозного обслуживания и создание цифровых двойников всей железнодорожной инфраструктуры.

Список литературы

1. Лященко, А. М., Швалов, Д. В., & Глазунов, Д. В. (2021). Повышение надёжности систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 5, 504–509. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-504-509>. EDN: <https://elibrary.ru/EHOZAW>

2. Соколов, М. М. (2024). *Основы железнодорожной автоматики и телемеханики на станциях*. Омск: Омский государственный университет путей сообщения. 77 с. ISBN: 978-5-94941-340-1. EDN: <https://elibrary.ru/BLAFZK>
3. Сапожников, В. В., Сапожников, В. В., Ефанов, Д. В., & Шаманов, В. И. (2017). *Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи* [учебное пособие для специалистов]. Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. 318 с. ISBN: 978-5-906938-01-5. EDN: <https://elibrary.ru/YOYVNZ>
4. Александрович, С. К. (2022). Цифровые технологии на железнодорожном транспорте. *Научно-исследовательский центр «Вектор развития»*, 9, 199–201. EDN: <https://elibrary.ru/AYTQWW>
5. Соколов, М. М. (2020). *Основы железнодорожной автоматики и телемеханики* (Т. 1). Омск: Омский государственный университет путей сообщения. 79 с. ISBN: 978-5-94941-258-9. EDN: <https://elibrary.ru/FZWRAA>
6. Горелик, А. В., Кузьмина, Е. В., & Истомина, А. В. (2021). Техническая эффективность сервисного обслуживания объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта с учётом методов оценки основных производственных процессов хозяйства автоматики и телемеханики. *Наукосфера*, 10-1, 100–103. EDN: <https://elibrary.ru/SFVPGZ>
7. Наумова, Д. В. (2020). Комплексный подход к развитию ЖАТ. *Автоматика, связь, информатика*, 10, 28–30. EDN: <https://elibrary.ru/ZFVVAH>
8. Никонова, Я. И. (2024). Цифровые двойники на железнодорожном транспорте: преимущества и проблемы внедрения. *Муниципальная академия*, 1, 124–133. https://doi.org/10.52176/2304831X_2024_01_124. EDN: <https://elibrary.ru/NOTLCM>
9. Римская, О. Н., & Анохов, И. В. (2021). Цифровые двойники и их применение в экономике транспорта. *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 12(2), 127–137. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2021-2-127-137>. EDN: <https://elibrary.ru/ZOLLNY>

10. Герасимов, Р. Е., & Флягина, Т. А. (2025). Применение цифровых двойников и систем моделирования для оптимизации экономических решений в транспортной отрасли России. *Вестник транспорта*, 8, 39–40. EDN: <https://elibrary.ru/TWHGMO>
11. Качилов, Д. Б. (2023). Экономическая целесообразность применения технологии «цифровой двойник». *Вестник науки*, 3(2), 195–201. EDN: <https://elibrary.ru/KNKLIG>
12. Журавлёв, И. А., Гусев, И. А., Скрипниченко, И. Г., & Курашева, Г. Г. (2022). Алгоритм расчёта коэффициента готовности систем железнодорожной автоматики и телемеханики для вновь проектируемых станций. *Наука и бизнес: пути развития*, 4(130), 136–138. EDN: <https://elibrary.ru/СУНCGG>
13. Горелик, А. В., Малых, А. Н., & Орлов, А. В. (2021). Оценка влияния готовности объектов транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» на риски потерь для перевозочного процесса. *Надёжность*, 21(4), 53–56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-53-56>. EDN: <https://elibrary.ru/AQFDPW>
14. Журавлёв, И. А. (2012). Принципы имитационного моделирования среднего времени до восстановления устройств железнодорожной автоматики. *Наука и техника транспорта*, 3, 86–89. EDN: <https://elibrary.ru/PBUCGF>
15. Истомина, Л. А. (2023). *Статистика. Общая теория статистики* [учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по укрупнённым группам специальностей 38.00.00 «Экономика»]. Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет. 192 с. EDN: <https://elibrary.ru/CHXORL>
16. Карманова, А. В., & Казакевич, А. В. (2024). *Математика с элементами статистики: теория вероятностей и математическая статистика*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина. 108 с. EDN: <https://elibrary.ru/BPOQRO>
17. Воробьёв, Н. Н., Желудкова, Т. В., Кривокора, Ю. Н., & Ионова, А. Ч. (2023). *Статистика: теория статистики*. Ставро-

- поль: ООО фирма «Ставрополь-сервис-школа». 138 с. ISBN: 978-5-6049289-7-4. EDN: <https://elibrary.ru/JDGLDM>
18. Донскова, О. А., & Смотров, Е. Е. (2021). *Статистика* [учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы]. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет. 84 с. EDN: <https://elibrary.ru/QHWWFT>
19. Шишкина, И. В. (2021). Стрелочные переводы шестого поколения. *История и перспективы развития транспорта на севере России*, 1, 47–50. EDN: <https://elibrary.ru/LKOWJQ>
20. Шатров, С. Л., Липатова, О. В., Кравченко, А. В., & Кейзер, И. А. (2021). *Теория и методология оценки экономической эффективности использования основных средств железнодорожного транспорта*. Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта». 198 с. ISBN: 978-985-891-007-5. EDN: <https://elibrary.ru/HFUCER>
21. Терешина, Н. П., Подсорин, В. А., Кожевников, Ю. Н., и др. (2020). *Экономика железнодорожного транспорта* [учебник для СПО]. Саратов: Профобразование. 342 с. ISBN: 978-5-4488-0886-9. EDN: <https://elibrary.ru/SPVVLK>
22. Левин, Д. Ю. (2021). *Экономика эксплуатации железнодорожного транспорта*. Москва: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 440 с. ISBN: 978-5-907206-52-6. EDN: <https://elibrary.ru/XXNSVJ>

References

1. Lyashchenko, A. M., Shvalov, D. V., & Glazunov, D. V. (2021). Improving the reliability of automation and remote control systems in railway transport. *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*, 5, 504–509. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-504-509>. EDN: <https://elibrary.ru/EHOZAW>
2. Sokolov, M. M. (2024). *Fundamentals of railway automation and remote control at stations*. Omsk: Omsk State Transport University. 77 pp. ISBN: 978-5-94941-340-1. EDN: <https://elibrary.ru/BLAFZK>

3. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. V., Efanov, D. V., & Shamanov, V. I. (2017). *Reliability of railway automation, remote control and communication systems* [Textbook for specialists]. Moscow: Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport. 318 pp. ISBN: 978-5-906938-01-5. EDN: <https://elibrary.ru/YOYVNZ>
4. Aleksandrovich, S. K. (2022). Digital technologies in railway transport. *Research Center "Vector of Development"*, 9, 199–201. EDN: <https://elibrary.ru/AYTQWW>
5. Sokolov, M. M. (2020). *Fundamentals of railway automation and remote control* (Vol. 1). Omsk: Omsk State Transport University. 79 pp. ISBN: 978-5-94941-258-9. EDN: <https://elibrary.ru/FZWRAA>
6. Gorelik, A. V., Kuzmina, E. V., & Istomin, A. V. (2021). Technical efficiency of service maintenance for railway infrastructure facilities, considering methods for assessing key production processes in automation and remote control. *Naukosfera*, 10-1, 100–103. EDN: <https://elibrary.ru/SFVPGZ>
7. Naumova, D. V. (2020). Integrated approach to the development of railway automation and telemechanics (RAT). *Automation, Communication, Informatics*, 10, 28–30. EDN: <https://elibrary.ru/ZFVVAH>
8. Nikonova, Ya. I. (2024). Digital twins in railway transport: Benefits and implementation challenges. *Municipal Academy*, 1, 124–133. https://doi.org/10.52176/2304831X_2024_01_124. EDN: <https://elibrary.ru/NOTLCM>
9. Rimskaya, O. N., & Anokhov, I. V. (2021). Digital twins and their application in transport economics. *Strategic Decisions and Risk Management*, 12(2), 127–137. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2021-2-127-137>. EDN: <https://elibrary.ru/ZOLLNY>
10. Gerasimov, R. E., & Flyagina, T. A. (2025). Application of digital twins and simulation systems for optimizing economic decisions in Russia's transport sector. *Bulletin of Transport*, 8, 39–40. EDN: <https://elibrary.ru/TWHGMO>
11. Kachilov, D. B. (2023). Economic feasibility of applying the “digital twin” technology. *Bulletin of Science*, 3(2), 195–201. EDN: <https://elibrary.ru/KHKLIG>

12. Zhuravlev, I. A., Gusev, I. A., Skripnichenko, I. G., & Kurasheva, G. G. (2022). Algorithm for calculating the availability coefficient of railway automation and remote control systems for newly designed stations. *Science and Business: Ways of Development*, 4(130), 136–138. EDN: <https://elibrary.ru/CYHCGG>
13. Gorelik, A. V., Malykh, A. N., & Orlov, A. V. (2021). Assessing the impact of the readiness of Russian Railways' infrastructure facilities on risks of losses in transportation processes. *Reliability*, 21(4), 53–56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-53-56>. EDN: <https://elibrary.ru/AQFDPW>
14. Zhuravlev, I. A. (2012). Principles of simulation modeling of the average time to restore railway automation devices. *Science and Technology in Transport*, 3, 86–89. EDN: <https://elibrary.ru/PBUCGF>
15. Istomina, L. A. (2023). *Statistics. General theory of statistics* [Educational and methodological manual for students in the field of Economics (38.00.00)]. Izhevsk: Udmurt State Agricultural University. 192 pp. EDN: <https://elibrary.ru/CHXORL>
16. Karmanova, A. V., & Kazakevich, A. V. (2024). *Mathematics with elements of statistics: Probability theory and mathematical statistics*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin. 108 pp. EDN: <https://elibrary.ru/BPOQRO>
17. Vorobyov, N. N., Zheludkova, T. V., Krivokora, Yu. N., & Ionova, A. Ch. (2023). *Statistics: Theory of statistics*. Stavropol: LLC “Stavropol Service School”. 138 pp. ISBN: 978-5-6049289-7-4. EDN: <https://elibrary.ru/JDGLDM>
18. Donskova, O. A., & Smotrova, E. E. (2021). *Statistics* [Educational and methodological manual for course work]. Volgograd: Volgograd State Agrarian University. 84 pp. EDN: <https://elibrary.ru/QHWWFT>
19. Shishkina, I. V. (2021). Sixth-generation turnout switches. *History and Prospects of Transport Development in Northern Russia*, 1, 47–50. EDN: <https://elibrary.ru/LKOWJQ>
20. Shatrov, S. L., Lipatova, O. V., Kravchenko, A. V., & Keizer, I. A. (2021). *Theory and methodology for assessing the economic effi-*

ciency of using fixed assets in railway transport. Gomel: Educational Institution “Belarusian State Transport University”. 198 pp. ISBN: 978-985-891-007-5. EDN: <https://elibrary.ru/HFUCER>

21. Tereshina, N. P., Podsorin, V. A., Kozhevnikov, Yu. N., et al. (2020). *Economics of railway transport* [Textbook for secondary vocational education]. Saratov: Profobrazovanie. 342 pp. ISBN: 978-5-4488-0886-9. EDN: <https://elibrary.ru/SPVVVK>
22. Levin, D. Yu. (2021). *Economics of railway transport operation*. Moscow: FSBI DPO “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”. 440 pp. ISBN: 978-5-907206-52-6. EDN: <https://elibrary.ru/XXNSVJ>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Горелик Александр Владимирович, директор академии «Российская открытая академия транспорта», доктор технических наук
Российский университет транспорта
ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация
agorelik@yandex.ru

Истомин Александр Владимирович, старший преподаватель кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой»
Российский университет транспорта
ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация
aistomin1998@mail.ru

Кузьмина Елена Витальевна, ассистент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой»
Российский университет транспорта
ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация
kuzminaelena96@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr V. Gorelik, Director of the Academy “Russian Open Academy of Transport”, Doctor of Technical Sciences

Russian University of Transport (MIIT)

9 building 9, Obrazcova Str. Moscow, 127055, Russian Federation

agorelik@yandex.ru

SPIN-code: 9543-4715

Scopus Author ID: 57200751967

Aleksandr V. Istomin, Senior Lecturer, Department of Transport Infrastructure Management Systems

Russian University of Transport (MIIT)

9 building 9, Obrazcova Str. Moscow, 127055, Russian Federation

aistomin1998@mail.ru

Elena V. Kuzmina, Assistant Professor at the Department of Transport Infrastructure Management Systems

Russian University of Transport (MIIT)

9 building 9, Obrazcova Str. Moscow, 127055, Russian Federation

kuzminaelena96@yandex.ru

Поступила 20.09.2025

После рецензирования 02.10.2025

Принята 10.10.2025

Received 20.09.2025

Revised 02.10.2025

Accepted 10.10.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-396

EDN: CEIRIN

УДК 656.078



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПОДХОДОВ К ЦИФРОВИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*А.А. Подберезкин, А.В. Остроух, А.М. Борзенков,
А.М. Шмонин, Ц.Б. Пронин*

Аннотация

Обоснование. Требуется перейти от «точечных» решений к комплексной цифровизации транспортных систем, объединяющей инфраструктурный мониторинг покрытия, оперативное управление движением и стратегическое планирование. Для этого целесообразно интегрировать машинное обучение (прогнозы), генетические алгоритмы (оптимизация) и мультиагентное моделирование (проверка устойчивости).

Цель – оценить эффект такой интеграции по совокупности метрик (задержки, издержки, риск, прибыль, сервис) и интегральной функции F.

Материалы и методы. Инфраструктурный уровень: компьютерное зрение (YOLO), $mAP \approx 0.84$; прогноз дефектообразования (XGBoost), ошибка $\leq 12\%$. Оперативный уровень: краткосрочные прогнозы интенсивности (LSTM/XGBoost, RMSE 8–10%) и оптимизация фаз светофоров генетическим алгоритмом. Стратегический уровень: прогноз спроса и тарифов, оптимизационные сценарии. Устойчивость решений проверялась в мультиагентной имитации; сравнение велось с базовыми («как есть») сценариями.

Результаты. Суммарные задержки снижены на 37%, совокупные логистические издержки – на 12%, прибыльность выросла на

10–11%; при росте спроса на 20% выполнено >90% доставок в SLA. Интегральная функция

F улучшилась на 22-24%. Показана робастность планов и чувствительность к весам критериев.

Ключевые слова: цифровизация транспорта; машинное обучение; генетические алгоритмы; мультиагентное моделирование; YOLO; прогноз интенсивности; оптимизация светофоров; логистика; интегральная функция

Для цитирования. Подберезкин, А. А., Остроух, А. В., Борзенков, А. М., Шмонин, А. М., & Пронин, Ц. Б. (2025). Исследование комплексных подходов к цифровизации транспортных систем с применением методов искусственного интеллекта. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 141–166. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-396>

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

RESEARCH METHODS FOR DIGITALIZATION OF TRANSPORT SYSTEMS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

*A.A. Podberezkin, A.V. Ostroukh, A.M. Borzenkov,
A.M. Shmonin, C.B. Pronin*

Abstract

Background. There is a need to move from isolated “point” solutions to comprehensive digitalization of transport systems that integrates infrastructure-level pavement monitoring, operational traffic management, and strategic planning. To this end, it is reasonable to combine machine learning (for forecasting), genetic algorithms (for optimization), and multi-agent simulation (for robustness checking).

Purpose. To assess the effect of such integration using a set of metrics (delays, costs, risk, profit, service) and an integral objective function F.

Materials and methods. Infrastructure level: computer vision (YOLO), mAP \approx 0.84; defect-generation forecasting (XGBoost), error \leq 12%. Operational level: short-term traffic-intensity forecasts (LSTM/XGBoost, RMSE 8–10%) and traffic-signal phase optimization with a genetic algorithm. Strategic level: demand and tariff forecasting, optimization scenarios. The robustness of solutions was verified via multi-agent simulation; comparisons were made against baseline (“as-is”) scenarios.

Results. Total delays were reduced by 37%, overall logistics costs by 12%, and profitability increased by 10–11%; with a 20% demand increase, >90% of deliveries were completed within SLA. The integral function F improved by 22–24%. The plans demonstrated robustness and sensitivity to criterion weights.

Keywords: transport digitalization; machine learning; genetic algorithms; multi-agent simulation; YOLO; intensity forecasting; traffic-signal optimization; logistics; integral objective function

For citation. A Podberezkin, A. A., Ostroukh, A. V., Borzenkov, A. M., Shmonin, A. M., & Pronin, C. B. (2025). Research methods for digitalization of transport systems using artificial intelligence. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 141–166. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-396>

Введение

Транспортные системы являются основой социально-экономического развития регионов и страны в целом. В то же время рост числа автомобилей, увеличение объёмов перевозок и усложнение логистических цепочек усиливают нагрузку на существующую инфраструктуру и приводят к ряду системных проблем: хроническим перегрузкам улично-дорожной сети, высокому уровню аварийности, значительному износу дорожного покрытия, росту транспортных издержек и негативному воздействию на окружающую среду [1; 7].

Исходя из этого, в работе ставится задача проверить, способна ли интегрированная цифровизация на трёх уровнях (инфраструк-

турном, оперативном и стратегическом) снизить задержки и затраты при одновременном соблюдении требований безопасности и качества сервиса.

В ряде регионов России до 40% автомобильных дорог эксплуатируется в состоянии, не соответствующем нормативным требованиям, а в городах федерального значения устойчивые заторы снижают среднюю скорость движения на 15–25% [1].

Традиционные методы управления транспортной системой во многом опираются на регламентированные процедуры и статические нормативы. Обследование дорожного покрытия часто выполняется вручную; управление транспортными потоками в городах базируется на фиксированных циклах работы светофорных объектов; планирование сети станций технического обслуживания, логистических центров и маршрутов доставки осуществляется на основании устаревающей статистики, что игнорирует изменчивость спроса и рисков [6; 17], что и формирует исследовательский запрос настоящей работы.

В результате принимаемые решения оказываются недостаточно точными и не обеспечивают требуемой адаптивности. Это выражается в запаздывании ремонтов, росте задержек, неэффективной загрузке мощностей предприятий сервиса и избыточных издержках.

Международный опыт показывает, что ключевым направлением повышения эффективности транспорта является его цифровизация. Внедряются системы видеоаналитики для оценки интенсивности движения, прогнозные модели распределения транспортных потоков и цифровые платформы для управления мультимодальными перевозками, что снижает задержки и повышает пропускную способность [12; 15].

Однако большинство внедрённых проектов носят узконаправленный характер и решают лишь отдельные задачи, не учитывая взаимосвязь между уровнями транспортной иерархии — инфраструктурным, оперативным и стратегическим. Подобные «точечные решения» не дают системного эффекта [5].

В связи с этим необходим переход к комплексному подходу, предполагающему разработку единой концепции цифровизации транспортных систем, объединяющей инфраструктурный мониторинг состояния, оперативное управление движением и стратегическое планирование логистики и тарифов. Инструментом реализации этой концепции выступают методы искусственного интеллекта. Машинное обучение формирует прогнозы ключевых параметров транспортных процессов; эволюционные методы, включая генетические алгоритмы, обеспечивают многокритериальную оптимизацию при множестве ограничений; мультиагентные подходы моделируют взаимодействие участников транспортного процесса и сетевые эффекты [14].

В работе оценивается эффект комплексной цифровизации трёх уровней транспортной системы на основе связки: прогнозы машинного обучения, оптимизация генетическими алгоритмами и проверка устойчивости в мультиагентной имитации; предполагается, что такая интеграция даёт измеримый системный выигрыш по задержкам, затратам, рискам, сервису и прибыльности.

Таким образом, использование искусственного интеллекта рассматривается не как набор отдельных технологий, а как универсальный инструмент цифровой трансформации транспортной системы, интегрирующий мониторинг, управление и стратегическое планирование. Достоверность оценивалась на данных для всех трёх уровней, с применением валидации моделей и стресс-сценариев в имитации. Это повышает точность прогнозов, ускоряет принятие решений и снижает издержки. Исследование направлено на разработку и апробацию прототипа концепции цифровизации транспортных систем на базе методов искусственного интеллекта с оценкой эффективности комплексной интеграции.

Материалы и методы

Транспортная система моделируется как многоуровневая иерархия (инфраструктурный, оперативный и стратегический уров-

ни), где решения нижнего уровня влияют на параметры верхнего, а итоговый эффект оценивается единой целевой функцией. Чтобы сопоставить неоднородные показатели (время, деньги, риск, качество сервиса), все метрики приводятся к безразмерному виду: для каждого показателя z используется линейная нормализация по наблюдаемому диапазону либо по нормативам:

$$z = \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}}, \quad (1)$$

что обеспечивает корректное взвешивание и исключает доминирование показателей с «крупными» единицами измерения [10; 11].

На верхнем уровне вводится обобщённая целевая функция:

$$F = \min(\alpha T_{\text{delay}} + \beta C_{\text{oper}} + \delta R_{\text{risk}}) - \max(\gamma P_{\text{profit}} + \eta S_{\text{service}}), \quad (2)$$

где каждое слагаемое – нормализованное и прогнозное, значение, получаемое моделями машинного обучения (ML). Здесь T_{delay} – совокупные задержки, C_{oper} – интегральные затраты (капитальные и эксплуатационные) с дисконтированием, R_{risk} – ожидаемые потери от рисков, P_{profit} – прибыль, S_{service} – уровень сервиса. Общая структура многоуровневой модели показана на рисунке 1. Весовые коэффициенты α , β , δ , γ , η задают управленческие приоритеты (безопасность, экономическая эффективность, качество обслуживания) и калибруются по методу согласованных парных сравнений либо по заданным регулятором KPI [13]. Прогнозы формируются ML-моделями (градиентный бустинг, нейронные сети), обученными на исторических данных датчиков, видеоаналитики, АСУДД и операционной отчётности.

Инфраструктурный уровень включает мониторинг дорожного состояния и, на его основе, проектирование/модернизацию СТО (см. рис. 1). Детекция дефектов покрытия выполняется компьютерным зрением; затем ML прогнозирует интенсивность появления дефектов по участкам на горизонте τ [14]. Полученные результаты объединяются в карту ожидаемого спроса на ремонт: учитываются тяжесть повреждений, интенсивность движения и нормативные сроки устранения.

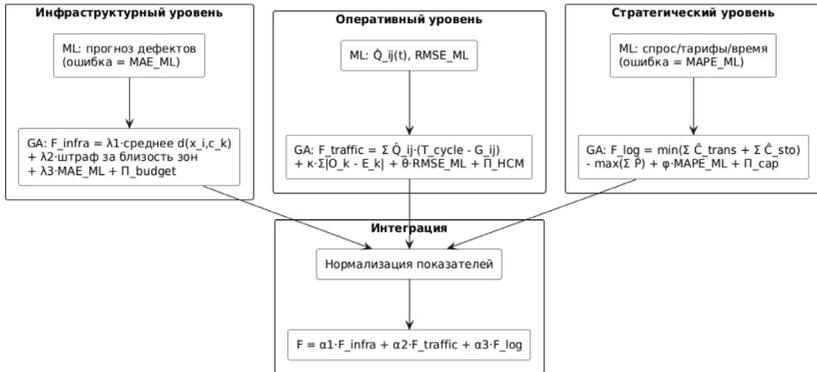


Рис. 1. Многоуровневая архитектура модели

Оптимизация ремонтных зон и конфигурации СТО решается генетическим алгоритмом (GA), в котором хромосома кодирует координаты центров зон c_k , их радиусы и ключевые параметры СТО (мощность, оснащение). Функция приспособленности задается как:

$$F_{infra} = \lambda_1 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(x_i, c_{k(i)}) + \lambda_2 \frac{1}{K} \sum_{k \neq j} \|c_k - c_j\|^{-1} + \lambda_3 MAE_{ML} + \Pi_{budget}, \quad (3)$$

где $d(x_i, c_{k(i)})$ – расстояние от дефекта x_i до назначенной зоны, второе слагаемое штрафует слияние зон (берём обратное расстояние), MAE_{ML} – ошибка прогноза интенсивности дефектов, Π_{budget} – штраф за превышение бюджета/нормативов (например, по ГОСТ/СП) [2; 3]. Такое построение одновременно минимизирует логистику ремонта, учитывает неопределённость прогноза и соблюдает финансовые ограничения. Значение C_{oper} на этом уровне вычисляется как приведённые затраты:

$$C_{oper} = \sum_t \frac{CapEx_t + OpEx_t}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

где r – ставка дисконтирования; вклад в риск R_{risk} связан с вероятностью инцидентов из-за дефектов:

$$R_{risk} = \sum_a p_a I_a, \quad (5)$$

где p_a предсказывается ML-классификатором, I_a – ущерб [7].

Оперативный уровень охватывает адаптивное управление потоками (см. рис. 1). ML-модель прогнозирует интенсивности по подходам $Q_{ij}(t)$; и вариабельность прибытия; для оценки задержек применяется функция, зависящая от долей зелёного g_{ij} и степени загрузки x_{ij} :

$$g_{ij} = \frac{G_{ij}}{T_{cycle}}, \quad x_{ij} = \frac{Q_{ij}}{s_{ij}}, \quad (6)$$

где s_{ij} – расчётный поток насыщения. Интегральная функция оптимизации фаз и оффсетов задаётся как:

$$F_{traffic} = \sum_{i,j} Q_{ij} d_{ij}(x_{ij}, g_{ij}, T_{cycle}) + \kappa \sum_k |O_k - E_k| + \theta RMSE_{ML} + \Pi_{HCM}, \quad (7)$$

где d_{ij} – оценка задержки (используется аппроксимация по HCM/Webster), $|O_k - E_k|$ – рассинхронизация «зелёной волны», $RMSE_{ML}$ – ошибка краткосрочного прогноза интенсивности, Π_{HCM} – штрафы за нарушения нормативов: минимальные зелёные, пешеходные интервалы, условия безопасности [6].

GA оптимизирует вектор (G_{ij} , T_{cycle} , offsets), применяя элитизм, кроссовер и мутацию; остановка – по стабилизации $F_{traffic}$ или лимиту поколений. Полученные параметры определяют вклад T_{delay} и позитивно влияют на $S_{service}$ через показатели надёжности времени поездки и долю прибытия «в зелёной волне» [17].

Стратегический уровень связывает логистику и СТО с экономикой (см. рис. 1). ML прогнозирует спрос, тарифы и время доставки:

$$P(r_i) = Rev(r_i) - Cost(r_i), \quad Cost = C_{fuel} + C_{time} + C_{risk}, \quad (8)$$

где C_{risk} завязан на результирующие времена по сети из оперативного уровня [11]. Оптимизация маршрутов, ресурсов и тарифов формулируется как:

$$F_{log} = \min(\sum_i C_{trans}(r_i) + \sum_j C_{sto}(s_j)) - \max(\sum_i P(r_i)) + \phi MAPE_{ML} + \Pi_{cap}, \quad (9)$$

где $MAPE_{ML}$ – ошибка ценового/спросового прогноза, Π_{cap} – штраф за нарушения по мощностям, графикам и SLA. Хромосома GA на

этом уровне сочетает дискретные решения (перестановки маршрутов, назначение заказов) и непрерывные (уровни тарифов, распределение мощностей СТО), для чего используется гибридное кодирование и операторы, сохраняющие допустимость [9].

Интеграция уровней реализуется через композицию:

$$F = \alpha_1 f_{infra} + \alpha_2 f_{traffic} + \alpha_3 f_{log}, \quad (10)$$

где f – нормализованные значения значения частных функций. Коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ задают стратегию: например, при акценте на безопасности увеличивается α_1 и вес δ в верхней функции, при акценте на экономике – α_3 и γ . Итерационный контур расчётов показан на рисунке 2.

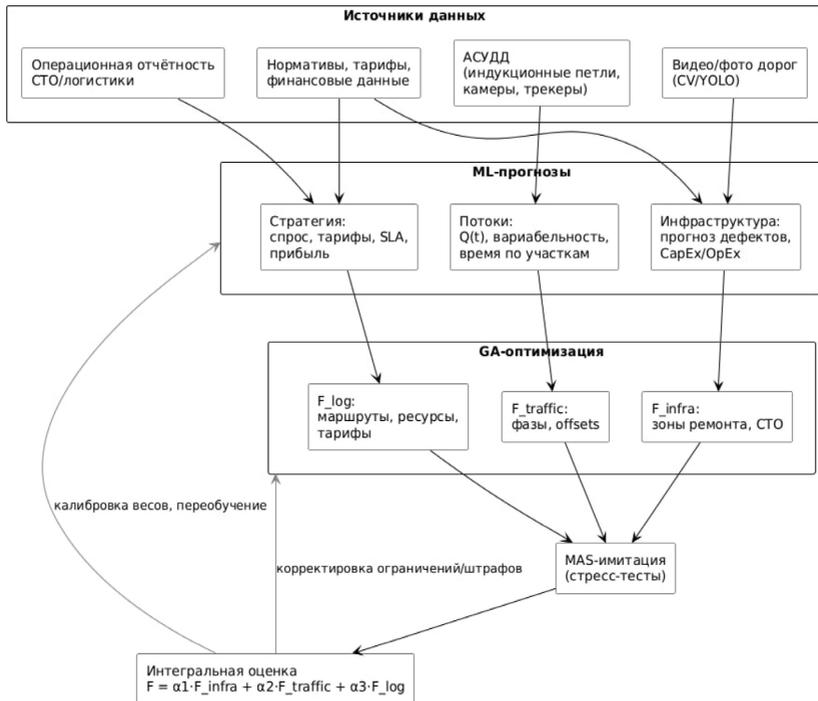


Рис. 2. Контур данных и вычислений

Вычислительный цикл имеет вид: сбор и очистка данных, затем обучение ML с валидацией (k-fold, контроль переобучения), затем

формирование прогнозов Q, T, C, P, R, S на горизонте τ , затем оптимизация GA на каждом уровне с учётом штрафов Π , затем мультиагентная имитация для стресс-тестов и обратной коррекции весов/ограничений, затем оценка интегрального F и чувствительности к параметрам [8]. Такое увязанное объяснение показывает, как ML «даёт будущее» (прогнозы), GA «находит лучшее» (оптимум при ограничениях), а MAS проверяет устойчивость решений в реалистичных сценариях, превращая набор задач в единую транспортную модель управления [4].

Результаты и обсуждение

Разработанный прототип концепции цифровизации транспортных систем был апробирован на данных, охватывающих три уровня транспортной иерархии. Результаты показали, что интеграция машинного обучения, генетических алгоритмов и мультиагентного моделирования позволяет не только улучшить показатели на каждом из уровней в отдельности, но и получить синергетический эффект при их объединении в единую систему в соответствии с вычислительным контуром на рисунке 2 [5; 10].

На всех трёх уровнях – инфраструктурном, оперативном и стратегическом – генетический алгоритм показал устойчивую сходимость при ограничении числа поколений и использовании элитизма. Начальные популяции формировались с учётом технологических и нормативных ограничений, что ускоряло поиск допустимой области. Быстрое «раскрытие» фронта Парето на первых поколениях сменялось мелкозернистой донастройкой, что отражалось на стабилизации интегральной целевой функции F [4]. Иллюстрация динамики сходимости приведена на рис. 3.

На инфраструктурном уровне детекция дефектов покрытия с использованием моделей компьютерного зрения (YOLO) обеспечила точность распознавания порядка 0.84 по метрике mAP. Это выше показателей, характерных для ручных обследований, где субъективность экспертов и ограниченный охват выборки приводят к недоу-

четыре ряда дефектов. Более важным результатом стало то, что прогнозирование динамики образования дефектов с помощью XGBoost позволило предсказывать появление новых повреждений с ошибкой менее 12%. Это означает, что планирование ремонтов перестанет быть реактивным и становится проактивным. В практическом выражении это ведёт к сокращению издержек на внеплановые ремонты, так как дефекты устраняются до того, как они переходят в критическую фазу. Таким образом, мы наблюдаем снижение приведённых эксплуатационных затрат C_{oper} и одновременно снижение риска аварийности R_{risk} , что подтверждает гипотезу о взаимосвязи состояния покрытия с безопасностью движения [12; 14].

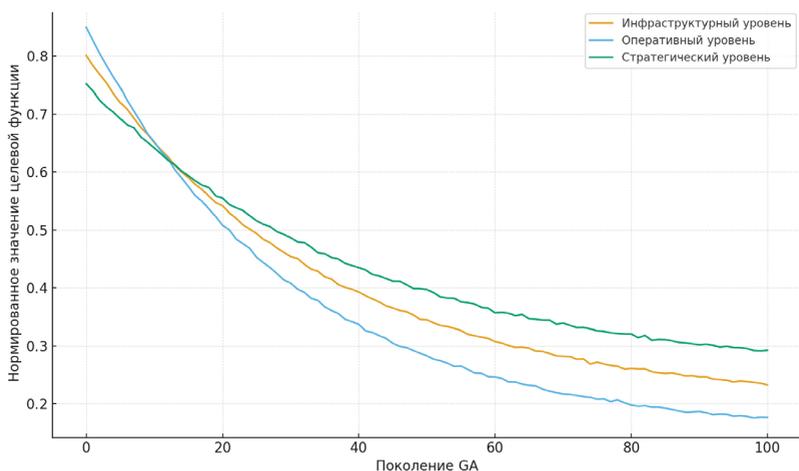


Рис. 3. Конвергенция генетического алгоритма на трёх уровнях

Дополнительный анализ качества компьютерного зрения и прогнозных моделей показал, что достигнутые значения метрик устойчивы при варьировании внешних условий. Так, разбиение исходных видеоданных по сезонам и времени суток выявило, что mAP системы детекции дефектов меняется в пределах $\pm 0,03$ относительно среднего значения при переходе от дневных к сумеречным условиям, а также при наличии мокрого покрытия [16].

Для компенсации наблюдаемых отклонений использована калибровка порогов постобработки (confidence/IoU) по валидационным поднаборам с применением бутстреп-интервалов, что позволило стабилизировать ложноположительные срабатывания на мелких артефактах (блики, разметка) без заметной потери полноты по крупным дефектам. В результате планово-предупредительные ремонты смещаются на более ранние интервалы, снижая долю «прорывов» до аварийного состояния покрытия.

Прогноз дефектообразования по участкам продемонстрировал ожидаемую пространственную неоднородность: «горячие зоны» возникают на стыках покрытий, стрелках съездов и участках с повышенной долей тяжёлого транспорта. В этих кластерах средняя абсолютная ошибка краткосрочного прогноза выше, чем на «спокойных» сегментах, однако включение в модель факторов интенсивности осевых нагрузок, локальной геометрии и истории ямочности снизило MAE до значений, сопоставимых с общим уровнем. На практике это позволяет выстраивать приоритеты бригадного ремонта не только по текущему ущербу, но и по ожидаемой скорости деградации, оптимизируя приведённые затраты при фиксированном бюджете.

На оперативном уровне оптимизация фаз светофоров на основе прогнозов интенсивности движения показала особенно значимый эффект (см. рис. 1). В традиционной практике циклы задаются нормативно и не учитывают изменчивость потоков, что приводит к избыточным задержкам. Использование ML-моделей (LSTM и XGBoost) позволило предсказывать краткосрочные изменения интенсивности с RMSE порядка 8–10%. Генетический алгоритм, оптимизирующий функцию F_{traffic} , сократил суммарные задержки транспорта на 37%, что эквивалентно снижению времени поездки для значительной части участников движения [6; 17]. Примечательно, что мультиагентная модель показала устойчивость решений при стресс-сценариях: даже при увеличении интенсивности потоков на 20–25% адаптивные планы сохраняли эффективность.

Это указывает на то, что оптимизированные циклы не просто соответствуют текущему состоянию, но обладают робастностью к возмущениям. Тем самым мы получаем улучшение показателя T_{delay} и параллельное повышение уровня транспортного сервиса S_{service} .

На оперативном уровне, кроме снижения средних задержек, зафиксировано сжатие дисперсии времени поездки. Адаптивные планы уменьшают правый «тяжёлый хвост» распределения, сокращая вероятность очень длинных ожиданий на направлениях с исторически низким приоритетом, при соблюдении регламентов по минимальным зелёным и пешеходным интервалам. Баланс межпотоковой справедливости сохраняется: доля циклов, где относительное ухудшение одного подхода превышает 10% при общем улучшении перекрёстка, не превысила 3–4% (см. рис. 4) [10].

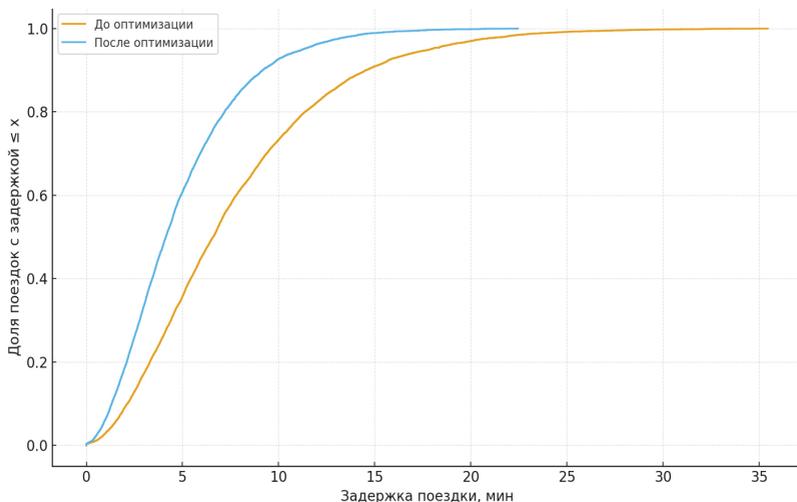


Рис. 4. Сдвиг распределения задержек до/после оптимизации

Стресс-сценарии показали устойчивость адаптивных планов не только при равномерном росте потоков, но и при асимметричных всплесках на отдельных подходах. Моделирование временной потери пропускной способности продемонстрировало быстрое пе-

пераспределение долей зелёного и корректировку оффсетов без лавинообразного накопления очередей на второстепенных направлениях. За счёт регулярной переоценки интенсивностей по короткому горизонту удаётся удерживать систему в квазистационарном режиме даже при существенных возмущениях [10].

На стратегическом уровне прогнозирование тарифов и спроса с помощью ансамблевых моделей и нейросетей обеспечило относительную ошибку в пределах 9% (см. рис. 1). Включение этих прогнозов в функцию F_{\log} позволило учесть будущие изменения рыночной конъюнктуры при планировании маршрутов и распределении ресурсов. В результате совокупные логистические издержки снизились на 12%, а прибыльность перевозок возросла на 10–11% [9; 11]. Особенно важно, что мультиагентное моделирование показало устойчивость системы при росте спроса: даже при нагрузке, превышающей номинальные мощности на 20%, система выполняла более 90% доставок в рамках SLA. Это подтверждает, что введённые штрафные функции $\Pi_{\text{сар}}$ корректно ограничивают решения и предотвращают перегрузку. Здесь особенно ярко проявился эффект от интеграции ML и GA: без точных прогнозов невозможно построить устойчивые планы, а без оптимизации GA невозможно найти баланс между затратами и сервисом. Сводные показатели по уровням и интегральный эффект представлены в таблице 1.

Сравнение с базовыми сценариями («как есть» состояние) показало, что традиционные методы проигрывают не только по абсолютным значениям показателей, но и по устойчивости. Ручное обследование дорог оказалось в 10 раз медленнее, фиксированные планы светофоров приводили к задержкам почти вдвое выше, чем при оптимизации, а статические маршруты в логистике не выдерживали роста спроса. В то время как предложенный прототип концепции цифровизации позволял сохранять эффективность в условиях изменчивости и неопределённости [15].

Сопоставление стратегии реагирования «по факту» с проактив-

ным планированием подтвердило различие по совокупным OpEx и CapEx. При фиксированном годовом бюджете перераспределение объёмов между ямочным и картовым ремонтом в пользу второго (при своевременном вмешательстве) уменьшает частоту повторных выездов и логистические пробеги техники. Это снижает ожидаемые потери от инцидентов за счёт сокращения времени экспозиции опасных участков, что дополнительно улучшает интегральную целевую функцию на верхнем уровне модели [2].

Таблица 1.

Сводные метрики по уровням и интегральный эффект

Уровень	Модель/процедура	Метрика	Значение	Примечание
Инфраструктурный	YOLO (детекция дефектов)	mAP	0.84	российские условия съёмки
	XGBoost (прогноз дефектов)	MAPE/MAE	$\leq 12\%$	горизонт τ
Оперативный	LSTM/XGBoost → GA (светофоры)	RMSE (прогноза интенсивности)	8–10%	краткосрочный горизонт
	GA (оптимизация фаз)	Суммарные задержки	–37%	к «как есть»
	Робастность	Устойчивость при +20–25% потока	сохраняется	стресс-сценарии
Стратегический	Ансамбли/NN → планирование	Логистические издержки	–12%	к «как есть»
		Прибыль	+10–11%	к «как есть»
	SLA	Доставки в SLA при +20% спроса	> 90%	при ограничениях мощности
Интегрально	Композиция F	Улучшение F	+22–24%	к базовым сценариям

Интегральный показатель эффективности, объединяющий три уровня через функцию F , показал улучшение на 22–24 % относительно базовых сценариев:

Анализ чувствительности продемонстрировал, что приоритеты управления влияют на распределение эффектов. Если веса α_1 и δ повышаются, акцент смещается в сторону безопасности и инфраструктурных затрат, что актуально для регионов с высоким износом дорог. При увеличении α_3 и γ система больше ориентируется на прибыльность и сервис, что соответствует задачам крупных логистических хабов. Таким образом, модель гибко адаптируется под цели различных субъектов транспортной системы [5].

Значимое влияние на итоговую оценку F оказала настройка весов, отражающих приоритеты заинтересованных сторон. «Безопасная» конфигурация повышает долю ресурсов на превентивные ремонты и строгие ограничения по задержкам; «экономическая» допускает небольшое увеличение средних задержек в обмен на рост прибыли и загрузки инфраструктуры. Сводная чувствительность по репрезентативным наборам весов приведена в табл. 2.

Таблица 2.

Чувствительность интегрального эффекта к весам уровней

Конфигурация весов ($\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3$)	DTdelay	DCoper	DRrisk	ДПрибыль	SLA, %	Изменение F
0,5:0,3:0,2 (безопасность)	-34%	-9%	-18%	+6%	95,2	+21%
0,33:0,34:0,33 (сбаланс.)	-37%	-12%	-15%	+10%	93,8	+23%
0,2:0,3:0,5 (экономика)	-29%	-10%	-11%	+13%	91,6	+22%

С теоретической точки зрения полученные результаты подтверждают, что использование ML и GA позволяет преодолеть ограничения классических методов. Перебор и линейное программирование не масштабируются при росте числа параметров, а статистические прогнозы не отражают нелинейных зависимостей. Интеллектуальные методы, напротив, обеспечивают адаптивность, учитывают стохастический характер процессов и позволяют одновременно работать с противоречивыми критериями. С практической точки зрения внедрение предложенного прототипа

снижает задержки, затраты и риски, повышает прибыль и качество сервиса — то есть воздействует на все составляющие целевой функции [4; 13].

Для оценки вклада отдельных компонентов проведён абляционный анализ. Исключение ML и замена его простыми сглаживаниями ухудшают точность краткосрочных прогнозов интенсивностей/спроса; замена GA локальными эвристиками ведёт к застреванию в локальных минимумах; отказ от мультиагентной имитации лишает систему «краш-тестов» и снижает устойчивость к возмущениям. Совокупный эффект этих отключений представлен в табл. 3 и подтверждает интеграционную природу выигрыша [13].

Таблица 3.

Абляционный анализ компонентов методологии

Вариант	Изменение задержек	Логистические издержки	Прибыль	SLA, %	Интегральная F
Полная модель (ML+GA+MAS)	-37%	-12%	+10–11%	>90	+22–24%
- ML (простые сглаживания)	-24%	-7%	+6%	86–88	+14%
- GA (локальные эвристики)	-18%	-6%	+4%	84–86	+10%
- MAS (без стресс-тестов)	-31%	-10%	+8%	88–90	+18%

С точки зрения вычислительных затрат оптимизационные процедуры не становятся узким местом при грамотной организации вычислений. Обучение ML выполнялось офлайн раз в сутки с перекалибровкой гиперпараметров по расписанию; GA на оперативном уровне запускался на укороченном горизонте при каждом пересчёте прогнозов (раз в 5-10 минут) с ограничением по числу поколений и элитизмом; на стратегическом уровне пересчёт выполнялся по событиям или по таймеру. Параллелизация по перекрёсткам/кластерным зонам дефектов обеспечивает масштабируемость и соответствие требованиям near real-time.

Ключевые угрозы валидности – дрейф данных (смена парка, погодные аномалии), неполнота разметки дефектов и смещения спроса в праздничные периоды. Для снижения рисков задействованы мониторинг распределений признаков, сезонная перекалибровка порогов и переквалификация моделей по свежим данным с контрольно-валидационным контуром. Интерпретируемость усилена анализом важности признаков и сценарным тестированием, чтобы управленец понимал причины выбора комбинаций мероприятий [8].

Практический эффект быстрее достигается при поэтапном внедрении: старт с инфраструктурного уровня (компьютерное зрение и прогноз дефектов), затем добавление адаптивного управления светофорами, и завершение интеграцией стратегического планирования с учётом SLA и тарифов. Такой маршрут минимизирует риски, накапливает качественные данные и повышает прозрачность для операционных команд и регуляторов.

Таким образом, обсуждение результатов демонстрирует, что цифровизация транспортных систем на основе методов искусственного интеллекта должна рассматриваться не как набор отдельных решений, а как комплексная концепция, охватывающая все уровни транспортной иерархии. Именно интеграция прогнозирования, оптимизации и имитационного моделирования обеспечивает устойчивый системный эффект, который подтверждается численными результатами и согласуется с мировой тенденцией перехода к интеллектуальным транспортным системам.

Заключение

В ходе исследования показано, что транспортная система может быть рассмотрена как многоуровневая иерархия, включающая инфраструктурный, оперативный и стратегический уровни, эффективность которой целесообразно оценивать через интегральную целевую функцию, учитывающую задержки, затраты, риски, прибыль и качество сервиса [10]. Применение методов машинного обучения для прогнозирования параметров транспортных про-

цессов, таких как интенсивность потоков, динамика образования дефектов дорожного покрытия, спрос и тарифы в логистике, позволило учесть вероятное будущее состояние системы при принятии управленческих решений [11; 14]. Разработанные функции оптимизации для каждого уровня и их интеграция в единую модель показали, что использование генетических алгоритмов позволяет находить сбалансированные решения в условиях многокритериальности и ограничений, где традиционные методы оказываются недостаточно эффективными [6; 17].

Апробация прототипа концепции цифровизации транспортных систем продемонстрировала положительный эффект: сокращение времени обследования дорог, уменьшение задержек на перекрёстках и снижение совокупных логистических издержек сопровождались ростом прибыльности и улучшением уровня транспортного сервиса [1; 7]. Анализ чувствительности подтвердил, что за счёт настройки весовых коэффициентов модель может адаптироваться под различные управленческие приоритеты – от повышения безопасности и надёжности до увеличения экономической результативности [5]. Полученные результаты подтверждают перспективность комплексного применения методов искусственного интеллекта в транспортной отрасли и необходимость перехода от локальных «точечных» решений к системной цифровой трансформации, обеспечивающей устойчивое и эффективное функционирование транспортных систем в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. Министерство внутренних дел Российской Федерации [МВД России]. *Аналитические обзоры состояния безопасности дорожного движения*. Получено с <https://нцбдд.мвд.рф/ресурсы/аналитические-обзоры-состояния-безопасно> (дата обращения: 20.07.2025).
2. Росстандарт. (2017). *ГОСТ Р 50597-2017. Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию*. Москва: Стандартинформ. 21 с.

3. Министерство регионального развития Российской Федерации [Минрегион России]. (2012). *СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*. Москва. 89 с.
4. Akopov, A. S. (2025). MBHGA: A matrix-based hybrid genetic algorithm for solving an agent-based model of controlled trade interactions. *IEEE Access*, 13, 26843–26863. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3539460>. EDN: <https://elibrary.ru/NPLKCJ>
5. Borzenkov, A. M., Ostroukh, A. V., Pronin, C. B., Podberezkin, A. A., & Kuftinova, N. G. (2024). Multi-criteria analysis of genetic algorithm applications in transportation logistics. В *2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (с. 1–4). Moscow. <https://doi.org/10.1109/TIRVED63561.2024.10769798>
6. Ceylan, H., & Bell, M. G. H. (2018). Traffic signal timing optimization based on genetic algorithm approach, including driver's route choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 114, 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.05.009>
7. World Health Organization [WHO]. (2023). *Global status report on road safety 2023*. Geneva. 232 p. Получено с <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684> (дата обращения: 05.07.2025).
8. Hauer, E. (2004). The harm done by tests of significance. *Accident Analysis & Prevention*, 36(3), 495–500. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(03\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00036-8). Получено с <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457503000368> (дата обращения: 05.08.2025).
9. Kiselev, S. A., Podberezkin, A. A., Borzenkov, A. M., Ostroukh, A. V., & Pronin, C. B. (2025). Dynamic pricing in air cargo: Machine learning and genetic algorithm-based optimization. В *2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF)* (с. 1–5). St. Petersburg, Russian Federation. <https://doi.org/10.1109/WECNF65186.2025.11017136>
10. Mansurova, M. et al. (2024). Multi-level intelligent control system for inter-vehicle communication between smart traffic lights with computer vision and autonomous electric vehicles. В *2024 International Sympo-*

- sium on Sensing and Instrumentation in 5G and IoT Era (ISSI)* (с. 1–6). Lagoa, Portugal. <https://doi.org/10.1109/ISSI63632.2024.10720507>
11. Ostroukh, A., Kuftinova, N., Borzenkov, A., Podberezkin, A., & Ostroukh, I. (2024). Research on using deep learning for transport demand prediction. В *2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (с. 1–5). Moscow. <https://doi.org/10.1109/TIRVED63561.2024.10769599>
 12. Puscar, F. M. (2017). *Safety diagnosis of vehicle-bicycle interactions using computer vision systems: A case study in Vancouver, B.C.* (Магистерская диссертация). University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. <https://doi.org/10.14288/1.0343989>. Получено с <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0343989> (дата обращения: 06.08.2025).
 13. Radeev, N., & Vinogradova, K. (2025). Semi-automated framework for feature engineering in machine learning and data analysis. В *2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* (с. 1520–1525). Altai, Russian Federation. <https://doi.org/10.1109/EDM6517.2025.11096892>
 14. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. В *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (с. 779–788). Las Vegas, NV, USA. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
 15. St-Aubin, P., Saunier, N., & Miranda-Moreno, L. (2017). *Large-scale automated proactive road safety analysis using video data*. University of British Columbia. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.007>. Получено с https://www.researchgate.net/publication/275412773_Large-scale_automated_proactive_road_safety_analysis_using_video_data (дата обращения: 06.08.2025).
 16. Yan, S., Fu, Y., Zhang, W., Yang, W., Yu, R., & Zhang, F. (2023). Multi-target instance segmentation and tracking using YOLOv8 and BoT-SORT for video SAR. В *2023 5th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)* (с. 506–510). Wuhan, China. <https://doi.org/10.1109/EEI59236.2023.10212903>

17. Zhang, Z., Zhu, H., Zhang, W., Cai, Z., Zhu, L., & Li, Z. (2023). Multi-objective optimization of traffic signal timing at typical junctions based on genetic algorithms. *Computer Systems Science and Engineering*, 47, 1901–1917. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.039395>. EDN: <https://elibrary.ru/FPUNQR>

References

1. Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation [MVD Rossii]. (n.d.). *Analytical reviews of road safety status*. Retrieved from [https://нцбдд.мвд.рф/ресурсы/аналитические обзоры состояния безопасно](https://нцбдд.мвд.рф/ресурсы/аналитические_обзоры_состояния_безопасно) (accessed: 20.07.2025).
2. Rosstandart. (2017). *GOST R 50597-2017. Roads and streets. Requirements for operational condition*. Moscow: Standartinform. 21 pp.
3. Ministry of Regional Development of the Russian Federation [Minregion Rossii]. (2012). *SP 78.13330.2012. Roads. Updated version of SNiP 2.05.02-85*. Moscow. 89 pp.
4. Akopov, A. S. (2025). MBHGA: A matrix-based hybrid genetic algorithm for solving an agent-based model of controlled trade interactions. *IEEE Access*, 13, 26843–26863. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3539460>. EDN: <https://elibrary.ru/NPLKCJ>
5. Borzenkov, A. M., Ostroukh, A. V., Pronin, C. B., Podberezkin, A. A., & Kuftinova, N. G. (2024). Multi-criteria analysis of genetic algorithm applications in transportation logistics. In *2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (pp. 1–4). Moscow. <https://doi.org/10.1109/TIRVED63561.2024.10769798>
6. Ceylan, H., & Bell, M. G. H. (2018). Traffic signal timing optimization based on genetic algorithm approach, including driver's route choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 114, 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.05.009>
7. World Health Organization [WHO]. (2023). *Global status report on road safety 2023*. Geneva. 232 p. Retrieved from <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684> (accessed: 05.07.2025).

8. Hauer, E. (2004). The harm done by tests of significance. *Accident Analysis & Prevention*, 36(3), 495–500. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(03\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00036-8). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457503000368> (accessed: 05.08.2025).
9. Kiselev, S. A., Podberezkin, A. A., Borzenkov, A. M., Ostroukh, A. V., & Pronin, C. B. (2025). Dynamic pricing in air cargo: Machine learning and genetic algorithm-based optimization. B *2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)* (с. 1–5). St. Petersburg, Russian Federation. <https://doi.org/10.1109/WECONF65186.2025.11017136>
10. Mansurova, M. et al. (2024). Multi-level intelligent control system for inter-vehicle communication between smart traffic lights with computer vision and autonomous electric vehicles. B *2024 International Symposium on Sensing and Instrumentation in 5G and IoT Era (ISSI)* (с. 1–6). Lagoa, Portugal. <https://doi.org/10.1109/ISSI63632.2024.10720507>
11. Ostroukh, A., Kuftinova, N., Borzenkov, A., Podberezkin, A., & Ostroukh, I. (2024). Research on using deep learning for transport demand prediction. B *2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (с. 1–5). Moscow. <https://doi.org/10.1109/TIRVED63561.2024.10769599>
12. Puscar, F. M. (2017). *Safety diagnosis of vehicle-bicycle interactions using computer vision systems: A case study in Vancouver, B.C.* (Магистерская диссертация). University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. <https://doi.org/10.14288/1.0343989>. Retrieved from <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0343989> (accessed: 06.08.2025).
13. Radeev, N., & Vinogradova, K. (2025). Semi-automated framework for feature engineering in machine learning and data analysis. B *2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* (с. 1520–1525). Altai, Russian Federation. <https://doi.org/10.1109/EDM65517.2025.11096892>
14. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. B *2016 IEEE Confer-*

- ence on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (с. 779–788). Las Vegas, NV, USA. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
15. St-Aubin, P., Saunier, N., & Miranda-Moreno, L. (2017). *Large-scale automated proactive road safety analysis using video data*. University of British Columbia. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.007>. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/275412773_Large-scale_automated_proactive_road_safety_analysis_using_video_data (accessed: 06.08.2025).
16. Yan, S., Fu, Y., Zhang, W., Yang, W., Yu, R., & Zhang, F. (2023). Multi-target instance segmentation and tracking using YOLOv8 and BoT-SORT for video SAR. В *2023 5th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)* (с. 506–510). Wuhan, China. <https://doi.org/10.1109/EEI59236.2023.10212903>
17. Zhang, Z., Zhu, H., Zhang, W., Cai, Z., Zhu, L., & Li, Z. (2023). Multi-objective optimization of traffic signal timing at typical junctions based on genetic algorithms. *Computer Systems Science and Engineering*, 47, 1901–1917. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.039395>. EDN: <https://elibrary.ru/FPUNQR>

ДАнные об авторах

Подберёзкин Александр Александрович, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»
Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация
a.podberezkin@gmail.com

Остроух Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления»
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»

Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация
ostroukh@mail.ru

Борзенков Александр Михайлович, студент, магистрант кафедры «Автоматизированные системы управления»
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»
Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация
borzenkov03h@mail.ru

Шмонин Артём Михайлович, студент кафедры «Автоматизированные системы управления»
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»
Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация
shmoninam@mail.ru

Пронин Цезарь Борисович, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы управления»
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»
Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация
caesarpr12@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr A. Podberezkin, Senior Lecturer of the Department of Automated Control Systems
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

*64, Leningradsky pr., Moscow, 125319, Russian Federation
a.podberezkin@gmail.com*

Andrey V. Ostroukh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
64, Leningradsky pr., Moscow, 125319, Russian Federation
ostroukh@mail.ru*

Aleksandr M. Borzenkov, Student of the Department of Automated Control Systems
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
64, Leningradsky pr., Moscow, 125319, Russian Federation
borzenkov03h@mail.ru*

Artyom M. Shmonin, Student of the Department of Automated Control Systems
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
64, Leningradsky pr., Moscow, 125319, Russian Federation
shmoninam@mail.ru*

Cezar B. Pronin, Senior Lecturer of the Department of Automated Control Systems
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
64, Leningradsky pr., Moscow, 125319, Russian Federation
caesarpr12@gmail.com*

Поступила 20.09.2025
После рецензирования 15.10.2025
Принята 19.10.2025

Received 20.09.2025
Revised 15.10.2025
Accepted 19.10.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-392

EDN: LEDGDI



УДК 656.2

Научная статья | Логистические транспортные системы

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Г.И. Никифорова

Аннотация

Обоснование. Статья представляет собой исследование качества транспортно-логистического обслуживания в современных условиях. Проводится анализ транспортной отрасли Российской Федерации с оценкой конкурентных преимуществ по основным четырем группам: производительных факторов, смежных и обеспечивающих отраслей, параметров внутреннего спроса, структуры и стратегии компаний отрасли и внутриотраслевой конкуренции. С использованием официальных статистических данных описаны и систематизированы признаки стадий экономического роста для транспортной сферы, проанализировано современное положение по этим признакам, отмечены катализаторы перехода из одной стадии в другую. Представлено описание реализации проектов международных транспортных коридоров с участием России, как признака перехода к стадии нововведений. Анализируются конкурентные преимущества отечественной транспортной отрасли, характерные для второй и третьей стадий экономического роста, оцениваются ресурсы, технологический потенциал и качество транспортно-логистической услуги для железнодорожного транспорта. Выводится комплексный показатель качества транспортно-логистического обслуживания, условия для его расчета. Определяются весовые коэффициенты для реализации качества ресурсов, технологии и конечной транспортно-логистической услуги.

Цель – повышение конкурентных преимуществ с использованием комплексного показателя качества транспортно-логистического обслуживания.

Материалы и методы. В статье использовались анализ существующего положения в сфере транспортно-логистического обслуживания, формулировка признаков перехода к стадии нововведений, вывод формулы комплексного показателя качества транспортно-логистического обслуживания.

Результаты. Определено положение транспортной сферы как переходной от конкуренции на основе инвестиций к конкуренции на основе нововведений. Обосновано, что качество транспортно-логистического обслуживания должно базироваться на трех составляющих – качестве ресурсов, качестве технологий и качестве конечной транспортно-логистической услуги. Реализация конкурентных преимуществ транспортно-логистического обслуживания может достигаться путем увеличения значения комплексного показателя качества при соблюдении ряда условий.

Область применения результатов. Полученные результаты целесообразно применять в системе железнодорожных перевозок, в работе операторских и транспортно-логистических компаний.

Ключевые слова: качество транспортно-логистического обслуживания; конкурентные преимущества; железнодорожный транспорт; стадия нововведений

Для цитирования. Никифорова, Г. И. (2025). Анализ качества транспортно-логистического обслуживания в современных условиях. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 167–181. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-392>

Original article | Logistic Transport Systems

ANALYSIS OF THE QUALITY OF TRANSPORT AND LOGISTICS SERVICES IN MODERN CONDITIONS

G.Is. Nikiforova

Abstract

Background. The article is a study of the quality of transport and logistics services in modern conditions. It analyzes the transport industry of the

Russian Federation and assesses its competitive advantages in four main areas: productive factors, related and supporting industries, domestic demand parameters, and the structure and strategies of industry companies and intra-industry competition. Using official statistical data, the article describes and systematizes the characteristics of the stages of economic growth in the transport sector, analyzes the current situation in these areas, and identifies the catalysts for transition from one stage to another. The article also provides a description of the implementation of international transport corridor projects involving Russia as a sign of transition to the innovation stage. The purpose is to apply the product life cycle period to the railway transport service during freight transportation with the subsequent search for opportunities to improve the quality of services provided. The competitive advantages of the domestic transport industry, which are typical for the second and third stages of economic growth, are analyzed, and the resources, technological potential, and quality of transport and logistics services for rail transport are evaluated. A comprehensive indicator of the quality of transport and logistics services is derived, and the conditions for its calculation are determined. Weight coefficients are determined for the implementation of the quality of resources, technology, and the final transport and logistics service.

Purpose. Increasing competitive advantages using a comprehensive indicator of the quality of transport and logistics services.

Materials and methods. The article used an analysis of the current state of transport and logistics services, formulated the signs of transition to the innovation stage, and derived a formula for a comprehensive indicator of the quality of transport and logistics services.

Results. The position of the transport sector is defined as a transition from investment-based competition to innovation-based competition. It is substantiated that the quality of transport and logistics services should be based on three components: the quality of resources, the quality of technologies, and the quality of the final transport and logistics service. The implementation of competitive advantages in transport and logistics services can be achieved by increasing the value of the comprehensive quality indicator, subject to certain conditions.

Practical implications. The obtained results can be applied in the railway transportation system, as well as in the work of operator and transport and logistics companies.

Keywords: quality of transport and logistics services; competitive advantages; rail transport; stage of innovation

For citation. Nikiforova, G. Is. (2025). Analysis of the quality of transport and logistics services in modern conditions. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 167–181. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-392>

В последнее время уделяется большое внимание технологическому суверенитету Российской Федерации. Это обусловлено геополитической волатильностью в мире, когда на первое место выходят проблемы транспортного и логистического обслуживания страны и регионов, адаптации цепочек поставок для сохранения экономических и торговых связей между государствами [1-5]. Суверенитет представляется как некоторая независимость государства от поставок критически важных технологий из-за рубежа. Следует отметить, что глобализация современных мировых процессов и развитие технологического суверенитета – это процессы противоположной направленности, и необдуманное копирование некоторых элементов, свойственных процессу глобализации, может отрицательно влиять на технологический рост государства. Так, например, термин «устойчивое развитие» – по сути означает не развитие, а контроль за развитием и стагнацию, если провести анализ этого понятия. С другой стороны, глобализация транспортных процессов выражается на практике в продвижении грузопотоков по международным транспортным коридорам [6-8], однако естественное развитие этих процессов в текущих условиях искусственно замедляется [9; 10].

В связи с этим целесообразно проанализировать текущее состояние экономики и транспортной отрасли РФ в соответствии с теорией международной конкуренции [11]. Экономический рост

государства характеризуется четырьмя стадиями развития конкурентоспособности национальной экономики (рис. 1).

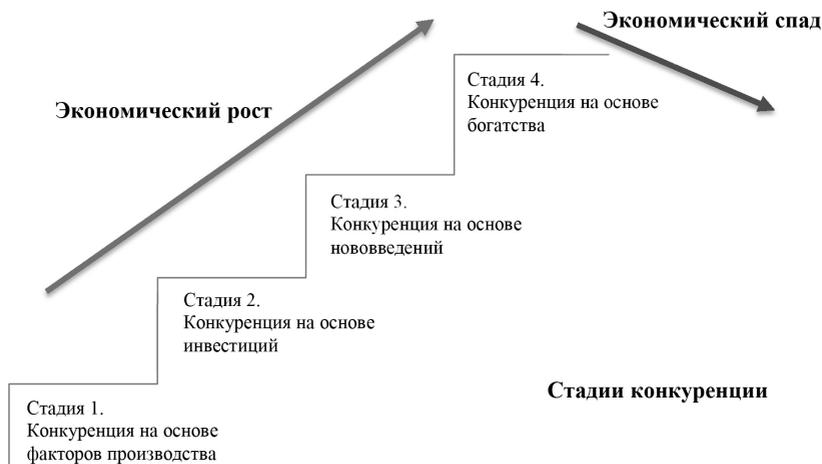


Рис. 1. Стадии конкуренции. Составлено автором на основе [11].

Конкуренция на основе факторов производства характеризуется богатством природных ресурсов, избыточной и дешевой рабочей силой, низким уровнем технологий и научного потенциала, крайне высокой чувствительностью к курсу валют и мировым экономическим кризисам, неразвитой инфраструктурой, малым внутренним спросом, внутренней конкуренцией только за счет снижения цены. Обеспечение промышленности производится или из-за рубежа, или строятся иностранные производства внутри страны. Вторая стадия характеризуется так называемым агрессивным инвестированием со стороны национальных компаний. Вкладываются средства в современное оборудование и технологии, покупаются лицензии, растет количество технически ориентированного персонала, квалификация трудовых ресурсов, уровень образованности. Растущий внутренний спрос становится ресурсом конкурентоспособности. Появляется интенсивная внутренняя конкуренция. Конкуренция на основе нововведений ха-

рактируется развитием и ростом всех факторов конкурентного «ромба» М. Портера. Создаются новые производственные факторы, усложняется структура внутреннего спроса, происходит ориентация потребителя на качество. Внутренний спрос перерастает в международный. Это приводит к активному развитию смежных и поддерживающих отраслей.

Динамичный рост экономики государств расширяет количество конкурентоспособных отраслей. Конкуренция на основе богатства является той стадией, после которой начинается экономический спад. Это в общем смысле происходит в силу того, что отсутствуют стимулы для развития и расширения национальных компаний, они стараются сохранять статус кво. Инвестиции предыдущих этапов позволяют сохранять преимущества в конкуренции. Снижается мотивация персонала на всех уровнях работы и управления. Происходит потеря конкурентных преимуществ национальных компаний высокого порядка, что ведет к падению производства, повышается уровень безработицы, падение уровня личного дохода. Усиливается разница между богатыми и бедными слоями населения.

Целесообразно проанализировать состояние отечественной транспортной сферы в соответствии с теорией конкурентных преимуществ [12]. Исследование четырех основных детерминант конкурентных преимуществ в настоящее время позволит выделить признаки той или иной стадии экономического роста и выявить направления дальнейшего развития применительно к транспортной сфере. Для анализа широко используются данные Росстата [13], обзоры логистического рынка [14; 15], а также данные по объему производства, грузооборота, и по уровню образования, квалификации и занятости населения (рис. 2). Наиболее широко представлены производительные факторы, т.к. к этой категории относятся природный и географический ресурс, трудовые и научные кадры, развитость инфраструктуры и проч. На схеме рис. 2 представлены признаки стадий экономического роста примени-

тельно к транспортной отрасли РФ. Природно-географический фактор выгодного расположения РФ на карте мира с потенциалом к транспортно-логистическому обслуживанию как внутренних, так и транзитных, грузопотоков остается неизменным и характерен для всех 4-х стадий. Объем и структура инвестиций характерны для второй стадии. Также к признакам второй стадии относится совершенствование логистических цепочек от производства до потребления. Вложение ресурсов в развитие науки технологий можно отнести и ко 2-й и к 3-й стадиям. Формирование благоприятной среды для внедрения инноваций, акцент на технологический суверенитет также можно отнести к 3 стадии.

Структура и стратегии предпринимательства, внутриотраслевая конкуренция		●	●	
Условия внутреннего спроса		●	●	
Смежные и обеспечивающие отрасли		●		
Производительные факторы	●	● ● ●	● ●	●
	Стадия 1.	Стадия 2.	Стадия 3.	Стадия 4.

Рис. 2. Признаки стадий экономического роста по основным конкурентным факторам

Таким образом, можно говорить о том, что транспортная отрасль имеет признаки второй стадии с переходом к третьей стадии. Стоит также отметить, что среди постоянно действующих факторов конкурентных преимуществ появляются факторы «случая» и «государства». В текущий условиях катализатором перехода к третьей стадии могут стать пандемия, специальная военная операция, санкционные ограничения, относящиеся к «случаю» с одной стороны, и – создание, развитие и расширение БРИКС и ШОС, относящиеся к фактору «государство», с другой. Тогда

после стадии активного инвестирования переход к стадии нововведений должен быть поддержан развитием науки, технологий, образования в первую очередь, и повышением качества производственных процессов на этой основе во вторую очередь. Применительно к транспортной отрасли можно говорить о качестве транспортно-логистического обслуживания.

Активным этапом повышения качества транспортного обслуживания стало создание в начале 90-х годов прошлого века Системы фирменного транспортного обслуживания на железнодорожном транспорте. Тогда же появляется внутриотраслевая конкуренция как результат перехода от плановой к рыночной экономике. На железнодорожном транспорте появляются компании-операторы владельцы вагонного парка. Развитие операторского бизнеса привело в настоящее время к монополистической конкуренции в этой среде [8], когда на рынке действуют 10-20 крупнейших игроков. Операторские компании конкурируют на рынке, стараясь повысить качество транспортно-логистических услуг для привлечения грузовладельцев. Холдинг ОАО «РЖД» является основным перевозчиком и владельцем инфраструктуры, от организации работы, уровня применяемых технологий, квалификации работников зависит перевозочный процесс, объемы работы. В свою очередь конкурентами ОАО «РЖД» является автомобильный, внутренний водный и морской виды транспорта. На третьей стадии экономического роста конкуренция в сфере транспортно-логистического обслуживания переходит на мировой уровень, и здесь можно говорить о транспортных коридорах «Север-Юг», «Запад-Восток» с включением уже имеющейся железнодорожной инфраструктуры с пониманием необходимости ее развития. Развитие Северного морского пути помимо наращивания ледокольного флота должно предусматривать необходимые портовые мощности и развитую сеть сухопутных путей сообщения, в особенности железнодорожных.

Формальный подход к транспортной услуге упрощает ее сущность и может привести к неправильным решениям в сфере управления и организации работы предприятий. Принадлежность подвижно-

го состава частным компаниям вызывает необходимость применения новых методов и технологий регулирования вагонного парка для нивелирования профицита и дефицита, скопления «брошенных» поездов. При этом необходим достаточный ресурс инфраструктуры, вагонов, локомотивов, складов и терминалов, обслуживающих железнодорожный транспорт, квалифицированных рабочих кадров и управляющего персонала. Только на основе достаточного ресурса можно внедрять инновационные технологии, применять новейшее оборудование, передовые методы организации производственных процессов. А уже результатом применения ресурсов и технологий может стать повышение качества транспортно-логистической услуги.

Опираясь на вышесказанное, можно представить оценку качества транспортно-логистической услуги по некоторому показателю, который будет включать в себя составляющие ресурсов, технологий и непосредственно саму услугу. Средневзвешенный комплексный показатель качества транспортно-логистического обслуживания будет определяться выражением:

$$\bar{K} = m_p K_p + m_T K_T + m_y K_y, \quad (1)$$

где K_p – относительный уровень качества ресурсов;

K_T – относительный уровень качества технологий;

K_y – относительный уровень качества услуги;

m_p – весовой коэффициент качества ресурсов;

m_T – весовой коэффициент качества технологий;

m_y – весовой коэффициент качества услуги.

Как уже было сказано, реализация ресурсной базы является основой для внедрения технологий, а это, в свою очередь, определяет качество конечной услуги. В связи с этим, оценка весовых коэффициентов должна удовлетворять некоторым условиям. Весовой коэффициент качества ресурсов должен быть больше весового коэффициента качества технологий:

$$m_p > m_T \quad (2)$$

Так как без реализации качества технологий невозможна реализация качества конечной услуги, должно выполняться неравенство:

$$m_T \geq m_Y \quad (3)$$

Таким образом, действует условие:

$$m_P > m_T \geq m_Y \quad (4)$$

Весовые коэффициенты в сумме составляют единицу, поэтому:

$$m_P + m_T + m_Y = 1 \quad (5)$$

Изменение весовых коэффициентов в рамках наложенных ограничений может быть оценено экспертным методом. В практической деятельности транспортно-логистического предприятия оценка весовых коэффициентов может быть проведена менеджментом на основе анализа деятельности предприятия.

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что реализация конкурентных преимуществ будет тем выше, чем большее значение примет комплексный показатель качества транспортно-логистического обслуживания. Тогда можно сформулировать следующее выражение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{K} = m_P K_P + m_T K_T + m_Y K_Y \rightarrow \max, \\ m_P + m_T + m_Y = 1, \\ m_P > m_T \geq m_Y \end{array} \right. , \quad (6)$$

По результатам настоящего исследования сформулированы следующие **выводы**:

- анализ состояния транспортной отрасли, смежных и обеспечивающих производств, внутриотраслевой конкуренции и основных производственных факторов показала, что РФ сейчас находится на второй стадии экономического роста с переходом на третью согласно теории конкурентных преимуществ;

- катализаторами перехода к третьей стадии выступают факторы «случая» и «государства», которые в настоящий момент активны и действуют;

- качество транспортно-логистического обслуживания должно базироваться на трех составляющих – качестве ресурсов, качестве технологий и качестве конечной услуги;

- в работе выведено выражение и условия для реализации конкурентных преимуществ транспортно-логистического обслуживания с помощью комплексного показателя качества.

Список литературы

1. Покровская, О. Д., & Шугаев, О. В. (2024). Логистика и эффективность тяжеловесного движения. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(3), 174–187. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-3-320>. EDN: <https://elibrary.ru/URXJJC>
2. Покровская, О. Д., & Шугаев, О. В. (2024). Опыт и перспективы развития тяжеловесного движения. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(4), 185–198. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-327>. EDN: <https://elibrary.ru/QBOQXL>
3. Покровская, О. Д. (2024). Транспортная сила и индекс потенциала развития тяжеловесного движения как новые индикаторы использования тягового бизнес-ресурса. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(4), 199–211. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-328>. EDN: <https://elibrary.ru/RFRMLO>
4. Марченко, М. А., & Никифорова, Г. И. (2025). Проблематика развития транспортной логистики Российской Федерации в условиях западных санкций. В *Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности: материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов* (20–21 февраля, с. 157–160). Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К». EDN: <https://elibrary.ru/IVVLFK>
5. Pokrovskaya, O. D., Nikiforova, G. I., Nikiforov, V. V., & Pankrateva, G. I. (2024). Modern approach in railcar fleet management. *E3S Web of Conferences*, 549, 04011. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202454904011>. EDN: <https://elibrary.ru/PLKFTC>
6. Толкачева, Е. В., Воронов, А. А., & Лукашук, П. И. (2025). Перспективы развития Международного транспортного коридора

- «Север-Юг» в условиях современных геополитических вызовов. *Экономика устойчивого развития*, 2(62), 295–297. EDN: <https://elibrary.ru/TQQAOG>
7. Толкачева, Е. В., Лукашук, П. И., & Воронов, А. А. (2025). Роль международного транспортного коридора «Север-Юг» в развитии международной торговли Евразийского региона. *Экономика устойчивого развития*, 1(61), 303–305. EDN: <https://elibrary.ru/TYYUIV>
 8. Покровская, О. Д. (2013). Концепция транспортно-логистической интеграции региона в систему МТК. *Наука и мир*, 4(4), 87–90. EDN: <https://elibrary.ru/RYZNTL>
 9. Ivanyuk, V., Tsvirkun, A., Petrosov, D., et al. (2024). Econometric model of the indicator for identifying crisis situations. В *Proceedings of 2024 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD)* (24–26 сентября). Danvers, Massachusetts, USA: IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/MLSD61779.2024.10739537>. EDN: <https://elibrary.ru/КМIFMX>
 10. Кузнецов, А. Л., Радченко, И. А., Кириченко, А. В., & Ситов, А. Н. (2025). Возможные направления развития национальной морской контейнерной транспортно-логистической системы. *Транспортное дело России*, 3, 148–150. EDN: <https://elibrary.ru/YNLBZY>
 11. Портер, М. Э. (2010). *Конкуренция* (Обновлённое и расширенное изд.). Москва [и др.]: Вильямс. 591 с. ISBN: 978-5-8459-1584-9. EDN: <https://elibrary.ru/QUGLTR>
 12. Куренков, П. В., & Соловьева, Л. В. (2014). Эффективное взаимодействие компаний-операторов и ОАО «РЖД» как основа конкурентоспособности транспортно-логистической системы России: модельный подход. *Проблемы безопасности российского общества*, 3–4, 75–94. EDN: <https://elibrary.ru/TBXSZY>
 13. Федеральная служба государственной статистики [Росстат]. *Официальный сайт*. Получено с <http://ssl.rosstat.gov.ru> (дата обращения: 07.08.2025)
 14. Сергеева, Т. Г., & Никифорова, Г. И. (2020). Повышение конку-

рентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, 17(3), 428–436. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2020-3-428-436>. EDN: <https://elibrary.ru/HADKPK>

15. Покровская, О. Д. (2023). Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций. *Бюллетень результатов научных исследований*, 3, 58–72. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-3-58-72>. EDN: <https://elibrary.ru/QTHKZC>

References

1. Pokrovskaya, O. D., & Shugaev, O. V. (2024a). Logistics and efficiency of heavy traffic. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(3), 174–187. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-3-320>. EDN: <https://elibrary.ru/URXJJC>
2. Pokrovskaya, O. D., & Shugaev, O. V. (2024b). Experience and prospects for the development of heavy traffic. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(4), 185–198. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-327>. EDN: <https://elibrary.ru/QBOQXL>
3. Pokrovskaya, O. D. (2024). Transport power and the index of heavy traffic development potential as new indicators of traction business resource utilization. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(4), 199–211. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-328>. EDN: <https://elibrary.ru/RFRML0>
4. Marchenko, M. A., & Nikiforova, G. I. (2025). Issues of developing transport logistics in the Russian Federation under Western sanctions. In *Modern Challenges of the Transport Industry: New Opportunities: Proceedings of the Interuniversity Scientific and Practical Conference of Transport Universities* (February 20–21, pp. 157–160). Moscow: Publishing and Trading Corporation “Dashkov & K”. EDN: <https://elibrary.ru/IVVLFK>
5. Pokrovskaya, O. D., Nikiforova, G. I., Nikiforov, V. V., & Pankrateva, G. I. (2024). Modern approach in railcar fleet management.

- E3S Web of Conferences*, 549, 04011. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202454904011>. EDN: <https://elibrary.ru/PLKFTC>
6. Tolkacheva, E. V., Voronov, A. A., & Lukashchuk, P. I. (2025). Prospects for the development of the North-South International Transport Corridor under current geopolitical challenges. *Economics of Sustainable Development*, 2(62), 295–297. EDN: <https://elibrary.ru/TQQAOG>
 7. Tolkacheva, E. V., Lukashchuk, P. I., & Voronov, A. A. (2025). The role of the North-South International Transport Corridor in developing international trade in the Eurasian region. *Economics of Sustainable Development*, 1(61), 303–305. EDN: <https://elibrary.ru/TYYUIV>
 8. Pokrovskaya, O. D. (2013). Concept of transport and logistics integration of a region into the ITC system. *Science and World*, 4(4), 87–90. EDN: <https://elibrary.ru/RYZNTL>
 9. Ivanyuk, V., Tsvirkun, A., Petrosov, D., et al. (2024). Econometric model of the indicator for identifying crisis situations. In *Proceedings of the 2024 17th International Conference on Management of Large Scale System Development (MLSD)* (September 24–26). Danvers, Massachusetts, USA: IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/MLSD61779.2024.10739537>. EDN: <https://elibrary.ru/KMIFMX>
 10. Kuznetsov, A. L., Radchenko, I. A., Kirichenko, A. V., & Sitov, A. N. (2025). Possible directions for developing the national maritime container transport and logistics system. *Transport Business of Russia*, 3, 148–150. EDN: <https://elibrary.ru/YNLBZY>
 11. Porter, M. E. (2010). *Competition* (Updated and expanded ed.). Moscow [et al.]: Williams. 591 pp. ISBN: 978-5-8459-1584-9. EDN: <https://elibrary.ru/QUGLTR>
 12. Kurenkov, P. V., & Solovyeva, L. V. (2014). Effective interaction between operator companies and Russian Railways as the basis for competitiveness of Russia's transport and logistics system: A model approach. *Problems of Security of Russian Society*, 3–4, 75–94. EDN: <https://elibrary.ru/TBXSJY>
 13. Federal State Statistics Service [Rosstat]. *Official website*. Retrieved from <http://ssl.rosstat.gov.ru> (accessed: 07.08.2025)

14. Sergeeva, T. G., & Nikiforova, G. I. (2020). Enhancing competitiveness of transport and logistics companies in the context of digitalization. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 17(3), 428–436. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2020-3-428-436>. EDN: <https://elibrary.ru/HADKPK>
15. Pokrovskaya, O. D. (2023). Development of Russia's logistics transport system under sanctions. *Bulletin of Research Results*, 3, 58–72. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-3-58-72>. EDN: <https://elibrary.ru/QTHKZC>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Никифорова Гузель Ислямовна, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», кандидат технических наук
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
пр. Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация
guzel.spb@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Guzel Is. Nikiforova, Associate Professor «Operational work management», PhD in Engineering
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
guzel.spb@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4908-3225>

Поступила 23.08.2025

После рецензирования 01.09.2025

Принята 11.09.2025

Received 23.08.2025

Revised 01.09.2025

Accepted 11.09.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-391

EDN: MQGVXY

УДК 656.025.2



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫДЕЛЕННЫХ ПОЛОС ДЛЯ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ НА УЧАСТКЕ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

И.Н. Котенкова, В.И. Рассоха, Д.А. Дрючин

Аннотация

Обоснование. В данной статье авторами приведены результаты обзора научных работ в области повышения эффективности использования городской улично-дорожной сети на основе реализации мероприятий по организации приоритетного движения городского пассажирского транспорта общего пользования. Отмечено отсутствие сформированной и структурированной научной и нормативно-правовой базы в области определения условий целесообразной организации выделенных полос для движения транспортных средств городского пассажирского транспорта общего пользования.

В качестве одного из возможных решений обозначенной проблемы предложен критерий оценки целесообразности организации выделенных полос, разработана методика расчёта данного критерия, определяемого с учётом перераспределения транспортных потоков между смежными участками городской улично-дорожной сети.

Цель – повышение эффективности использования городской улично-дорожной сети на основе обеспечения приоритетных условий движения городского пассажирского транспорта общего пользования.

Материалы и методы. В работе реализованы методы математического и статистического анализа, методы планирования натурального эксперимента, теория вероятности. Статья базируется на комплексе источников, включающих в себя: документацию нормативно-право-

вого характера и научные работы в области организации движения и организации городских пассажирских перевозок.

Результаты. В статье предложен критерий оценки целесообразности организации выделенной полосы на участке городской улично-дорожной сети, разработана методика расчёта значений предложенного показателя с учётом интенсивности движения транспортных средств, структуры транспортных потоков и особенностей организации дорожного движения. На основе предложенных расчётных формул разработана математическая модель, позволяющая выявить параметрическую область, характеризующую условия, определяющие целесообразность организации выделенной полосы для движения транспортных средств городского пассажирского транспорта общего пользования.

Область применения результатов: научно-исследовательская деятельность в области организации городских пассажирских перевозок и организации движения; решение прикладных задач, связанных с разработкой схем организации дорожного движения и организации работы городского пассажирского транспорта.

Ключевые слова: пассажирские перевозки; организация дорожного движения; выделенная полоса для общественного транспорта; моделирование транспортного процесса

Для цитирования. Котенкова, И. Н., Рассоха, В. И., & Дрючин, Д. А. (2025). Оценка целесообразности организации выделенных полос для городского пассажирского транспорта общего пользования на участке улично-дорожной сети. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 182–202. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-391>

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

ASSESSMENT OF THE EXPEDIENCY OF ORGANIZING DEDICATED LANES FOR PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORT ON A SECTION OF THE ROAD NETWORK

I.N. Kotenkova, V.I. Rassokha, D.A. Dryuchin

Abstract

Background. In this article, the authors present the results of a review of scientific work in the field of improving the efficiency of the urban road

network based on the implementation of measures to organize the priority movement of public urban passenger transport. The absence of a well-formed and structured scientific and regulatory framework in the field of determining the conditions for the expedient organization of dedicated lanes for public urban passenger transport was noted.

As one of the solutions to this problem, a criterion has been proposed for assessing the feasibility of organizing dedicated lanes, and a methodology has been developed for calculating this criterion, which is determined taking into account the redistribution of traffic flows between adjacent sections of the urban road network.

Purpose. Improving the efficiency of using the urban road network based on ensuring priority traffic conditions for public urban passenger transport.

Materials and methods. The paper implements methods of mathematical and statistical analysis, methods of planning a field experiment, and probability theory. Statistical analysis was used in this work. The article is based on a set of sources, including: documentation of a regulatory nature and scientific work in the field of traffic management and organization of urban passenger transportation.

Results. The article proposes a criterion for assessing the feasibility of organizing a dedicated lane on a section of the urban road network, and develops a methodology for calculating the values of the proposed indicator, taking into account the intensity of vehicle traffic, the structure of traffic flows, and the specifics of traffic management. Based on the proposed calculation formulas, a mathematical model has been developed that makes it possible to identify a parametric area characterizing the conditions determining the expediency of organizing a dedicated lane for public urban passenger transport.

Scope of application of the results: scientific and research activities in the field of urban passenger transportation and traffic management; solving applied problems related to the development of traffic management schemes and the organization of urban passenger transport.

Keywords: passenger transportation; traffic management; dedicated lane for public transport; modeling of the transport process

For citation. Kotenkova, I. N., Rassokha, V. I., & Dryuchin, D. A. (2025). Assessment of the expediency of organizing dedicated lanes for public urban passenger transport on a section of the road network. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 182–202. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-391>

Введение

В связи с ростом уровня автомобилизации для большинства крупных городов индустриально развитых стран с каждым годом все более актуальной становятся проблемы, обусловленные перегруженностью улично-дорожной сети (УДС). Следствиями обозначенной проблемы являются образование дорожных заторов, снижение скорости сообщения и рост потерь времени населения на перемещения.

Решением данной проблемы является увеличение доли населения, передвигающегося посредством городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП). Данная цель может быть достигнута за счёт повышения качества транспортного обслуживания населения по таким показателям, как экономическая доступность и скорость сообщения.

Одним из методов, обеспечивающих решение указанной задачи, является организация выделенных полос для движения транспортных средств (ТС) ГПТОП.

На практике решение о целесообразности организации выделенных полос для движения ГПТОП зачастую принимается без учета характеристик транспортного потока, пропускной способности проезжей части и особенностей организации дорожного движения. При таком подходе организация выделенных полос в ряде случаев является не только неэффективным, но и усугубляет имеющиеся проблемы. Следовательно, существует потребность в разработке критериев и методик обоснования целесообразности организации выделенных полос для движения ГПТОП, что определяет актуальность данного исследования.

В настоящее время отсутствует комплексная система нормативного и правового обеспечения вопроса целесообразности организации выделенных полос для движения ТС ГПТОП. Исходя из актуальности проблемы, решение обозначенных задач лежит в сфере деятельности ряда научных школ, результаты работы которых отражены в трудах отечественных и зарубежных учёных [1; 3; 8-12; 15; 16; 20; 21; 22].

Одной из фундаментальных работ в рассматриваемой области является научная работа С.И. Смирнова [17], в которой приведено решение задачи предварительной оценки изменения среднего времени проезда ТС участка УДС с учётом влияния выделенной полосы для ТС ГПТОП. В работе учтено влияние интенсивности и состава потока неприоритетных ТС, их динамических качеств, а также ряда других факторов.

Исследования М.Р. Якимова [18] направлены на разработку методики определения целесообразности выделения полосы для движения ГПТОП на участке УДС. В качестве критерия целесообразности реализации данного мероприятия предложено время превышения суммарных задержек участников движения при организации выделенной полосы для движения общественного транспорта относительно суммарных задержек для случая, когда общественный транспорт движется в общем потоке.

Схожие исследования проведены учёными А.Э. Горевым, А.М. Дацюком, О.В. Поповой и другими авторами [4; 5; 14]. В указанных трудах приведено обоснование критериев качества управления транспортными потоками, представлена методика организации приоритетного движения ГПТОП.

А.М. Белова в своих работах предложила классификацию критериев целесообразности выделения полос для движения ГПТОП [2]. Исходя из критерия минимизации потерь времени пассажиров ГПТОП, водителей и пассажиров личного транспорта в период наибольшей интенсивности движения автором предложена методика оценки целесообразности выделения полосы для движения ГПТОП.

В.В. Зырянов и А.А. Мирончук в своих работах [7] представили результаты исследования условий организации приоритетных полос прерывного действия и использование компонентов интеллектуальных транспортных систем для управления транспортными потоками.

В рамках развития рассматриваемой темы, в отличие от известных научных работ, в качестве критерия оценки целесообразности организации выделенной полосы предложено перейти к относительному (удельному) показателю эффективности, использовать величину изменения средней скорости перемещения пассажиров всех ТС в рамках рассматриваемого участка УДС (Δv_{CP}). Дополнительно учтено перераспределение транспортных потоков в часы пик с рассматриваемого участка УДС, имеющего выделенную полосу для движения ТС ОГПТ, на смежные участки той же направленности.

Оценка изменения средней скорости перемещения совокупности пассажиров рассматриваемого направления может быть выполнена, исходя из величины $\Delta v_{CP,П}$:

$$\Delta v_{CP,П} = v_{CP,+П} - v_{CP,-П}, \quad (1)$$

где $v_{CP,+П}$ – средняя скорость передвижения пассажиров при схеме организации движения с выделенной полосой для движения ГПТОП, км/ч; $v_{CP,-П}$ – средняя скорость передвижения пассажиров при схеме организации движения без выделенной полосой для движения ГПТОП, км/ч.

Организация выделенной полосы целесообразна при $\Delta v_{CP} > 0$. Значения средних скоростей передвижения пассажиров определяются, исходя из скорости движения и средней наполняемости салона ТС различных категорий, передвигающихся в рамках рассматриваемого участка УДС по совокупности однонаправленных городских улиц. Вычисление данного показателя при организации выделенной полосы для движения ТС ГПТОП производится по формуле:

$$v_{CP,+П} = \frac{\sum_{i=1}^k (\bar{v}_i \cdot n_i \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i + \bar{v}_C \cdot n_{iC} \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) + \sum_{j=1}^m (\bar{v}_j \cdot n_{jП} \cdot \Pi_{jП} \cdot \gamma_{jП})}{\sum_{i=1}^k (n_i \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i + n_{iC} \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) + \sum_{j=1}^m (n_{jП} \cdot \Pi_{jП} \cdot \gamma_{jП})}, \quad (2)$$

где \bar{v} – средняя скорость движения ТС на рассматриваемом участке УДС вне выделенной полосы, км/ч; n_i – интенсивность движения ТС i -ой категории на рассматриваемом участке УДС вне выделенной полосы, ед./ч; P_i – пассажировместимость ТС i -ой категории, пасс.; γ_i – коэффициент использования пассажировместимости i -ой категории ТС, двигающихся вне выделенной полосы; \bar{v}_c – средняя скорость движения ТС на смежном участке УДС, не имеющем выделенной полосы ГПТОП при организации выделенной полосы на рассматриваемом участке, км/ч; n_{iC} – интенсивность движения ТС i -ой категории на смежном участке УДС при организации выделенной полосы на рассматриваемом участке, ед./ч; \bar{v}_{jII} – средняя скорость сообщения при движении ТС ГПТОП по выделенной полосе, км/ч; n_{jII} – интенсивность движения ТС j -ой категории, двигающихся по выделенной полосе, ед./ч; P_{jII} – пассажировместимость ТС j -ой категории, двигающихся по выделенной полосе, пасс.; γ_{jII} – коэффициент использования пассажировместимости j -ой категории ТС, двигающихся по выделенной полосе; k – количество категорий ТС, движущихся вне выделенной полосы; m – количество категорий ТС, движущихся по выделенной полосе.

Средняя скорость передвижения пассажиров при отсутствии выделенной полосы на рассматриваемом участке УДС определяется по аналогичной формуле:

$$v_{CP-II} = \frac{\bar{v} \cdot \left(\sum_{i=1}^k n_i \cdot P_i \cdot \gamma_i + \sum_{j=1}^m n_{jII} \cdot P_{jII} \cdot \gamma_{jII} \right) + \bar{v}_c \cdot \sum_{i=1}^k (n_{iC} \cdot P_i \cdot \gamma_i)}{\sum_{i=1}^k (n_i \cdot P_i \cdot \gamma_i + n_{iC} \cdot P_i \cdot \gamma_i) + \sum_{j=1}^m (n_{jII} \cdot P_{jII} \cdot \gamma_{jII})}. \quad (3)$$

Показатель интенсивности движения ТС i -ой категории на участке УДС определён для двух условий: насыщенного и ненасыщенного транспортного потока. При насыщенном транспортном потоке интенсивность движения ТС i -ой категории определяется по формуле:

$$n_i = M_H \cdot b_i \cdot D_i, \quad (4)$$

где M_H – величина потока насыщения одной полосы рассматриваемого участка УДС, ед./час.; b_i – количество полос, доступных

для движения ТС i -ой категории, ед.; D_i – доля ТС i -ой категории в общем потоке ТС, ед.

При организации выделенной полосы интенсивности движения ТС, не относящихся к ГПТОП, определяется по формуле:

$$n_i = p_i \cdot (b_{\text{общ}} - b_{II}), D_i, \quad (5)$$

где $b_{\text{общ}}$ – общее количество полос на наиболее нагруженном направлении проезжей части рассматриваемого участка УДС, ед.; b_{II} – количество выделенных полос для движения ТС ГПТОП (как правило, $b_{II}=1$), ед.

Интенсивность движения ТС ГПТОП, движущихся в рамках выделенной полосы, в подавляющем большинстве случаев не превышает значения потока насыщения и определяется, исходя из интервала их движения. Расчёт производится по формуле:

$$n_{\text{пл}} = \sum_{a=1}^M \left(\frac{1}{I_{ia}} \right), \quad (6)$$

где I_{ia} – интервал движения пассажирских ТС i -ой категории на a -ом маршруте, час; M – количество регулярных маршрутов ГПТОП, проходящих через рассматриваемый участок УДС, ед.

В условиях насыщенного транспортного потока средняя скорость движения ТС может быть определена, исходя из величины потока насыщения и динамического габарита ТС:

$$v_i = L_{di} \cdot M_H, \quad (7)$$

где L_{di} – динамический габарит ТС i -ой категории, м; M_H – величина потока насыщения одной полосы рассматриваемого участка УДС, ед/час.

Формула для расчёта динамического габарита [13, 19]:

$$L_{di} = v_i \cdot T_p + \frac{v_i^2}{2 \cdot J_i} + 2L_{Ai}, \quad (8)$$

где T_p – время реакции водителя, с; v_i – скорость движения ТС i -ой категории, м/с; J_i – среднее замедление ТС i -ой категории при экстренном торможении, м/с²; L_{Ai} – длина ТС i -ой категории, м.

Рассмотрим возможные варианты насыщения транспортного потока. Первый вариант: при насыщенных транспортных пото-

ках как на рассматриваемом, так и на смежном участках УДС, выражение для расчёта изменения средней скорости перемещения пассажира имеет вид:

$$\Delta v_{1,cr,n} = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i^+)^2 \cdot L_n \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i - \sum_{i=1}^k (n_i^-)^2 \cdot L_n \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i + \left(\frac{v_n - \frac{\sum_{i=1}^k (L_n \cdot n_i^2)}{1000 \cdot \sum_{i=1}^k (n_i)}}{\sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{L_n} \right) \cdot \Pi_{jn} \cdot \gamma_{jn} \right) + \sum_{i=1}^k (n_{ic}^+)^2 \cdot L_n \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i - \sum_{i=1}^k (n_{ic}^-)^2 \cdot L_n \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i \right)}{1000 \cdot \sum_{i=1}^k (\Pi_i \cdot \gamma_i \cdot (n_i^+ + n_i^-)) + \sum_{j=1}^m (n_{jn} \cdot \Pi_{jn} \cdot \gamma_{jn})}, \quad (9)$$

где n_i^+ и n_i^- – интенсивность движения ТС i -ой категории на рассматриваемом участке УДС вне выделенной полосы при её наличии и отсутствии соответственно, ед./ч; n_{ic}^+ и n_{ic}^- – интенсивность движения ТС i -ой категории на смежном участке УДС при наличии и отсутствии выделенной полосы на рассматриваемом участке соответственно, ед./ч.

Второй вариант: транспортный поток вне выделенной полосы не достигает предела насыщения как до, так и после организации выделенной полосы. Расчёт изменения средней скорости перемещения пассажира производится по формуле:

$$\Delta v_{2,cr,n} = \frac{\overline{v}^+ \cdot \sum_{i=1}^k (n_i^+ \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) - \overline{v}^- \cdot \sum_{i=1}^k (n_i^- \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) + (\overline{v}_n^+ - \overline{v}_n^-) \cdot \sum_{j=1}^m (n_{jn} \cdot \Pi_{jn} \cdot \gamma_{jn}) + \overline{v}_c^+ \cdot \sum_{i=1}^k (n_{ic}^+ \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) - \overline{v}_c^- \cdot \sum_{i=1}^k (n_{ic}^- \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i)}{\sum_{i=1}^k (n_i \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i + n_{ic} \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) + \sum_{j=1}^m (n_{jn} \cdot \Pi_{jn} \cdot \gamma_{jn})}, \quad (10)$$

где \overline{v}^+ и \overline{v}^- – средняя скорость движения ТС на рассматриваемом участке УДС вне выделенной полосы при её наличии и отсутствии соответственно, км/ч; n_i^+ и n_i^- – интенсивность движения ТС i -ой категории на рассматриваемом участке УДС вне выделенной полосы при её наличии и отсутствии соответственно, ед./ч; \overline{v}_n^+ и \overline{v}_n^- – средняя скорость движения ТС ГПТОП на рассматриваемом участке УДС при наличии и отсутствии выделенной полосы соответственно, км/ч; \overline{v}_c^+ и \overline{v}_c^- – средняя скорость движения ТС на смежном участке УДС при наличии и отсутствии выделенной полосы на рассматриваемом участке, соответственно, км/ч; n_{ic}^+ и n_{ic}^- – интенсивность движения ТС i -ой категории на смежном участке УДС при наличии и отсутствии выделенной полосы на рассматриваемом участке соответственно, ед./ч.

Третий вариант: до организации выделенной полосы транспортный поток вне выделенной полосы был ненасыщенным, а

при её организации достиг порога насыщения. Для такого варианта расчёт изменения средней скорости перемещения пассажиров может быть произведён на основе выражения, полученного на основе комбинации формул (9) и (10):

$$\Delta v_{ср.п} = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i^2 \cdot L_{a_i} \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) - \bar{v} \cdot \sum_{i=1}^k (n_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) + \left(\frac{v_n - \sum_{i=1}^k (L_{a_i} \cdot n_i^2)}{1000 \cdot \sum_{i=1}^k (n_i)} \right) \cdot \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{L_{a_i}} \right) \cdot \Pi_{j,i} \cdot \gamma_{j,i} \right) + \sum_{i=1}^k (n_i^2 \cdot L_{a_i} \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i) - \bar{v} \cdot \sum_{i=1}^k (n_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \gamma_i)}{1000 \cdot \sum_{i=1}^k (\Pi_i \cdot \gamma_i \cdot (n_i^+ + n_i^-)) + \sum_{j=1}^m (n_{j,i} \cdot \Pi_{j,i} \cdot \gamma_{j,i})} \quad (11)$$

Значение потока насыщения M_H , определяющего предельную величину интенсивности движения ТС, может быть определено по методике, представленной в работе Дудниковой Н.Н. [6]. Данная методика позволяет произвести расчёт величины потока насыщения для полосы участка УДС с учётом состава транспортного потока и характера взаимодействия ТС различных классов. Обобщённая формула, описывающая разработанный метод, имеет вид:

$$M_H = M_{H1} \cdot \frac{I_{л1}}{\sum (P_{ij} \cdot I_{ij})} - 30 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_B^i}{I_{ij}} \cdot P_{ij} \right), \quad (12)$$

где M_{H1} – поток насыщения для прямолинейного движения, ед./час; $I_{л1}$ – постоянный интервал разъезда легковых автомобилей из очереди в пересечении линии «стоп» на участке светофорного регулирования, с; P_{ij} – вероятность появления пары ТС i -го типа по j -му; I_{ij} – постоянный интервал разъезда ТС из очереди в пересечении линии «стоп», i -го типа по j -тому, с; t_B^i – потерянное время i -го вида взаимодействия ТС, с; n – количество видов взаимодействия.

Исходя из вышеизложенного, величина изменения средней скорости перемещения пассажира $\Delta v_{ср.п}$ может быть определена на основе системы выражений:

$$\Delta v_{ср.п} = \begin{cases} \Delta v1_{ср.п}, \text{ если } n^+ = M_H \cdot (b_{общ} - b_H) \cdot \frac{t_p}{t_u}; n_c^+ = M_{HC} \cdot b_c \cdot \frac{t_{pc}}{t_{uc}} \\ \Delta v2_{ср.п}, \text{ если } n^+ < M_H \cdot (b_{общ} - b_H) \cdot \frac{t_p}{t_u}; n_c^+ \leq M_{HC} \cdot b_c \cdot \frac{t_{pc}}{t_{uc}} \\ \Delta v3_{ср.п}, \text{ если } n^+ = M_H \cdot (b_{общ} - b_H) \cdot \frac{t_p}{t_u}; n^- < M_H \cdot b_{общ} \cdot \frac{t_p}{t_u}; n_c^+ \leq M_{HC} \cdot b_c \cdot \frac{t_{pc}}{t_{uc}} \end{cases}, \quad (13)$$

где M_H – величина потока насыщения одной полосы для заданных условий на рассматриваемом участке УДС, ед./ч; M_{HC} – величина

потока насыщения одной полосы для заданных условий на смежном участке УДС, ед./ч; $b_{\text{ОБЩ}}$ – общее количество полос проезжей части на рассматриваемом участке УДС, ед.; b_c – количество полос проезжей части на смежном участке УДС, ед.; $b_{\text{П}}$ – количество выделенных полос для движения ТС ГПТОП (как правило, $b_{\text{П}} = 1$), ед.; n^+ и n^- – приведённая интенсивность движения ТС на рассматриваемом участке УДС вне выделенной полосы при её наличии и отсутствии соответственно, ед./ч; n_c^+ – приведённая интенсивность движения ТС на смежном участке УДС при наличии выделенной полосы на рассматриваемом участке соответственно, ед./ч; t_p – продолжительность разрешающей фазы регулирования светофорного объекта, расположенного в конце рассматриваемого участка УДС, с; $t_{\text{Ц}}$ – продолжительность цикла регулирования светофорного объекта, расположенного в конце рассматриваемого участка УДС, с; t_{PC} – продолжительность разрешающей фазы регулирования светофорного объекта, расположенного в конце смежного участка УДС, с; $t_{\text{ЦC}}$ – продолжительность цикла регулирования светофорного объекта, расположенного в конце смежного участка УДС, с.

Очевидно, что условие целесообразности организации выделенной полосы на рассматриваемом участке УДС определяется неравенством: $\Delta v_{\text{СР.П}} > 0$, что соответствует увеличению средней скорости перемещения пассажира при организации выделенной полосы.

В случае поступления на рассматриваемый участок УДС транспортных потоков с интенсивностью, превышающей его пропускную способность, происходит перераспределение транспортных потоков на смежный участок. При этом пропускная способность смежного участка должна быть выше интенсивности общего транспортного потока. При невыполнении данного условия ($n_c^+ > M_{\text{НС}} \cdot b$), формируется затор как на рассматриваемом, так и на смежном участках УДС. Принимается решение о нецелесообразности организации выделенной полосы ГПТОП.

Результаты и обсуждение

Результатом проделанного исследования является разработка теоретических положений, позволяющих повысить эффективность использования городской УДС и качество транспортного обслуживания населения на основе реализации научно-обоснованного подхода к вопросу организации выделенных полос для движения ТС ГПТОП. На основании приведённых теоретических положений разработана методика оценки целесообразности организации выделенных полос. Схема алгоритма, реализующего данную методику, представлена на рисунке 1.

Продолжением данной научной работы является постановка и выполнения модельного эксперимента, целью которого является определение области целесообразного применения выделенных полос при организации движения ТС ГПТОП.

Размерность и диапазон области исследования целесообразно определить на основе результатов ранжирования параметров интенсивности транспортных потоков, параметров УДС и организации дорожного движения.

Заключение

Представленный материал – теоретическая часть комплексного исследования, целью которого является повышение эффективности использования городской УДС на основе обеспечения приоритетных условий движения городского пассажирского транспорта общего пользования.

Исходя из общей логики научного исследования можно сделать заключение о разработке теоретической базы и получении следующих результатов (рис. 1.)

- проведён анализ существующих научных работ в области определения условий и критериев целесообразности организации выделенных полос для движения ГПТОП; установлено, что в существующих работах не учтено перераспределение транспортных потоков между смежными участками УДС при достижении потока насыщения на рассматриваемом участке;

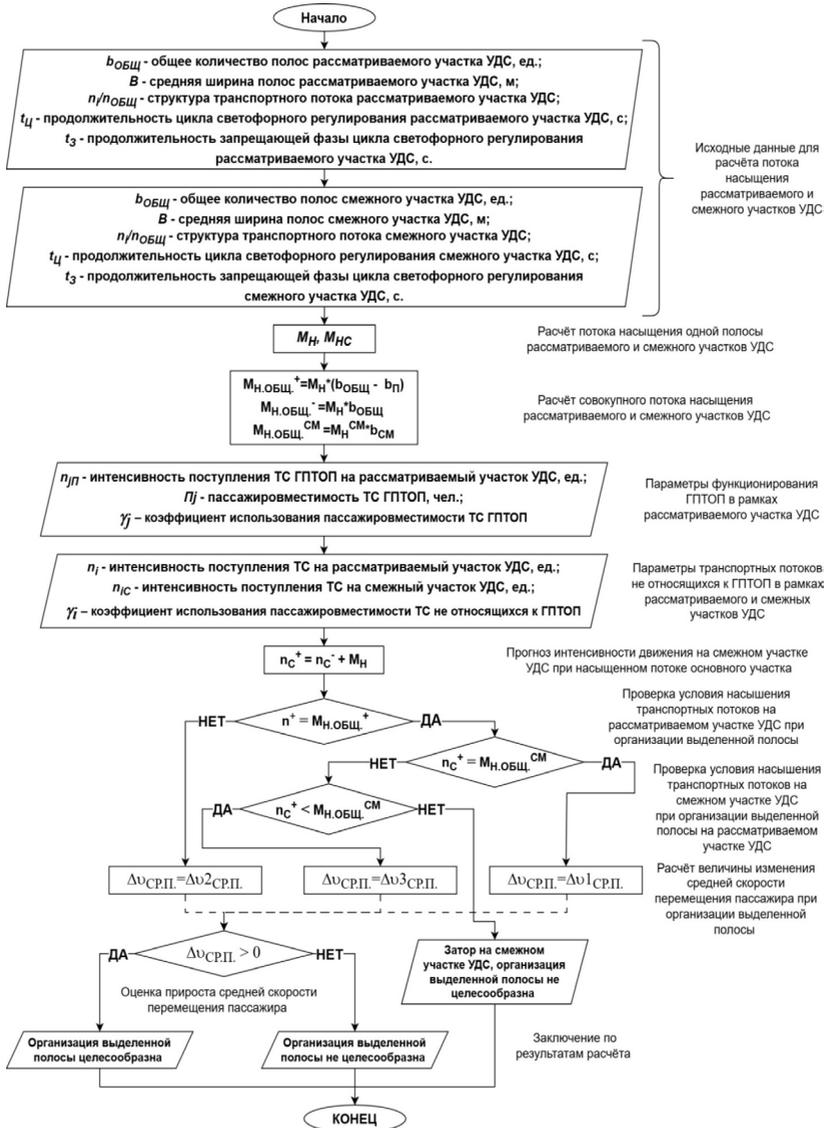


Рис. 1. Схема алгоритма расчёта изменения средней скорости перемещения пассажира, обусловленного организацией выделенной полосы на рассматриваемом участке УДС

- предложен показатель оценки целесообразности организации выделенной полосы для движения ТС ГПТОП, позволяющий выявить степень эффективности использования городской УДС;
- разработана методика оценки целесообразности организации выделенной полосы для движения ТС ГПТОП на локальном участке городской УДС, позволяющая учесть перераспределение транспортных потоков между смежными направлениями при достижении потока насыщения на рассматриваемом участке.

Список литературы

1. Акопов, Ф. В. (2012). Проблемы организации выделенных полос для движения наземного городского пассажирского транспорта. В *Проблемы и основные направления модернизации транспортного комплекса Московского региона* (с. 83–89). Москва: МАДИ.
2. Белова, А. М. (2014). *Методика обоснования целесообразности выделения полос для движения маршрутного транспорта общего пользования* [Диссертация на соискание кандидата технических наук, 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте»]. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 159 с.
3. Голеницкий, Ю. В. (1999). *Моделирование приоритетного движения автобусов* [Диссертация на соискание кандидата технических наук, 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»]. Волгоградский государственный технический университет. 145 с. EDN: <https://elibrary.ru/QDDHRX>
4. Горев, А. Э., Попова, О. В., & Филимонова, А. М. (2010). Повышение эффективности использования общественного транспорта за счёт выделенных полос. *Автотранспортное предприятие*, 8, 10–12. EDN: <https://elibrary.ru/MTERTD>
5. Дацюк, А. М., Горев, А. Э., & Попова, О. В. (2010). Организация скоростного автобусного сообщения и области его применения. В *Сборник докладов 67-й научной конференции профессоров, преподавателей и аспирантов* (с. 10–12). Москва: МАДИ.

- давателей, научных работников, инженеров и аспирантов (Ч. III, с. 89–94). Санкт-Петербург: СПбГАСУ.
6. Дудникова, Н. Н., & Синько, К. А. (2023). Формулирование подходов для раскрытия влияния состава транспортного потока на значение потоков насыщения для пересечений в одном уровне со светофорным регулированием. *Техника и технология транспорта*, 1(28). EDN: <https://elibrary.ru/PUVSHE>
 7. Зырянов, В. В., & Мирончук, А. А. (2012). Приоритетное движение общественного транспорта: развитие методов организации. *Транспорт Российской Федерации*, 3–4, 40–41. EDN: <https://elibrary.ru/PBZHUL>
 8. Котенкова, И. Н., Лебедев, Е. А., & Рассоха, В. И. (2024). К вопросу о приоритетном праве проезда пассажирского транспорта в городах. В *Прогрессивные технологии в транспортных системах: материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием* (20–22 ноября, с. 239–248). Оренбург: Оренбургский государственный университет.
 9. Курганский, С. Г., & Рожин, П. С. (2014). Организация и внедрение приоритетного проезда наземного городского пассажирского транспорта на регулируемых перекрёстках. *Транспорт Российской Федерации*, 4, 60–63. EDN: <https://elibrary.ru/SLSQQZ>
 10. Ле Дык Лонг. (2021). *Исследование закономерностей движения транспортных потоков для проектирования выделенных полос наземного общественного транспорта* [Диссертация на соискание кандидата технических наук, 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»]. МАДИ. 170 с.
 11. Мирончук, А. А. (2020). Исследование эффективных условий применения приоритетных полос прерывного действия. В *Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы 5-й Международной научно-практической конференции* (22–23 мая, с. 179–187). Орёл: Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева. EDN: <https://elibrary.ru/KXEXUM>

12. Мирончук, А. А. (2013). Особенности интеграции приоритетных полос прерывного действия с городской интеллектуальной транспортной системой. *Инженерный вестник Дона*, 3(26), 147–152. EDN: <https://elibrary.ru/RZENUL>
13. Нестеренко, Д. Х. (2021). *Методика повышения привлекательности городских пассажирских автомобильных перевозок на основе управления структурой транспортных потоков* [Диссертация на соискание кандидата технических наук, 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта»]. Оренбургский государственный университет. 118 с. EDN: <https://elibrary.ru/GGWGHW>
14. Попова, О. В. (2003). *Разработка методики планирования приоритетного движения наземного общественного транспорта* [Диссертация на соискание кандидата технических наук, 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»]. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 154 с. EDN: <https://elibrary.ru/NMGLQV>
15. Рассоха, В. И. (2010). Ситуационное управление автотранспортными системами. Схема и сценарии управления городским пассажирским транспортом. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 4, 142–146. EDN: <https://elibrary.ru/MLZQRX>
16. Рассоха, В. И., & Исайчев, В. Т. (2010). Улучшение эксплуатационных характеристик системы непрерывного регулирования схождения управляемых колёс автотранспортных средств в движении. Повышение точности регулирования. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 10(116), 141–143. EDN: <https://elibrary.ru/MVSQFR>
17. Смирнов, С. И. (1984). *Совершенствование организации приоритетного движения средств маршрутного пассажирского транспорта в городах* [Диссертация на соискание кандидата технических наук, 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»]. МАДИ. 195 с. EDN: <https://elibrary.ru/NPOSGN>
18. Якимов, М. Р. (2011). Методология обоснования целесообразности выделения обособленных полос для движения общественного

- транспорта на улично-дорожной сети крупного города. *Вестник МАДИ*, 2(25), 90–95. EDN: <https://elibrary.ru/NUTAGB>
19. Якунина, Н. В., Нургалиева, Д. Х., Легашёв, С. В., & Мухамедов, Д. С. (2015). Моделирование структуры пассажирских автотранспортных потоков с использованием показателя динамического габарита пассажира. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*, 4, 140–144. EDN: <https://elibrary.ru/VPUPWB>
20. Tsitsokas, D., Kouvelas, A., & Geroliminis, N. (2019). Modeling and optimization of dedicated bus lane network design under dynamic traffic congestion. В *hEART 2019 — 8th Symposium of the European Association for Research in Transportation* (4–6 сентября, с. 86–98). Budapest.
21. Hu, J., Lian, Zh., Sun, X., et al. (2024). Dynamic right-of-way allocation on bus priority lanes considering traffic system resilience. *Sustainability*, 16(5), 1801. <https://doi.org/10.3390/su16051801>. EDN: <https://elibrary.ru/KBQSGV>
22. Hadas, Y., & Nahum, O. E. (2016). Urban bus network of priority lanes: A combined multi-objective, multi-criteria and group decision-making approach. *Transport Policy*, 52, 186–196.

References

1. Akopov, F. V. (2012). Problems of organizing dedicated lanes for urban public passenger transport. In *Problems and key directions of modernizing the transport complex of the Moscow region* (pp. 83–89). Moscow: MADI.
2. Belova, A. M. (2014). *Methodology for justifying the feasibility of dedicating lanes for public route transport* [PhD thesis in Technical Sciences, 05.22.01 “Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport”]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 159 pp.
3. Golenitsky, Yu. V. (1999). *Modeling priority bus movement* [PhD thesis in Technical Sciences, 05.22.10 “Operation of road trans-

- port”]. Volgograd: Volgograd State Technical University. 145 pp. EDN: <https://elibrary.ru/QDDHRX>
4. Gorev, A. E., Popova, O. V., & Filimonova, A. M. (2010). Improving the efficiency of public transport use through dedicated lanes. *Motor Transport Enterprise*, 8, 10–12. EDN: <https://elibrary.ru/MTERTD>
 5. Datsyuk, A. M., Gorev, A. E., & Popova, O. V. (2010). Organizing express bus services and areas of their application. In *Proceedings of the 67th Scientific Conference of Professors, Teachers, Researchers, Engineers, and Postgraduate Students* (Part III, pp. 89–94). Saint Petersburg: SPbGASU.
 6. Dudnikova, N. N., & Sinko, K. A. (2023). Formulating approaches to reveal the impact of traffic flow composition on saturation flow values at signalized level crossings. *Technique and Technology of Transport*, 1(28). EDN: <https://elibrary.ru/PUVSHE>
 7. Zyryanov, V. V., & Mironchuk, A. A. (2012). Priority movement of public transport: Development of organization methods. *Transport of the Russian Federation*, 3–4, 40–41. EDN: <https://elibrary.ru/PB-ZHUL>
 8. Kotenkova, I. N., Lebedev, E. A., & Rassokha, V. I. (2024). On the issue of priority right-of-way for passenger transport in cities. In *Progressive Technologies in Transport Systems: Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation* (November 20–22, pp. 239–248). Orenburg: Orenburg State University.
 9. Kurgansky, S. G., & Rozhin, P. S. (2014). Organization and implementation of priority passage for urban public transport at signalized intersections. *Transport of the Russian Federation*, 4, 60–63. EDN: <https://elibrary.ru/SLSQQZ>
 10. Le Dyk Long. (2021). *Studying traffic flow patterns for designing dedicated lanes for public ground transport* [PhD thesis in Technical Sciences, 05.23.11 “Design and construction of roads, subways, airfields, bridges, and transport tunnels”]. MADI. 170 pp.

11. Mironchuk, A. A. (2020). Studying effective conditions for using priority intermittent lanes. In *Information Technologies and Innovations in Transport: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference* (May 22–23, pp. 179–187). Oryol: Oryol State University named after I. S. Turgenev. EDN: <https://elibrary.ru/KXEXUM>
12. Mironchuk, A. A. (2013). Features of integrating priority intermittent lanes with an urban intelligent transport system. *Engineering Bulletin of the Don*, 3(26), 147–152. EDN: <https://elibrary.ru/RZEHUL>
13. Nesterenko, D. Kh. (2021). *Methodology for increasing the attractiveness of urban passenger road transport through managing traffic flow structure* [PhD thesis in Technical Sciences, 2.9.5 “Operation of road transport”]. Orenburg: Orenburg State University. 118 pp. EDN: <https://elibrary.ru/GGWGHW>
14. Popova, O. V. (2003). *Developing a methodology for planning priority movement of public ground transport* [PhD thesis in Technical Sciences, 05.22.10 “Operation of road transport”]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 154 pp. EDN: <https://elibrary.ru/NMGLQV>
15. Rassokha, V. I. (2010). Situational management of motor transport systems. Scheme and scenarios for urban passenger transport management. *Bulletin of Orenburg State University*, 4, 142–146. EDN: <https://elibrary.ru/MLZQRX>
16. Rassokha, V. I., & Isaychev, V. T. (2010). Improving operational characteristics of continuous alignment control systems for vehicle steering wheels in motion. Enhancing control accuracy. *Bulletin of Orenburg State University*, 10(116), 141–143. EDN: <https://elibrary.ru/MVSQFR>
17. Smirnov, S. I. (1984). *Improving the organization of priority movement for public route passenger transport in cities* [PhD thesis in Technical Sciences, 05.22.10 “Operation of road transport”]. MADI. 195 pp. EDN: <https://elibrary.ru/NPOSGN>

18. Yakimov, M. R. (2011). Methodology for justifying the feasibility of dedicating separate lanes for public transport on major city road networks. *Bulletin of MADI*, 2(25), 90–95. EDN: <https://elibrary.ru/NUTAGB>
19. Yakunina, N. V., Nurgalieva, D. Kh., Legashchev, S. V., & Mukhamedov, D. S. (2015). Modeling the structure of passenger road transport flows using the dynamic passenger space indicator. *Intellect. Innovations. Investments*, 4, 140–144. EDN: <https://elibrary.ru/VPUPWB>
20. Tsitsokas, D., Kouvelas, A., & Geroliminis, N. (2019). Modeling and optimization of dedicated bus lane network design under dynamic traffic congestion. In *hEART 2019 — 8th Symposium of the European Association for Research in Transportation* (September 4–6, pp. 86–98). Budapest.
21. Hu, J., Lian, Zh., Sun, X., et al. (2024). Dynamic right of way allocation on bus priority lanes considering traffic system resilience. *Sustainability*, 16(5), 1801. <https://doi.org/10.3390/su16051801>. EDN: <https://elibrary.ru/KBQSGV>
22. Hadas, Y., & Nahum, O. E. (2016). Urban bus network of priority lanes: A combined multi-objective, multi-criteria and group decision making approach. *Transport Policy*, 52, 186–196.

ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Котенкова Ирина Николаевна, старший преподаватель кафедры транспортных процессов и технологических комплексов ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»
ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация
ir-kot83@mail.ru

Рассоха Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент, декан транспортного факультета, профессор кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей

*ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»
просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
cabin2012@yandex.ru*

Дрючин Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технической эксплуатации и ремонта
автомобилей
*ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»
просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
dmi-dryuchin@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Irina N. Kotenkova, Senior Lecturer at the Department of Transport
Processes and Technological Complexes
*Kuban State Technological University
2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation
ir-kot83@mail.ru*

Vladimir I. Rassokha, Doctor of Technical Sciences, Associate Pro-
fessor, Dean of the Transport Faculty, Professor of the Depart-
ment of Technical Operation and Repair of Cars
*Orenburg State University
13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
cabin2012@yandex.ru*

Dmitry A. Dryuchin, Doctor of Technical Sciences, Associate Pro-
fessor, Head of the Department of Technical Operation and Re-
pair of Cars
*Orenburg State University
13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
dmi-dryuchin@yandex.ru*

Поступила 03.08.2025
После рецензирования 22.08.2025
Принята 07.09.2025

Received 03.08.2025
Revised 22.08.2025
Accepted 07.09.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-393

EDN: FFPUKV

УДК 656.078



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Р.А. Халтурин, М.Г. Плетнёв, И.Ю. Капитанов

Аннотация

Обоснование. Управление распределением ресурсов в транспортном комплексе значительно осложняется наличием неопределенных информационных состояний, характерных для таких сложных многоуровневых систем. Традиционные модели управления часто оказываются неадекватными, так как не в полной мере учитывают эту стохастическую неопределенность и эргатическую природу системы, предполагающую взаимодействие разнородных технических элементов и человеческих коллективов с потенциально противоречивыми целями. Это обуславливает необходимость разработки специализированных аналитических моделей, основанных на robust mathematical аппарате, таком как теория энтропии, для формализации процессов принятия решений и повышения эффективности распределения ресурсов в условиях неполной информации.

Цель – разработка аналитических моделей управления системой распределения ресурсов в транспортном комплексе, основанных на принципах измерения энтропии и теории принятия решений в условиях неопределенности, направленных на формализацию процедур оценки эффективности и выбора оптимальных решений.

Материалы и методы. В исследовании используются теоретические основы энтропии К. Шеннона для количественной оценки неопределенности в системе. Основным методическим инструментом

является модель исследования функций неопределенности второго рода, предназначенная для систем с дискретными состояниями, какими являются системы распределения ресурсов. Для формирования системы распределения вероятностей информационных состояний применяется модель, основанная на оценках Фишберна. Математический аппарат включает построение матриц оценочных функционалов (2) для различных вариантов решений и критериев. Анализ эффективности решений проводится с использованием графоаналитической модели для множества взаимоисключающих вариантов, в частности, и для априорных распределений вероятностей.

Результаты. Разработана и представлена графоаналитическая модель определения эффективности в системе, иллюстрирующая пространство решений для заданного предпочтения априорных. Показано, что применение модели, основанной на оценках Фишберна, решает основную задачу снятия неопределенности. Однако установлено, что только эта модель не позволяет выявить вероятностные характеристики, соответствующие максимуму оценочного функционала на всем множестве состояний внешней среды. Для решения этой проблемы модель дополнена условием целеполагания (4). Кроме того, продемонстрированы принципиальные отличия между методом оценок Фишберна и альтернативными методами – методом районирования по принципу доминирования вероятностей возможных состояний внешней среды (ДВСС) и методом районирования по принципу соблюдения иерархического соотношения вероятностей возможных состояний внешней среды (СИСС). Проведен сравнительный анализ этих методов на гипотетическом примере.

Ключевые слова: распределение ресурсов; транспортный комплекс; энтропия; неопределенность; информационное состояние; оценки Фишберна; оценочный функционал; принятие решений; методы районирования; распределение вероятностей

Для цитирования. Халтурин, Р. А., Плетнёв, М. Г., & Каштанов, И. Ю. (2025). Аналитические модели управления в системе распределения ресурсов транспортного комплекса. *Transportation*

and Information Technologies in Russia, 15(3), 203–221. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-393>

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

ANALYTICAL MANAGEMENT MODELS IN THE TRANSPORT COMPLEX RESOURCE ALLOCATION SYSTEM

R.A. Khalturin, M.G. Pletnev, I.Yu. Kashtanov

Abstract

Background. The management of resource allocation in a transport complex is significantly complicated by the presence of uncertain informational states, a characteristic feature of such complex, multi-level systems. Traditional management models often prove inadequate as they fail to fully account for this stochastic uncertainty and the ergatic nature of the system, which involves interaction between heterogeneous technical elements and human collectives with potentially conflicting goals. This necessitates the development of specialized analytical models based on robust mathematical apparatuses, such as entropy theory, to formalize decision-making processes and increase the efficiency of resource distribution under conditions of incomplete information.

Purpose. To develop analytical models for managing the resource allocation system in a transport complex, based on the principles of entropy measurement and the theory of decision-making under uncertainty, aimed at formalizing the procedures for evaluating efficiency and selecting optimal solutions.

Materials and methods. The study employs the theoretical foundations of K. Shannon's entropy to quantify uncertainty within the system. The core methodological tool is the model for researching second-order uncertainty functions, designed for systems with discrete states, such as resource allocation systems. To form a system of probability distributions for informational states, a model based on Fishburn's estimates is used. The

mathematical apparatus includes constructing matrices of evaluation functionals (2) for various decision options and criteria. The analysis of solution efficiency is conducted using a graphical model for a set of mutually exclusive options, particularly for, and for a priori probability distributions.

Results. A graphical model for determining efficiency within the system was developed and presented, illustrating the solution space for a given preference of a priori probabilities. The application of the model based on Fishburn's estimates was shown to solve the primary task of reducing uncertainty. However, it was established that this model alone does not identify the probability characteristics corresponding to the maximum of the evaluation functional across the entire set of external environment states. To address this, the model was supplemented with a targeted condition (4). Furthermore, the fundamental differences between the method of Fishburn's estimates and alternative methods – the zoning method by the principle of dominance of probabilities of possible states of the external environment (DPPSE) and the zoning method by the principle of maintaining the hierarchical ratio of probabilities of possible states of the external environment (MHRPSE) – were demonstrated. A comparative analysis of these methods was conducted using a hypothetical example.

Keywords: resource allocation; transport complex; entropy; uncertainty; informational state; Fishburn's estimates; evaluation functional; decision-making; zoning methods; probability distribution

For citation. Khalturin, R. A., Pletnev, M. G., & Kashtanov, I. Yu. (2025). Analytical management models in the transport complex resource allocation system. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 203–221. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-393>

Введение

Любая модель структуры в системе распределения ресурсов (PP-системе) пассажирского транспорта опирается на базовый уровень (эшелон) технологических показателей. Именно на этом уровне отражены реальные показатели текущего состояния системы, которые по сути являются объектами управления. Можно ска-

зять, что структура первого иерархического уровня не изменяется в зависимости от общего или частного целеполагания в системе. Но, при формировании структуры второго и последующих необходимо учитывать следующие обстоятельства:

1. В модель структуры исследуемой системы должно включаться строго определенное количество связей, которые, отражают установленное целеполагание. При этом важна не только количественная оценка связей (какие элементы в блоках взаимодействуют между собой), но и качественная оценка отражающая степень влияния каждого из показателей на исследуемый процесс.
2. Модель структуры исследуемой системы должна отражать строго определенную последовательность вычислений, которая формирует упорядоченную систему связей между элементами [15]. Таким образом последовательная совокупность связанных между собой элементов в системе формируют алгоритм «черного ящика», который может быть различен для любых систем, построенных на полностью однородной элементарной основе. Поэтому, как правило, трудности построения модели структуры являются одновременно и трудностями построения моделей «черного ящика».
3. Достижение конкретного целеполагания в системе требует построения оптимальной модели при достаточно большом количестве возможных альтернативных структур. Количество возможных вариантов, как правило, определяется числом элементов, страт и эшелонов. Выбор из имеющихся или вариантов построения модели специально для конкретного случая должен осуществляться без субъективных оценок этих обстоятельств. Но даже при зафиксированном составе модель структуры переменна – из-за возможности по-разному определить существенность связей.

Поэтому при проектировании модели структуры распределения ресурсов применительно к пассажирским транспортным си-

стемам необходимо последовательно решать три основные задачи исследования систем: представление, анализ и синтез.

Материал и методы

Задачи представления, расчёта, анализа и синтеза систем имеют основополагающее значение для изучения и проектирования эффективных пассажирских транспортных систем в силу вышеобозначенных характерных особенностей. В данном случае эти задачи весьма разнообразны и могут классифицироваться по различным признакам: по разнообразным типам входящих в систему подсистем; по наличию ограничений на функционирование блоков в подсистемах; по полноте имеющихся данных о системе, причем для различных блоков транспортной системы информационные состояния могут быть различными (детерминированные задачи, где имеется полная информация о структуре и параметрах блоков, заданная в детерминированной форме; вероятностные задачи, где указанная информация неполна и задана в вероятностной форме; задачи с неопределенностью в них часть информации может вообще отсутствовать или находиться в состоянии, не позволяющим выявить её стохастические параметры) [1-3]. Наличие в пассажирской системе всех перечисленных признаков, включая признаки неопределенного информационного состояния (ИС) приводит к значительной сложности при решении задач, связанных с изучением данного вида систем.

Основным инструментом исследования сложных систем в условиях неопределенности является научный подход, основанный на определении количества энтропии К. Шеннона. Для системы дискретными состояниями, какими является РР-системы наиболее апробированной моделью определения меры неопределенности является, так называемая модель исследования функция неопределенности второго рода. Применение данной модели и её решения, основанное на оценках Фишберна [4] позволяет сформировать систему распределения вероятностей ИС.

Теоретические исследования

Для формирования системы распределения вероятностей ИС используется следующая модель:

$$\begin{cases} H(P_1, P_2, \dots, P_n) = P_1^n \cdot P_2^{n-1}, \dots, P_n^1 = \prod_{k=1}^n P_k^{n-k+1} \\ P_j = \frac{2(n-j+1)}{n+1}, j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

где n – количество исследуемых функций ценности или критериев целеполагания

Данная система измерения неопределенности обладает тем свойством, что её максимум достигается на так называемых оценках Фишберна, при условии простого предпочтения $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_n \geq 0$. Что позволяет достаточно просто решить задачу определения коэффициентов относительной важности (КОВ) тождественным ИС.

В таблице 1 приведен ряд решений, основанный на модели оценки вероятностных характеристик, соответствующих максимуму неопределенности в исследуемой системе.

Таблица 1.

Решения задачи снятия неопределенности, основанное на оценках Фишберна

N	Φ	p1	p2	p3	p4
2	$F_1 \approx F_2$	1/2	1/2	-	-
	$F_1 \succ F_2$	2/3	1/3	-	-
3	$F_1 \approx F_2 \approx F_3$	1/3	1/3	1/3	-
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3$	2/4	1/4	1/4	-
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3$	2/5	2/5	1/5	-
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3$	3/6	2/6	1/6	-
4	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \approx F_4$	1/4	1/4	1/4	1/4
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \approx F_4$	2/5	1/5	1/5	1/5
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \approx F_4$	2/6	2/6	1/6	1/6
	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \succ F_4$	2/7	2/7	2/7	1/7
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \approx F_4$	3/7	2/7	1/7	1/7
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \succ F_4$	3/8	2/8	2/8	1/8
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \succ F_4$	3/9	3/9	2/9	1/9
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \succ F_4$	4/10	3/10	2/10	1/10

Рассмотрим возможность не ограничиваться решением задачи на основании одного отдельно взятого предпочтения из ряда возмож-

ных априорных вероятностей, то есть, будем рассматривать полное множество распределения априорных вероятностей \hat{P}_j . Тогда данное множество может быть представлено в виде прямоугольного единичного гипертетраэдра в информационном пространстве $(n - 1)$ независимых величин $\sum_{j=1}^{n-1} \hat{P}_j$. В декартовой системе координат данный гипертетраэдр формируется пересечением положительного гипероктанта гиперплоскостью, отсекающей на каждой из осей отрезок, равный единице. При $n = 3$ поле распределений априорных вероятностей трансформируется в прямоугольный треугольник с единичными катетами (рисунок 1). Используя данные таблицы 1 определим координаты точек, являющиеся решением модели снятия неопределенности в соответствии с оценками

Фишберна для информационного состояния: $P_1 \geq P_2 \geq P_3$.

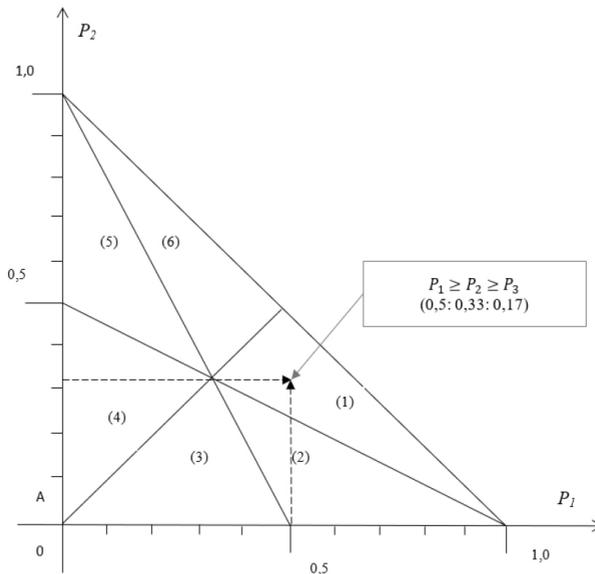


Рис. 1. Поле распределений информационных состояниями для \hat{P}_j , при $P_3 = 3! = 6$

Далее не вызовет затруднений определить оценки вероятностных характеристик для $n = 3! = 6$ с целью изучения полного ИС с

учетом полного факторного пространства, влияющего на получение возможных решений (рисунок 2).

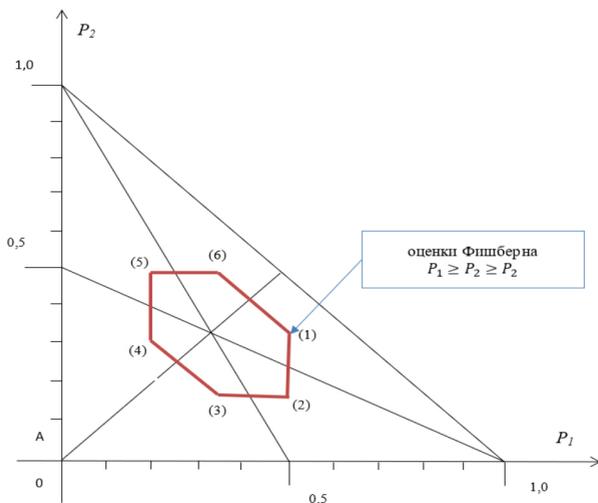


Рис. 2. Поле распределений информационных состояниями для P_j , по Фишберну, при $P_3 = 3! = 6$

На рисунке 2 мы видим, что оценки Фишберна для всех ИС представимы в виде некоторого замкнутого контура, причем для каждого из рассматриваемых предпочтений это будет отдельное единичное значение, одинаковое для их совокупность будет формировать множество $\{(1), (2), \dots, (6)\}$. Как уже отмечалось на множестве оценок Фишберна априори достигается максимум неопределенности, но данное, но получение параметров вероятностных характеристик, соответствующих максимуму снятия неопределенности, не означает достижения максимума эффективности исследуемой функции.

Исследование всех возможных ИС и выявлением определение эффективности исследуемой системы требует уточнения, которое производится на завершающем этапе по критерию Байеса [5]. Для многокритериальной задачи с присущим со множеством взаимоисключающих вариантов $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_n)$,

соответствующим основным показателям «производительности» в тех или иных условиях эксплуатации необходимо определить и задать основной показатель эффективности или полезности (оценочный функционал) $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_m)$. Обозначим этот показатель как F , а измеритель f_{ij} будет обозначать, что он принял конкретное численное значение (показатель), если среда находится в состоянии Θ_j , а мы оцениваем функционал φ_i . Тогда матрица оценочного функционала для различных вариантов решений примет вид:

$$\|F_{ij}\| = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

где i – текущее значение варианта принятия решений, $i = 1, m$; j – текущее значение критерия принятия решений, $j = 1, n$

Результаты и обсуждения

Рассмотрим графоаналитическую модель определения эффективности в исследуемой системе (рисунок 3) на одном из множества взаимоисключающих вариантов $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_n)$ при $n = 3$, и для одного из предпочтений, соответствующего априорной вероятностей \hat{P}_j (таблица 2).

Таблица 2.

Геометрическое поле распределения априорных вероятностей \hat{P}_j .

Подмножество	Соотношение априорных вероятностей \hat{P}_j .
(1)	$\hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_3}$

На рисунке 3 множество точек плоскости, ограниченной треугольником AOD является совокупность вероятностных характеристик соответствующих предпочтению $\hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_3}$, а множество точек плоскости, ограниченной треугольником $A_{\varphi} O_{\varphi} D_{\varphi}$ является множеством точек соответствующих оценочному функционалу для исследуемой PP-системы на всем множестве СВС. Точка

(Φ) является одним из возможных решений, определимым в соответствии с моделью оценок Фишберна. Из рисунка 3 нетрудно сделать вывод, что применение модели, основанной на оценках Фишберна, решает основную задачу снятия неопределенности в исследуемой системе.

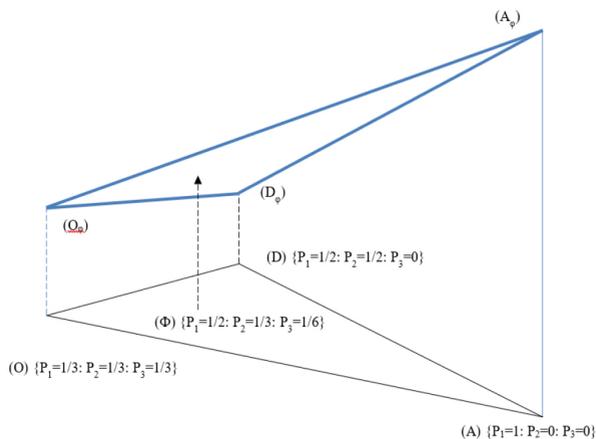


Рис. 3. Графоаналитическую модель определения эффективности на одном из множества взаимоисключающих вариантов $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_n)$ при $n = 3$ для одного из предпочтений $\hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_3}$,

Однако, модель оценок Фишберна не позволяют решить другую не маловажную задачу РР-систем – выявить значения вероятностных характеристик ИС соответствующее максимуму оценочного функционала $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_j, \dots, \varphi_m)$ на всем множестве взаимоисключающих вариантов $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_n)$ состояний, определяемых внешней средой. Согласно рисунку 3 максимум оценочного функционала по Фишберну достигается только при условии, что в случае прикладных задач фактически исключается:

$$f_{11} = f_{12} = \dots = f_{1j} = \dots = f_{1n} \quad (3)$$

Тогда решение системы, определяющие оценочный функционал при различных сценариях (в нашем случае это различные виды транспорта) должен быть дополнен условием целеполагания

$$\max_i B(P, \varphi_c^{ij}) = \begin{cases} \max B \sum_{j=1}^n P_j f_{jc}; & \varphi_c \in \Phi \\ \text{или} \\ \min B \sum_{j=1}^n P_j f_{jc}; & \varphi_c \in \Phi \end{cases}, \quad (4)$$

где i – текущее значение варианта принятия решений, $i = 1, m$

В ряде научных публикаций в течение последних лет исследуется возможность применять для решений подобного характера методы районирования, при этом под районированием (разбиением на отдельные районы) подразумевается определение областей эффективных решений, соответствующих каждому из рассматриваемых сценариев при $0 \leq P_j \leq 1$ [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Постановка многокритериальной задачи векторной оптимизации в случае применения методов районирования

$$\begin{cases} K_1 = f_{11}p_1 + f_{21}p_2 + \dots + f_{n1}p_n \rightarrow \max \\ K_2 = f_{12}p_1 + f_{22}p_2 + \dots + f_{n2}p_n \rightarrow \max \\ \dots \\ K_n = f_{1n}p_1 + f_{2n}p_2 + \dots + f_{nn}p_n \rightarrow \max \\ p_1 + p_2 + \dots + p_n = N \end{cases} \quad (5)$$

Определим условия и ограничения:

$$p_i = \begin{cases} N, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad j = 1, n-1 \quad i = 1, m, \quad (6)$$

Различают две модели районирования. Принципиальным отличием метода районирования по принципу доминирования вероятностей возможных состояний внешней среды (ДВСС) от метода районирования по принципу соблюдения иерархического соотношений вероятностей возможных состояний внешней среды (СИСС), является то, что для последнего должно выполняться предпочтение:

$$p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_j \geq \dots \geq p_{n-1} \geq p_n \quad (7)$$

Покажем на гипотетическом примере принципиальные отличия между исследуемыми методами: методом оценок Фишберна, методом районирования по принципу доминирования вероятностей возможных состояний внешней среды и методом районирования по принципу соблюдения иерархического соотношений вероятностей возможных состояний внешней среды (рисунок 4).

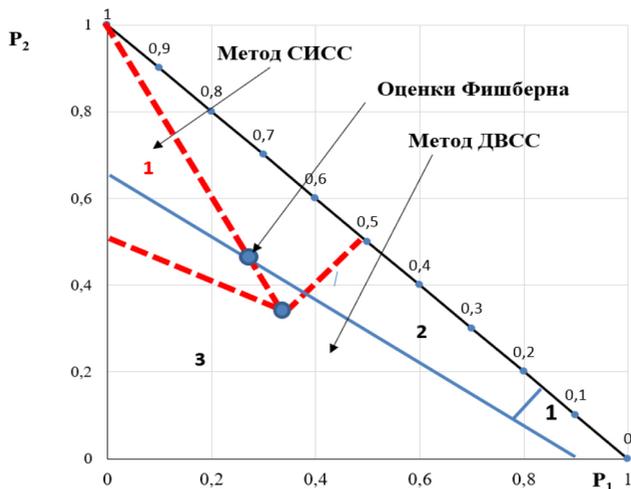


Рис. 4. Графическое представление возможных решений при условии

На рисунке 4 представлены гипотетическое распределение вероятностных характеристик для единой структуры оценочного функционала, распределенного по трём критериям эффективности. Для гипотетического случая количественные оценки рассматриваемого функционала не столь важны, главное показать принципиальные отличия между различными инструментами поиска решений и выбрать наиболее предпочтительный для исследования РР-систем.

1. Метод «оценки Фишберна» всегда будет рекомендовать единственно решение при заданном предпочтении. В случае применения модифицированной в данном исследовании модели оценок Фишберна это совокупность решений, определяемая условием (4).
2. Метод «районирования по принципу доминирования вероятностей возможных состояний внешней среды» (ДВСС) независим от устанавливаемых предпочтений, его основное назначение определить районы доминирования отдельных действий или определение вероятностных характери-

стик, соответствующим наборам эффективных решений по каждому из исследуемых вариантов (районы 1, 2 и 3, выделенные на рисунке 4). Далее в соответствии с ДВСС определяются парные границы между выявленными районами и определяются предпочтения при которых можно добиться эффективных решений.

3. Метод «районирования по принципу соблюдения иерархического соотношений вероятностей возможных состояний внешней среды» (СИСС) позволяет исследовать возможные варианты эффективных решений на всем наборе возможных предпочтений. На рисунке 4 показана одна область, соответствующая предпочтению $p_2 \leq p_3 \leq p_1$, в которой определяться эффективное решение. Следующим шагом является перебор всех возможных решений с выявлением максимального эффективного решения в каждом из предпочтений.

Заключение

На рисунке 4 показана одна область, соответствующая предпочтению $p_2 \leq p_3 \leq p_1$, в которой определяться эффективное решение. Таким образом, продемонстрированы принципиальные отличия между методом оценок Фишберна и методами районирования. Следующим шагом является перебор всех возможных решений с выявлением максимального эффективного решения в каждом из предпочтений, что позволяет выбрать наиболее подходящий инструмент для исследования РР-систем в зависимости от поставленной задачи.

Список литературы

1. Поспелов, Д. А. (1986). *Ситуационное управление: Теория и практика*. Москва: Наука.
2. Тарасенко, Ф. П. (2004). *Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем): Учебник*. Томск: Издательство Томского университета. 186 с. ISBN: 5-7511-1838-3. EDN: <https://elibrary.ru/TFPWDF>

3. Вентцель, Е. С. (2001). *Исследование операций. Задачи, принципы, методология*. Москва: Высшая школа. 208 с.
4. Фишберн, П. С. (1978). *Теория полезности для принятия решений*. Москва: Наука. 352 с.
5. Якушев, А. А. (2012). Принятие управленческих решений на основе системного подхода и математического моделирования. *Современные проблемы науки и образования*, 6. Получено с <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7936> (дата обращения: 10.02.2023). EDN: <https://elibrary.ru/TODQYD>
6. Терентьев, А. В. (2015). Методы решения автотранспортных задач. *Современные проблемы науки и образования*, 1. Получено с <http://www.science-education.ru/125-19863>. EDN: <https://elibrary.ru/TXUWAP>
7. Прудовский, Б. Д., & Терентьев, А. В. (2015). Методы определения множества Парето в некоторых задачах линейного программирования. *Записки Горного института*, 211, 86–90. EDN: <https://elibrary.ru/TQMGRJ>
8. Терентьев, А. В., Ефименко, Д. Б., & Карелина, М. Ю. (2017). Методы районирования как методы оптимизации автотранспортных процессов. *Вестник гражданских инженеров*, 6(65), 291–294. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-291-294>. EDN: <https://elibrary.ru/YPNFZF>
9. Terentyev, A., Evtiukov, S., & Karelina, M. (2017). A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*, 36, 149–156.
10. Moiseev, V. V., Terentiev, A. V., StroeV, V. V., & Karelina, M. Yu. (2018). Enhancement of economic efficiency of transport performance using multi-criteria estimation. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 61, 167–171. EDN: <https://elibrary.ru/WHRSRR>
11. Terentiev, A. V., Evtiukov, S. S., & Karelina, E. A. (2020). Development of zoning method for solving economic problems of optimal resource allocation to objects of various importance in context of in-

- complete information. В *Advances in Economics, Business and Management Research* (Т. 128, с. 765–772). *International Scientific Conference «Far East Con» (ISCFEC 2020)*.
12. Terentyev, A. V., Karelina, M. Yu., Cherepnina, T. Yu., Linnik, D. A., & Demin, V. A. (2020). Digital object-oriented control models in automobile-road complex systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 832, 012058.
 13. Темкин, И. О., Дерябин, С. А., & Конов, И. С. (2017). Нечёткие модели управления взаимодействием мобильных объектов горно-транспортного комплекса (ГТК). В *Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика: Материалы 1-й Международной научно-практической конференции* (4–5 декабря, Т. 1, с. 246–253). Москва: Государственный университет управления. EDN: <https://elibrary.ru/YVSQMQ>
 14. Пугачев, И. Н., Шешера, Н. Г., & Григоров, Д. Е. (2024). Исследования интенсивности транспортного потока методом Deep learning. *Мир транспорта*, 22(2), 12–24. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-2>. EDN: <https://elibrary.ru/VG-TIPB>
 15. Jiang, B., & Fei, Y. (2016). Vehicle speed prediction by two-level data driven models in vehicular networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (ноябрь).

References

1. Pospelov, D. A. (1986). *Situational management: Theory and practice*. Moscow: Nauka.
2. Tarasenko, F. P. (2004). *Applied systems analysis (Science and art of problem solving): Textbook*. Tomsk: Tomsk University Press. 186 pp. ISBN: 5-7511-1838-3. EDN: <https://elibrary.ru/TFPWDF>
3. Ventzel, E. S. (2001). *Operations research. Problems, principles, methodology*. Moscow: Vysshaya Shkola. 208 pp.
4. Fishburn, P. S. (1978). *Utility theory for decision making*. Moscow: Nauka. 352 pp.

5. Yakushev, A. A. (2012). Making managerial decisions based on a systems approach and mathematical modeling. *Modern Problems of Science and Education*, 6. Retrieved from <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7936> (accessed: 10.02.2023). EDN: <https://elibrary.ru/TODQYD>
6. Terentyev, A. V. (2015). Methods for solving road transport problems. *Modern Problems of Science and Education*, 1. Retrieved from <http://www.science-education.ru/125-19863>. EDN: <https://elibrary.ru/TXUWAP>
7. Prudovsky, B. D., & Terentyev, A. V. (2015). Methods for determining the Pareto set in some linear programming problems. *Proceedings of the Mining Institute*, 211, 86–90. EDN: <https://elibrary.ru/TQMGRJ>
8. Terentyev, A. V., Efimenko, D. B., & Karelina, M. Yu. (2017). Zoning methods as methods for optimizing road transport processes. *Bulletin of Civil Engineers*, 6(65), 291–294. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-291-294>. EDN: <https://elibrary.ru/YPNFZF>
9. Terentyev, A., Evtiukov, S., & Karelina, M. (2017). A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*, 36, 149–156.
10. Moiseev, V. V., Terentyev, A. V., Stroeve, V. V., & Karelina, M. Yu. (2018). Enhancement of economic efficiency of transport performance using multi-criteria estimation. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 61, 167–171. EDN: <https://elibrary.ru/WHRSRR>
11. Terentiev, A. V., Evtiukov, S. S., & Karelina, E. A. (2020). Development of zoning method for solving economic problems of optimal resource allocation to objects of various importance in context of incomplete information. In *Advances in Economics, Business and Management Research* (Vol. 128, pp. 765–772). *International Scientific Conference «Far East Con» (ISCFEC 2020)*.
12. Terentyev, A. V., Karelina, M. Yu., Cherepnina, T. Yu., Linnik, D. A., & Demin, V. A. (2020). Digital object-oriented control models in automobile road complex systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 832, 012058.

13. Temkin, I. O., Deryabin, S. A., & Konov, I. S. (2017). Fuzzy models of interaction control for mobile objects in the mining and transport complex (MTC). In *Step into the Future: Artificial Intelligence and Digital Economy: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference* (December 4–5, Vol. 1, pp. 246–253). Moscow: State University of Management. EDN: <https://elibrary.ru/YVVSQMQ>
14. Pugachev, I. N., Sheshera, N. G., & Grigorov, D. E. (2024). Research on traffic flow intensity using the Deep Learning method. *World of Transport*, 22(2), 12–24. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-2>. EDN: <https://elibrary.ru/VGTIPB>
15. Jiang, B., & Fei, Y. (2016). Vehicle speed prediction by two-level data-driven models in vehicular networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (November).

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Халтурин Роман Александрович, кандидат экономических наук,
ведущий научный сотрудник
Государственный университет управления (ГУУ)
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация
ra_khalturin@guu.ru

Плетнев Максим Геннадьевич, начальник Управления координации научных исследований
Государственный университет управления (ГУУ)
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация
mg_pletnev@guu.ru

Каштанов Игорь Юрьевич, аспирант
Государственный университет управления (ГУУ)
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация
iyu_kashtanov@guu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Roman A. Khalturin, Candidate of Economic Sciences, Leading Research Fellow
State University of Management
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation
ra_khalturin@guu.ru

Maxim G. Pletnev, Head of the Research Coordination Department
State University of Management
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation
mg_pletnev@guu.ru

Igor Yu. Kashtanov, Postgraduate Student
State University of Management
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation
iyu_kashtanov@guu.ru

Поступила 07.09.2025
После рецензирования 15.10.2025
Принята 17.10.2025

Received 07.09.2025
Revised 15.10.2025
Accepted 17.10.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-394

EDN: EAJMKG

УДК 656.078



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

Р.А. Халтурин, Р.О. Судоргин

Аннотация

Обоснование. Пассажирский транспортный комплекс представляет собой сложную эргатическую систему, объединяющую разнородные технологические, инфраструктурные элементы и человеческие коллективы с зачастую противоречивым целеполаганием, находящиеся в различном ведомственном подчинении. Его функционирование происходит в условиях стохастической неопределенности показателей, что приводит к значительным трудностям при традиционном подходе к распределению ресурсов. Существующие методы управления не в полной мере учитывают специфику таких систем, что обуславливает необходимость разработки новых теоретических и методических основ для проектирования эффективной многоуровневой структуры управления ресурсами, устойчивой к воздействию неопределенных факторов внешней и внутренней среды.

Цель. Разработка концепции проектирования многоуровневой иерархической структуры распределения ресурсов для пассажирской транспортной системы, соответствующей её уникальным характеристикам как комплексной эргатической структуры, функционирующей в условиях присущей ей стохастической неопределенности.

Материалы и методы. В основе исследования лежит системный подход, включающий анализ, представление, расчет и синтез слож-

ных систем. В качестве теоретической базы использованы теория многоуровневых иерархических систем, теория принятия решений в условиях неопределенности и вероятностные методы анализа. Для формализации процесса распределения ресурсов предложен аппарат логических операторов (ЛО), представленных в виде морфологических матриц, которые агрегируют показатели эффективности различных видов транспорта для множества взаимоисключающих информационных состояний. Это позволяет проводить расчет оценочных функционалов с учетом вероятностных распределений и весовых коэффициентов, характеризующих важность каждого параметра.

Результаты. Разработана концепция представления системы распределения ресурсов как многоэшелонной иерархической структуры. Базовым компонентом разработанной иерархической структуры выступают логические операторы (ЛО), расположенные на низовом уровне управления и отвечающие за консолидацию данных, поступающих от различных транспортных модальностей, а также за учет их текущих информационных статусов. Предложена математическая модель в виде матрицы оценочных функционалов, позволяющая формализовать расчет эффективности распределения ресурсов для различных сценариев. Введено понятие «района» как совокупности ЛО на одном эшелоне, что позволяет структурировать систему по территориальному или функциональному признаку. Полученная модель обеспечивает основу для последующего анализа и синтеза оптимальной структуры управления в условиях неполной информации.

Ключевые слова: структура управления; распределение ресурсов; пассажирский транспорт; сложная система; эргатическая система; стохастическая неопределенность; логический оператор; иерархическая структура; оценочный функционал; принятие решений

Для цитирования. Халтурин, Р. А., & Судоргин, Р. О. (2025). Концепция проектирования многоуровневой иерархической структуры управления ресурсами в пассажирской транспортной системе. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 222–243. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-394>

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

DESIGN CONCEPT FOR A MULTI-LEVEL HIERARCHICAL RESOURCE MANAGEMENT STRUCTURE IN PASSENGER TRANSPORTATION SYSTEMS

R.A. Khalturin, R.O. Sudorgin

Abstract

Background. The passenger transport complex is a complex ergatic system that integrates heterogeneous technological and infrastructural elements and human teams with often contradictory goals, operating under different departmental jurisdictions. Its functioning occurs under conditions of stochastic uncertainty of indicators, which leads to significant difficulties in the traditional approach to resource allocation. Existing management methods do not fully account for the specifics of such systems, necessitating the development of new theoretical and methodological foundations for designing an effective multi-level resource management structure resilient to the impact of uncertain factors of the internal and external environment.

Purpose. To develop a concept for designing a multi-level hierarchical resource allocation structure for a passenger transportation system, which corresponds to its unique characteristics as a complex ergatic system operating under conditions of inherent stochastic uncertainty.

Materials and methods. The research is based on a systems approach, including the analysis, representation, calculation, and synthesis of complex systems. The theoretical foundation utilizes the theory of multi-level hierarchical systems, decision theory under uncertainty, and probabilistic analysis methods. To formalize the resource allocation process, an apparatus of logical operators (LOs) is proposed, presented as morphological matrices that aggregate performance indicators of various transport modes for a set of mutually exclusive information states. This allows for the calculation of evaluation functionals considering probability

distributions and weighting coefficients characterizing the importance of each parameter.

Results. A concept for representing the resource allocation system as a multi-echelon hierarchical structure has been developed. The fundamental component of the elaborated hierarchical framework consists of logical operators (LOs), situated at the lowest management level, responsible for consolidating data received from various transport modalities and for accounting for their current informational states. A mathematical model in the form of an evaluation functional matrix is proposed, enabling the formalization of resource allocation efficiency calculations for diverse scenarios. The concept of a ‘district’ has been introduced, defined as a collection of LOs within a single echelon, which facilitates system structuring based on territorial or functional attributes. The resulting model provides a foundation for subsequent analysis and synthesis of an optimal management structure under conditions of incomplete information.

Keywords: management structure; resource allocation; passenger transportation; complex system; ergatic system; stochastic uncertainty; logical operator; hierarchical structure; evaluation functional; decision-making

For citation. Khalturin, R. A., & Sudorgin, R. O. (2025). Design concept for a multi-level hierarchical resource management structure in passenger transportation systems. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 222–243. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-394>

Введение

Разработка концептуальной модели распределения ресурсов в системе управления пассажирским транспортом акцентирует внимание на её фундаментальных особенностях: многоаспектности состава и эргатическом характере. Система объединяет обширный объем инфраструктурных объектов и инженерных комплексов, включающих единицы подвижного состава, элементы производственно-технического обеспечения, а также компоненты инфраструктуры, предназначенные для обслуживания пассажиров на всей

маршрутной сети. Эксплуатация данной системы осуществляется на основе многообразных технологических и организационных парадигм. Более того, эти функционально дифференцированные образования взаимодействуют с различными группами управленческого персонала, находящимися в ведомственном подчинении множества административных субъектов. В качестве примера можно рассмотреть управление городскими пассажирскими перевозками, где задействованы многочисленные организации, которые зачастую функционируют автономно, не образуя унифицированной иерархической системы. К ним относятся профильные департаменты транспорта, комитеты по развитию транспортной инфраструктуры, диспетчерские центры и другие координационные инстанции.

Представленные эргатические системы демонстрируют сложные функциональные, а зачастую и неявные, взаимосвязи между своими подсистемами и компонентами. Кроме того, для них характерна множественность целей, нередко входящих в противоречие. Перечисленные обстоятельства обуславливают классификацию рассматриваемого транспортного комплекса как сложной системы, чья операционная деятельность протекает в условиях стохастической неопределенности ключевых входных и выходных переменных. Исследованием и разработкой методов решения проблем, присущих таким многокомпонентным системам, занимается академическая дисциплина – теория сложных систем [1]. В последующих разделах будут детализированы фундаментальные положения этой теории, адаптированные к специфическим условиям функционирования пассажирского транспорта, с учетом таких аспектов, как динамика и флуктуации транспортных потоков, временная нестабильность показателей загрузки подвижного состава, изменчивость результативности транспортных предприятий, а также региональные климатические и географические вариации, рассмотренные ранее.

Концептуально, транспортный комплекс, рассматриваемый как сложная система, определяется в пространственно-времен-

ных рамках как взаимосвязанный ансамбль технических средств, инфраструктурных объектов и человеческих ресурсов, предназначенный для организации и регулирования пассажирских потоков. Операционные особенности включают:

- унифицированной целевой функцией, заключающейся в достижении максимальной операционной эффективности с точки зрения ключевого стейкхолдера – национальной пассажирской транспортной системы;
- множественностью, а зачастую и коллизией, целевых установок на разноуровневых иерархических ступенях и в различных подсистемах, обусловленной сложной композицией стратегических задач для оптимизации системной производительности.

Аналогично другим сложным системам, транспортный комплекс может быть предварительно систематизирован по следующим критериям:

- По структурным характеристикам: представляет собой значительное и, как правило, динамически изменяющееся во времени множество компонентов, интегрированных в систему через входные интерфейсы. Эти компоненты включают как внутренние системные сущности, ограниченные её периметром (например, совокупность предприятий, осуществляющих пассажирские перевозки, а также множество инфраструктурных объектов и/или сервисных организаций, отвечающих за техническую эксплуатацию подвижного состава), так и внешние факторы, проявляющиеся в виде таких параметров, как объем пассажиропотока и эволюция маршрутной сети в течение времени.
- По межэлементным связям: характеризуется комплексностью и вариативностью межэлементных взаимодействий, эволюционирующих во времени, которые обладают иерархической структурой и выраженной информационной неполнотой относительно природы внешних воздействий.

- По механизмам управления: данный аспект предполагает имманентное присутствие в структуре регулирующего элемента или специализированной подсистемы, основной задачей которой является нивелирование рассогласований между заданными целевыми и фактически поступающими системными входными параметрами.
- По моделям поведения: Определяется функционированием на базе унифицированной архитектуры целевых функций, реализация которых осуществляется в рамках предписанных ограничений (включая регулятивные нормы дорожного движения, регламенты по техническому обслуживанию и ремонту подвижного состава, протоколы обеспечения безопасности движения, а также системы мониторинга воздействия на окружающую среду), при этом обеспечивая покрытие широкого спектра операционной деятельности.

Методы исследования

Системный подход, как методологическая основа, предусматривает декомпозицию анализируемой структуры на взаимосвязанные компоненты – подсистемы. На каждом уровне детализации под подсистемой подразумевается специфическая часть комплексной структуры, функциональная роль которой является критичной с позиций управления и обеспечения совокупной эффективности системы [2]. В контексте исследования транспортного комплекса и оптимизации распределения ресурсов, системный подход базируется на следующих фундаментальных принципах:

1. Детерминация целевой архитектуры: Формулировка специфических целей (таких как надежность функционирования транспортных средств, экологическая устойчивость, безопасность дорожного движения, обеспечение регулярности перевозок) для исследуемого комплекса. Эти частные цели subordinированы главному иерархическому принципу – оптимизации качества пассажирских перевозок с целью повышения макроэкономической эффективности городских, региональных и государственных эко-

номик.

2. Определение системной конфигурации: Идентификация комплекса технических средств и инфраструктурных компонентов, которые обеспечивают операционное функционирование транспортного комплекса в пределах заданных системных границ.

3. Имплементация иерархического принципа: Структурирование многоуровневых систем предусматривает последовательное вертикальное позиционирование подсистем с четко выраженным приоритетом вышестоящих уровней по отношению к функциональной реализации нижестоящими. Отличительными особенностями явно выраженной иерархии являются: существенная разница в масштабах характеристических элементов различных уровней; наличие верифицированных механизмов взаимодействия конкретного элемента с внешней средой, оказывающих воздействие на данный уровень.

4. Принцип иерархии целеполагания: операционные цели отдельных подсистем должны быть подчинены и согласовываться с общими стратегическими целями всей системы.

5. Взаимодействие с внешней средой: в ходе функционирования сложные системы показывают высокую степень взаимосвязи с окружающей внешней средой, изменения в динамике которой непосредственно влияют на внутреннее состояние и работоспособность системы.

Типологический процесс исследования сложных систем включает в себя следующие фазы: системный анализ; формулирование исследовательской цели и математическая постановка проблемы; разработка математической модели системы; и оптимальный синтез системы, осуществляемый на базе разработанных моделей [3; 4]. Но для эргатических систем, какой по ряду признаков является пассажирская транспортная система, обязательным элементом её исследования является порядок и класс задач, распределяющие этапы решения на следующие: представление системы, расчёт, анализ и синтез. Подобное разделение алгоритма решения задач в системах транспортного комплекса необходимо в силу его осо-

бенностей, что требует более подробного описания.

Системное представление описывается как структурирование всей релевантной информации об объекте, что упрощает его описание, а также постановку и разрешение задач, связанных с его вычислением, анализом и синтезом [5].

Процесс системного расчета включает детерминацию количественных параметров или числовых значений функциональных характеристик, исходя из заданной архитектуры системы, операционного режима (последовательности выполнения операций) и численных значений параметров её составляющих блоков. В контексте транспортных систем, задача расчета приобретает особую значимость, поскольку она способствует выявлению потенциала для разработки искусственных (технических и организационных) интеллектуальных комплексов. Без решения задачи полного алгоритма расчёта системы невозможно продвигаться в сторону создания и реализации широко декларируемого сегодня направления класса интеллектуальных транспортных систем.

Анализ системы состоит в определении вида зависимостей различных характеристик функционирования системы от её структуры, режима её функционирования, значений параметров её блоков. анализ системы позволяет установить степень влияния всех факторов на характеристики системы. благодаря этому оказывается возможным ввести расчёты устойчивости функционирования системы при различных изменениях её параметров и структуры и расчёты при проектировании систем с целью достичь нужных значений характеристик путем некоторого изменения её параметров и структуры [6; 7]. В случае проектирования эффективных пассажирских транспортных систем в рамках данного исследования — это задача проектирования оптимальной структуры распределения ресурсов в транспортном комплексе.

Синтез произвольной системы необходим, когда не определены в структуре исследуемой системы и необходима её реструктуризация, как в определении самой структуры, так и по заданным

целям, значением параметров её блоков и требуемым значениям различных характеристик функционирования системы.

Задачи представления, расчёта, анализа и синтеза систем имеют основополагающее значение для изучения и проектирования эффективных пассажирских транспортных систем в силу вышеобозначенных характерных особенностей. В данном случае эти задачи весьма разнообразны и могут классифицироваться по различным признакам: по разнообразным типам входящих в систему подсистем; по наличию ограничений на функционирование блоков в подсистемах; по полноте имеющихся данных о системе, причем для различных блоков транспортной системы информационные состояния могут быть различными (детерминированные задачи, где имеется полная информация о структуре и параметрах блоков, заданная в детерминированной форме; вероятностные задачи, где указанная информация неполна и задана в вероятностной форме; задачи с неопределенностью в них часть информации может вообще отсутствовать или находиться в состоянии, не позволяющим выявить её стохастические параметры) [8; 9]. Наличие в пассажирской системе всех перечисленных признаков приводит к значительной сложности при решении задач, связанных с изучением данного вида систем.

Теоретические исследования

Перечислим основные проблемы научного характера, возникающие на всех этапах проектирования или реструктуризации сложных пассажирских транспортных систем:

1. Первая проблема возникает при решении вероятностных системных задач. Она состоит в том, что такое решение предполагает знание параметров блоков системы в виде их вероятностных распределений. В то же время в пассажирских транспортных системах на практике достоверная информация в указанном виде по некоторым показателям отсутствует, что затрудняет вероятностный подход к изучению системы. Например, если мы рассматриваем по-

казатели использования инфраструктуры (протяженность сети, количество маршрутов, количество объектов обслуживания), то вероятностные их значения являются фактически детерминированными величинами, а если речь идет о результативных показателях перевозок (количество фактически перевезённых пассажиров или скорость движение ПС на маршруте, то мы имеем ИС неопределенности.

2. Вторая проблема, возникающая при решении вероятностных задач теории систем в применении к сложным системам, заключается в том, что, хотя к таким задачам применяются хорошо развитые математические методы (теория вероятностей и её ветви – теория случайных процессов, теория операций и т.д.). Тем не менее легко поддаются решению лишь случаи с простейшей структурой. Обычно это параллельная структура. Причем для систем с последовательной структурой (особенно для сложных систем с разветвленной структурой) решение задач наталкивается на большие трудности. В данном случае, когда финансирование проектов развития пассажирских транспортных систем осуществляется за редким исключением фактически из одного источника (бюджетное финансирование), а транспортная система распределена по огромному географическому пространству, то формируется «громоздкая» разветвленная система с большим количеством последовательных и параллельных подсистем.

3. Третья проблема, вытекает из первых двух озвученных проблем. Она возникает, как при решении при как при решении детерминистических, так и вероятностных задач исследования систем. Это так называемая задача размерности. Она заключается в том, что успешное исследование сложных систем невозможно без дополнительных (по отношению к простым системам) серьезных мер, учитывающих факторы сложности: большое количество блоков и развитость связей между ними.

4. Четвертая научная проблема, интегральная и синтезирующая предыдущие аспекты, заключается в пролонгированном дефиците релевантного математического инструментария, способного

комплексно решать поставленные задачи для определенных классов систем. Данное обстоятельство обуславливает необходимость применения широкого спектра гетерогенных математических и эвристических подходов, базирующихся на различных методологических основаниях. К ним относятся методы комбинаторного анализа, теории графов, эвристического поиска, линейного и динамического программирования, а также специализированные алгоритмы принятия решений и прочие аналитические техники.

Для решения указанных проблем важнейшее значение имеет разработка таких вероятностных методов расчёта, во-первых, точность которых мало зависит от точности задания вероятностных распределений параметров блоков, а, во-вторых, в виду большого объёмов данных имеют высокую вычислительную производительность [10; 11].

Для решения поставленных проблем применительно к пассажирским транспортным системам последовательно решим три основные задачи исследования систем: представление, анализ и синтез [12].

Архитектура представления системы базируется на методологии формирования дискретных блоков морфологических матриц, предназначенных для сценарного анализа с учетом критериев эффективности или оценочных функционалов. В этом контексте необходимо разработать инструментарий для расчета и детерминации весовых коэффициентов, которые будут характеризовать каждый конкретный сценарий. Далее будет представлена конфигурация отдельного элементарного модуля системы.

В таблице 1 сформован единый логический оператор (блок) до разработки эффективной структуры распределения ресурсов в пассажирской транспортной системе. ЛО является базовым элементом проектируемой системе распределения ресурсов. Элементарным показателем является оценочный функционал $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p, \dots, \varphi_m)$, который характеризует эффективность эксплуатации отдельных видов транспорта для отдельный взаимоисключающих

информационных ситуаций (ИС). Взаимоисключающие ИС среды находиться в состояниях $\Theta_j = Q_j P_j \in \Theta$. Под информационным состоянием (ИС) понимается классификация объектов пассажирской транспортной системы, каждый из которых требует индивидуального распределения ресурсов (финансирования) [13; 14].

Таблица 1.

Элементарная логическая матрица оценочного функционала для отдельных видов транспорта

R_1		Q – множество информационных ситуаций (ИС) для различных видов транспорта					\mathcal{E}_i^p – эффективность по критерию Байеса
		ИС ₁ – $Q_1 P_1$...	ИС ₂ – $Q_j P_j$...	ИС _n – $Q_n P_n$	
Φ – различные виды транспорта	φ_{c1}	f_{11}	...	f_{1j}	...	f_{1n}	$\mathcal{E}_{c1}^p = \sum_{j=1}^n P_j f_{j1}$

	φ_c	f_{i1}	...	f_{ij}	...	f_{mj}	$\mathcal{E}_{ci}^p = \sum_{j=1}^n P_j f_{jc}$

	φ_{cm}	f_{m1}	...	f_{in}	...	f_{mn}	$\mathcal{E}_{cm}^p = \sum_{j=1}^n P_j f_{jm}$

В пределах одного логического оператора (ЛО) полная совокупность взаимоисключающих ИС описывается набором вариантов $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_n)$, удовлетворяющих следующим условиям:

- Сумма вероятностей реализации каждого ИС равна единице
- Распределение ресурсов между ИС соответствует их относительной важности
- Общий объем ресурсов для ЛО остается константой.

$$\begin{cases} P_{ij} = P\{\Theta_j\}, \sum_{j=1}^n P_j = 1 \\ R_{ij} = R\{\Theta_j\}, \sum_{j=1}^n R_j = R_i^{no} \end{cases} \quad (1)$$

где P_{ij} – распределение вероятностей для j -го ИС, на i -ом виде транспорта на элементарном ЛО;

R_{ij} – оценочный показатель распределения ресурсов, соответ-

ствующих (тождественный) коэффициенту относительной важности при отдельном показателе эффективности для j -го ИС, на i -ом виде транспорта в элементарном ЛО;

$R_i^{ло}$ – оценочный показатель распределения ресурсов для i -ого вида транспорта в элементарном ЛО

Примем отдельный показатель эффективности как f_{ij} , который обозначает, что он принял конкретное численное значение, если среда находится в состоянии Θ_j . В данном случае мы оцениваем функционал отдельного вида транспорта на отдельном объекте пассажирской транспортной системы в элементарном ЛО. В качестве показателей могут эффективности выступать показатели производительности, показатели производственно-технической базы (ПТБ), экономические показатели, экологические показатели, показатели системы обеспечения безопасности движения и т.д. Тогда структура показателей для элементарного ЛО примет вид

$$\|F\| = \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Результаты и обсуждения

Для построения комплексной модели распределения ресурсов в пассажирском транспорте, интегрирующей все подсистемы (рис. 1), необходимо провести всестороннее исследование её функциональной архитектуры с учётом заданных ограничений, условий и допущений.

Очевидно, что критерии оценки эффективности для различных видов транспорта существенно зависят от конкретных условий эксплуатации, таких как особенности муниципальных образований или регионов. Следовательно, проектируемая структура системы должна обладать двумя ключевыми свойствами: полнотой охвата характерных информационных состояний и гибкостью адаптации к специфическим прикладным контекстам. Для решения этой задачи целесообразно обратиться к понятийному аппарату теории многоуровневых иерархических систем [3], адаптировав его к потреб-

ностям настоящего исследования. В рамках классического подхода данной теории [3] архитектура системы формируется через выделение отдельных страт (рисунок 2), что позволяет эффективно организовать сложные взаимосвязи между элементами системы.

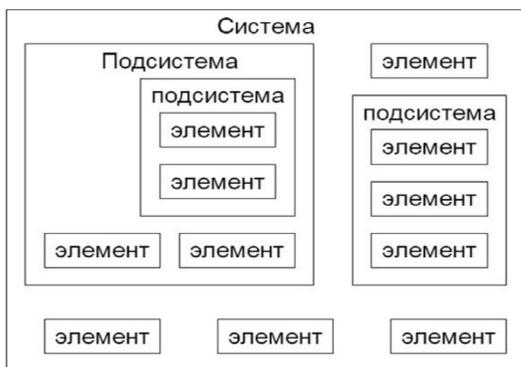


Рис. 1. Общая форма представления сложной системы [3]

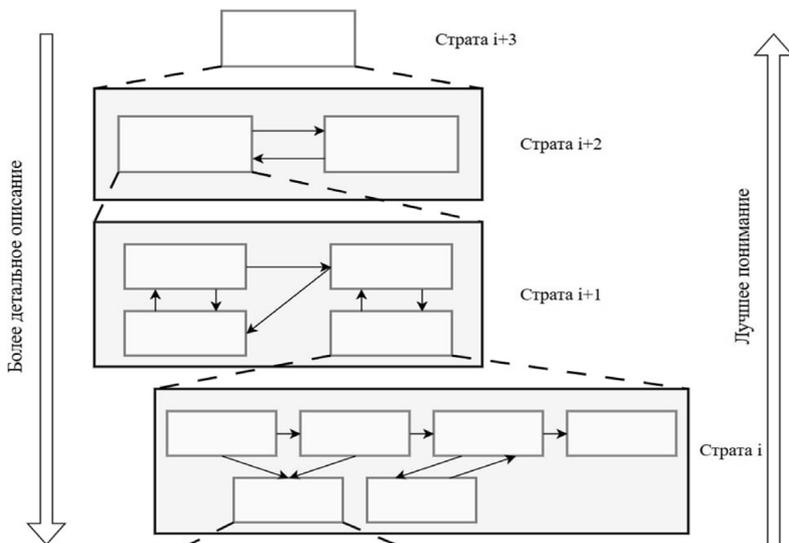


Рис. 2. Представление иерархической системы с применением понятия «страта» [3]

Согласно рисунку 2, каждая страта системы объединяет эле-

менты с установленными взаимосвязями и выявленными закономерностями взаимодействий. Произвольное расположение функциональных компонентов внутри страты создает внутреннюю энтропию системы. Для управления распределением пассажиропотока между различными видами транспорта вводится понятие логического оператора (ЛО). Совокупность ЛО в пределах одного эшелона обозначается как «район», что формирует дифференцированную структуру показателей на первом уровне управления ресурсами. Согласно теории многоуровневых систем, ЛО располагаются на нижнем иерархическом уровне и выступают объектами управления (рисунок 3).

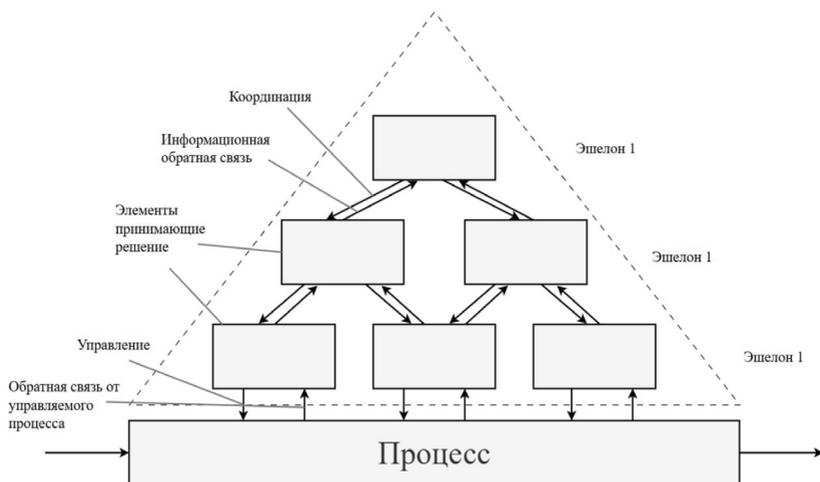


Рис. 3. Много-эшелонная иерархическая система принятия решений [3]

Нижний уровень управления включает множество логических операторов (ЛО), воздействующих на различные аспекты производственного процесса. В транспортной отрасли это соответствует традиционному разделению на функциональные подсистемы: организацию перевозок, техническую эксплуатацию, материально-техническое снабжение и управление персоналом.

В рамках архитектуры системы группы одноуровневых ЛО

объединяются в структурные блоки. Согласно классической теории стратификации, элементы могут группироваться как в пределах одного уровня (формируя «эшелон»), так и across различных уровней системы.

Для устранения терминологических противоречий в многоуровневых транспортных системах предлагается ввести понятие «район» как совокупность ЛО в пределах одного эшелона. Такая структура позволяет создать дифференцированную систему показателей распределения ресурсов на первом уровне управления:

$$\|F_1\| = \begin{bmatrix} f_{11}^{sr} & \dots & f_{1n}^{sr} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1}^{sr} & \dots & f_{mn}^{sr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

где f_{ij}^{sr} – оценочный функционал i -го вида транспорта ($i = 1 \dots m$) для j -го информационного состояния, тождественному измерителю или критерию эффективности ($j = 1 \dots n$) для s -го логического оператора ($s = 1 \dots k$) в r -ом «районе» или подсистеме транспортного производства ($r = 1 \dots p$).

Основу управленческой структуры пассажирских перевозок формирует базовый уровень, который выполняет двойную функцию: фиксирует текущее состояние системы и одновременно управляется как основной объект регулирования. В отличие от последующих уровней, структура первого иерархического уровня остается инвариантной относительно изменений целеполагания. Формирование вышестоящих уровней требует учета трех ключевых аспектов: включения строго определенного количества связей, отражающих целевые установки; реализации детерминированной последовательности вычислений, образующей упорядоченную систему взаимосвязей; и выбора оптимальной конфигурации из множества альтернативных структур. Вариативность моделирования обусловлена возможностью различной интерпретации значимости связей даже при фиксированном составе элементов. Следовательно, критически важным этапом проектирования становится сравнительный анализ multiple вариантов организации взаимосвязей

между уровнями системы.

Заключение

Структурно системы распределения ресурсов (РР-системы) представляют собой сложные динамические образования, состоящие из значительного и нестабильного количества элементов, которые классифицируются по качественным результативным показателям и требуют организации в виде отдельных подсистем. В состав этих систем входят как внутренние элементы, функционирующие в установленных границах – например, предприятия пассажирских перевозок, объекты инфраструктуры и сервисные организации по обслуживанию подвижного состава, – так и элементы внешней среды, такие как объёмы перевозок, изменчивая маршрутная структура и другие факторы. Связи между компонентами РР-систем носят иерархический и изменчивый во времени характер, а сама система функционирует в условиях значительной информационной неопределённости, обусловленной разнородностью влияющих факторов. Вследствие этой сложности объективная оценка эффективности РР-систем возможна только при использовании advanced аналитических инструментов, основанных на теории принятия решений в условиях неопределённости.

Список литературы

1. Перегудов, Ф. И., & Тарасенко, Ф. П. (1989). *Введение в системный анализ*. Москва: Высшая школа. 368 с. ISBN: 5-06-001569-6. EDN: <https://elibrary.ru/TFPWJJ>
2. Клир, Дж. (1990). *Системология. Автоматизация решения системных задач*. Москва: Радио и связь. 539 с.
3. Месарович, М., & Такахара, И. (1978). *Общая теория систем: математические основы*. Москва: Мир.
4. Попов, Э. В., Фоминых, И. Б., Кисель, Е. Б., & Шапот, М. Д. (1996). *Статические и динамические экспертные системы*. Москва: Финансы и статистика.
5. Сурмин, Ю. П. (2003). *Теория систем и системный анализ: учеб-*

- ное пособие*. Киев: МАУП. 368 с.
6. Купер, Дж., & Макгиллем, М. (1989). *Вероятностные методы анализа сигналов и систем*. Москва: Мир. 376 с.
 7. Отнес, Р., & Эноксон, Л. (1982). *Прикладной анализ временных рядов*. Москва: Мир. 428 с.
 8. Поспелов, Д. А. (1986). *Ситуационное управление: теория и практика*. Москва: Наука.
 9. Тарасенко, Ф. П. (2004). *Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем): учебник*. Томск: Издательство Томского университета. 186 с. ISBN: 5-7511-1838-3. EDN: <https://elibrary.ru/TFPWDF>
 10. Терентьев, А. В., Ефименко, Д. Б., & Карелина, М. Ю. (2017). Методы районирования как методы оптимизации автотранспортных процессов. *Вестник гражданских инженеров*, 6(65), 291–294. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-291-294>. EDN: <https://elibrary.ru/YPNFZF>
 11. Terentyev, A., Evtiukov, S., & Karelina, M. (2017). A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*, 36, 149–156.
 12. Moiseev, V. V., Terentiev, A. V., Stroeve, V. V., & Karelina, M. Yu. (2018). Enhancement of economic efficiency of transport performance using multi-criteria estimation. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 61, 167–171. EDN: <https://elibrary.ru/WHRSSR>
 13. Terentiev, A. V., Evtiukov, S. S., & Karelina, E. A. (2020). Development of zoning method for solving economic problems of optimal resource allocation to objects of various importance in context of incomplete information. В *Advances in Economics, Business and Management Research* (Т. 128, с. 765–772). *International Scientific Conference «Far East Con» (ISCFEC 2020)*.
 14. Terentyev, A. V., Karelina, M. Yu., Cherepnina, T. Yu., Linnik, D. A., & Demin, V. A. (2020). Digital object-oriented control models in automobile-road complex systems. *IOP Conference Series: Materials*

Science and Engineering, 832, 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012058>. EDN: <https://elibrary.ru/LTGFVW>

References

1. Peregudov, F. I., & Tarasenko, F. P. (1989). *Introduction to systems analysis*. Moscow: Vysshaya Shkola. 368 pp. ISBN: 5-06-001569-6. EDN: <https://elibrary.ru/TFPWJJ>
2. Klir, J. (1990). *Systemology. Automation of solving system problems*. Moscow: Radio i Svyaz. 539 pp.
3. Mesarovic, M., & Takahara, Y. (1978). *General systems theory: Mathematical foundations*. Moscow: Mir.
4. Popov, E. V., Fominykh, I. B., Kisel, E. B., & Shapot, M. D. (1996). *Static and dynamic expert systems*. Moscow: Finansy i Statistika.
5. Surmin, Yu. P. (2003). *Systems theory and systems analysis: Textbook*. Kyiv: MAUP. 368 pp.
6. Cooper, J., & McGilllem, C. D. (1989). *Probabilistic methods for signal and system analysis*. Moscow: Mir. 376 pp.
7. Otnes, R., & Enochson, L. (1982). *Applied time series analysis*. Moscow: Mir. 428 pp.
8. Pospelov, D. A. (1986). *Situational management: Theory and practice*. Moscow: Nauka.
9. Tarasenko, F. P. (2004). *Applied systems analysis (Science and art of problem solving): Textbook*. Tomsk: Tomsk University Press. 186 pp. ISBN: 5-7511-1838-3. EDN: <https://elibrary.ru/TFPWDF>
10. Terentyev, A. V., Efimenko, D. B., & Karelina, M. Yu. (2017). Zoning methods as methods for optimizing road transport processes. *Bulletin of Civil Engineers*, 6(65), 291–294. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-291-294>. EDN: <https://elibrary.ru/YPNFZF>
11. Terentyev, A., Evtiukov, S., & Karelina, M. (2017). A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*, 36, 149–156.
12. Moiseev, V. V., Terentyev, A. V., Stroeve, V. V., & Karelina, M. Yu. (2018). Enhancement of economic efficiency of transport perfor-

- mance using multi-criteria estimation. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 61, 167–171. EDN: <https://elibrary.ru/WHRSRR>
13. Terentiev, A. V., Evtiukov, S. S., & Karelina, E. A. (2020). Development of zoning method for solving economic problems of optimal resource allocation to objects of various importance in context of incomplete information. In *Advances in Economics, Business and Management Research* (Vol. 128, pp. 765–772). *International Scientific Conference «Far East Con» (ISCFEC 2020)*.
14. Terentyev, A. V., Karelina, M. Yu., Cherepnina, T. Yu., Linnik, D. A., & Demin, V. A. (2020). Digital object-oriented control models in automobile road complex systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 832, 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012058>. EDN: <https://elibrary.ru/LTGFWV>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Халтурин Роман Александрович, кандидат экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Управления координации научных исследований

*Государственный университет управления (ГУУ)
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация
ra_khalturin@guu.ru*

Судоргин Роман Олегович, кандидат экономических наук, научный сотрудник Управления координации научных исследований

*Государственный университет управления (ГУУ)
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация
ro_sudorgin@guu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Roman A. Khalturin, Ph.D. of Economic Sciences Associate Leading Research Researcher in Coordination Office

State University of Management
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation
ra_khalturin@guu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8499-3737>
SPIN-code: 8883-0316

Roman O. Sudorgin, Ph.D. of Economic Sciences Research Researcher in Coordination Office
State University of Management
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation
ro_sudorgin@guu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8499-3737>

Поступила 04.09.2025

После рецензирования 02.10.2025

Принята 05.10.2025

Received 04.09.2025

Revised 02.10.2025

Accepted 05.10.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-390

EDN: YQWEYY

УДК 656.022



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

А.П. Преображенский, Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович

Аннотация

Обоснование. В исследовании приведено рассмотрение задачи, связанной с распределением ресурсов внутри транспортной системы. Показано, каким образом происходит формирование многокритериальной модели. Выделена краткосрочная (текущее распределение ресурсов) и долгосрочная (стратегическое распределение ресурсов) задача. Дано обоснование использования многокритериального подхода. Структура транспортной системы представляется в виде графа. Подробно рассмотрены принципы распределения ресурсов в транспортной системе при различных условиях. Рассмотрены особенности решения задачи, связанной оптимизацией транспортной системы с точки зрения распределения взаимозависимых ограниченных ресурсов. Предлагаемые подходы являются универсальными, позволяющими учесть особенности различных транспортных компаний.

Цель – разработка модели, позволяющей оптимизировать распределение ресурсов внутри транспортной системы.

Материалы и методы. Основные методы исследования связаны с применением теории графов и многокритериальной модели.

Результаты. В данной статье подробным образом проведено рассмотрение основных принципов и особенностей распределения ресурсов в транспортной системе. Вследствие инвариантности используемых моделей они могут быть использованы в самых разных транспортных компаниях, требуется лишь осуществить настройку соответствующих

параметров. Результаты работы могут быть использованы в логистических компаниях для повышения эффективности их работы.

Ключевые слова: распределение ресурсов; транспортная система; модель; эффективность; оптимизация

Для цитирования. Преображенский, А. П., Аветисян, Т. В., & Львович, Я. Е. (2025). Оптимизация распределения ресурсов в транспортной системе. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 244–267. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-390>

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

OPTIMIZATION OF RESOURCE ALLOCATION IN THE TRANSPORT SYSTEM

A.P. Preobrazhenskiy, T.V. Avetisyan, Ya.E. Lvovich

Abstract

Background. The study considers the problem related to the distribution of resources within the transport system. It shows how a multi-criteria model is formed. A short-term (current allocation of resources) and a long-term (strategic allocation of resources) task is highlighted. The substantiation of the use of a multi-criteria approach is given. The structure of the transport system is presented in the form of a graph. The principles of resource allocation in the transport system under various conditions are considered in detail. The features of solving the problem related to the optimization of the transport system from the point of view of the distribution of interdependent limited resources are considered. The proposed approaches are universal, allowing you to consider the features of various transport companies.

Purpose. Development of a model that allows optimizing the distribution of resources within the transport system.

Materials and methods. The main research methods are related to the application of graph theory and the multi-criteria model.

Results. In the paper, the basic principles and features of the distribution of resources in the transport system are considered in detail. Due to the invariance of the models used, they can be used in a variety of transport companies, it is only necessary to configure the appropriate parameters. The results of the work can be used in logistics companies to improve the efficiency of their work.

Keywords: resource allocation; transport system; model; efficiency; optimization

For citation. Preobrazhenskiy, A. P., Avetisyan, T. V., & Lvovich, Ya. E. (2025). Optimization of resource allocation in the transport system. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 244–267. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-390>

Введение

Действующие в настоящее время транспортные системы были созданы с учетом запросов как потребителей, так и производственной сферы. Необходимо учитывать возможные изменения в транспортных компаниях вследствие воздействия экономических факторов. Кроме того, вследствие внедрения инструментов глобальной цифровизации определяет появление новых требований к соответствующим системам управления.

Транспортно-логистические системы активным образом внедряются в различные промышленные сферы [1; 2]. Для того, чтобы обеспечить высокую эффективность промышленных систем, необходимо реализовывать оптимизацию материальных ресурсов, уменьшать нагрузку на сотрудников на различных уровнях. Это происходит за счет централизованного управления. Важно также обеспечивать своевременный оперативный контроль. Системы функционируют на базе разработанных алгоритмов.

Управление человеческими ресурсами в транспортных системах [3] должно происходить с учетом следования принципам обеспечения высокого качества производственных процессов. Необходимо разрабатывать алгоритмы управления и оптимизации

человеческими ресурсами. При этом необходимо отслеживать связи между подразделениями на различных уровнях, поддерживать гибкую систему менеджмента. В ходе формирования оптимальной системы управления должен использоваться системный подход. При его использовании рассматриваются отдельные элементы транспортной системы и учитывается влияние внешней среды. Все операции с существующими ресурсами происходят с учетом того, как они будут влиять на взаимодействующие подсистемы [4].

В ходе рассмотрения технического состояния объектов транспортной системы необходимо вести планирование необходимых ресурсов. Важно распределять по различным видам работ технические объекты. В таком случае можно повысить эффективность использования различных ресурсов [5].

В ходе анализа трансграничной транспортной инфраструктуры [6] необходимо учитывать загрузку различных производственных мощностей, последовательным образом развивать транспортно-логистические объекты. При инфраструктурно-технологическом развитии трансграничных переходов большая роль принадлежит используемым ресурсам.

Таким образом, проведенное рассмотрение показало, что в ходе развития современных транспортных систем должен быть использован комплексный подход по управлению их ресурсами, базирующийся на методах системного анализа, оптимизации, многокритериальных моделей.

Цель данной работы – разработка модели, позволяющей оптимизировать распределение ресурсов в транспортной системе.

Формирование многокритериальной модели распределения ресурсов в транспортной системе

При рассмотрении транспортной системы, когда эффективным образом используются соответствующие ресурсы, возникают возможности для развития такой системы. Одной из ключевых целей в ходе организации и управления транспортной компании можно

считать осуществление рациональное распределение ресурсов среди различных ее компонентов. Цель достигается за счет того, что будут решены две задачи, которые являются взаимосвязанными.

В первой задаче, которая является краткосрочной, требуется преобразовывать существующие ресурсы и возможности транспортной системы в конкурентные преимущества. При этом происходит рост ее текущей эффективности. Чтобы решать такую задачу необходимо опираться на подходы, в которых учитывается, что ресурсы являются ограниченными.

Вторая задача является долгосрочной. При ее рассмотрении ресурсы создаются или развиваются. Виды ресурсного обеспечения будут оказывать влияние на решение задачи в транспортной системе. На рис. 1 дана иллюстрация того, как взаимосвязаны задачи. В ходе решения задачи будет реализовываться многокритериальный подход. В задаче будет реализовываться векторная оптимизация [7]. В транспортной системе проведем рассмотрение задачи, связанной с тем, как распределяются ресурсы между n -объектами.

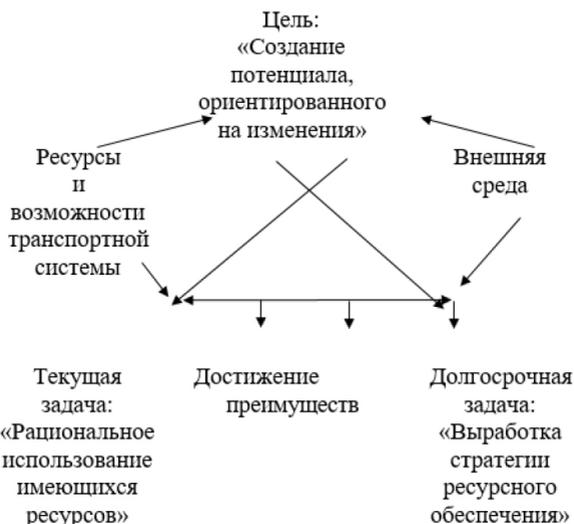


Рис. 1. Иллюстрация задачи, связанного с повышением эффективности транспортной системы

Предположим, что требуется определение вектора $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, для компонент $x_{n,i}$, $i = \overline{1, n}$, входящих в систему. То, как действует каждая из компонент описывается на основе критерия $\varphi_i(\bar{x})$. Критерий эффективности каждого из компонентов связан с целью распределения ресурсов. По ресурсам существуют определенные ограничения. Они будут связаны с функциями потребления $R_i(\bar{x})$, $i = \overline{1, m}$. Для этого формируются необходимые неравенства. Задача векторной оптимизации представляется следующим образом [7]:

$$\max \varphi_1(\bar{x}), \max \varphi_2(\bar{x}), \dots, \max \varphi_n(\bar{x}) \quad (1)$$

с учетом ограничений

$$R_i(\bar{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

В сокращенном виде задачу (1) -(2) мы можем представить так

$$\max \bar{\varphi}(\bar{x}), D = \left\{ \frac{\bar{x}}{R_i(\bar{x})} \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \right\}, \bar{x} \in D \quad (3)$$

при этом $\bar{\varphi}(\bar{x}) = (\varphi_1(\bar{x}), \varphi_2(\bar{x}), \dots, \varphi_n(\bar{x}))$. То есть, мы представили задачу, которая относится к распределению ресурсов. Здесь присутствует несколько критериев. Эти частные критерии будут образовывать вектор $\bar{\varphi}$. В чем здесь будет особенность? Задача будет отличаться от обычной задачи в математическом программировании. Отметим те факторы, которые оказывают влияние на природу многокритериальности.

Во-первых, в транспортных системах выделяются сложные цели. В связи с чем они являются сложными? Это вытекает из того, что требуется обеспечивать функциональную полноту показателей.

Во-вторых, существуют разные технические требования, которые связаны распределением ресурсов. Подобные требования во многих случаях будут представлены на основе системы неравенств

$$q_i(\bar{x}) \leq q_i^+, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Тогда искусственным образом можно ввести рассмотрение многокритериальности на базе критериев

$$\varphi_i(\bar{x}) = \begin{cases} 0, & \text{если } q_i(\bar{x}) \leq q_i^*; \\ -\alpha_i (q_i(\bar{x}) - q_i^*) & \text{в противном случае, } \alpha_i > 0. \end{cases} \quad (5)$$

Проверку условия удовлетворения требования (4) можно осуществить, когда решается задача

$$\max_{\bar{x} \in D} \varphi_i(\bar{x}), \dots, \max_{\bar{x} \in D} \varphi_n(\bar{x}). \quad (6)$$

В-третьих, рассматриваются транспортные системы с точки зрения их работы, чтобы обеспечить должную эффективность. Например, мы можем провести анализ задач по определению максимума функций $\bar{\varphi}(\bar{x}, u)$ в транспортной системе, когда ведется анализ по всем значениям параметра, которые лежат в некотором интервале:

$$\max_{\bar{x} \in D} \varphi_i(\bar{x}, u), \quad U \in [U^-, U^+] \quad (7)$$

Введение многокритериальности обеспечивается за счет того, что будет реализован анализ дискретного множества значений $U_i, U_i \in [U^-, U^+], i = 1, 2, \dots, m$. Есть для каждого параметра критерии

$$\varphi(\bar{x}) = \varphi(\bar{x}, u_i), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

Необходимо по любому критерию обеспечить максимум

$$\max_{\bar{x} \in D} \varphi_i(\bar{x}), \dots, \max_{\bar{x} \in D} \varphi_m(\bar{x}). \quad (9)$$

В-четвертых, структура транспортной системы характеризуется сложностью. Внутри системы выделяются подсистемы. Сложность вытекает из того, что в таких подсистемах будут разнородные цели. Аппарат исследования операций, в котором в основном существует одна целевая функция трудно применять для многокритериальных задач.

В этой связи, чтобы решать многокритериальные задачи требуется активным образом развивать различные методы. Представляет интерес проведение разработок различных методов решения с тем, чтобы учитывать соответствующие факторы в процессах принятия решений.

Транспортная система представляется как иерархическая. В такой иерархической системе можно выделить два уровня. Формируется граф (рис. 2).

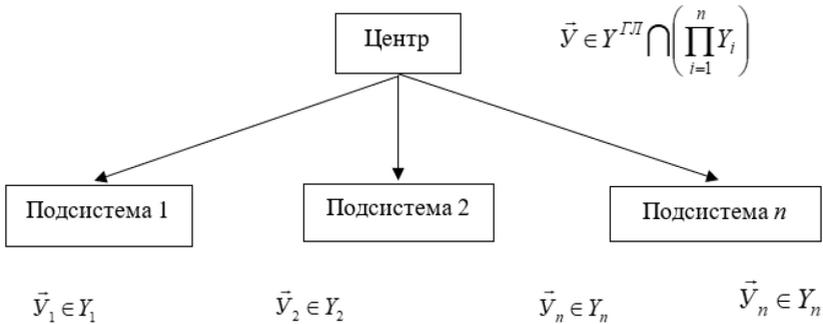


Рис. 2. Схема двух уровней в транспортной системе

В структуре транспортной системы можно также выделить набор переменных. На их основе задается состояние ее элементов. Внутри подсистем i происходит определение вектора \vec{y}_i состояния

$$\vec{y}_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{imi}), i \in I, \quad (10)$$

В таком представлении учитывается, что y_{ij} являются показателями подсистемы в транспортной системе. При этом m_i – является их количеством. Кроме того, $I = \{1, 2\}$ будет считаться множеством номеров подсистем. Следующей задачей является определение состояний системы. С тем, чтобы ее решить, требуется вести анализ для всех состояний подсистем

$$\vec{y} = (y_i, i \in I). \quad (11)$$

В подсистеме важно знать ограничения. Для этого можно задавать множество всех состояний, которые можно реализовать в транспортной системе

$$\vec{y}_i \in Y_i, i \in I, \quad (12)$$

множество состояний подсистемы локальным образом допустимых считается как Y_i .

Вектор затрат \vec{V}_i и вектор выпуска $\vec{U}_i : \vec{y}_i (\vec{V}_i, \vec{U}_i)$ достаточно часто рассматривают, чтобы дать описание транспортной системы [7]. Можно рассматривать количество видов затрачиваемых m_i^3 и производимых m_i^4 ресурсов, что позволяет определить размерности векторов затрат и выпуска:

$$\vec{V}_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{im_i}), \vec{U}_i = (U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{im_i'}) \quad (13)$$

в компонентах V_{ij} U_{ij} учитываются затраты и выпуски j -го вида, которые производятся транспортной системой. Множеству состояний транспортной системы Y^{zt} , которые глобально-допустимые, будут соответствовать некоторые глобальные ограничения:

$$\vec{y} \in Y^{zt} \quad (14)$$

Есть декартовое произведение $\prod_{i \in I} Y_i$ множеств локально-допустимых состояний подсистем. Указанные множества пересекаются, что дает ограничение

$$\vec{y} \in Y, Y = Y^{zt} \prod_{i \in I} \left(\prod Y_i \right). \quad (15)$$

При этом общий эффект от применения ресурса должен быть максимальный. Это учитывается в начальных данных. Пусть общий объем однородного ресурса в центре будет R . Всего Π подсистем делят ресурс. Между ними будет происходить его распределение. Предположим, что максимальный эффект от применения ресурса в количестве V_i в потребляющей подсистеме i мы можем определить на основе функции дохода $U_i = D(Y_p, M_i)$. При этом M_i является количеством ресурса, которое дает максимальный эффект для потребляющей подсистемы i . Считаем функцию дохода монотонной для области $0 \leq V_i \leq M_i$. Для анализируемой модели, связанной с распределением ресурса состояние каждой потребляющей подсистемы, мы можем задавать при помощи пары $\vec{y}_i = (V_i, U_i)$. Потребляющие подсистемы имеют заинтересованность в том, чтобы ресурс был применен при максимальной эффективности. Соответствующие целевые функции для подсистем будут приниматься функции, характеризующиеся максимальным доходом $D_i(V_i, M_i)$, $i \in I$.

В транспортной системе в качестве целевой функции в общем рассматривается суммарное поступление ресурса

$$\Phi(\vec{y}, \vec{M}) = \sum_{i \in I} D_i(V_i, M_i). \quad (16)$$

Необходимо определить пути распределения ресурсов. С этой целью необходимо оценить степень централизации механизма работы транспортной системы. При этом относительно функций эф-

фактивности соответствующих подсистем рассматривается степень информированности центра. Рассматривается максимальное поступление ресурса. В качестве модельной функции будем считать

$$D_i(V_i, M_i) = A \left[1 - \left(1 - \frac{V_i}{M_i} \right)^{\alpha_i} \right], \alpha_i \geq 1, \quad (17)$$

здесь $A_i = D_i(M_i, M_i)$ – является максимально возможным поступлением ресурса или максимально возможными потерями потребляющей подсистемы i .

Есть два параметра модели для всех функций поступления ресурса (17). Первый из них – максимальное количество ресурса A_i . Второй – максимальное требуемое количество ресурса M_i . Будем считать, что есть полная централизация. В таком случае центр имеет информацию о параметрах A_i и M_i . При этом задача распределения ресурса будет сведена к следующей оптимизационной задаче:

$$\max_{\Pi} \sum_{i \in I} D_i(\Pi_i, M_i), \sum_{i \in I} \Pi_i \leq R, 0 \leq \Pi_i \leq M_i, i \in I. \quad (18)$$

Проведем рассмотрение случая, когда есть неполная информированность центра транспортной системы. Тогда потребителями информации производится подача заявки $\vec{S} = (S_1, S_2, \dots, S_n)$ по требуемому для него количеству ресурса. Исходя из полученных заявок происходит распределение ресурса R . При этом применяется некоторый принцип (закон планирования) $\vec{\Pi}(\vec{S}) = (\Pi_1(\vec{S}), \Pi_2(\vec{S}), \dots, \Pi_n(\vec{S}))$ так, что $\sum_{i \in I} \Pi_i(\vec{S}) \leq R$. Принимая во внимание полную централизацию планирования относительно распределения ресурса, $\vec{\Pi}(\vec{S})$ можно записать такие выражения:

$$D_i(\Pi_i(\vec{S}), M_i), i \in I, \sum_{i \in I} D_i(\Pi_i(\vec{S}), M_i) \quad (19)$$

Принципы распределения ресурсов

Мы исходим из того, что принцип распределения ресурсов будет выполняться в транспортной системе. В решении \vec{S}^0 соответствующей игровой модели в таком случае то количество ресурса, которое получается для каждого из потребителей равно заявленному количеству $(\Pi_i(\vec{S}^0) = S_i^0, i \in I)$. Проведем рассмотрение особен-

ностей трех принципов, которые связаны с тем, как будут распределяться ресурсы.

1. Принцип, направленный на то, чтобы распределение было пропорциональным

$$\Pi_i(\vec{S}) = \begin{cases} S_i, & \text{если } \sum_{i \in I} S_i \leq R, \\ \frac{S_i R}{\sum_{i \in I} S_i}, & \text{если } \sum_{i \in I} S_i \triangleright R. \end{cases} \quad (20)$$

Дефицит ресурса будет основываться на таком выражении $\sum_{i \in I} M_i \triangleright R$. Об абсолютно оптимальной стратегии $S_i^0 = Q_i, i \in I$ можно говорить для любого из потребителей. Она является единственной. Для потребителя i максимальные потребности характеризуются на основе оценки Q_i . Завышение заявок по ресурсу будет рассматриваться как тенденция в анализируемой транспортной системе. Чем больше степень неинформированности центра, тем большее значение. В таких случаях наблюдается превышение Q_i над M_i .

2. Принцип, который базируется на оптимальном распределении.

В центр потребителями происходит сообщение оценок S_i величин $M_i, i \in I$. Происходит решение задачи по оптимальному распределению ресурсов при критерии максимума суммарного дохода:

$$\max_{\Pi} \sum_{i \in I} D_i(\Pi_i, S_i), \quad \sum_{i \in I} \Pi_i \leq R, \quad \Pi_i \leq S_i, \quad i \in I. \quad (21)$$

3. Принцип, который базируется на обратных приоритетах.

Приоритет потребителя, когда распределяются ресурсы тем выше, чем меньше количество ресурса он заказывает. В качестве показателя приоритета выступает величина A_i / S_i :

$$\Pi_i(\vec{S}) = \begin{cases} S_i, & \text{если } , \\ \min \left(S_i, \frac{A_i}{\sum_{i \in I} \frac{A_i}{S_i}} R \right), & \text{если } \sum_{i \in I} S_i \triangleright R. \end{cases} \quad (22)$$

В качестве оптимальной стратегии потребителей будет

$$S_i = \frac{\sqrt{A_i}}{\sum_{i \in I} \sqrt{A_i}} R, i \in I, \tag{23}$$

учитываем, что $\Pi_i(\bar{S}^0) = S_i^0$, то есть принцип обратных приоритетов рассматривается как эффективный. Когда свертка частных критериев не обозначается, тогда есть трудности, связанные с определением наилучших решений, когда даже наблюдается полная централизация в системе. Поэтому на практике применяются многокритериальные задачи. В них распределяются ресурсы в транспортной системе, являющейся иерархической. При этом будет ограниченность по однокритериальным задачам распределения ресурсов. Дадим анализ по некоторым задачам, связанным с распределением однородных ресурсов. Требуется распределение однородного ресурса в объеме x^0 среди n объектов или подсистем. Каждая из подсистем описывается на основе функции

$$\varphi_i(\bar{x}) i = 1, 2, \dots, n. \tag{24}$$

Максимизация суммарного эффекта связана с тем какая цель распределения

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i(\bar{x}) \rightarrow \max \tag{25}$$

с учетом ограничений

$$\sum_{i=1}^n x_i = x^0, \tag{26}$$

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

Помимо (25) мы можем рассмотреть обратную задачу, связанную с распределением ресурсов. Требуется определить соответствующее минимальное значение объема по ресурсу x^0 и таким образом осуществить распределение его среди n подсистем, чтобы значение суммарного эффекта было бы не меньше определенного заданного значения Φ^0 .

$$x^0 = \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \min \tag{27}$$

с учетом ограничений

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i(\bar{x}) \geq \Phi^0, x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n. \tag{28}$$

Происходит обобщение задачи (25) на случай, когда ресурсы в транспортной системе неоднородные. Всего рассматривается m групп ресурсов $x_j, j = 1, 2, \dots, m$. При этом x_{ij} – количество ресурса типа j , который будет потребляться подсистемой i . Когда эффект от применения ресурса подсистемой i равняется $\varphi_i(\vec{x})$, тогда задачу максимизации суммарного эффекта запишем так:

$$x^0 = \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \max \quad (29)$$

С учетом ограничений

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m x_{ij} &= x_j^0, j = 1, 2, \dots, m, \\ x_{ij} &\geq 0, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (30)$$

Условия оптимальности Куна-Таккера [8] и методы динамического программирования являются основой для алгоритмов решения задач типа (25)-(29) по некоторым специальным видам функции $\varphi_i(\vec{x})$. Все проанализированные задачи связаны с тем, что существует один критерий эффективности. Для реальных систем степень эффективности их работы может быть оценена на базе нескольких показателей, помимо этого, требуется проводить учет самостоятельным образом критерии эффективности в составляющих подсистемах.

Осуществление оптимизации транспортной системы с точки зрения распределения взаимозависимых ограниченных ресурсов

Одной из задач повышения эффективности транспортной системы является поддержка в ней сбалансированного равновесия ресурсов за счет того, что путем оптимального образа распределяются ограниченные ресурсы. Предположим, что есть некоторая определенная структура в системе. Она сформирована за счет координирующего центра и подсистем. В центре существует некоторый вектор ресурсов $\vec{\omega} = (\omega_1^0, \omega_2^0, \dots, \omega_m^0)$ разного вида. При этом в качестве неизвестных рассматриваются объемы тех ресурсов каждого вида $\tilde{\omega}_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$, которые выделяются для

подсистем. Если требуется, то проводится рассмотрение объемов ресурсов с привлечением соответствующих нормировок. Есть ограничения по тому, как будет выделяться соответствующий ресурс каждого вида с точки зрения минимального \tilde{d}_{ij}^- и максимального объемов \tilde{d}_{ij}^+ , $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$. Ресурсы снизу и сверху имеют соответствующие ограничения g_i^- и g_i^+ . Это определяется тем, какие в транспортной системе по подсистемам $i = 1, 2, \dots, n$ объемы потребления по ресурсам разных видов. Центром внутри системы ведется распределение ресурсов. При этом исходим из того будет выделен для любой из подсистем максимальный суммарный объем по всем ресурсам. В таком случае для транспортной системы задача сводится к такой задаче векторной оптимизации:

$$\max \sum_{j=1}^m x_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (31)$$

с учетом ограничений по объемам ресурсов

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = x_j^0, j = 1, 2, \dots, m, \quad (32)$$

$$x_{ij}^- \leq x_{ij} \leq x_{ij}^+, i = 1, 2, \dots, m, \quad (33)$$

при условиях взаимосвязи ресурсов

$$\sum_{j=1}^m \tilde{n}_{ij} x_{ij} \geq g_i^-, i = 1, 2, \dots, n, \quad \sum_{j=1}^m d_{ij} x_{ij} \leq g_i^+, i = 1, 2, \dots, n. \quad (34)$$

Могут быть получены разные виды в линейной зависимости ресурсов, что определяется зависимостью от того, какие значения коэффициентов взаимосвязи $\tilde{n}_{ij}, d_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$. Центр анализируемой транспортной системы будет решать задачу, связанную с тем, что определяется вид свертки. Относительная важность подсистем должна быть учтена в центре. Проведем анализ двух схем компромисса, которые задаются на базе аддитивной свертки [9] по частным критериям оптимальности

$$\hat{O}_1(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi_i(\bar{x}) \quad (35)$$

и при помощи свертки в рамках принципа результата

$$\hat{O}_2(\bar{x}) = \min_{1 \leq i \leq n} \phi_i(\bar{x}) / \alpha_i \quad (36)$$

При этом $\alpha_i > 0$ является относительной важностью в частных критериях оптимальности $\phi_i, i = 1, 2, \dots, n$. Задача (35), в которой проводится рассмотрение обобщенного критерий \hat{O}_1 , анализируется в виде задачи линейного программирования. Осуществлять процесс ее решения можно за счет того, что применяются общие методы, на основе которых проводится решение задач в линейном программировании. Предположим, что требуется осуществить процесс распределения вектора ресурсов среди подсистем, если ведется обозначение нижних и верхних границ по общему потреблению всех видов ресурсов в любой из подсистем. Следует считать, что значения коэффициентов взаимосвязи по ресурсам равны: $c_{ij} d_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$. Важно осуществить замену интервальных ограничений по объемам потребления любой из подсистем для видов ресурсов на то, что будут условия, связанные с неотрицательностью таких объемов, при этом:

$$x_{ij}^- = 0, x_{ij}^+ = \infty, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (37)$$

тогда приходим к экстремальной задаче:

$$\hat{O}_2(\bar{x}) = \min_{1 \leq i \leq n} \left(\sum_{j=1}^m x_{ij} / \alpha_i \right) \rightarrow \max \quad (38)$$

с учетом условий

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_{ij} &= x_j^0, j = 1, 2, \dots, m, \\ x_{ij} &\geq 0, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (39)$$

$$g_i^- \leq \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq g_i^+, i = 1, 2, \dots, n,$$

В представленных выражениях ограничения вида равенства рассматриваются в виде требований по объемам ресурсов каждого вида. При этом для общего потребления по всем видам ресурсов любой подсистемы в транспортной системе будет отражение двусторонних ограничений по взаимосвязи ресурсов. Чтобы изучить свойства такой задачи и обеспечить методы ее решения проведем

рассмотрение вспомогательной задачи. В ней осуществлена замена ограничений по объему каждого вида ресурсов на ограничения, относящиеся к общему объему по всем видам ресурсов, которые будут получаться при суммировании уравнений, которые приведены в (39).

Предположим, что

$$\hat{O}_{A_1}(\bar{x}) = \min_{1 \leq i \leq n} \left(\sum_{j=1}^m x_{ij} / \alpha_i \right) \rightarrow \max \quad (40)$$

с учетом ограничений

$$\sum_{i=1, j=1}^{n, m} x_{ij} = z^0, \quad g_i^- \leq \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq g_i^+, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (41)$$

здесь $z^0 = \sum_{j=1}^m x_j^0$. При помощи замены $z_i = \sum_{j=1}^m x_{ij}$ мы приведем к такому виду задачу (40):

$$\hat{O}_{A_2}(\bar{z}) = \min_{1 \leq i \leq n} z_i / \alpha_i \rightarrow \max \quad (42)$$

с учетом ограничений

$$\sum_{i=1}^n z_i = z^0, \quad g_i^- \leq z_i \leq g_i^+, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (43)$$

Задача (42) рассматривается в виде задачи по распределению независимых ресурсов в транспортной системе. Исходя из того, что в задаче (42) есть множество оптимальных решений, необходимо стремиться к тому, чтобы достигать цели подсистем и транспортной системы в общем по множеству таких решений:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = z_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = x_j^0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (44)$$

При этом важно, чтобы в подсистеме i происходило распределение общего объема выделяемого для нее ресурса z_i среди видов ресурсов при учете того какая приоритетность соответствующих ресурсов в подсистеме. Будем считать, что происходит задание приоритетности видов ресурсов в подсистеме i на базе коэффициентов важности $a_{ij} > 0, j = 1, 2, \dots, m$. В таком случае, основываясь на условии максимизации по объему любого вида ресурсов и на основе того, что применяется принцип результата, приходим к критерию эффективности подсистемы в транспортной системе

$$f_i(\bar{x}) = \min_{1 \leq j \leq m} x_{ij} / a_{ij} \rightarrow \max, i = 1, 2, \dots, n. \quad (45)$$

При этом задается тип свертки в частных критериях оптимальности. Проводя учет по принципу справедливого распределения ресурсов, мы выберем схему компромисса, которая будет реализована на основе принципа результата

$$F(\bar{x}) = \min_{1 \leq i \leq n} f_i(\bar{x}) / a_i \rightarrow \max. \quad (46)$$

Дадим анализ задачи (44)-(46). Если частный критерий оптимальности будет подставлен из (45) в (46), есть возможность для того, чтобы представить таким образом обобщенный критерий оптимальности

$$F(\bar{x}) = \min_{1 \leq i \leq n} \min_{1 \leq j \leq m} x_{ij} / (a_{ij} \alpha_i) \rightarrow \max. \quad (47)$$

Если ввести замену $\tau_{ij} = x_{ij} / \beta_{ij}$, $\beta_{ij} = a_{ij} \alpha_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, мы задачу (44)-(46) представим так

$$F(\bar{\tau}) = \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \tau_{ij} \rightarrow \max \quad (48)$$

с учетом условий

$$\sum_{j=1}^m \beta_{ij} \tau_{ij} = z_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \tau_{ij} = x_j^0, i = 1, 2, \dots, n, \quad \tau_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m. \quad (49)$$

В задаче (48) оптимальное значение критерия F^* записывается так

$$F^* = \min \left(\min_{1 \leq i \leq n} \frac{z_i}{\sum_{j=1}^m \beta_{ij}}, \min_{1 \leq i \leq m} \frac{x_i^0}{\sum_{j=1}^n \beta_{ij}} \right). \quad (50)$$

Будем считать, что происходит достижение минимума в (50) для одного из анализируемых $m + n$ выражений. Осуществим рассмотрение отдельным образом случаев, если реализуется его достижение для одного из первых n выражений, когда $i = i_0$. Предположим, что будет реализован первый случай. Проведем обозначение минимального значения выражения, которое находится в правой части (50) как W

$$W = \frac{z_{i_0}}{\sum_{j=1}^m \beta_{i_0 j}}. \quad (51)$$

Проведем формирование допустимого решения задачи (48) таким образом

$$\tau_{ij} = W + \delta_{ij}, \delta_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m. \quad (52)$$

Осуществляя подстановку такого значения в систему ограничений, придем к системе уравнений, чтобы найти δ_j

$$\sum_{j=1}^m \beta_{ij} \delta_{ij} = z_i - W \sum_{j=1}^m \beta_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, \quad \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \delta_{ij} = x_j^0 - W \sum_{i=1}^n \beta_{ij}, j = 1, 2, \dots, m. \quad (53)$$

Проводя деление первых n уравнений на $\sum_{j=1}^m \beta_{ij}$ последних m уравнений на $\sum_{i=1}^n \beta_{ij}$, придем к таким уравнениям

$$\sum_{j=1}^m \frac{\beta_{ij}}{\sum_{j=1}^m \beta_{ij}} \delta_{ij} = \frac{z_i}{\sum_{j=1}^m \beta_{ij}} - W, i = 1, 2, \dots, n, \quad \sum_{j=1}^m \frac{\beta_{ij}}{\sum_{i=1}^n \beta_{ij}} \delta_{ij} = \frac{x_j^0}{\sum_{i=1}^n \beta_{ij}} - W, j = 1, 2, \dots, m. \quad (54)$$

В правых частях представленных уравнений, поскольку выбирается W , придем к тому, минимальные значения в выражениях в (50) будут неотрицательными. В этой связи есть решение системы, в котором есть неотрицательные значения переменных $\delta_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$. В итоге будет достижение значения критерия $\min_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m} \tau_{ij} = W$ по компонентам решения $\tau_{ij}, j = 1, 2, \dots, m$. Можно делать выбор остальных компонент в решении неоднозначным образом по решениям системы (54). При этом является целесообразным в ходе выбора таких компонент осуществлять применение принципа справедливого компромисса. В таких случаях будет сведение решения задачи (48) к тому, что будет осуществляться решение последовательности экстремальных задач, которые являются вложенными и однотипными. Любая из рассматриваемых задача будет иметь отличие от предыдущей в том, что сокращаются компоненты вектора неизвестных вследствие того, что компоненты, которые однозначным образом определены в ходе решения предыдущих задач, будут исключены. Важно осуществлять коррекцию по ресурсным ограничениям задач. Для решения задач опираемся на такой алгоритм.

1. Проводится определение

$$W = \min \left(\min_{1 \leq i \leq n} \frac{z_i}{\sum_{j=1}^m \beta_{ij}}, \min_{1 \leq j \leq m} \frac{x_j^0}{\sum_{i=1}^n \beta_{ij}} \right) \quad (55)$$

а также компоненты $i = i_0$ (или $j = j_0$), для которой происходит достижение минимума.

2. Считаем, что $\tau_{i_0 j} = W, j = 1, 2, \dots, m$ (или $\tau_{i_0 j} = W, i = 1, 2, \dots, n$).

3. Проводим исключение компонентов вектора $\bar{z}, \tau_{i_0 j}, j = 1, 2, \dots, m$, из рассмотрения. Исходим из того, что $x_j^0 = x_j^0 - W\beta_{i_0 j}, j = 1, 2, \dots, m$, полагаем $n = n - 1$ (или ведем исключение компонент $\tau_{i_0 j}, i = 1, 2, \dots, n$ из рассмотрения, записываем $z_{i^*} = z_i - W\beta_{i_0 i}, i = 1, 2, \dots, n$, считаем, что $m = m - 1$).

4. Компоненты подвергаются перенумеровыванию. Осуществляем повторение вычислений с шага 1 до того, как будут определены все компоненты в векторе \bar{z} .

Чтобы определить решение в рамках рассматриваемого алгоритма, необходимо реализовывать $m + n$ итераций. На любой из них ведется решение задачи, связанной с тем, что определяется минимальный элемент внутри числовой последовательности. В итоге, проведено сведение решения задачи по распределению взаимозависимых ресурсов в транспортной системе к тому, что осуществляется решение последовательности экстремальных задач. При этом по всем уровням происходит поддержка принципа равноправного распределения ресурсов (то есть, принципа гарантированного результата) при учете того, что есть относительная важность подсистем и видов ресурсов [10].

Заключение

1. Проведена постановка задачи по выбору функций управления в транспортной системе. Рассматривается двухуровневая модель управления, в которой происходит оптимизация распределяемых ресурсов. Указана модельная функция, которая для этого требуется.

2. Приведены ключевые принципы, на которых базируется распределение ресурсов. Показано, когда требуется опираться на условия оптимальности Куна-Таккера.

3. Рассмотрена задача распределения взаимозависимых ограниченных ресурсов и вспомогательная к ней задача. Приведен алгоритм коррекции по ресурсным ограничениям в транспортной системе.

Список литературы

1. Дунаенко, Н. А., & Кудрявцева, Т. Ю. (2022). Управление ресурсами и цифровизация транспортной логистики. *Экономические науки*, 4(209), 81–89. <https://doi.org/10.14451/1.209.80>. EDN: <https://elibrary.ru/GDAIEF>
2. Миркина, О. Н. (2024). Цифровизация в деятельности предприятий транспортной отрасли России. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(2), 145–157. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-317>. EDN: <https://elibrary.ru/OEOUCC>
3. Мальцева, М. В. (2018). Управление человеческими ресурсами в системе менеджмента качества транспортного предприятия. *Вестник университета*, 2, 64–69. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2018-2-64-69>. EDN: <https://elibrary.ru/YUPHVX>
4. Коновалова, Т. В., Домбровский, А. Н., Надирян, С. Л., & Коцурба, С. В. (2024). Формирование и пути оптимизации транспортных затрат производственного предприятия. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(2), 169–180. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-283>. EDN: <https://elibrary.ru/JCLRUR>
5. Карагодин, В. И. (2024). Распределение наземных транспортных и транспортно-технологических средств по объектам и видам работ с учётом их технического состояния. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(3), 77–99. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-3-309>. EDN: <https://elibrary.ru/SFOAPK>
6. Король, Р. Г. (2024). Моделирование транспортных процессов

- при формировании и развитии трансграничной инфраструктуры. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(4), 134–153. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-323>. EDN: <https://elibrary.ru/LTYYNJ>
7. Tunik, A., & Sushchenko, O. (2013). Usage of vector parametric optimization for robust stabilization of ground vehicles information-measuring devices. *Proceedings of National Aviation University*, 4(57), 23–32. EDN: <https://elibrary.ru/RTUFUX>
 8. Данданян, А. Н., Хайдарова, Л. А., & Курганова, М. В. (2020). Решение задач нелинейного программирования по условиям Куна-Таккера. *Наука XXI века: актуальные направления развития*, 1–2, 24–27. EDN: <https://elibrary.ru/JLDZQK>
 9. Заставный, В. П., & Савчук, В. В. (2011). Приближение классов свёрток линейными операторами специального вида. *Математические заметки*, 90(3), 351–361. <https://doi.org/10.4213/mzm8545>. EDN: <https://elibrary.ru/RLRHON>
 10. Фомичева, И. В., Юдина, О. В., & Поляков, Д. В. (2024). Экспертная оценка относительной ответственности управляющего в исполнении подсистем бизнес-плана. *Научные исследования и разработки. Экономика*, 12(1), 36–40. <https://doi.org/10.12737/2587-9111-2024-12-1-36-40>. EDN: <https://elibrary.ru/VBAGYC>

References

1. Dunaenko, N. A., & Kudryavtseva, T. Yu. (2022). Resource management and digitalization of transport logistics. *Economic Sciences*, 4(209), 81–89. <https://doi.org/10.14451/1.209.80>. EDN: <https://elibrary.ru/GDAIEF>
2. Mirkina, O. N. (2024). Digitalization in the activities of Russian transport enterprises. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(2), 145–157. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-317>. EDN: <https://elibrary.ru/OEOUCC>
3. Maltseva, M. V. (2018). Human resource management in the quality management system of a transport enterprise. *Bulletin of the University*, 2, 64–69. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2018-2-64-69>. EDN:

<https://elibrary.ru/YUPHVX>

4. Konovalova, T. V., Dombrovsky, A. N., Nadiryan, S. L., & Kotsurba, S. V. (2024). Formation and ways to optimize transport costs of a manufacturing enterprise. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(2), 169–180. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-283>. EDN: <https://elibrary.ru/JCLRUR>
5. Karagodin, V. I. (2024). Distribution of ground transport and transport-technological means across facilities and types of work considering their technical condition. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(3), 77–99. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-3-309>. EDN: <https://elibrary.ru/SFOAPK>
6. Korol, R. G. (2024). Modeling transport processes in the formation and development of cross-border infrastructure. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(4), 134–153. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-323>. EDN: <https://elibrary.ru/LTYYNJ>
7. Tunik, A., & Sushchenko, O. (2013). Usage of vector parametric optimization for robust stabilization of ground vehicles information measuring devices. *Proceedings of National Aviation University*, 4(57), 23–32. EDN: <https://elibrary.ru/RTUFUX>
8. Dandanyan, A. N., Khaidarova, L. A., & Kurganova, M. V. (2020). Solving nonlinear programming problems under Kuhn-Tucker conditions. *Science of the XXI Century: Current Development Trends*, 1–2, 24–27. EDN: <https://elibrary.ru/JLDZQK>
9. Zastavny, V. P., & Savchuk, V. V. (2011). Approximation of convolution classes by linear operators of a special type. *Mathematical Notes*, 90(3), 351–361. <https://doi.org/10.4213/mzm8545>. EDN: <https://elibrary.ru/RLRHON>
10. Fomicheva, I. V., Yudina, O. V., & Polyakov, D. V. (2024). Expert assessment of the relative responsibility of the manager in the execution of business plan subsystems. *Scientific Research and Development. Economics*, 12(1), 36–40. <https://doi.org/10.12737/2587-9111-2024-12-1-36-40>. EDN: <https://elibrary.ru/VBAGYC>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий

Воронежский институт высоких технологий

ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация

app@vivt.ru

Аветисян Татьяна Владимировна, преподаватель

Колледж Воронежского института высоких технологий

ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация

vtatyana_avetisyan@mail.ru

Львович Яков Евсеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий

Воронежский институт высоких технологий

ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация

office@vivt.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Andrey P. Preobrazhenskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies

Voronezh Institute of High Technologies

73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation

app@vivt.ru

SPIN-code: 2758-1530

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6911-8053>

ResearcherID: A-5832-2019

Scopus Author ID: 14122417700

Tatyana V. Avetisyan, teacher

College of Voronezh Institute of High Technologies

73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation

vtatyana_avetisyan@mail.ru

SPIN-code: 3062-9901

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-6070>

Scopus Author ID: 58079888600

Yakov E. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies
Voronezh Institute of High Technologies

73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation

office@vivt.ru

SPIN-code: 9029-3251

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7051-3763>

Scopus Author ID: 57193738839

Поступила 15.04.2025

После рецензирования 22.05.2025

Принята 01.06.2025

Received 15.04.2025

Revised 22.05.2025

Accepted 01.06.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-397

EDN: DQZIBP

УДК 656.072.6



Научная статья | Логистические транспортные системы

АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВОКЗАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В.И. Ульяницкая

Аннотация

Обоснование. В исследовании рассмотрена сложность обработки информационных потоков железнодорожных вокзальных комплексов (далее – ЖВК), ввиду непрерывности, массовости, разнородности поступающей информации для клиента, а также отсутствию информационной логистической системы железнодорожного вокзала, как самого фактора управляемости. Задачей такого типа является поиск организационных решений по повышению эффективности функционирования системы управления, на основе параметров информационных потоков ЖВК.

Отличительным решением применительно к ЖВК, в нашем случае рассматривается необходимость интеграции моделей коммуникаций, и их трансформация в жизненный цикл ЖВК. Предлагается, что, скорректировав жизненный цикл системы ЖВК, с учетом возможных погрешностей и влияния информационных потоков, позволит выявить закономерности, в основании которых лежат предпосылки к обращениям пассажиров.

Цель – повышение эффективности управления ЖВК, на основе учета и оптимизации параметров информационных потоков.

Материалы и методы. В работе используются методы практического и теоретического уровня: причинно-следственные связи, картирование и анализ данных анализ и др.

Результаты. Определение принципов функционирования коммуникационной среды и информационных потоков ЖВК, как отдельного

структурного компонента логистической системы, решит поставленную задачу. В данной статье предложена архитектура информационных технологий ЖВК и модель коммуникации Теодора Ньюкомба, на примере информационного поля ЖВК (модифицированная).

Ключевые слова: железнодорожный вокзальный комплекс; информационные потоки; информационные технологии; триггерный эффект пассажира; коммуникация

Для цитирования. Ульяницкая, В. И. (2025). Архитектура информационных технологий железнодорожного вокзального комплекса. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 268–280. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-397>

Original article | Logistic Transport Systems

INFORMATION TECHNOLOGY ARCHITECTURE OF THE RAILWAY STATION COMPLEX

V.I. Ulyanitskaya

Abstract

Background. The study examines the complexity of processing information flows of railway station complexes, due to the continuity, mass, heterogeneity of incoming information for the client, as well as the lack of a railway station transport logistics system, as the most manageable factor. The task of this type is to find organizational solutions to improve the efficiency of the management system, based on the parameters of information flows of railway station complexes.

A distinctive solution in relation to railway stations, in our case, considers the need to integrate communication models and their transformation in relation to railway station complexes. It is proposed that by adjusting the life cycle of the station system, taking into account possible errors and the influence of information flows, it will allow to identify patterns based on the prerequisites for passenger appeals.

Purpose – the goal is to increase the efficiency of railway station management based on accounting and optimization of information flow parameters.

Materials and methods. The work uses practical and theoretical methods: cause-effect relationships, mapping and data analysis, analysis, etc.

Results. Defining the principles of functioning of the communication environment and information flows of the housing and communal services, as a separate structural component of the logistics system, will solve the task. This article proposes the architecture of the information technology of the housing and communal services and the communication model of Theodore Newcomb, using the example of the information field of the housing and communal services (modified).

Keywords: railway station complex; information flows; information technology; passenger trigger effect; communication

For citation. Ulyanitskaya, V. I. (2025). Information technology architecture of the railway station complex. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 268–280. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-397>

Введение

В настоящее время особую актуальность приобретает объемы и учет перерабатываемой информации железнодорожных вокзалов, которая обусловлена масштабами деятельности транспортного хозяйства.

Железнодорожный вокзальный комплекс – это место концентрации и скопления множества информационных потоков, где входящая и исходящая информация подвергается преобразованию, структурированию и интерпретации. Дирекция железнодорожных вокзалов ОАО «РЖД» старается сделать пребывание пассажиров, посетителей и клиентов вокзалов максимально безопасным и комфортным: исключить очереди, повысить уровень обслуживания и информирования, создать атмосферный интерьер, распределить эффективность площадей, обеспечить медицинским сопровождением, предоставить выбор услуг питания, социально-бытовых и

других услуг. Но именно правильная постановка справочной и информационной работы на ЖВК имеет исключительно значение. Технология работы вокзала должна быть построена так, чтоб процесс и использование одной услуги и информации по ней, тянул за собой цепочку других информационных составляющих («цепочка касаний с клиентом»), когда клиент получает информацию единым окном. Информирование пассажиров неотъемлемая часть оказания услуг в сфере любых транспортных перевозок. Именно информация, которую получает клиент, ложиться в основу планирования поездки, ее осуществления, сопровождения.

Растущий объем количества каналов коммуникаций и информационных потоков ЖВК, должен позволять клиенту обрабатывать запрос таким образом, чтоб система организации технологических и технических процессов ЖВК, сама уже учитывала все условия запроса, выбрав и предложив либо итоговый вариант, либо альтернативный. Механизм такой работы возможен благодаря вводимым цифровыми услугам и системам информирования пассажиров. Когда работа системы строиться на цикличности запроса и обработки информации путем ее обработки и извлечении прецедентов схожих тематик и обращений (запросов). Следует отметить, что при учете всех данных и факторов, требуется обработка множества вводных, часть из которых содержат несколько условий (вариантов) от пассажиров, а также неточности и размытости информации. Примерами таких запросов могут быть такие данные как: время отправления, номер поезда, вагон и место, в то время, когда дата и маршрут (станция отправления и прибытия) более устойчивые в запросе, так как именно они служат фиксированной информацией по потребностям пассажира.

Развитие систем обработки и предоставления информации каналов обратной коммуникации, позволяет клиенту право выбора на единоличном принятии решения не зависимо от оказания услуги онлайн или офлайн, с множеством конечных элементов запроса. Так вводные данные по наличию информации, могут ока-

заться наиболее значимые для одного клиента и не представлять интерес для другого, однако учет требований и границ процесса запроса (обращения) должен быть многообразен, чтоб исключить отсутствие необходимых условий, предоставленных для выбора.

Именно современные методы автоматизации работы с данными и информацией позволяют персонализировать каждого клиента и каждый запрос, а в последующем скорректировать систему накопленной базы данных, в том числе за счет пополнения существующих классифицированных параметров, а также формирования новых прецедентов (Рис. 1).

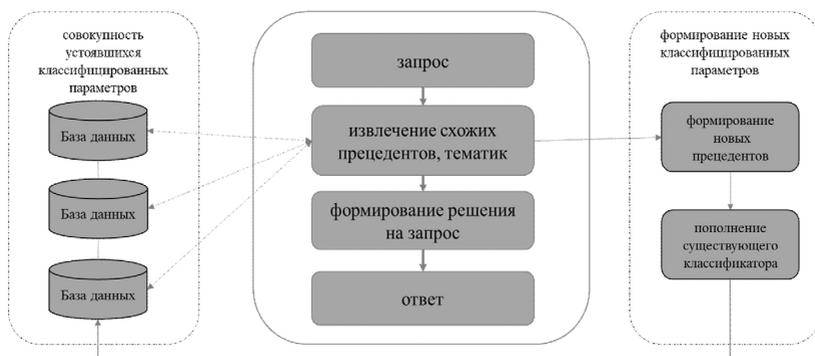


Рис. 1. Цикл поиска и обработки информации

Так компания ОАО «РЖД» в лице Дирекции железнодорожных вокзалов, сделала огромный шаг в сторону опережения принятия решений, основанных на фактах по типовым запросам клиентов (пассажиров). Вводятся, и постоянно обновляется, пласт новых услуг на вокзальных комплексах, через интерактивные системы, такие как стойки информации, справочные видеотерминалы, онлайн карты вокзалов, интерактивная навигация, электронные путеводители, сервисные услуги, автоматизированные камеры хранения, системы электронной очереди и другие. Создание цифрового двойника вокзального комплекса, уже не новинка, а обыденная реальность, когда геоинформационная система, посредством прило-

жений на мобильном устройстве, позволяет построить маршрут к нужной кассе, вагону поезда, комнатам отдыха и прочее, просто используя технологию привязки виртуальных меток.

Основополагающим трендами развития систем и элементов информирования в структуре взаимоотношений с клиентом (пассажиром) рассматривается, через:

1. внедрение виртуальной среды – здесь работы ведутся в сфере оцифровки реального окружения вокзального комплекса и прилегающих территорий. Клиент в режиме реального времени может проложить маршрут, увидеть внешний вид объектов, ознакомиться с услугами, тем самым упрощая ориентирование на месте;

2. создание и внедрение голосовых и неголосовых роботов, по различным группам запросов;

3. работа с данными клиентами – формирование данных о клиенте «цифровой след клиента»;

4. внедрение геоинформационных систем в контексте общей структуры вокзального комплекса и городской территории. Общими словами – для клиента формируется «единое окно» информационной базы транспортно-пересадочных узлов (кластеров), когда координация, актуализация и мониторинг информационных потоков едины для всех участников транспортных процессов и осуществляется посредством одной (или увязки нескольких) программ (приложений), когда изменения в одной системе (владельца), сказываются и вносят изменения в другую.

5. автоматизированные системы удаленного управления - доступ к техническим и технологическим сетям, к информационной безопасности и др., с удаленным управлением и администрированием внешних и внутренних процессов. Больше ориентированно для внутреннего использования компании.

6. переход на электронный (цифровые) документооборот. Уход от бумажных документов и ручной обработки данных. Клиент может получить услугу удаленно (билет, справку, чек и др.), без физического присутствия.

Учитывая особенности клиентского сектора и групп, относящихся к разным комплектам услуг ЖВК, необходимо рассматривать архитектуру информационных технологий ЖВК, как саморегулирующуюся систему, в которой при изменении отношения одного параметра (объекта ЖВК (X), потребителя (A) и исполнителя (B)) к другому изменяются все остальные. Неоднозначность и неопределенность отношения коммуникантов, должна быть минимизирована и стремиться к балансу потребностей, возможностей, спроса и предложения, и равновесной цены.

Опираясь на модель коммуникаций Теодора Ньюкомба, где главная идея заключается в поиске единого направления, позволяющего рассматривать отношение A и B к объекту X в одном ключе. Сходство отношений к объекту ЖВК будет порождать привязанность между воспринимающим субъектом, клиентом (A) и источником коммуникации (B) и, напротив, расхождение этих отношений будет порождать негативное отношение между A и B.



где,

«X» - информационное поле ЖВК

«A» - получатель, клиент, «B» - отправитель, источник коммуникации;

«+» позитивное отношение к объекту, «-» негативное отношение к объекту

Рис. 2. Адаптированная модель коммуникаций Теодора Ньюкомба, на примере информационного поля ЖВК

Выполнения условий развития коммуникаций между A и B, должно быть сосредоточено на балансе позиций клиента и источ-

ника коммуникаций по отношению к объекту X. Будем исходить из позиции, что источник коммуникации имеет исходное отношение к X, отличное от отношения A, когда «негативное отношение» рассматривается как несоответствие ожиданиям, установкам и возможностям B к объекту X, через призму отношения объекта A: нереалистичные ожидания, необоснованные требования и пр.

Чтобы восполнить эти пробелы, субъекты коммуникации в этой модели должны быть равноправными и связанными как взаимными ожиданиями и установками, так и общим интересом к предмету запроса.

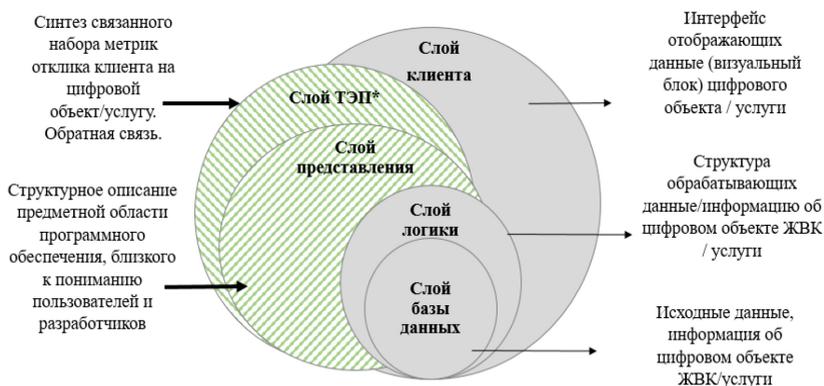
С целью изучения потребительского спроса услуги, потребность в конкретной информации, предоставляемой на железнодорожных вокзалах и мониторинга настроения клиентов, была поставлена задача, сформулировать и учесть системный интерес клиента к информационным технологиям ЖВК, что позволит исполнителю объективно реагировать на мнения и потребности клиентов (потребителя) на вновь вводимые цифровые услуги, или модернизацию существующих.

Автором предлагается рассматривать архитектуру информационных технологий ЖВК по пятислоистой архитектуре, состоящий из трех типовых слоев «клиента», «логики» и «базы данных» и вводимых слоев – «представления», «ТЭП».

Очевидно, что «слой представления», уже не является чем-то исключительным для крупных цифровых проектов ОАО «РЖД», и учитывается частично в архитектуре информационных систем ЖВК, реализуя контекст понятийной модели предметной области услуги, близкого к пониманию пользователей и разработчиков информационных систем, внедряемых на объектах ЖВК.

При этом автором предлагается в клиентской части учитывать системный интерес клиента, через «слой ТЭП», где под ТЭП автор понимает «триггерный эффект пассажира».

Исследования «триггерного эффекта пассажира» направлены на результаториентированность и проактивность ввода новой услуги / модернизации или уже имеющийся. Особенность учета ТЭП, в архитектуре информационных технологий, позволит повлиять на коэффициент сопряжённости барьерных метрик и классификации состояний (настроя), который указывает на степень связи между впечатлением и повторным использованием цифрового продукта.



* ТЭП – триггерный эффект пассажира

Рис. 3. Архитектура информационных технологий ЖВК
Источник: разработано автором

Сформировав новое понимание о пассажире, через систему ТЭП и возможные последствия их возникновения на объектах ЖВК, позволит всей клиентской деятельности выйти на новый уровень прогнозирования, планирования работы ЖВК, и воздействовать не только на главные возмущающие факторы (внутренние и внешние), но и локальные и частные механизмы жизненного цикла железнодорожного вокзала.

Заключение

Ключевым фактором успешного взаимодействия с клиентом является концентрация всех видов информации. На протяжении

последних лет, наблюдается динамика устойчивого перехода на цифровые платформы, за счет автоматизации и сбора обработки информации. Основная задача таких систем – ввод и сохранение (эффект накопления) больших массивов информации, организация их хранения, поиск в них нужных сведений, накопление прецедентов и извлечение фактов и данных на каждый конкретный запрос от клиента. При выборе способа предоставления информации, владелец услуги всегда должен ориентироваться на закономерность изменений спроса и предложений со стороны клиента, с дальнейшей оценкой удовлетворенности качеством ее предоставления по итогам оказанной услуги.

Список литературы

1. Вакуленко, С. П., Копылова, Е. В., & Куликова, Е. Б. (2015). *Технология работы и эксплуатация железнодорожных вокзальных комплексов: учебное пособие*. Москва: МГУПС (МИИТ). 270 с. EDN: <https://elibrary.ru/XNOGZK>
2. Медведев, В. А., & Присяжнюк, А. С. (2016). *Информационные системы и технологии в логистике и управлении цепями поставок: учебное пособие*. Санкт-Петербург: Университет ИТМО. 114 с. EDN: <https://elibrary.ru/ZUYMRL>
3. Ульяницкая, В. И. (2024). Модель организации сервисных услуг на железнодорожных вокзалах. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, 21(1), 169–177. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-01-169-177>. EDN: <https://elibrary.ru/DCFFMG>
4. Зайцева, А. В. (2021). *Теория коммуникации: учебно-методическое пособие*. Луганск: Книга. 114 с.
5. Бурцева, Е. В., Платенкин, А. В., Рак, И. П., & Терехов, А. В. (2024). *Информационные технологии и системы: учебное пособие* [Электронный ресурс]. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ».
6. ГК ЛАНИТ. (2018). *Информационные системы с понятийными моделями. Часть первая*. Получено с <https://habr.com/ru/companies/lanit/articles/358852> (дата обращения: 01.10.2025).

7. Боловинцев, М. Ю., & Зязиков, М. М. (2021). Организация работы вокзальных комплексов и транспортно-пересадочных узлов. *StudNet*, 6, 2147–2171. EDN: <https://elibrary.ru/PZXBUG>
8. Апенько, С. Н., & Гилева, К. В. (2012). Эффективность внутренних коммуникаций на предприятиях железнодорожного транспорта. *Дискуссия*, 1, 54–60. EDN: <https://elibrary.ru/OOIVPR>
9. Селезнёва, Т. О., Лилимберг, С. И., & Панина, Г. В. (2021). *Основы логистики: учебное пособие по направлениям подготовки 38.03.01 Экономика, 38.03.02 Менеджмент*. Костанай: Костанайский филиал ФГБОУ ВО «ЧелГУ». 116 с.
10. Plaud-Lombard, M. (2019). *Railway stations boosting the city*. International Union of Railways (UIC). Paris. 52 p. Получено с https://uic.org/IMG/pdf/2019_nextstation_railway_stations_boosting_the_city.pdf
11. Hall, D., & Comtois, C. (Eds.). (2016). *Sustainable railway futures: Issues and challenges*. *Journal of Transport Geography*, 53, 76–77. ISSN: 0966-6923. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.04.009>
12. Покровская, О. Д. (2023). Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций. *Бюллетень результатов научных исследований*, 3, 58–72. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-3-58-72>. EDN: <https://elibrary.ru/QTHKZC>
13. Чаркин, Е. И. (n.d.). *Цифровая трансформация, охватывающая каждый участок деятельности холдинга РЖД*. Получено с <https://rzddigital.ru/opinions/4444/> (дата обращения: 01.10.2025).
14. Покровская, О. Д., & Ульяницкая, В. И. (2022). Система работы с обращениями пассажиров. *Недропользование и транспортные системы*, 12(2), 4–11. <https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-4-11>. EDN: <https://elibrary.ru/AYDGAX>
15. Покровская, О. Д. (2017). Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов. *Известия Транссиба*, 2(30), 146–158. EDN: <https://elibrary.ru/ZWQAIX>

References

1. Vakulenko, S. P., Kopylova, E. V., & Kulikova, E. B. (2015). *Technology of work and operation of railway station complexes: Study guide*. Moscow: MGUPS (MIIT). 270 pp. EDN: <https://elibrary.ru/XNOGZK>
2. Medvedev, V. A., & Prisyazhnyuk, A. S. (2016). *Information systems and technologies in logistics and supply chain management: Study guide*. Saint Petersburg: ITMO University. 114 pp. EDN: <https://elibrary.ru/ZUYMRL>
3. Ulyanitskaya, V. I. (2024). Model for organizing service offerings at railway stations. *Proceedings of the Petersburg State Transport University*, 21(1), 169–177. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-01-169-177>. EDN: <https://elibrary.ru/DCFFMG>
4. Zaitseva, A. V. (2021). *Theory of communication: Educational and methodological guide*. Lugansk: Kniga. 114 pp.
5. Burtseva, E. V., Platenkin, A. V., Rak, I. P., & Terekhov, A. V. (2024). *Information technologies and systems: Study guide* [Electronic resource]. Tambov: Publishing Center of FSBEI HE “TSTU”.
6. LANIT Group. (2018). *Information systems with conceptual models. Part 1*. Retrieved from <https://habr.com/ru/companies/lanit/articles/358852> (accessed: 01.10.2025).
7. Bolovintsev, M. Yu., & Zyazikov, M. M. (2021). Organization of work at station complexes and transport interchange hubs. *StudNet*, 6, 2147–2171. EDN: <https://elibrary.ru/PZXBUG>
8. Apenko, S. N., & Gileva, K. V. (2012). Efficiency of internal communications at railway transport enterprises. *Discussion*, 1, 54–60. EDN: <https://elibrary.ru/OOIVPR>
9. Selezneva, T. O., Lilimberg, S. I., & Panina, G. V. (2021). *Fundamentals of logistics: Study guide for training areas 38.03.01 Economics, 38.03.02 Management*. Kostanay: Kostanay Branch of FSBEI HE “ChelSU”. 116 pp.
10. Plaud Lombard, M. (2019). *Railway stations boosting the city*. International Union of Railways (UIC). Paris. 52 pp. Retrieved from https://uic.org/IMG/pdf/2019_nextstation_railway_stations_boosting_the_city.pdf

11. Hall, D., & Comtois, C. (Eds.). (2016). Sustainable railway futures: Issues and challenges. *Journal of Transport Geography*, 53, 76–77. ISSN: 0966-6923. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.04.009>
12. Pokrovskaya, O. D. (2023). Development of Russia's logistics transport system under sanctions. *Bulletin of Research Results*, 3, 58–72. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-3-58-72>. EDN: <https://elibrary.ru/QTHKZC>
13. Charkin, E. I. (n.d.). *Digital transformation encompassing every area of activity within the Russian Railways holding*. Retrieved from <https://rzdigital.ru/opinions/4444/> (accessed: 01.10.2025).
14. Pokrovskaya, O. D., & Ulyanitskaya, V. I. (2022). Passenger complaint handling system. *Subsoil Use and Transport Systems*, 12(2), 4–11. <https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-4-11>. EDN: <https://elibrary.ru/AYDGAX>
15. Pokrovskaya, O. D. (2017). Research on the evolution of transport hubs as logistics objects. *Proceedings of Transsib*, 2(30), 146–158. EDN: <https://elibrary.ru/ZWQAIX>

ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Ульяницкая Виктория Игоревна, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

пр. Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация

ulyanickaya_viktoriya@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Victoria I. Ulyanitskaya, Postgraduate Student

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation*

ulyanickaya_viktoriya@mail.ru

SPIN-code: 7329-2935

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1455-7961>

Поступила 10.10.2025

После рецензирования 15.11.2025

Принята 17.11.2025

Received 10.10.2025

Revised 15.11.2025

Accepted 17.11.2025

AUTHOR GUIDELINES

<https://ijournal-as.com/>

Volume of the manuscript: 15-24 pages A4 format, including tables, figures, references.

Margins all margins – 20 mm each

Main text font Times New Roman

Main text size 14 pt

Line spacing 1.5 interval

First line indent 1,25 cm

Text align justify

Automatic hyphenation turned on

Page numbering turned off

Formulas in formula processor MS Equation 3.0

Figures in the text

References to a formula (1)

Article structure requirements

TITLE (in English)

Author(s): surname and initials (in English)

Abstract (in English)

Keywords: separated with semicolon (in English)

Text of the article (in English)

1. Introduction.

2. Objective.

3. Materials and methods.

4. Results of the research and Discussion.

5. Conclusion.

6. Conflict of interest information.

7. Sponsorship information.

8. Acknowledgments.

References

References text type should be APA Style

DATA ABOUT THE AUTHORS

Surname, first name (and patronymic) in full, job title, academic degree, academic title

Full name of the organization – place of employment (or study) without compound parts of the organizations' names, full registered address of the organization in the following sequence: street, building, city, postcode, country

E-mail address

SPIN-code in SCIENCE INDEX:

ORCID:

ResearcherID:

Scopus Author ID:

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

<https://ijournal-as.com/>

Объем статей: 15-24 страницы формата А4, включая таблицы, иллюстрации, список литературы. Рукописи большего объема принимаются по специальному решению Редколлегии.

Поля все поля – по 20 мм.

Шрифт основного текста Times New Roman

Размер шрифта основного текста 14 пт

Межстрочный интервал полуторный

Отступ первой строки абзаца 1,25 см

Выравнивание текста по ширине

Автоматическая расстановка переносов включена

Нумерация страниц не ведется

Формулы в редакторе формул MS Equation 3.0

Рисунки по тексту

Ссылки на формулу (1)

Обязательная структура статьи

УДК

ЗАГЛАВИЕ (на русском языке)

Автор(ы): фамилия и инициалы (на русском языке)

Аннотация (на русском языке)

Ключевые слова: отделяются друг от друга точкой с запятой (на русском языке)

ЗАГЛАВИЕ (на английском языке)

Автор(ы): фамилия и инициалы (на английском языке)

Аннотация (на английском языке)

Ключевые слова: отделяются друг от друга точкой с запятой (на ан-

глийском языке)

Текст статьи (на русском языке)

1. Введение.

2. Цель работы.

3. Материалы и методы исследования.

4. Результаты исследования и их обсуждение.

5. Заключение.

6. Информация о конфликте интересов.

7. Информация о спонсорстве.

8. Благодарности.

Список литературы

Библиографический список в соответствии с международным стилем APA

References

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Фамилия, имя, отчество полностью, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: улица, дом, город, индекс, страна (на русском языке)

Электронный адрес

SPIN-код в SCIENCE INDEX:

DATA ABOUT THE AUTHORS

Фамилия, имя, отчество полностью, должность, ученая степень, ученое звание

Полное название организации – место работы (учебы) в именительном падеже без составных частей названий организаций, полный юридический адрес организации в следующей последовательности: дом, улица, город, индекс, страна (на английском языке)

Электронный адрес

СОДЕРЖАНИЕ

СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Г.Г. Дудайти, А.И. Сазонов, М.Д. Ларин, А.С. Тришин 7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ДЛЯ ТОЧНОЙ ОЦЕНКИ ЗАПАСА ХОДА С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ТЕКУЩИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В.В. Матвиюк 27

ГЕНЕЗИС ПРОБЛЕМЫ НЕЭФФЕКТИВНОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Р.О. Судоргин, И.Ю. Каиштанов, Н.В. Соловьев 52

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПАРКОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

А.Е. Кривоногова, А.Г. Исавнин 72

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСГРАНИЧНОЙ СИСТЕМЫ

Р.Г. Король 92

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

П.В. Калашников 108

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ И ШКАЛА ХАРРИНГТОНА В УПРАВЛЕНИИ НАДЕЖНОСТЬЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ <i>А.В. Горелик, А.В. Истомин, Е.В. Кузьмина</i>	125
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПОДХОДОВ К ЦИФРОВИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА <i>А.А. Подберезкин, А.В. Остроух, А.М. Борзенков, А.М. Шмонин, Ц.Б. Пронин</i>	141
АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ <i>Г.И. Никифорова</i>	167
ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫДЕЛЕННЫХ ПОЛОС ДЛЯ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ НА УЧАСТКЕ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ <i>И.Н. Котенкова, В.И. Рассоха, Д.А. Дрючин</i>	182
АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА <i>Р.А. Халтурин, М.Г. Плетнёв, И.Ю. Каишанов</i>	203
КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ <i>Р.А. Халтурин, Р.О. Судоргин</i>	222

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ
В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ**

А.П. Преображенский, Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович 244

**АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВОКЗАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

В.И. Ульяницкая 268

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 281

CONTENTS

METHODS FOR OPTIMIZING URBAN TRANSPORT NETWORK PERFORMANCE <i>G.G. Dudaiti, A.I. Sazonov, M.D. Larin, A.S. Trishin</i>	7
IMPROVING ALGORITHMS FOR PREDICTING ELECTRIC VEHICLE ENERGY CONSUMPTION TO ACCURATELY ESTIMATE POWER RESERVE BASED ON REAL TERRAIN PARAMETERS AND CURRENT METEOROLOGICAL FACTORS <i>V.V. Matviyuk</i>	27
GENESIS OF THE INEFFICIENCY PROBLEM IN TRANSPORT AND LOGISTICS PRODUCTION IN THE RUSSIAN FEDERATION <i>R.O. Sudorgin, I.Yu. Kashtanov, N.V. Solovyev</i>	52
AUTOMATED MONITORING OF PARKING INFRASTRUCTURE USING MACHINE LEARNING AND COMPUTER VISION METHODS <i>A.E. Krivonogova, A.G. Isavnin</i>	72
A SET-THEORETIC MODEL OF A CROSS-BORDER SYSTEM <i>R.G. Korol</i>	92
CALCULATION OF RELIABILITY INDICATORS OF AN INFORMATION SYSTEM UNDER CONDITIONS OF INTERVAL UNCERTAINTY <i>P.V. Kalashnikov</i>	108

DIGITAL TWINS AND THE HARRINGTON SCALE
IN RAILWAY AUTOMATION AND TELEMCHANICS
RELIABILITY MANAGEMENT

*A.V. Gorelik, A.V. Istomin,
E.V. Kuzmina* 125

RESEARCH METHODS FOR DIGITALIZATION
OF TRANSPORT SYSTEMS USING ARTIFICIAL
INTELLIGENCE

*A.A. Podberezkin, A.V. Ostroukh, A.M. Borzenkov,
A.M. Shmonin, C.B. Pronin* 141

ANALYSIS OF THE QUALITY OF TRANSPORT
AND LOGISTICS SERVICES IN MODERN CONDITIONS

G.Is. Nikiforova 167

ASSESSMENT OF THE EXPEDIENCY OF ORGANIZING
DEDICATED LANES FOR PUBLIC URBAN PASSENGER
TRANSPORT ON A SECTION OF THE ROAD NETWORK

I.N. Kotenkova, V.I. Rassokha, D.A. Dryuchin 182

ANALYTICAL MANAGEMENT MODELS IN THE TRANSPORT
COMPLEX RESOURCE ALLOCATION SYSTEM

R.A. Khalturin, M.G. Pletnev, I.Yu. Kashtanov 203

DESIGN CONCEPT FOR A MULTI-LEVEL HIERARCHICAL
RESOURCE MANAGEMENT STRUCTURE IN PASSENGER
TRANSPORTATION SYSTEMS

R.A. Khalturin, R.O. Sudorgin 222

OPTIMIZATION OF RESOURCE ALLOCATION
IN THE TRANSPORT SYSTEM

A.P. Preobrazhenskiy, T.V. Avetisyan, Ya.E. Lvovich 244

INFORMATION TECHNOLOGY ARCHITECTURE
OF THE RAILWAY STATION COMPLEX

Ulyanitskaya V.I. 268

RULES FOR AUTHORS 281

Доступ к журналу

Доступ ко всем номерам журнала –
постоянный, свободный и бесплатный.
Каждый номер содержится в едином файле PDF.

Open Access Policy

All issues of the *Transportation and Information Technologies in Russia* are
always open and free access. Each entire issue is downloadable as a single
PDF file.

<https://ijournal-as.com/>

Дата выхода в свет 25.11.2025. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 20,66.
Свободная цена. Заказ 153/025.