

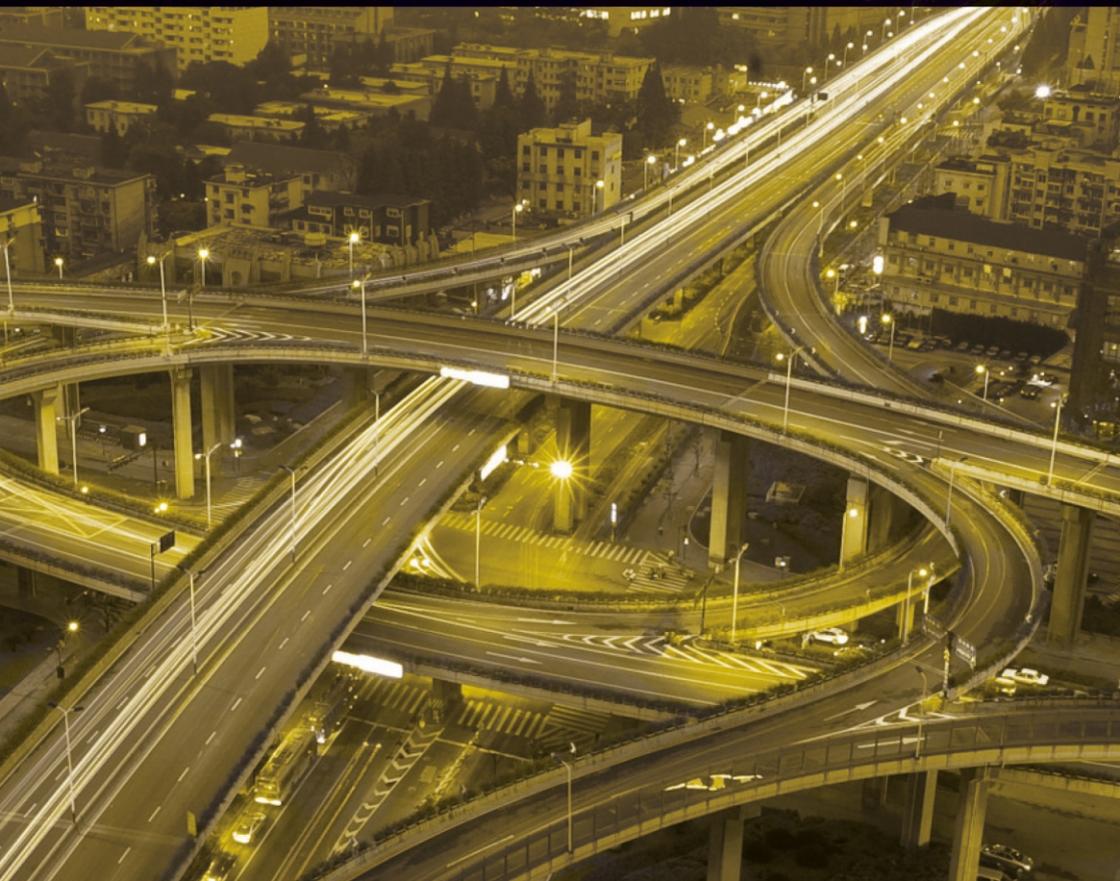
ISSN 3033-5965 (online)

# Transportation and Information Technologies in Russia

## Транспорт и информационные технологии

Vol. 15, No 4, 2025

Том 15, № 4, 2025



# **Transportation and Information Technologies in Russia**

## **Транспорт и информационные технологии**

**Vol. 15, No 4, 2025**

**Том 15, № 4, 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.

# 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, № 4, 2025 / Vol. 15, No 4, 2025

<p><b>Учредитель и издатель:</b> ООО Научно-инновационный центр</p> <p><b>Журнал основан в 2011 году</b> 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 <b>входит</b> 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><b>Индексирование и реферирование:</b> РИНЦ РЦНЦ КиберЛенинка 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: <a href="mailto:ijas@ijournal-as.com">ijas@ijournal-as.com</a> <a href="http://ijournal-as.com/">http://ijournal-as.com/</a> +7 (995) 080-90-42</p>	<p><b>Founder and publisher:</b> Science and Innovation Center Publishing House</p> <p><b>Founded 2011</b> 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 <b>included</b> 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><b>Indexing and Abstracting:</b> RISC RCSI CyberLeninka 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: <a href="mailto:ijas@ijournal-as.com">ijas@ijournal-as.com</a> <a href="http://ijournal-as.com/">http://ijournal-as.com/</a> +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: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-384

EDN: CSDCDF



УДК 631.372

Научная статья | Эксплуатация автомобильного транспорта

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕДУЩЕГО КОЛЕСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА ЕГО ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*Ю.П. Корнюшин, М.В. Сидоров*

### *Аннотация*

**Обоснование.** В статье рассматривается влияние параметров ведущего колеса (коэффициента продольной жесткости и демпфирования шины) технологического модуля на – передачу энергии (косвенно, нагрузки на его компоненты (узлы и механизмы)), обусловленные крутящим моментом на оси ведущего колеса и тяговым усилием со стороны трактора. Оценка выполнялась путем определения спектральных плотностей и амплитудно-частотных характеристик угловой и поступательной скоростей ведущего колеса через реализации его крутящего момента и горизонтальных усилий со стороны навески трактора и рабочего орудия, записанные при выполнении машинно-тракторным агрегатом технологической операции. В исследовании использовалась математическая модель ведущего колеса технологического модуля, который является дополнительным третьим ведущим мостом трактора колесной формулы 4К4. Оценена зависимость среднеквадратического отклонения колебаний выходного параметра технологического модуля – угловой скорости ведущего колеса в зависимости от коэффициента продольной жесткости и величины демпфирования шины.

**Цель** – поиск оптимальных параметров ведущего колеса (коэффициента продольной жесткости и демпфирования шины) технологического модуля для уменьшения колебаний угловой скорости ведущего колеса, обусловленных крутящим моментом на его оси и тяговым усилием со стороны трактора.

**Метод и методология проведения работы.** В статье использовались методы статистической динамики и теории движения колеса.

**Результаты.** Получены спектральные плотности и амплитудно-частотные характеристики угловой и поступательной скоростей ведущего колеса через реализации его крутящего момента и горизонтальных усилий со стороны навески трактора и рабочего орудия, записанные при выполнении машинно-тракторным агрегатом технологической операции.

**Область применения результатов.** Полученные результаты могут быть использованы при разработке и производстве тракторов и автомобилей.

**Ключевые слова:** технологический модуль; математическая модель, методы статистической динамики; шина

**Для цитирования.** Корнюшин, Ю. П., & Сидоров, М. В. (2025). Исследования влияния параметров ведущего колеса технологического модуля на его динамические свойства. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 7–26. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-384>

Original article | Operation of Road Transport

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGY MODULE DRIVE WHEEL PARAMETERS ON ITS DYNAMIC PROPERTIES

*Yu.P. Korniyushin, M.V. Sidorov*

### *Abstract*

**Background.** The article examines the influence of the parameters of the drive wheel (coefficient of longitudinal stiffness and tire damping) of the technological module on energy transfer (indirectly, loads on its components (assemblies and mechanisms)) caused by the torque on the axis of the drive wheel and traction from the tractor. The evaluation was performed by determining the spectral densities and amplitude-frequency characteris-

tics of the angular and translational speeds of the drive wheel through the realization of its torque and horizontal forces from the tractor attachment and working tool, recorded during the technological operation performed by the tractor unit. The study used a mathematical model of the drive wheel of the technological module, which is an additional third drive axle of a tractor with a 4K4 wheel formula. The dependence of the RMS deviation of the oscillations of the output parameter of the technological module, the angular velocity of the drive wheel, depending on the coefficient of longitudinal stiffness and the amount of tire damping, is estimated.

**Purpose.** The search for optimal parameters of the drive wheel (coefficient of longitudinal stiffness and tire damping) of the technological module to reduce fluctuations in the angular velocity of the drive wheel due to the torque on its axis and traction from the tractor.

**Methodology.** The methods of statistical dynamics and the theory of wheel motion were used in the article.

**Results.** The spectral densities and amplitude-frequency characteristics of the angular and translational speeds of the drive wheel are obtained through the realization of its torque and horizontal forces from the tractor attachment and working tool, recorded during the technological operation performed by the tractor unit.

**Practical implications.** The results obtained can be used in the development and production of tractors and automobiles.

**Keywords:** technological module; mathematical model; methods of statistical dynamics; tire

**For citation.** Korniyushin, Yu. P., & Sidorov, M. V. (2025). Investigation of the influence of the technology module drive wheel parameters on its dynamic properties. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 7–26. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-384>

## Введение

За последние годы в производстве сельскохозяйственных тракторов наметилась устойчивая тенденция – повышение мощности двигателей, которая не может быть реализована через тяговое уси-

лие, передаваемое к рабочим машинам. Сельскохозяйственный трактор становится не только источником тяги, но и мобильным энергоносителем, что позволяет расширить его функциональные возможности. Предложенное комплектование машинно-тракторного агрегата (МТА) по модульному принципу, сформированного путем применения мобильного энергоносителя с дополнительным ведущим мостом (технологическим модулем) позволяет не только повысить универсальность трактора, но и снизить удельные энергозатраты при выполнении технологических операций [1]. Технологический модуль представляет собой подкатной третий мост с ведущими колесами, на шарнирно-сочлененной несущей раме, оборудованной гидронавесным механизмом [2]. Поиск оптимальных параметров ведущего колеса (коэффициента продольной жесткости и демпфирования шины) технологического модуля для уменьшения колебаний угловой и поступательной скоростей ведущего колеса, обусловленных крутящим моментом на его оси и тяговым усилием со стороны трактора, представляет определенный интерес.

### Методы и материалы

На ведущее колесо технологического модуля воздействует крутящий момент со стороны силовой установки и тяговые усилия со стороны трактора и рабочего орудия. Многие авторы рассматривают эти воздействия при исследовании их влияния на выходные параметры машинно-тракторных агрегатов как случайные процессы [3-6]. Для получения спектральной плотности выходного случайного процесса  $S_{вых}(\omega)$  достаточно иметь амплитудно-частотную характеристику исследуемой системы  $A_{TM}(\omega)$  и спектральную плотность входного процесса  $S_{ex}(\omega)$  [7]:

$$S_{вых}(\omega) = \left( A_{TM}(\omega) \right)^2 \cdot S_{ex}(\omega), \quad (1)$$

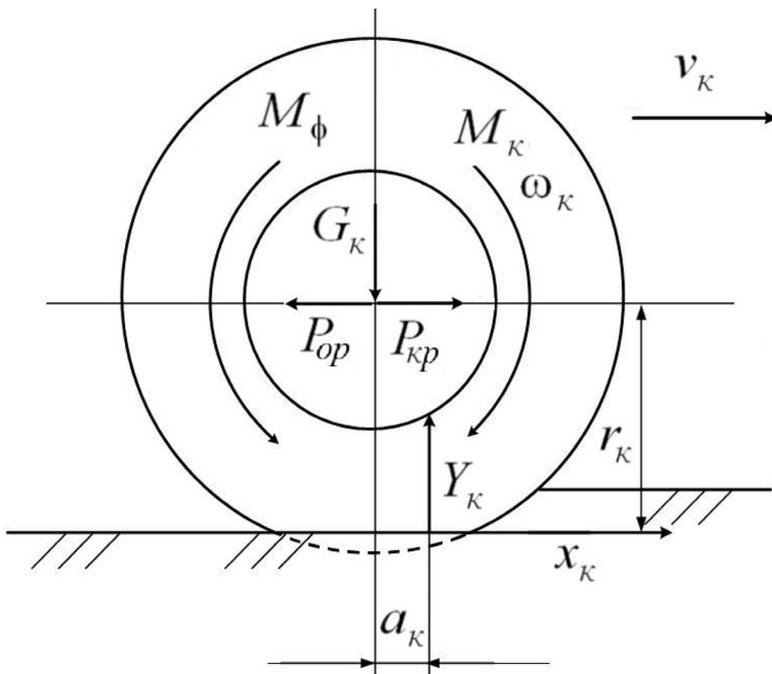
Уменьшение колебаний выходных параметров ведущего колеса технологического модуля: его угловой и поступательной скоростей,

обусловленных колебаниями крутящего момента на его оси и тяговых усилий со стороны трактора и рабочего орудия, характеризуется минимально возможными значениями составляющих их спектральных плотностей  $S_{\text{вых}}(\omega)$ . Минимально возможные значения составляющих спектральных плотностей  $S_{\text{вых}}(\omega)$  можно оценить по величине дисперсии или среднеквадратического отклонения:

$$D_{\text{вых}} = \int_0^{\infty} S_{\text{вых}}(\omega) d\omega, \tag{2 а}$$

$$\sigma_{\text{вых}} = \sqrt{D_{\text{вых}}}, \tag{2 б}$$

Для определения амплитудно-частотных характеристик системы рассмотрим технологический модуль как динамическую модель, расчетная схема которой приведена на рис. 1 [1, 8-11].



**Рис. 1.** Схема сил и моментов, действующих на ведущее колесо технологического модуля при выполнении трактором технологических операций

Согласно схеме сил и моментов, действующих на ведущее колесо технологического модуля при выполнении трактором технологических операций (Рис. 1), составим систему уравнений, описывающих его движение [8; 9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\kappa} \frac{d\omega_{\kappa}}{dt} = M_{\kappa} - M_{\phi}; \\ v_{\kappa} = \omega_{\kappa} r_{\kappa} - \frac{d\lambda_{uu}}{dt} - \beta_{\kappa} \lambda_{uu}; \\ m_{\kappa} \frac{dv_{\kappa}}{dt} = P_{\phi} + P_{kp} - P_{op}; \\ M_{\phi} = \left( k_{\lambda} \frac{d\lambda_{uu}}{dt} + c_{\lambda} \lambda_{uu} + \frac{k_{\phi} \omega_{\kappa}}{r_{\kappa}} + \frac{a_{\kappa} Y_{\kappa}}{r_{\kappa}} \right) r_{\kappa}; \\ P_{\phi} = k_{\lambda} \frac{d\lambda_{uu}}{dt} + c_{\lambda} \lambda_{uu} - \frac{k_{\phi} \omega_{\kappa}}{r_{\kappa}}; \\ Y_{\kappa} = m_{\kappa} g; \\ a_{\kappa} = a_0 + \lambda_{uu}; \\ a_0 = f_{\kappa} r_{\kappa}. \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $\omega_{\kappa}$  – угловая скорость ведущего колеса;

$J_{\kappa}$  – момент инерции ведущего колеса;

$M_{\kappa}$  – крутящий момент на оси ведущего колеса;

$M_{\phi}$  – моменты касательных сил взаимодействия ведущего колеса с почвой;

$v_{\kappa}$  – поступательная скорость движения ведущего колеса;

$r_{\kappa}$  – динамический радиус ведущего колеса;

$\lambda_{uu}$  – продольная деформация шины ведущего колеса;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий буксование ведущего колеса;

$m_{\kappa}$  – поступательно-движущиеся масса, приходящаяся на ось колеса;

$P_{\phi}$  – сила сопротивления качению колеса;

$P_{kp}$  – тяговое усилие со стороны трактора;

$P_{op}$  – сила сопротивления со стороны рабочего орудия;

$c_\lambda$  и  $k_\lambda$  – коэффициенты продольной жесткости и демпфирования шины;  
 $k_\phi$  – коэффициент углового демпфирования шины;  
 $a_\kappa$  – смещение вертикальной реакции  $Y_\kappa$  относительно оси ведущего колеса;  
 $a_0$  – продольная деформация опорной поверхности;  
 $f_\kappa$  – коэффициент сопротивления качению колеса.

Для проведения последующих исследований и получения необходимых зависимостей преобразуем вышеприведенную систему уравнений к следующему виду

$$\begin{cases} J_\kappa \frac{d\omega_\kappa}{dt} + k_\phi \omega_\kappa + k_\lambda r_\kappa \frac{d\lambda_{uu}}{dt} + (c_\lambda r_\kappa + m_\kappa g) \lambda_{uu} = M_\kappa - m_\kappa g f_\kappa r_\kappa; \\ r_\kappa \omega_\kappa - \frac{d\lambda_{uu}}{dt} - \beta_\kappa \lambda_{uu} - v_\kappa = 0; \\ \frac{k_\phi}{r_\kappa} \omega_\kappa - k_\lambda \frac{d\lambda_{uu}}{dt} - c_\lambda \lambda_{uu} + m_\kappa \frac{dv_\kappa}{dt} = P_{kp} - P_{op}. \end{cases} \quad (4)$$

После преобразования Лапласа система уравнений примет вид [5, 6]:

$$\begin{cases} (J_\kappa s + k_\phi) \omega_\kappa(s) + (k_\lambda r_\kappa s + (c_\lambda r_\kappa + m_\kappa g)) \lambda_{uu}(s) = M_\kappa(s) - m_\kappa g f_\kappa r_\kappa; \\ r_\kappa \omega_\kappa(s) - (s + \beta_\kappa) \lambda_{uu}(s) - v_\kappa(s) = 0; \\ \frac{k_\phi}{r_\kappa} \omega_\kappa(s) - (k_\lambda s + c_\lambda) \lambda_{uu}(s) + m_\kappa s v_\kappa(s) = P_{kp}(s) - P_{op}(s). \end{cases}$$

Введем следующие векторы и матрицу:

$$\mathbf{X} \ s = \begin{bmatrix} \omega_\kappa \ s \\ \lambda_{uu} \ s \\ v_\kappa \ s \end{bmatrix} \text{ – вектор неизвестных (вектор выходных сигналов);}$$

$$\mathbf{Y} \ s = \begin{bmatrix} M_\kappa \ s - m_\kappa g r_\kappa f_\kappa \\ 0 \\ P_{kp} \ s - P_{op} \ s - m_\kappa g f_\kappa \end{bmatrix} \text{ – вектор правой части (вектор}$$

входных воздействий);

$$\mathbf{A} s = \begin{bmatrix} J_{\kappa} s + k_{\phi} & k_{\lambda} r_{\kappa} s + c_{\lambda} r_{\kappa} + m_{\kappa} g & 0 \\ r_{\kappa} & -s + \beta_{\kappa} & -1 \\ \frac{k_{\phi}}{r_{\kappa}} & -k_{\lambda} s + c_{\lambda} & m_{\kappa} s \end{bmatrix} - \text{матрица коэффициентов при неизвестных.}$$

циентов при неизвестных.

Тогда систему уравнений (3) можно записать в следующем виде

$$\mathbf{A} s \mathbf{X} s = \mathbf{Y} s.$$

Обращая матрицу  $\mathbf{A}(s)$  можно определить матричную передаточную функцию, устанавливающую связь между выходными сигналами и входными воздействиями:

$$\mathbf{X} s = \mathbf{W} s \mathbf{Y} s, (\mathbf{W} s = \mathbf{A}^{-1} s),$$

где

$$\mathbf{W} s = \begin{bmatrix} W_{M_{\kappa}}^{\omega_{\kappa}} s & W_{12} s & W_{P_{\kappa p}}^{\omega_{\kappa}} s \\ W_{M_{\kappa}}^{\lambda_{u}} s & W_{22} s & W_{P_{\kappa p}}^{\lambda_{u}} s \\ W_{M_{\kappa}}^{\nu_{\kappa}} s & W_{32} s & W_{P_{\kappa p}}^{\nu_{\kappa}} s \end{bmatrix}.$$

Передаточные функции  $W_{12}(s)$ ,  $W_{22}(s)$  и  $W_{32}(s)$  не являются информационными, поскольку вектор входных воздействий имеет нулевой элемент.

Составляющие матрицы (передаточные функции)  $\mathbf{W}(s)$  имеют вид следующие аналитические зависимости:

$$W_{M_{\kappa}}^{\omega_{\kappa}} s = \frac{m_{\kappa} s^2 + m_{\kappa} \beta_{\kappa} + k_{\lambda} s + c_{\lambda} r_{\kappa}}{J_{\kappa} m_{\kappa} r_{\kappa} s^3 + r_{\kappa} k_{\phi} m_{\kappa} + r_{\kappa}^3 m_{\kappa} k_{\lambda} + r_{\kappa} J_{\kappa} m_{\kappa} \beta_{\kappa} + r_{\kappa} J_{\kappa} k_{\lambda} s^2} \times$$

$$\times \frac{1}{r_{\kappa} k_{\phi} m_{\kappa} \beta_{\kappa} + 2r_{\kappa} k_{\phi} k_{\lambda} + r_{\kappa}^3 m_{\kappa} c_{\lambda} + r_{\kappa}^2 m_{\kappa}^2 g + J_{\kappa} r_{\kappa} c_{\lambda} s + 2r_{\kappa} k_{\phi} c_{\lambda} + k_{\phi} m_{\kappa} g}$$

$$W_{P_{\kappa p}}^{\omega_{\kappa}} s = \frac{k_{\lambda} c_{\lambda} s + c_{\lambda} r_{\kappa} + m_{\kappa} g r_{\kappa}}{J_{\kappa} m_{\kappa} r_{\kappa} s^3 + r_{\kappa} k_{\phi} m_{\kappa} + r_{\kappa}^3 m_{\kappa} k_{\lambda} + r_{\kappa} J_{\kappa} m_{\kappa} \beta_{\kappa} + r_{\kappa} J_{\kappa} k_{\lambda} s^2} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \frac{1}{r_k k_\phi m_k \beta_k + 2r_k k_\phi k_\lambda + r_k^3 m_k c_\lambda + r_k^2 m_k^2 g + J_k r_k c_\lambda s + 2r_k k_\phi c_\lambda + k_\phi m_k g} \\ W_{M_k}^{v_k} s &= \frac{r_k^2 k_\lambda - k_\phi s + r_k^2 c_\lambda - k_\phi \beta_k}{J_k m_k r_k s^3 + r_k k_\phi m_k + r_k^3 m_k k_\lambda + r_k J_k m_k \beta_k + r_k J_k k_\lambda s^2} \times \\ & \times \frac{1}{r_k k_\phi m_k \beta_k + 2r_k k_\phi k_\lambda + r_k^3 m_k c_\lambda + r_k^2 m_k^2 g + J_k r_k c_\lambda s + 2r_k k_\phi c_\lambda + k_\phi m_k g} \\ W_{P_{sp}}^{v_k} s &= \frac{J_k s^2 + J_k \beta_k + k_\phi + r_k^2 k_\lambda s + k_\phi \beta_k + r_k^2 c_\lambda + r_k m_k g}{J_k m_k r_k s^3 + r_k k_\phi m_k + r_k^3 m_k k_\lambda + r_k J_k m_k \beta_k + r_k J_k k_\lambda s^2} \times \\ & \times \frac{1}{r_k k_\phi m_k \beta_k + 2r_k k_\phi k_\lambda + r_k^3 m_k c_\lambda + r_k^2 m_k^2 g + J_k r_k c_\lambda s + 2r_k k_\phi c_\lambda + k_\phi m_k g} \end{aligned}$$

где  $W_{M_k}^{\omega_k}(s)$ ,  $W_{P_{sp}}^{\omega_k}(s)$ , и  $W_{M_k}^{v_k}(s)$   $W_{P_{sp}}^{v_k}(s)$  – передаточные функции соответственно от внешних воздействий: крутящего момента на оси ведущего колеса  $M_k$  и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{sp} - P_{op}$  (нижний индекс), для соответствующих показателей: угловой  $\omega_k$  и поступательной скоростей  $v_k$  ведущего колеса (верхний индекс).

Соответствующие амплитудно-частотные характеристике (АЧХ) технологического модуля описываются соотношениями:

$$\begin{aligned} A_{M_k}^{\omega_k} \omega &= \sqrt{\frac{\left( c_\lambda - m_k \omega^2 + m_k \beta_k + k_\lambda \omega^2 \right) r_k^2}{2r_k k_\phi c_\lambda + k_\phi m_k g - r_k k_\phi m_k + r_k^3 m_k k_\lambda + r_k J_k m_k \beta_k + r_k J_k k_\lambda \omega^2}} \times \\ & \times \sqrt{\frac{1}{r_k k_\phi m_k \beta_k + 2r_k k_\phi k_\lambda + r_k^3 m_k c_\lambda + r_k^2 m_k^2 g + J_k r_k c_\lambda \omega - J_k m_k r_k \omega^3}} \\ A_{P_{sp}}^{\omega_k} \omega &= \sqrt{\frac{k_\lambda c_\lambda \omega^2 + c_\lambda r_k + m_k g^2 r_k^2}{2r_k k_\phi c_\lambda + k_\phi m_k g - r_k k_\phi m_k + r_k^3 m_k k_\lambda + r_k J_k m_k \beta_k + r_k J_k k_\lambda \omega^2}} \times \end{aligned}$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{r_k k_\phi m_k \beta_k + 2r_k k_\phi k_\lambda + r_k^3 m_k c_\lambda + r_k^2 m_k^2 g + J_k r_k c_\lambda \omega - J_k m_k r_k \omega^3}}^2$$

$$A_{P_{sp}}^{\omega_k} \omega = \sqrt{\frac{r_k^2 k_\lambda - k_\phi \omega^2 + r_k^2 c_\lambda - k_\phi \beta_k^2}{2r_k k_\phi c_\lambda + k_\phi m_k g - r_k k_\phi m_k + r_k^3 m_k k_\lambda + r_k J_k m_k \beta_k + r_k J_k k_\lambda \omega^2}}^2 \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{r_k k_\phi m_k \beta_k + 2r_k k_\phi k_\lambda + r_k^3 m_k c_\lambda + r_k^2 m_k^2 g + J_k r_k c_\lambda \omega - J_k m_k r_k \omega^3}}^2$$

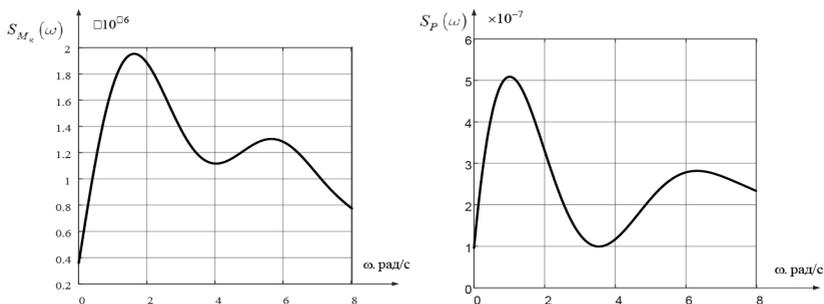
$$A_{P_{sp}}^{\nu_k} \omega = \sqrt{\frac{\left( k_\phi \beta_k + r_k^2 c_\lambda + r_k m_k g - J_k \omega^2 + J_k \beta_k + k_\phi + r_k^2 k_\lambda \omega^2 \right) r_k^2}{2r_k k_\phi c_\lambda + k_\phi m_k g - r_k k_\phi m_k + r_k^3 m_k k_\lambda + r_k J_k m_k \beta_k + r_k J_k k_\lambda \omega^2}}^2 \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{r_k k_\phi m_k \beta_k + 2r_k k_\phi k_\lambda + r_k^3 m_k c_\lambda + r_k^2 m_k^2 g + J_k r_k c_\lambda \omega - J_k m_k r_k \omega^3}}^2$$

где  $\omega$  – циклическая (круговая) частота колебаний, рад/с.

## Результаты

Для получения спектральных плотностей внешних для шины воздействий  $M_k$  и  $(P_{кр} - P_{ор})$  была проведена тензометрическая запись этих параметров при выполнении МТА технологической операции с орудием БДТ-7.



**Рис. 2.** Спектральные плотности входных воздействий ведущего колеса: крутящего момента на его оси  $M_k$  (а) и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{кр} - P_{ор}$  (б)

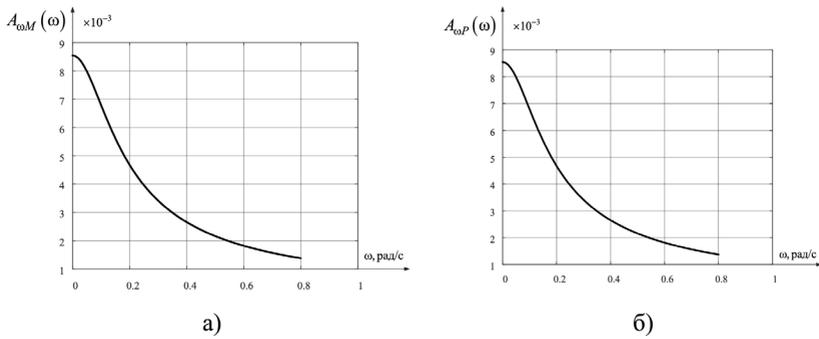
Обработанные методом периодограмм с использованием окна Хемминга и аппроксимированные полиномами 9 степени спектральные плотности этих воздействий приведены на рис. 2 [12; 13].

Наблюдаемые всплески выделения энергии (рис. 2) для крутящего момента на оси ведущего колеса  $M_k$  и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{кр} - P_{op}$  совпадают по частоте и находятся в области около 1-1,8 и 5,9-6,2 рад/с, что очевидно, в виду одной причины их появления.

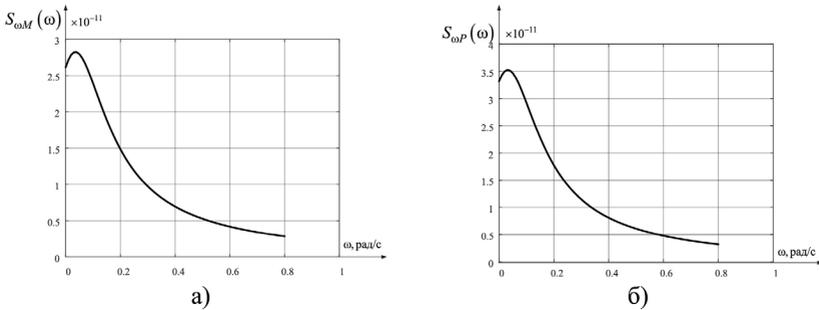
Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ведущего колеса технологического модуля по угловой скорости ведущего колеса  $\omega$  от крутящего момента на его оси  $M_k$  и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{кр} - P_{op}$  для тракторной шины 15,5R38 [14] приведены на рис. 3.

Полюса передаточных функций матрицы  $\mathbf{W}(s)$  имеют одинаковые знаменатели и составляют значения  $s_1 = -3,81$ ,  $s_{1,2} = -23,02 \pm j48,53$ , поэтому все АЧХ являются монотонными кривыми без выраженных особенностей до частот примерно 22 рад/с. Учитывая, что основная энергия колебаний создаваемых крутящим моментом на оси ведущего колеса и суммарным воздействием тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия находится в полосе частот от нуля до 6-8 рад/с, то будем рассматривать соответствующие вероятностные характеристики именно в этом частотном диапазоне.

Анализируя спектральные плотности (характеризующие распределение энергии процесса) угловой скорости, полученные через спектральные плотности крутящего момента на оси ведущего колеса  $M_k$  и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия (Рис. 4) можно отметить, что они имеют одинаковый явно выраженный всплеск 0,04 рад/с, что говорит об отсутствии высокочастотных составляющих у угловой скорости ведущего колеса, а также подтверждает адекватность моделирования.



**Рис. 3.** Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы по угловой скорости ведущего колеса  $\omega_k$  от крутящего момента на его оси  $M_k$  (а) и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{кр} - P_{ор}$  (б)

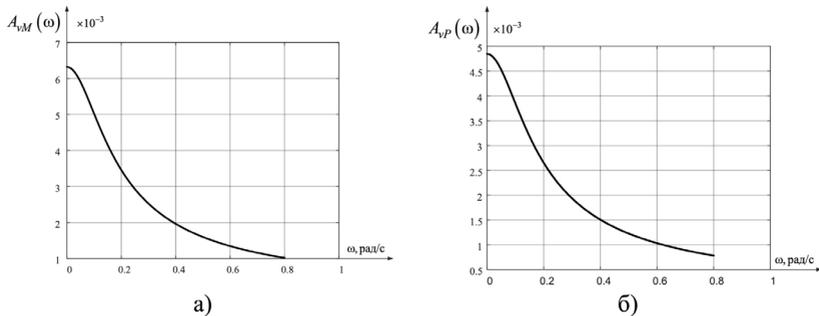


**Рис. 4.** Спектральная плотность угловой скорости ведущего колеса  $\omega_k$  от крутящего момента на его оси  $M_k$  колеса (а) и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{кр} - P_{ор}$  (б)

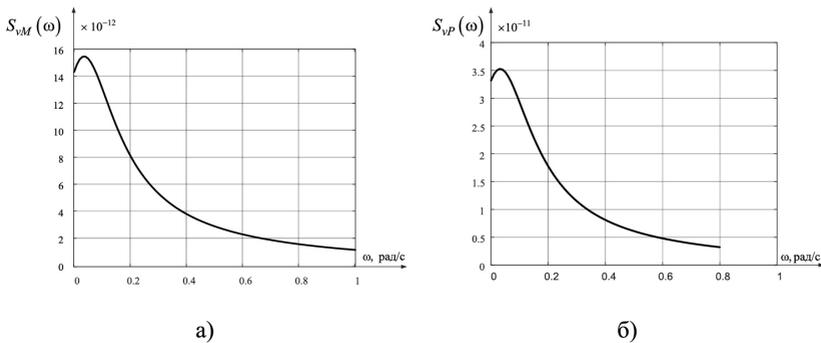
Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы по поступательной скорости движения ведущего колеса  $v_k$  от крутящего момента на его оси  $M_k$  и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{кр} - P_{ор}$  приведены на рис. 5.

Спектральные плотности скорости поступательного движения ведущего колеса, полученные через спектральные плотности крутящего момента на оси ведущего колеса  $M_k$ , а также суммарного воздей-

ствия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия (Рис. 6) имеют одинаковый явно выраженный всплеск 0,04 рад/с и совпадают со спектральными плотностями угловой скорости ведущего колеса (Рис. 4).



**Рис. 5.** Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы по поступательной скорости движения ведущего колеса  $v_k$  от крутящего момента на его оси  $M_k$  колеса (а) и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{кр} - P_{ор}$  (б)



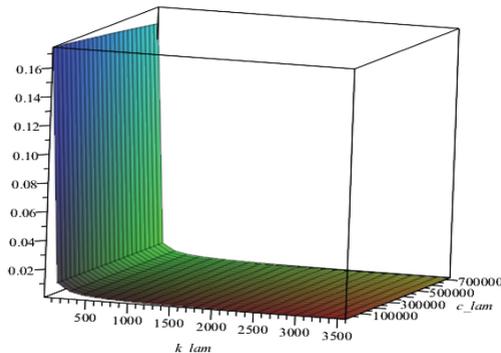
**Рис. 6.** Спектральная плотность поступательной скорости оси ведущего колеса  $v_k$ , полученные через спектральные плотности крутящего момента на оси ведущего  $M_k$  колеса (а) и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия  $P_{кр} - P_{ор}$  (б)

Как указывалось выше в качестве целевой функции, характеризующей эффективность демпфирования технологического моду-

ля, выберем среднеквадратическое отклонение угловой скорости ведущего колеса, вызванное колебаниями крутящего момента на его оси, зависящее от коэффициента продольной жесткости и величины демпфирования шины  $c_\lambda, k_\lambda$ :

$$\sigma_\omega = \sqrt{\int_0^\infty A_{vM}^2(\omega, c_\lambda, k_\lambda) S_{M_k}^{\omega_k}(\omega) d\omega},$$

поскольку оно является усредненной оценкой распределения энергии колебаний выходного параметра технологического модуля во всем частотном диапазоне его работы. Поверхность целевой функции приведена на рис. 7.



**Рис. 7.** Поверхность зависимости величины среднеквадратического отклонения угловой скорости ведущего колеса, вызванного крутящим моментом при изменении продольной жесткости и демпфирования шины

Анализируя зависимость среднеквадратического отклонения угловой скорости ведущего колеса, обусловленные крутящим моментом на оси ведущего колеса при изменении продольной жесткости от нуля до 1000000 Н/м и демпфирования от нуля до 3500 Н\*с/м его шины, можно сделать вывод, что, чем больше продольное демпфирование, тем среднеквадратическое отклонение меньше, а продольная жесткость практически не влияет на ее значение [15]. Таким образом, основное поглощение энергии удастся получить за счет увеличения коэффициента демпфирования шины.

Зависимости среднеквадратических отклонений угловой скорости ведущего колеса, как функции коэффициента продольной жесткости и величины демпфирования шины, обусловленные тяговым усилием со стороны трактора, а также скорости его поступательного движения, вызванные теми же внешними факторами будут иметь вид близкий по характеру изменения, к тому, который изображен на рис. 7.

### **Выводы**

1. Спектральные плотности угловой скорости ведущего колеса, полученные через спектральные плотности суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия, а также крутящего момента на оси ведущего колеса имеют одинаковый явно выраженный всплеск 0,04 рад/с, что подтверждает адекватность моделирования.

2. Спектральные плотности (характеризующие распределение энергии процесса) скорости поступательного движения колеса технологического модуля, полученные через спектральные плотности крутящего момента на его оси, а также суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия имеют одинаковый явно выраженный всплеск 0,04 рад/с и совпадают со спектральными плотностями угловой скорости этого колеса, полученные через спектральные плотности крутящего момента на оси ведущего колеса, и суммарного воздействия тягового усилия со стороны трактора и силы технологического сопротивления со стороны рабочего орудия.

3. Среднеквадратическое отклонение угловой скорости ведущего колеса, обусловленное крутящим моментом на оси ведущего колеса существенно зависит от продольного демпфирования шины, продольная жесткость практически не влияет на ее значение. Таким образом, основное поглощение энергии, и следова-

тельно демпфирование колебаний, (снижения нагрузок на узлы трактора и модуля) создаваемых силовой установкой за счет использования технологического модуля удастся получить только за счет увеличения коэффициента демпфирования шины.

### **Список литературы**

1. Сидоров, М. В. (2016). *Повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата за счёт применения технологического модуля с ведущими двигателями для трактора тягового класса 1,4* (Канд. дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1). Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 153 с. EDN: <https://elibrary.ru/ZSLHPX>
2. Лавров, А. В., Сидоров, М. В., & Воронин, В. А. (2021). Технологический модуль для крестьянских фермерских хозяйств. *Сельский механизатор*, 3, 5. EDN: <https://elibrary.ru/WKMHWK>
3. Котиев, Г. О., & Сарач, Е. Б. (2010). *Комплексное поддрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин*. Москва, 184 с. ISBN: 978-5-7038-3432-9. EDN: <https://elibrary.ru/ZCLELL>
4. Лурье, А. Б. (1981). *Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов*. Москва, 382 с.
5. Хачатуров, А. А., Афанасьев, В. Л., Васильев, В. С., и др. (1976). *Динамика системы дорога — шина — автомобиль — водитель*. Москва: Машиностроение, 535 с.
6. Певзнер, Я. М., Гридасов, Г. Г., Конев, А. Д., и др. (1979). *Колебания автомобиля. Испытания и исследования*. Москва: Машиностроение, 208 с.
7. Попов, В. Б. (2005). Математическое моделирование мобильного сельскохозяйственного агрегата в режиме транспортного переезда. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого*, 3(22), 13–18. EDN: <https://elibrary.ru/PYVSMТ>
8. Скрынников, А. В., Шихин, А. В., Попов, А. А., & Сидоров, В. Н. (2022). Моделирование взаимодействия шины колеса с опорным основанием опорно-ходового модуля. *Инженерный вестник Дона*,

6. Получено с [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7695](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7695). EDN: <https://elibrary.ru/RIGKUW>
9. Алакин, В. М., & Сидорова, А. В. (2020). Динамическая модель ведущего колеса трактора. В *Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции* (с. 183–186). EDN: <https://elibrary.ru/DSSIRI>
10. Яровой, В. Г., & Шаратов, А. П. (2010). Шина как упругодемпфирующее звено сельскохозяйственного трактора. *Вестник аграрной науки Дона. Зерноград*, 3, 25–30. EDN: <https://elibrary.ru/РУДНКZ>
11. Фадеева, М. Э., Чудаков, Д. А., Маташнёв, А. А., Сидоров, В. Н., & Пономарев, А. И. (2022). Моделирование механической трансмиссии колёсной машины 4×2 с задней ведущей осью. *Инженерный вестник Дона*, 12. Получено с <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8090>. EDN: <https://elibrary.ru/KEDQQI>
12. Жилейкин, М. М., Котиев, Г. О., & Сарач, Е. Б. (2018). *Математические модели систем транспортных средств: методические указания*. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана. Получено из электронно-библиотечной системы «Лань»: <https://e.lanbook.com/book/103321>
13. Шахтарин, Б. И., & Ковригин, В. А. (2005). *Методы спектрального оценивания случайных процессов*. Москва: Гелиос АРВ, 248 с. ISBN: 5-85438-136-2. EDN: <https://elibrary.ru/QMPBMN>
14. Айфичер, Э., & Джервис, Б. (2017). *Цифровая обработка сигналов: практический подход* (Пер. с англ.). Москва: Вильямс, 992 с.
15. Бойков, В. П., & Белковский, В. Н. (1988). *Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин*. Москва: Агропромиздат, 240 с.
16. Корнюшин, Ю. П., & Сидоров, М. В. (2025). Влияние динамических свойств технологического модуля на вертикальные колебания оси колеса. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(2), 161–176. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2025-15-2-341>. EDN: <https://elibrary.ru/GJGBJR>

### References

1. Sidorov, M. V. (2016). *Improving the efficiency of using a machine-tractor unit through the application of a technological module with driving propulsors for a tractor of traction class 1.4* (Candidate dissertation in Engineering Sciences: 4.3.1). Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 153 p. EDN: <https://elibrary.ru/ZSLHPX>
2. Lavrov, A. V., Sidorov, M. V., & Voronin, V. A. (2021). Technological module for peasant farms. *Rural Mechanizer*, (3), 5. EDN: <https://elibrary.ru/WKMHWK>
3. Kotiev, G. O., & Sarach, E. B. (2010). *Integrated suspension of highly mobile two-section tracked vehicles*. Moscow, 184 p. ISBN: 978-5-7038-3432-9. EDN: <https://elibrary.ru/ZCLELL>
4. Lurie, A. B. (1981). *Statistical dynamics of agricultural units*. Moscow, 382 p.
5. Khachaturov, A. A., Afanasyev, V. L., Vasiliev, V. S., et al. (1976). *Dynamics of the road – tire – vehicle – driver system*. Moscow: Mashinostroenie, 535 p.
6. Pevzner, Ya. M., Gridasov, G. G., Konev, A. D., et al. (1979). *Vehicle vibrations. Tests and studies*. Moscow: Mashinostroenie, 208 p.
7. Popov, V. B. (2005). Mathematical modeling of a mobile agricultural unit in transport travel mode. *Bulletin of Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi*, 3(22), 13–18. EDN: <https://elibrary.ru/PYVSMT>
8. Skrynnikov, A. V., Shikhin, A. V., Popov, A. A., & Sidorov, V. N. (2022). Modeling the interaction of a wheel tire with the supporting base of a running module. *Engineering Bulletin of the Don*, (6). Retrieved from: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7695](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7695). EDN: <https://elibrary.ru/RIGKUW>
9. Alakin, V. M., & Sidorova, A. V. (2020). Dynamic model of a tractor driving wheel. In *Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 183–186). EDN: <https://elibrary.ru/DSSIRI>

10. Yarovoy, V. G., & Sharapov, A. P. (2010). Tire as an elastic-damping link of an agricultural tractor. *Bulletin of Agrarian Science of the Don. Zernograd*, (3), 25–30. EDN: <https://elibrary.ru/PYDHKZ>
11. Fadeeva, M. E., Chudakov, D. A., Matashnev, A. A., Sidorov, V. N., & Ponomarev, A. I. (2022). Modeling a mechanical transmission of a 4×2 wheeled vehicle with a rear driving axle. *Engineering Bulletin of the Don*, (12). Retrieved from: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8090>. EDN: <https://elibrary.ru/KEDQQI>
12. Zhileykin, M. M., Kotiev, G. O., & Sarach, E. B. (2018). *Mathematical models of vehicle systems: methodological guidelines*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. Retrieved from the electronic library system “Lan”: <https://e.lanbook.com/book/103321>
13. Shakhtarin, B. I., & Kovrigin, V. A. (2005). *Methods of spectral estimation of random processes*. Moscow: Gelios ARV, 248 p. ISBN: 5-85438-136-2. EDN: <https://elibrary.ru/QMPBMN>
14. Ifeather, E., & Jervis, B. (2017). *Digital signal processing: a practical approach* (Transl. from English). Moscow: Williams, 992 p.
15. Boykov, V. P., & Belkovsky, V. N. (1988). *Tires for tractors and agricultural machines*. Moscow: Agropromizdat, 240 p.
16. Korniyushin, Yu. P., & Sidorov, M. V. (2025). Influence of technological module dynamic properties on vertical oscillations of the wheel axle. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(2), 161–176. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2025-15-2-341>. EDN: <https://elibrary.ru/GJGBJR>

### ДАНИЕ ОБ АВТОРАХ

**Корнюшин Юрий Петрович**, профессор кафедры «Системы автоматического управления», доктор технических наук  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал*  
*ул. Университетский Городок, 1, г. Калуга, 248002, Российская Федерация* [theroland@yandex.ru](mailto:theroland@yandex.ru)

**Сидоров Максим Владимирович**, доцент кафедры «Колесные машины и прикладная механика», кандидат технических наук  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал*  
*ул. Университетский Городок, 1, г. Калуга, 248002, Российская Федерация* *sidorov-kaluga@yandex.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Yuri P. Kornushin**, Professor of the Department “Automatic Control Systems”, Doctor of Technical Sciences  
*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch*  
*1, Universitetskiy Gorodok Str., Kaluga, 248002, Russian Federation*  
*theroland@yandex.ru*  
*SPIN-code: 4391-3096*

**Maksim V. Sidorov**, Associate Professor of the Department “Wheeled vehicles and Applied Mechanics”, Candidate of Technical Sciences  
*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch*  
*1, Universitetskiy Gorodok Str., Kaluga, 248002, Russian Federation*  
*sidorov-kaluga@yandex.ru*  
*SPIN-code: 6131-3669*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6686-2282>*  
*Scopus Author ID: 57211752346*

Поступила 10.10.2025

После рецензирования 02.11.2025

Принята 20.11.2025

Received 10.10.2025

Revised 02.11.2025

Accepted 20.11.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-405

EDN: OTWGME

УДК 656.02



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

## ФОРМИРОВАНИЕ ЛОЯЛЬНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ MOBILITY AS A SERVICE В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ

*Т.В. Коновалова, С.Л. Надирян,  
А.В. Гонтарук, В.И. Рассоха*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Внедрение концепции Mobility as a Service (MaaS) представляет собой стратегическое направление развития транспортных систем, особенно актуальное для динамично развивающихся регионов с высокой транспортной нагрузкой, таких как Краснодарский край. Успешность внедрения MaaS определяется не только технологическими аспектами, но и готовностью населения принять новую модель мобильности, ключевым показателем которой является лояльность пользователей.

**Цель** – выявить и проанализировать ключевые факторы формирования лояльности пользователей к системе MaaS в процессе её внедрения в Краснодарском крае и разработать механизмы преодоления основных барьеров, в первую очередь – недоверия.

**Метод и методология проведения работы.** В исследовании использовались системный анализ, SWOT-анализ для оценки потенциала и рисков внедрения MaaS в регионе, а также моделирование на основе классических теорий лояльности (таких как модель НПС и модель Оливера).

**Результаты.** Выявлен высокий, но нереализованный потенциал Краснодарского края для внедрения MaaS, обусловленный транспортными проблемами городов, диверсифицированной транспортной экосистемой и высоким уровнем цифровизации населения. Ключевым барье-

ром для формирования лояльности является недоверие пользователей. В качестве решения предложена трехуровневая модель управления доверием, включающая технологические (шифрование, прозрачная тарификация), организационно-правовые (омбудсмен, страховой депозит) и коммуникационные (открытый диалог, амбассадоры) механизмы.

**Область применения результатов.** Результаты исследования могут быть использованы региональными и муниципальными органами власти, потенциальными операторами МaaS-платформ и транспортными операторами при планировании, разработке и внедрении интегрированных транспортных решений в Краснодарском крае и других регионах со схожими условиями.

**Ключевые слова:** Mobility as a Service; МaaS; лояльность пользователей; цифровизация транспорта; интегрированная мобильность; транспортная система; доверие; Краснодарский край

**Для цитирования.** Коновалова, Т. В., Надирян, С. Л., Гонтарук, А. В., & Рассоха, В. И. (2025). Формирование лояльности пользователей в условиях внедрения концепции Mobility as a Service в Краснодарском крае. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 27–47. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-405>

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

## **BUILDING USER LOYALTY IN THE CONTEXT OF THE INTRODUCTION OF THE MOBILITY AS A SERVICE CONCEPT IN THE KRASNODAR TERRITORY**

*T.V. Konovalova, S.L. Nadiryan,  
V. I. Rassokha, A.V. Gontaruk*

### *Abstract*

**Background.** The implementation of the Mobility as a Service (MaaS) concept is a strategic direction for the development of transport systems,

especially relevant for dynamically developing regions with high traffic loads, such as the Krasnodar Territory. The success of the MaaS implementation is determined not only by technological aspects, but also by the willingness of the population to accept the new mobility model, the key indicator of which is user loyalty.

The purpose is to identify and analyze the key factors of forming user loyalty to the MaaS system in the process of its implementation in the Krasnodar Territory and to develop mechanisms to overcome the main barriers, primarily distrust.

**Methodology.** The study used system analysis, SWOT analysis to assess the potential and risks of implementing MaaS in the region, as well as modeling based on classical loyalty theories (such as the NPC model and the Oliver model).

**Results.** The high but unrealized potential of the Krasnodar Territory for the implementation of MaaS has been identified, due to the transport problems of cities, a diversified transport ecosystem and a high level of digitalization of the population. The key barrier to building loyalty is the distrust of users. A three-level trust management model is proposed as a solution, including technological (encryption, transparent billing), organizational and legal (ombudsman, security deposit) and communication (open dialogue, ambassadors) mechanisms.

**Practical implications.** The results of the study can be used by regional and municipal authorities, potential operators of MaaS platforms and transport operators in the planning, development and implementation of integrated transport solutions in the Krasnodar Territory and other regions with similar conditions.

**Keywords:** Mobility as a Service; MaaS; user loyalty; digitalization of transport; integrated mobility; transport system; trust; Krasnodar Territory

**For citation.** Konovalova, T. V., Nadiryan, S. L., Rassokha, V. I., & Gontaruk, A. V. (2025). Building user loyalty in the context of the introduction of the Mobility as a Service concept in the Krasnodar Territory. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 27–47. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-405>

Актуальность проблемы формирования лояльности пользователей в условиях внедрения концепции Mobility as a Service (MaaS) обусловлена глобальным трендом на трансформацию транспортных систем в направлении устойчивой, интеллектуальной и клиентоориентированной мобильности. MaaS, интегрируя различные виды транспорта в единую сервисную платформу, обещает революционные изменения для мегаполисов и крупных агломераций, к которым, безусловно, относится и Краснодарский край [1-3]. Регион характеризуется динамичным ростом населения, высокой автомобилизацией и значительной сезонной нагрузкой на транспортную инфраструктуру в курортный период, что приводит к хроническим пробкам, ухудшению экологической обстановки и снижению эффективности логистики. В этих условиях MaaS представляется не просто инновацией, а потенциальным инструментом решения острых региональных проблем. Однако успешность внедрения данной концепции определяется не только технологической готовностью инфраструктуры, но и, в первую очередь, готовностью населения принять новую модель потребительского поведения. Ключевым показателем этого принятия является лояльность пользователей, которая обеспечивает долгосрочную жизнеспособность проекта [4-6]. В этой связи возникает научная и практическая проблема, заключающаяся в выявлении специфических факторов, определяющих формирование и поддержание лояльности к MaaS в условиях конкретного российского региона – Краснодарского края, где социокультурные особенности и сложившаяся транспортная культура могут существенно отличаться от западноевропейских моделей, где концепция получила первоначальное развитие.

*Целью исследования* является выявление и анализ ключевых факторов лояльности пользователей к системе MaaS в процессе ее внедрения в Краснодарском крае. Полученные результаты позволят сформулировать практические рекомендации для региональных властей и потенциальных операторов MaaS, направленные на эффективное выстраивание коммуникации с пользователями и повышение шансов на успешную имплементацию концепции в регионе.

Концепция МaaS представляет собой системный сдвиг в организации транспортных систем, трансформирующий традиционное понимание мобильности как владения физическим активом в модель потребления транспорта как унифицированной услуги. В основе МaaS лежит интеграция различных видов транспорта – как муниципального, так и коммерческого – в единую цифровую платформу, доступную пользователю через одно приложение. Это позволяет перейти от фрагментированного использования отдельных транспортных средств к планированию, бронированию и оплате всего маршрута «от двери до двери» в рамках единой цифровой транзакции [7-11].

Ключевые компоненты, составляющие архитектуру любой МaaS-платформы, включают:

1. Единое цифровое приложение. Это пользовательский интерфейс системы, который служит точкой входа для клиента. Его основная функция – предоставление интуитивно понятного взаимодействия со всеми услугами.
2. Мультимодальный планировщик поездок. Ядро функциональности платформы, которое использует данные в реальном времени для предложения оптимальных маршрутов с комбинацией различных видов транспорта на основе критериев пользователя: времени, стоимости, комфорта или минимизации экологического следа.
3. Система бронирования и электронных билетов. Компонент, обеспечивающий резервирование необходимых транспортных средств и мест, а также хранение всех цифровых билетов и пропусков в одном месте.
4. Унифицированная система платежей и биллинга. Один из наиболее критичных элементов, который позволяет производить расчеты за всю поездку, независимо от количества задействованных операторов, через систему «единого кошелька». Это устраняет необходимость в множественных платежных операциях и существенно повышает удобство.

5. Служба управления учетной записью и персональными данными. Обеспечивает хранение пользовательских предпочтений, истории поездок, платежной информации и позволяет предлагать персонализированные сервисы и тарифы.

Таким образом, МaaS – это комплексная экосистема, которая переносит акцент с технической стороны транспорта на потребительскую, стремясь предложить пользователю максимальную ценность в виде экономии времени, денег и снижения когнитивной нагрузки при планировании перемещений. Успешная реализация данной концепции в условиях Краснодарского края требует понимания того, какие именно из этих компонентов являются наиболее значимыми с точки зрения формирования долгосрочной лояльности конечного пользователя [11-13].

Феномен лояльности пользователей является центральным в маркетинговых исследованиях и понимается как глубокая приверженность продукту или сервису, выражающаяся в повторяющихся покупках и положительных рекомендациях. В контексте цифровых платформ, к которым относится МaaS, лояльность приобретает особые характеристики, формируясь под влиянием комплексного взаимодействия рациональных и эмоциональных факторов. Ключевыми факторами лояльности выступают удовлетворенность, воспринимаемая ценность, доверие и привычка. Удовлетворенность возникает при соответствии реального опыта взаимодействия с сервисом ожиданиям пользователя. Воспринимаемая ценность складывается из оптимального соотношения выгод и затрат. Доверие к платформе, особенно в аспекте безопасности персональных и платежных данных, а также надежности выполнения обязательств, является критическим условием для долгосрочных отношений. Привычка, или поведенческая инерция, закрепляет использование сервиса как естественного выбора при возникновении потребности в мобильности [13-15].

Для измерения и анализа лояльности применяются различные модели. Классическая модель НПС (Net Promoter Score) позволяет оценить вербальную лояльность через вероятность рекомендации

сервиса друзьям или коллегам, разделяя пользователей на промоу-теров, нейтралов и критиков. Более сложные многоуровневые модели, такие как модель Оливера, описывают лояльность как процесс, проходящий стадии от когнитивной (лояльность, основанная на знании) и аффективной (на основе эмоциональной привязанности) до конативной (намерение совершить действие) и, наконец, стадию действий (поведенческая лояльность). Применительно к МaaS это означает, что пользователь сначала узнает о преимуществах системы, затем формирует положительное эмоциональное отношение к удобству и экологичности, после чего у него возникает намерение использовать платформу для своей следующей поездки, что в итоге реализуется в регулярном использовании.

Специфика формирования лояльности к МaaS-платформам заключается в необходимости преодоления укорененных моделей потребительского поведения, таких как использование личного автомобиля или привычных, хотя и не интегрированных, видов транспорта. В этом случае лояльность зависит не только от качества каждого отдельного элемента сервиса, но и от надежности связей между ними – так называемой «бесшовности». Сбой на любом этапе мультимодальной поездки, будь то задержка такси или неработающий QR-код для входа в метро, может подорвать доверие ко всей системе в целом. Таким образом, лояльность к МaaS является уязвимой, что требует от операторов платформы тотального контроля над качеством клиентского опыта на всех этапах взаимодействия [14-15].

Транспортная система Краснодарского края представляет собой уникальный и сложный объект для исследования, характеризующийся сочетанием черт крупной городской агломерации, протяженных сельских территорий и мощного рекреационного кластера. Транспортный каркас региона формируется под влиянием нескольких ключевых факторов: устойчивого демографического и экономического роста, высокой степени автомобилизации, превышающей среднероссийские показатели, и выраженной сезонности, связанной с курортной деятельностью. В условиях

растущей нагрузки существующая транспортная инфраструктура городов края, особенно его столицы – Краснодара, испытывает значительные перегрузки, проявляющиеся в хронических заторах, дефиците парковочных пространств и переполненности пассажирского транспорта в часы пик. Это создает благоприятную почву для внедрения альтернативных моделей мобильности, направленных на оптимизацию использования имеющихся ресурсов.

На текущий момент транспортный рынок края демонстрирует фрагментарность, при которой различные виды транспорта функционируют как независимые друг от друга сервисы. В крупных городах, таких как Краснодар, Сочи и Новороссийск, представлены традиционные виды городского транспорта, а также развит рынок такси и каршеринговых услуг. При этом уровень цифровизации и интеграции между этими видами остается низким. Пассажир вынужден использовать отдельные приложения для вызова такси, поиска каршерингового автомобиля и просмотра расписания муниципального транспорта, что создает существенные транзакционные издержки и не способствует формированию единого мобильного пространства.

Особую сложность для формирования интегрированной транспортной системы добавляет сезонный фактор. В летний период население края, особенно черноморского побережья, многократно увеличивается за счет туристов, что приводит к резкому обострению транспортных проблем. В это время потребность в гибких, надежных и удобных мультимодальных решениях возрастает, однако существующая система не обладает необходимым запасом прочности и адаптивности [15]. Таким образом, Краснодарский край, с одной стороны, остро нуждается во внедрении принципов MaaS для снижения транспортной нагрузки и повышения качества жизни населения, а с другой – обладает значительным потенциалом для его внедрения благодаря наличию базовых элементов будущей экосистемы и очевидной востребованности у населения. Однако успех этого внедрения будет напрямую зависеть от учета региональной специфики, включая пространственную структуру расселения, сезонные колебания спроса и сложившиеся потребительские привычки.

На основе проведенного анализа современного состояния транспортной системы Краснодарского края был проведен комплексный SWOT-анализ, позволяющий системно оценить перспективы внедрения концепции МaaS в регионе. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1.

**SWOT-анализ внедрения МaaS в Краснодарском крае**

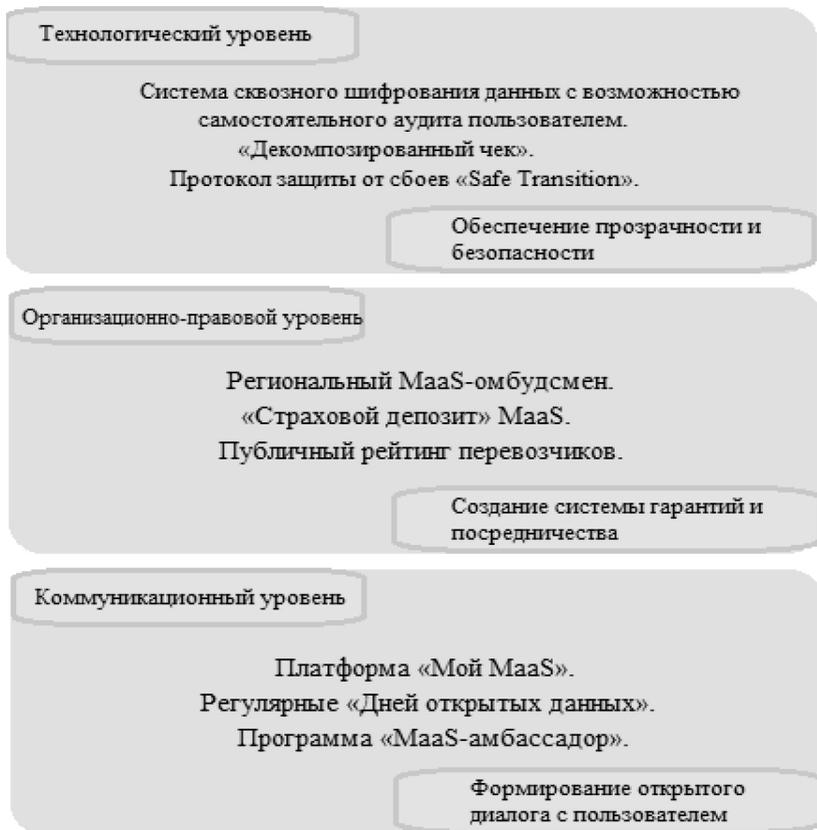
Потенциал (Strengths)	Риски (Weaknesses)
Высокая транспортная нагрузка в крупных городах края, создающая устойчивый спрос на альтернативные решения мобильности	Фрагментарность данных и отсутствие единых стандартов информации у разных транспортных операторов
Диверсифицированная транспортная экосистема - наличие развитых сервисов такси, каршеринга, муниципального транспорта	Недостаточная развитость инфраструктуры для легкого индивидуального транспорта
Высокий уровень цифровизации населения - проникновение смартфонов и цифровых услуг превышает среднероссийские показатели	Консервативность транспортного поведения значительной части населения, привыкшей к использованию личного автомобиля
Активная туристическая привлекательность региона, создающая дополнительный спрос на интегрированные транспортные решения	Выраженная сезонная неравномерность транспортных потоков, осложняющая экономику сервиса
Возможности (Opportunities)	Угрозы (Threats)
Снижение транспортной нагрузки на ключевые магистрали городов края за счет оптимизации маршрутов	Сопrotивление традиционных транспортных операторов, видящих в МaaS угрозу своим бизнес-моделям
Повышение инвестиционной привлекательности региона через реализацию проектов умного города	Правовые и регуляторные барьеры в области тарификации, лицензирования и страхования комплексных транспортных услуг
Улучшение экологической ситуации в крупных городах за счет снижения использования личного автотранспорта	Низкая готовность населения доверять единой платформе вопросы безопасности платежей и персональных данных
Развитие бесшовной транспортной логистики для туристов курортных городов	Технологические риски - зависимость от стабильности работы платформы и мобильного интернета

Ключевые выводы из SWOT-анализа:

- Наибольший потенциал внедрения МaaS связан с решением острых транспортных проблем крупных городов края через интеграцию существующих транспортных сервисов. Высокий уровень цифровизации населения создает благоприятную среду для быстрого принятия сервиса.
- Критическим ограничением является сезонный характер транспортной нагрузки, который может создать экономические сложности для оператора платформы в межсезонье. Это требует разработки гибкой тарифной политики и поиска дополнительных источников монетизации.
- Основные возможности лежат в плоскости повышения общей эффективности транспортной системы региона и его инвестиционной привлекательности. Внедрение МaaS может стать драйвером развития смежных отраслей - туризма, телекоммуникаций, финансовых услуг.
- Наиболее серьезные угрозы связаны с регуляторными барьерами и возможным сопротивлением традиционных участников транспортного рынка. Это указывает на необходимость активного участия региональных властей в процессе внедрения концепции.

Проведенный анализ демонстрирует, что Краснодарский край обладает значительным, хотя и нереализованным потенциалом для успешного внедрения МaaS. Выявленные сильные стороны и возможности создают прочную основу для запуска пилотных проектов, в то время как слабые стороны и угрозы указывают на направления необходимой подготовительной работы.

Анализ выявил, что низкий уровень доверия является ключевым барьером для формирования лояльности к МaaS. Для его преодоления необходима комплексная система мер, направленная на разные аспекты недоверия. Предлагается внедрение трехуровневой модели управления доверием, адаптированной к региональной специфике Краснодарского края (рис. 1).



**Рис. 1.** Модель управления доверием к МaaS, адаптированная к региональной специфике)

1. Технологический уровень: Обеспечение прозрачности и безопасности

Внедрение системы сквозного шифрования данных с возможностью самостоятельного аудита пользователем. Каждый участник цепочки должен иметь сертификаты соответствия стандартам безопасности (например, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2022).

Создание «Декомпозированного чека» – детализированной расшифровки стоимости поездки в приложении. Пользователь в ре-

альном времени видит, какая сумма идет на оплату трамвая, такси, каршеринга и комиссию платформы. Это устраним недоверие к тарификации.

Разработка протокола защиты от сбоев «Safe Transition». В случае технического отказа одного элемента системы приложение автоматически предложит и забронирует равноценную альтернативу с сохранением исходной стоимости поездки для пользователя. Риски несет оператор МaaS, а не потребитель.

2. Организационно-правовой уровень: Создание системы гарантий и посредничества

Учреждение краевого МaaS-омбудсмана – независимой арбитражной службы при региональном Министерстве транспорта. Эта служба будет оперативно разрешать споры между пользователями и операторами платформы, выступая гарантом честности сделок.

Внедрение «Страхового депозита» МaaS. Пользователь может внести страховой взнос, который гарантирует компенсацию в случае системных сбоев или некачественных услуг со стороны любого из перевозчиков, входящих в экосистему.

Создание публичного рейтинга перевозчиков внутри платформы с алгоритмом, учитывающим не только оценки пользователей, но и объективные показатели (пунктуальность, чистота транспорта, количество инцидентов). Операторы с низким рейтингом автоматически исключаются из системы.

3. Коммуникационный уровень: Формирование открытого диалога с пользователем

Запуск платформы «Мой МaaS» для сбора идей и жалоб от жителей края. Реализованные предложения пользователей должны публично анонсироваться с указанием их авторства, что создаст эффект соуправления системой [17].

Организация регулярных «Дней открытых данных» для блогеров, журналистов и активных граждан, где МaaS-оператор отчитывается о ключевых показателях работы.

Разработка пилотной программы «МааS-амбассадор» для лидеров мнений в Краснодаре и курортных городах. Участники программы получают ранний доступ к функциям, тестируют обновления и делятся честным опытом в соцсетях, формируя «эффект сарафанного радио».

Ожидаемый эффект для Краснодарского края:

Предложенные меры позволят перевести МааS из категории «рискованной инновации» в категорию «надежной городской услуги». Снижение когнитивных и финансовых рисков для пользователя напрямую повысит его готовность отказаться от личного автомобиля в пользу интегрированной мобильности, что будет способствовать решению ключевых транспортных проблем региона — загруженности дорог и экологической обстановки. Успешная реализация данной модели может стать эталоном для других субъектов Южного Федерального округа.

Проведенное исследование позволило сформулировать ряд ключевых выводов, имеющих теоретическую и практическую значимость для решения проблемы формирования лояльности пользователей к системе МааS в условиях Краснодарского края. На основе комплексного анализа установлено, что регион обладает значительным, хотя и нереализованным потенциалом для успешного внедрения концепции МааS. Высокая транспортная нагрузка в крупных городах, диверсифицированная транспортная экосистема и активная цифровизация населения создают объективные предпосылки для перехода к интегрированной мобильности. Однако успешность внедрения будет определяться способностью системы преодолеть укорененные модели транспортного поведения и сформировать устойчивое доверие пользователей [18].

Разработанная в исследовании модель факторов лояльности выявила, что в условиях Краснодарского края формирование приверженности к МааS происходит через последовательное достижение технологической надежности, функционального удобства, экономической выгоды и эмоционального доверия. Особое

значение в этом процессе играет региональная специфика, проявляющаяся в сезонных колебаниях транспортной нагрузки, разнородности пользовательских групп и необходимости обеспечения бесперебойной работы системы в пиковые периоды. Критическим барьером было идентифицировано недоверие пользователей, связанное с безопасностью платежей, защитой персональных данных и надежностью сервиса.

В качестве практического решения предложена трехуровневая система мер, включающая технологические, организационно-правовые и коммуникационные механизмы преодоления недоверия. Реализация этих мер позволит перевести МaaS из категории рискованной инновации в категорию надежной городской услуги, способствуя решению актуальных транспортных проблем региона. Теоретическая значимость работы заключается в адаптации классических моделей лояльности к специфике интегрированных транспортных систем, а практическая ценность – в разработке конкретных рекомендаций для участников, которые могут быть использованы при разработке пилотных проектов МaaS не только в Краснодарском крае, но и в других регионах со схожими характеристиками.

### **Список литературы**

1. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. (2022). *Концепция «умного города» в Российской Федерации*. Москва: Минстрой России, 65 с.
2. Министерство транспорта и дорожного хозяйства Краснодарского края. (2021). *Стратегия развития транспортной системы Краснодарского края до 2030 года*. Краснодар, 120 с.
3. Иноземцева, А. Ю., & Коновалова, Т. В. (2019). Цифровая трансформация пассажирского транспорта. В *Механика, оборудование, материалы и технологии: электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции* (Краснодар, 29–30 октября 2019 года, с. 613–616). Редакция-

- ная коллегия: Литвинов А. Е., Плоmodityяло Р. Л., Коновалова Т. В., Гукасян А. В., Война А. А., Вольченко Н. А. Краснодар: ООО «Принт Терра». EDN: <https://elibrary.ru/JIXMJD>
4. Изюмский, А. А., Надирян, С. Л., Леонова, И. О., & Гонтарук, А. В. (2025). Цифровые трансформации транспорта в городе Краснодар. В *Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств: сборник научных трудов по материалам XX Международной научно-технической конференции* (Саратов, 24 июня 2025 года, с. 40–46). Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А. EDN: <https://elibrary.ru/VYJTDY>
  5. Изюмский, А. А., Надирян, С. Л., & Коцурба, С. В. (2023). Цифровизация – единственный путь развития автомобильных перевозок. *International Journal of Advanced Studies*, 13(4), 118–127. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-4-118-127>. EDN: <https://elibrary.ru/DTCBRL>
  6. Надирян, С. Л., Коновалова, Т. В., Гонтарук, А. В., & Рышкова, П. А. (2025). Совершенствование организации пассажирских перевозок на примере регулярного маршрута в г. Краснодаре. *Вестник Донецкой академии транспорта*, 2, 50–60. EDN: <https://elibrary.ru/XJBOEZ>
  7. Агентство стратегических инициатив. (2021). *Аналитический обзор «Mobility as a Service (MaaS): мировой и российский опыт»*. Москва, 45 с.
  8. Надирян, С. Л. (2024). *Методика оптимизации численности автотранспортных средств, обслуживающих регулярные маршруты городского пассажирского транспорта* (Канд. дис. ... канд. техн. наук). 140 с. EDN: <https://elibrary.ru/KLNFNI>
  9. Дрючин, Д. А., Коновалова, Т. В., Лебедев, Е. А., Надирян, С. Л., & Рассоха, В. И. (2024). *Оптимизация численности автотранспортных средств, обслуживающих регулярные маршруты городских агломераций: монография*. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 178 с. (ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный

- университет», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»)
10. Коновалова, Т. В., Надирян, С. Л., & Котенкова, И. Н. (2024). *Организация перевозочных услуг и безопасность транспортного процесса: учебное пособие*. Краснодар: Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 256 с. ISBN: 978-5-8333-1355-8. EDN: <https://elibrary.ru/SZMALB>
  11. Надирян, С. Л., Дрючин, Д. А., & Рассоха, В. И. (2023). *Программа расчёта себестоимости перевозки пассажиров по муниципальным маршрутам регулярных перевозок* (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023668943; заявка № 2023667650 от 25.08.2023; зарегистрировано 06.09.2023)
  12. Надирян, С. Л., Дрючин, Д. А., Рассоха, В. И., & Изюмский, А. А. (2024). *Программа расчёта технико-экономических показателей работы автобусов на регулярном маршруте городского пассажирского транспорта при обеспечении оптимальной наполняемости салона* (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024619554; заявка от 18.04.2024; зарегистрировано 24.04.2024)
  13. Надирян, С. Л., Дрючин, Д. А., Рассоха, В. И., & Изюмский, А. А. (2024). *Программа расчёта численности транспортных средств, обслуживающих регулярный маршрут городского пассажирского транспорта при обеспечении оптимальной наполняемости салона* (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024660023; заявка от 18.04.2024; зарегистрировано 02.05.2024)
  14. Рассоха, В. И. (2010). Ситуационное управление автотранспортными системами. Схема и сценарии управления городским пассажирским транспортом. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 4(110), 142–146. EDN: <https://elibrary.ru/MLZQRX>
  15. Бочаров, И. А., Власов, Ю. Л., & Рассоха, В. И. (2011). Модель определения оптимального количества маршрутных транспортных средств. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 10(129), 49–53. EDN: <https://elibrary.ru/PDRBUX>

16. Regirer, S. A., Smirnov, N. N., & Chenchik, A. E. (2007). Mathematical model of moving collectives interaction: Public transport and passengers. *Automation and Remote Control*, 68(7), 1225–1238. <https://doi.org/10.1134/S0005117907070107>. EDN: <https://elibrary.ru/LKGOXF>
17. Mao, B.-H., Wang, M., Ho, T.-K., & Chen, H.-B. (2022). A review and prospect of urban public transit level-of-service research. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 22(1), 2–13.
18. Dahim, M. (2021). Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7(12), 2030–2042. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091776>. EDN: <https://elibrary.ru/ATRZWP>

### *References*

1. Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. (2022). *Concept of a “smart city” in the Russian Federation*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 65 p.
2. Ministry of Transport and Road Facilities of Krasnodar Krai. (2021). *Strategy for the development of the transport system of Krasnodar Krai until 2030*. Krasnodar, 120 p.
3. Inozemtseva, A. Yu., & Konovalova, T. V. (2019). Digital transformation of passenger transport. In *Mechanics, equipment, materials and technologies: Electronic collection of scientific articles based on materials of the International Scientific and Practical Conference (Krasnodar, October 29–30, 2019, pp. 613–616)*. Editorial board: Litvinov A. E., Plomodyalo R. L., Konovalova T. V., Gukasyan A. V., Voyna A. A., Volchenko N. A. Krasnodar: LLC “Print Terra”. EDN: <https://elibrary.ru/JIXMJD>
4. Izyumsky, A. A., Nadiryan, S. L., Leonova, I. O., & Gontaruk, A. V. (2025). Digital transformations of transport in the city of Krasnodar. In *Topical issues of organizing road transportation, traffic safety and vehicle operation: Collection of scientific papers based on materials of the XX International Scientific and Technical Conference (Saratov, June 24, 2025, pp. 40–46)*. Saratov: Yuri Gagarin Saratov State Technical University. EDN: <https://elibrary.ru/VYJTDY>

5. Izyumsky, A. A., Nadiryan, S. L., & Kotsurba, S. V. (2023). Digitalization — the only path for the development of road transportation. *International Journal of Advanced Studies*, 13(4), 118–127. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-4-118-127>. EDN: <https://elibrary.ru/DTCBRL>
6. Nadiryan, S. L., Konovalova, T. V., Gontaruk, A. V., & Rynkova, P. A. (2025). Improving the organization of passenger transportation using the example of a regular route in Krasnodar. *Bulletin of Donetsk Transport Academy*, (2), 50–60. EDN: <https://elibrary.ru/XJBOEZ>
7. Agency for Strategic Initiatives. (2021). *Analytical review “Mobility as a Service (MaaS): Global and Russian experience”*. Moscow, 45 p.
8. Nadiryan, S. L. (2024). *Methodology for optimizing the number of vehicles serving regular urban passenger transport routes* (Candidate dissertation in Engineering Sciences). 140 p. EDN: <https://elibrary.ru/KLNFNI>
9. Dryuchin, D. A., Konovalova, T. V., Lebedev, E. A., Nadiryan, S. L., & Rassokha, V. I. (2024). *Optimizing the number of vehicles serving regular routes in urban agglomerations: Monograph*. Krasnodar: Publishing House “Yug”, 178 p. (Orenburg State University, Kuban State Technological University)
10. Konovalova, T. V., Nadiryan, S. L., & Kotenkova, I. N. (2024). *Organization of transportation services and transport process safety: Study guide*. Krasnodar: Kuban State Technological University Publishing House, 256 p. ISBN: 978-5-8333-1355-8. EDN: <https://elibrary.ru/SZMALB>
11. Nadiryan, S. L., Dryuchin, D. A., Rassokha, V. I., & Izyumsky, A. A. (2023). *Program for calculating the cost of passenger transportation on municipal regular routes* (Certificate of computer program registration RU 2023668943; application No. 2023667650 dated August 25, 2023; registered September 6, 2023)
12. Nadiryan, S. L., Dryuchin, D. A., Rassokha, V. I., & Izyumsky, A. A. (2024). *Program for calculating technical and economic indicators of bus operation on a regular urban passenger route with optimal cabin occupancy* (Certificate of computer program registra-

- tion RU 2024619554; application dated April 18, 2024; registered April 24, 2024)
13. Nadiryayn, S. L., Dryuchin, D. A., Rassokha, V. I., & Izyumsky, A. A. (2024). *Program for calculating the number of vehicles serving a regular urban passenger route with optimal cabin occupancy* (Certificate of computer program registration RU 2024660023; application dated April 18, 2024; registered May 2, 2024)
  14. Rassokha, V. I. (2010). Situational management of motor transport systems. Scheme and scenarios for managing urban passenger transport. *Bulletin of Orenburg State University*, 4(110), 142–146. EDN: <https://elibrary.ru/MLZQRX>
  15. Bocharov, I. A., Vlasov, Yu. L., & Rassokha, V. I. (2011). Model for determining the optimal number of route vehicles. *Bulletin of Orenburg State University*, 10(129), 49–53. EDN: <https://elibrary.ru/PDRBUX>
  16. Regirer, S. A., Smirnov, N. N., & Chenchik, A. E. (2007). Mathematical model of moving collectives interaction: Public transport and passengers. *Automation and Remote Control*, 68(7), 1225–1238. <https://doi.org/10.1134/S0005117907070107>. EDN: <https://elibrary.ru/LKGOXF>
  17. Mao, B.-H., Wang, M., Ho, T.-K., & Chen, H.-B. (2022). A review and prospect of urban public transit level of service research. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 22(1), 2–13.
  18. Dahim, M. (2021). Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7(12), 2030–2042. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091776>. EDN: <https://elibrary.ru/ATRZWP>

## ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Коновалова Татьяна Вячеславовна**, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой «Транспортных процессов и технологических комплексов»  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»*

*ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация*  
*tan\_kon@mail.ru*

**Надирян София Леоновна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортных процессов и технологических комплексов»  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»*  
*ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация*  
*sofi008008@yandex.ru*

**Гонтарук Алиса Викторовна**, студент кафедры «Транспортных процессов и технологических комплексов»  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»*  
*ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация*  
*alisagont14@gmail.com*

**Рассоха Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, декан Транспортного факультета  
*ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»*  
*пр-т Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация*  
*cabin2012@yandex.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Tatiana V. Konovalova**, PhD in Economics, Associate Professor, Head of the Department of Transport Processes and Technological Complexes  
*Kuban State Technological University*  
*2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation*  
*tan\_kon@mail.ru*

**Sofia L. Nadiryan**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Processes and Technological Complexes  
*Kuban State Technological University*  
2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation  
*soft008008@yandex.ru*

**Alisa V. Gontaruk**, Student of the Department of Transport Processes and Technological Complexes  
*Kuban State Technological University*  
2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation  
*alisagont14@gmail.com*

**Vladimir I. Rassokha**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Transport  
*Orenburg State University*  
13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation  
*cabin2012@yandex.ru*

Поступила 01.11.2025

После рецензирования 15.12.2025

Принята 19.12.2025

Received 01.11.2025

Revised 15.12.2025

Accepted 19.12.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-410

EDN: BBZCAA



УДК 625.143.001.57

Научная статья | Управление процессами перевозок

## МОДЕЛИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

*В.А. Надежкин, С.А. Надежкина*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Токопроводящие стыки рельсовых линий являются критически важным элементом для работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Их отказы приводят к сбоям в рельсовых цепях, искажая информацию о положении поездов и создавая угрозы безопасности. Классические методы оценки надежности (марковские модели и статистический аппарат) имеют существенные ограничения, так как не учитывают неэкспоненциальный характер износа стыков и влияние эксплуатационных факторов (нагрузка, климат, качество обслуживания).

**Цель** – разработка и анализ усовершенствованных подходов к оценке надежности токопроводящих стыков, преодолевающих ограничения классических моделей, с использованием аппарата полумарковских процессов и практических методов ретроспективного и матричного анализа.

**Материалы и методы.** Аппарат полумарковских процессов, позволяющий использовать произвольные законы распределения времени наработки на отказ (Вейбулла, логарифмически нормальное и др.), что адекватнее описывает процессы деградации. Сравнение фактических и нормативных параметров потока отказов ( $\omega$ ) и коэффициента вынужденного простоя ( $\kappa$ ) для диагностики состояния участков пути. Анализ зависимости интенсивности отказов стыков от их возраста на основе матрицы отказов, позволяющий выявить периоды приработки, нормальной эксплуатации и старения.

**Результаты.** В статье подтверждена адекватность полумарковских моделей для описания неэкспоненциального характера износа токопроводящих стыков. Разработана система критериев для ретроспективной оценки, позволяющая дифференцировать влияние физического износа стыков и качества их эксплуатационного обслуживания на надежность работы ЖАТ. Показано, что матричный метод эффективно выявляет зависимость интенсивности отказов от возраста, что является основой для перехода от реактивного к предиктивному (прогнозному) техническому обслуживанию.

**Ключевые слова:** токопроводящие стыки; надежность; полумарковские процессы; параметр потока отказов; коэффициент вынужденного простоя; матричный метод; интенсивность отказов

**Для цитирования.** Надежкин, В. А., & Надежкина, С. А. (2025). Модели статистической оценки показателей надежности рельсовых линий. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 48–64. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-410>

Original article | Transportation Process Management

## STATISTICAL ESTIMATION MODELS FOR RAIL LINE RELIABILITY INDICATORS

*V.A. Nadezhkin, S.A. Nadezhkina*

### *Abstract*

**Background.** Conducting joints of rail lines are a critical element for the operation of railway automation and telemechanics devices. Their failures lead to malfunctions in track circuits, distorting information about train locations and creating safety hazards. Classical reliability assessment methods (Markov models and statistical tools) have significant limitations, as they do not account for the non-exponential nature of joint wear and the influence of operational factors (load, climate, maintenance quality).

**Purpose.** to develop and analyze improved approaches for assessing the reliability of conducting joints, overcoming the limitations of classical models, using the framework of semi-Markov processes and practical methods of retrospective and matrix analysis.

**Materials and methods.** The framework of semi-Markov processes, which allows for the use of arbitrary distributions of time-to-failure (Weibull, log-normal, etc.), thus providing a more adequate description of degradation processes. A comparison of actual and normative parameters of the failure flow ( $\omega$ ) and the forced downtime ratio ( $\kappa$ ) for diagnosing the condition of track sections. Analysis of the dependence of joint failure rate on their age based on a failure matrix, enabling the identification of burn-in, normal operation, and aging periods.

**Results.** The article confirms the adequacy of semi-Markov models for describing the non-exponential wear of conducting joints. A system of criteria for retrospective assessment has been developed, allowing for the differentiation of the influence of physical wear of the joints and the quality of their operational maintenance on the reliability of railway automation and telemechanics. It is shown that the matrix method effectively reveals the dependence of the failure rate on age, which forms the basis for transitioning from reactive to predictive maintenance.

**Keywords:** conducting joints; reliability; semi-Markov processes; failure flow parameter; forced downtime ratio; matrix method; failure rate

**For citation.** Nadezhkin, V. A., & Nadezhkina, S. A. (2025). Statistical estimation models for rail line reliability indicators. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 48–64. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-410>

## Введение

Бесперебойное и безопасное функционирование железнодорожного транспорта напрямую зависит от надежной работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Ключевым элементом, обеспечивающим передачу информации о занятости путевых участков и формирование сиг-

налов для автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), является рельсовая цепь. Ее корректная работа, в свою очередь, обусловлена состоянием токопроводящих стыковых соединений рельсовой линии. Нарушение целостности и проводимости этих стыков приводит к росту переходного сопротивления, что вызывает искажение информации, ложные занятости, сбои в системе СЦБ и, как следствие, создает прямую угрозу безопасности движения, снижая пропускную способность инфраструктуры [1; 2].

В настоящее время для оценки и прогнозирования надежности электрооборудования, включая токопроводящие стыки, широко применяется классический статистический аппарат и марковские модели. Однако эти подходы обладают существенными ограничениями. Классические методы часто пренебрегают влиянием эксплуатационных факторов (динамика нагрузок, климатические условия, качество обслуживания), а марковские модели предполагают экспоненциальный закон распределения наработки на отказ, что не всегда адекватно описывает реальные процессы постепенной деградации и старения стыков, характеризующиеся периодами нормальной эксплуатации и последующего резкого увеличения интенсивности отказов.

В связи с этим актуальной задачей является разработка и адаптация более совершенных математических моделей и практических методов, позволяющих учитывать неэкспоненциальный характер износа и влияние внешних факторов для точной оценки текущего состояния и остаточного ресурса токопроводящих стыков [3; 4].

### **Материалы и методы**

Надежность рельсовой линии является фундаментальным условием безопасной организации движения поездов. Особое место в этой системе занимают токопроводящие стыки, от состояния которых напрямую зависит корректная работа устройств ЖАТ, в

частности, рельсовых цепей. Нарушение контакта в стыке приводит к увеличению переходного сопротивления, что может вызвать ложную занятость путевого участка, сбой в работе автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и, как следствие, нарушение графика движения и снижение пропускной способности.

Классический математический аппарат обработки статистики для оценки показателей надежности электрооборудования, включая токопроводящие стыки, изложен в работах [5-7] и состоит из последовательности этапов:

1. Представление статистического материала по отказам в виде вариационного или статистического ряда (гистограммы).
2. Выбор вида закона распределения случайной величины (наработки на отказ, времени восстановления).
3. Проверка согласия эмпирического распределения с принятым теоретическим законом (например, с помощью критериев  $\chi^2$ , Колмогорова-Смирнова).
4. Оценка параметров выбранного закона распределения.
5. Непосредственный расчет показателей надежности (вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов).

Главным требованием к статистическому материалу является однородность исходных данных, так как массив формируется за продолжительный период эксплуатации и по большому количеству однотипных элементов. Основное достоинство этого подхода – формирование представительной выборки, что повышает достоверность полученного эмпирического закона распределения.

Существенным недостатком, особенно актуальным для токопроводящих стыков, работающих в разных условиях, является пренебрежение эксплуатационными факторами. В рамках классического подхода не учитываются различия в рабочих токах, качестве монтажа и технического обслуживания, климатических условиях (температура, влажность, загрязненность

атмосферы), что может приводить к значительным погрешностям в оценках.

*Полумарковские модели в оценке надежности токопроводящих стыков.*

Классические однородные марковские модели с непрерывным временем, широко применяемые для оценки надежности электрооборудования, обладают существенным ограничением: они предполагают экспоненциальное распределение интенсивностей переходов между состояниями (исправно, неисправно, дефект и т.д.). Для многих физических процессов, включая деградацию токопроводящих стыков под воздействием электрической нагрузки, термических циклов и окружающей среды, это предположение является излишне жестким и не всегда соответствует экспериментальным данным.

Преодолеть указанное ограничение позволяет переход к полумарковским моделям. Полумарковские процессы представляют собой важное обобщение марковских процессов. Основное отличие заключается в том, что время пребывания элемента или системы в  $jj$ -м состоянии описывается произвольной функцией распределения  $F_{jk}(t)$   $F_{jk}(t)$ , а не только экспоненциальной.

Это открывает возможности для более точного моделирования. При наличии достаточной статистической информации о времени безотказной работы токопроводящих стыков, времени возникновения дефектов (таких как ослабление контактного давления, окисление поверхностей) или наработке до отказа, можно идентифицировать реальные статистические законы распределения (Вейбулла, логарифмически нормальное, гамма-распределение и др.) и использовать адекватный математический аппарат.

Важными соотношениями в полумарковском подходе являются:

- Среднее время пребывания в  $jj$ -м состоянии до перехода в  $kk$ -е состояние равно безусловному среднему времени пребывания в  $jj$ -м состоянии.

- Интенсивность потока событий, выводящего оборудование из состояния  $j\bar{j}$ , является обратной величиной среднего времени пребывания в этом состоянии [8, 9, 10].

Под интенсивностями потоков событий понимаются ключевые единичные показатели надежности:

- Интенсивность потока отказов  $\lambda(t)$   $\lambda(t)$
- Параметр потока отказов  $\varphi(t)$   $\varphi(t)$
- Интенсивность потока дефектов  $\lambda_n(t)$   $\lambda_n(t)$
- Интенсивность восстановления  $\mu(t)$   $\mu(t)$

Использование однородных марковских и полумарковских моделей для описания реальных процессов старения и отказов токопроводящих стыков требует дополнительных исследований, в частности, в направлении учета эксплуатационных факторов (динамика нагрузок, качество технического обслуживания, климатические воздействия) при оценке итоговых показателей надежности.

Метод ретроспективной оценки на основе параметров потока отказов стыков.

Для ретроспективной оценки технического состояния участка пути по состоянию стыковых соединений применяется метод [6], основанный на сравнении параметров потока отказов  $\omega$  и коэффициента вынужденного простоя  $K_{вп}$ , вызванного этими отказами. Отказ стыка здесь трактуется как событие, приводящее к нарушению работы устройств ЖАТ и требующее немедленного вмешательства.

Усредненный расчетный параметр потока отказов стыков  $\omega(p)$   $\omega(p)$  и коэффициент вынужденного простоя  $K_{вп}(p)$   $K_{вп}(p)$  определяются как:

$$\omega(p) = n(p)t, K_{вп}(p) = \Delta T(p)t, \omega(p) = tn(p), K_{вп}(p) = t\Delta T(p), \quad (1.1)$$

где  $n(p)$   $n(p)$  – расчетное количество отказов стыков на рассматриваемом участке за время  $t$ ;  $\Delta T(p)$   $\Delta T(p)$  – расчетное время простоя участка из-за отказов стыков.

Фактические показатели  $\omega(\phi)$   $\omega(\phi)$  и  $K_{вп}(\phi)$   $K_{вп}(\phi)$  вычисляются по данным эксплуатации, а средние по сети значения  $\omega(cp)$   $\omega(cp)$  и  $K_{вп}(cp)$   $K_{вп}(cp)$  берутся из базы данных.

Таблица 1.

**Критерии определения технического состояния участка пути  
по надежности стыковых соединений**

№ варианта	Критерий оценки	Оценка состояния	Потенциальное техническое состояние стыков и влияние на ЖАТ
1	$\omega(\phi) \approx \omega(p) > \omega(cp) \approx \omega(\phi) \omega(p) > \omega(cp)$ $K_{\text{ен}}(\phi) \approx K_{\text{ен}}(p) > K_{\text{ен}}(cp) K_{\text{ен}}(\phi) \approx K_{\text{ен}}(p) > K_{\text{ен}}(cp)$	Неудовлетворительное	Высокий риск частых сбоев рельсовых цепей, нестабильная работа АЛС.
2	$\omega(\phi) \approx \omega(p) > \omega(cp) \omega(\phi) \approx \omega(p) > \omega(cp)$ $K_{\text{ен}}(\phi) \approx K_{\text{ен}}(p) > K_{\text{ен}}(cp) K_{\text{ен}}(\phi) \approx K_{\text{ен}}(p) > K_{\text{ен}}(cp)$	Хорошее	Низкий риск нарушений в работе ЖАТ.
3	$\omega(p) > \omega(\phi) > \omega(cp) \omega(p) > \omega(\phi) > \omega(cp)$ $K_{\text{ен}}(p) > K_{\text{ен}}(\phi) > K_{\text{ен}}(cp) K_{\text{ен}}(p) > K_{\text{ен}}(\phi) > K_{\text{ен}}(cp)$	Хорошее, благодаря высокому уровню эксплуатации	Стыки физически изношены, но качественное обслуживание (регулярная подтяжка, замена) предотвращает сбои ЖАТ.
4	$\omega(p) > \omega(\phi) > \omega(cp) \omega(p) > \omega(\phi) > \omega(cp)$ $K_{\text{ен}}(p) > K_{\text{ен}}(\phi) > K_{\text{ен}}(cp) K_{\text{ен}}(p) > K_{\text{ен}}(\phi) > K_{\text{ен}}(cp)$	Неудовлетворительное, но уровень эксплуатации высок	Потенциальная опасность скрытых дефектов, которые могут проявиться при ухудшении обслуживания.
5	$\omega(\phi) > \omega(cp) > \omega(p) \omega(\phi) > \omega(cp) > \omega(p)$ $K_{\text{ен}}(\phi) > K_{\text{ен}}(cp) > K_{\text{ен}}(p) K_{\text{ен}}(\phi) > K_{\text{ен}}(cp) > K_{\text{ен}}(p)$	Плохое, вследствие низкого уровня эксплуатации	Новые или хорошие стыки деградируют из-за плохого обслуживания, ведущего к постоянным ложным занятиям рельсовых цепей.
6	$\omega(p) < \omega(\phi) < \omega(cp) \omega(p) < \omega(\phi) < \omega(cp)$ $K_{\text{ен}}(p) < K_{\text{ен}}(\phi) < K_{\text{ен}}(cp) K_{\text{ен}}(p) < K_{\text{ен}}(\phi) < K_{\text{ен}}(cp)$	Хорошее, но уровень эксплуатации низкий	Стыки имеют высокий запас надежности, но пренебрежение обслуживанием ведет к учащению инцидентов с ЖАТ.

**Матричный метод обработки статистики отказов стыков**

Матричный метод [5] позволяет анализировать зависимость интенсивности отказов стыков от их возраста [11; 12]. Исходные данные представляются в виде матрицы, где строки – год укладки рельсошпальной решетки (или год сборки стыковых соединений), а столбцы – год эксплуатации.

Таблица 2.

**Фрагмент матрицы отказов токопроводящих стыков**

Год укладки, $nt$	Отказы стыков по годам эксплуатации ( $t$ )			
	1	2	3	$j$
2020	–	$M_{20,21}M_{20,21}$	$M_{20,22}M_{20,22}$	$M_{20,20+j}M_{20,20+j}$
2021	–	–	$M_{21,22}M_{21,22}$	$M_{21,21+j}M_{21,21+j}$
2022	–	–	–	$M_{22,22+j}M_{22,22+j}$

Интенсивность отказов стыков в возрасте  $jj$  лет рассчитывается по формуле:

$$\lambda(j) = \sum imi, i + j \sum ini - \sum k \sum lmk, l, \lambda(j) = \sum ini - \sum k \sum lmk, l \sum imi, i + j, (1.2)$$

где числитель – количество отказов всех стыков в возрасте  $jj$  лет, а знаменатель – количество стыков, находившихся в эксплуатации и работоспособных к возрасту  $jj$  лет.

Построение зависимости  $\lambda(j)\lambda(j)$  позволяет выявить характерные периоды: приработки, нормальной эксплуатации и старения, что критически важно для планирования ремонтов и замены стыковых соединителей до того, как их отказы начнут массово влиять на работу ЖАТ [13-15].

**Результаты и обсуждение**

Анализ механизмов старения токопроводящих стыков (ослабление контакта, термическая усталость, коррозия) показывает, что процессы деградации носят неэкспоненциальный характер. Накопление повреждений часто имеет период «старения», после которого интенсивность отказов резко возрастает. Это делает применение полумарковских моделей с произвольным законом распределения времени до отказа (например, распределением Вейбулла с параметром формы  $\beta > 1$ ) теоретически обоснованным [16; 17].

Основное преимущество такого подхода – возможность более точного прогнозирования остаточного ресурса стыков на основе реальных данных об отказах, а не на основе упрощенных моделей.

Однако ключевой проблемой внедрения является необходимость сбора большого объема высококачественных данных для идентификации параметров моделей, что требует создания специализированных систем мониторинга и учета.

Метод ретроспективной оценки на основе параметров потока отказов является практичным инструментом для экспресс-диагностики состояния парка токопроводящих стыков. Его главное достоинство – наглядность и относительная простота. Представленная в Таблице 1 система критериев позволяет не только констатировать состояние, но и в определенной степени дифференцировать влияние собственного старения оборудования и качества эксплуатации.

Для токопроводящих стыков это особенно важно, так как их состояние сильно зависит от соблюдения регламентов технического обслуживания (подтяжка болтовых соединений, очистка контактных поверхностей). Например, вариант 5 из Таблицы 1 (плохое состояние из-за низкого уровня эксплуатации при потенциально хорошем состоянии оборудования) может быть типичным для стыков, обслуживание которых проводится нерегулярно или с нарушениями.

Основным недостатком метода, как и классического подхода, является усреднение данных и игнорирование индивидуальных эксплуатационных факторов. Стыки, работающие в разных условиях эксплуатации (с разной нагрузкой) и в разных климатических зонах, условно считаются однотипными, что снижает точность оценки.

Матричный метод предоставляет более детальную информацию о зависимости интенсивности отказов от возраста. Построение функции  $\lambda^-(t)\lambda^-(t)$  для токопроводящих стыков позволяет выявить характерные периоды их «жизни»: приработка, нормальной эксплуатации и старения. Это ценно для планирования ремонтов и замен.

Однако для стыков, которые являются частью более сложного оборудования (например, силовых трансформаторов), выделение данных именно по отказам стыков из общей статистики отказов может быть затруднено. Кроме того, метод, как справедливо отмечено в исходном материале [18, 19, 20] не позволяет оценить

текущие процессы деградации в произвольный момент времени, а фиксирует лишь факт отказа. Он также страдает от той же проблемы неоднородности данных, так как в анализ попадают стыки разного возраста, эксплуатирующиеся в разных условиях.

### **Заключение**

Надежность токопроводящих стыков является системообразующим фактором для бесперебойной и безопасной работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Отказы стыков непосредственно приводят к сбоям в рельсовых цепях и искажению информации о положении поездов. Аппарат полумарковских процессов является адекватным инструментом для моделирования надежности стыковых соединений, так как позволяет учитывать неэкспоненциальный характер их износа. Метод ретроспективной оценки на основе сравнения параметров потока отказов и коэффициента простоя позволяет не только оценить техническое состояние стыков, но и дифференцировать вклад физического износа и качества эксплуатационного обслуживания в возникающие проблемы с ЖАТ. Матричный метод эффективно выявляет зависимость интенсивности отказов стыков от их возраста, что позволяет заблаговременно планировать профилактические работы и предотвращать массовые нарушения в работе систем автоматики. Для повышения точности прогнозов необходима разработка интегрированных моделей, связывающих статистику отказов стыков с мониторингом их электрических параметров (переходного сопротивления) в реальном времени. Это позволит перейти от реагирования на отказы к предиктивному обслуживанию, минимизирующему риски для системы ЖАТ и безопасности движения в целом.

### **Список литературы**

1. Цветков, В. А. (1992). Математическая модель для анализа надёжности генераторов с учётом развития дефектов. *Электричество*, (11), 64–65.

2. Вентцель, Е. С. (1969). *Теория вероятностей* (4-е изд.). Москва: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 576 с. EDN: <https://elibrary.ru/NRYKLC>
3. Вентцель, Е. С., & Овчаров, Л. А. (1991). *Теория случайных процессов и её инженерные приложения*. Москва: Наука, 384 с. ISBN: 5-02-014125-9. EDN: <https://elibrary.ru/YNMQIF>
4. Гмурман, В. Е. (2008). *Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие* (12-е изд., перераб.). Москва: Высш. образование, 479 с.
5. Руденко, Ю. Н. (Ред.). (2000). *Надёжность систем энергетики и их оборудования: справочник: в 4 т. Т. 2: Надёжность электроэнергетических систем* / под ред. М. Н. Розанова. Москва: Энергоатомиздат, 568 с.
6. Беляев, Ю. К., [и др.]; Ушаков, И. А. (Ред.). (1985). *Надёжность технических систем: справочник*. Москва: Радио и связь, 608 с.
7. Рутковская, Д., Пилиньский, М., & Рутковский, Л. (2007). *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы* / пер. с польск. И. Д. Рудинского. Москва: Горячая линия — Телеком, 452 с.
8. Северцев, Н. А., Мухин, А. В., & Ефимов, И. А. (2007). Математические основы теории выбора решений, обеспечивающих надёжность и безопасность систем. В кн.: *Труды международного симпозиума «Надёжность и качество»* (Т. 2, с. 121–123). EDN: <https://elibrary.ru/NDUPWV>
9. Сапожников, В. В., Сапожников, В. В., & Ефанов, Д. В. (2019). *Основы теории надёжности и технической диагностики*. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 588 с. ISBN: 978-5-8114-3453-4. EDN: <https://elibrary.ru/IZBJPZ>
10. Надежкин, В. А. (2025). Оптимизация диагностирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики по техническому состоянию. В кн.: *Актуальные проблемы в транспортной отрасли: Материалы Всероссийской научно-исследовательской конференции, Воронеж, 25 апреля 2025 года* (с. 35–38). Воронеж:

- ООО Издательско-полиграфический центр «Научная книга».  
EDN: <https://elibrary.ru/DABEQJ>
11. Тарасов, Е. М., Тарасова, А. Е., & Надежкин, В. А. (2022). К вопросу автоматизации технической диагностики и мониторинга. *Наука и образование транспорту*, (1), 362–364. EDN: <https://elibrary.ru/ZLIYYT>
  12. Тарасов, Е. М., & Надежкин, В. А. (2024). Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей. *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*, (2), 45–50. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-02-6>. EDN: <https://elibrary.ru/DSUOVV>
  13. Ефанов, Д. В. (2016). *Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики*: монография. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 171 с. ISBN: 978-5-7641-0933-6. EDN: <https://elibrary.ru/XAFAIN>
  14. Ефанов, Д. В. (2014). Метод автоматизации проверки логики функционирования объектов диагностирования в системах удалённого контроля и мониторинга. *Транспорт Урала*, (3), 58–62. EDN: <https://elibrary.ru/SVNLBZ>
  15. Сапожников, В. В., & Сапожников, Вл. В. (2004). *Основы технической диагностики*. Москва: Маршрут, 316 с. ISBN: 5-89035-123-0. EDN: <https://elibrary.ru/QNRRAL>
  16. Сапожников, В. В., Сапожников, Вл. В., & Лыков, А. А. (2004). Теоремы анализа для обнаружения неисправностей типа «временная задержка». *Электронное моделирование*, 26(3), 83–93.
  17. Tarasov, E., Nadezhkin, V., Nadezhkina, S., [et al.]. (2023). Insulating joints as a destabilizing factor in the operation of the track circuit. In *VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023), Karshi, 14–16 июня 2023 года* (p. 1019). Les Ulis: EDP SCIENCES SA. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341101019>. EDN: <https://elibrary.ru/YMJQQR>
  18. Сапожников, Вал. В., Сапожников, Вл. В., & Шаманов, В. И. (2003). *Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи*: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп.

- / под ред. Вл. В. Сапожникова. Москва: Маршрут, 263 с. ISBN: 5-89035-119-2. EDN: <https://elibrary.ru/QNRGQL>
19. Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R. N., [et al.]. (2001). The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 638–646.
20. Сорокин, А. С. (2008). Математическое моделирование оценки надёжности технологических систем. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, (5), 28–37. EDN: <https://elibrary.ru/JVZBJT>

### *References*

1. Tsvetkov, V. A. (1992). Mathematical model for analyzing the reliability of generators considering defect development. *Electricity*, (11), 64–65.
2. Ventzel, E. S. (1969). *Probability theory* (4th ed.). Moscow: Main Editorial Board of Physical and Mathematical Literature, Nauka Publishing House, 576 p. EDN: <https://elibrary.ru/NRYKLC>
3. Ventzel, E. S., & Ovcharov, L. A. (1991). *Theory of random processes and its engineering applications*. Moscow: Nauka, 384 p. ISBN: 5-02-014125-9. EDN: <https://elibrary.ru/YNMQIF>
4. Gmurman, V. E. (2008). *Probability theory and mathematical statistics: textbook* (12th ed., revised). Moscow: Higher Education, 479 p.
5. Rudenko, Yu. N. (Ed.). (2000). *Reliability of energy systems and their equipment: reference book in 4 vols. Vol. 2: Reliability of electric power systems* / Ed. by M. N. Rozanov. Moscow: Energoatomizdat, 568 p.
6. Belyaev, Yu. K., [et al.]; Ushakov, I. A. (Ed.). (1985). *Reliability of technical systems: reference book*. Moscow: Radio and Communication, 608 p.
7. Rutkovskaya, D., Pilinsky, M., & Rutkovsky, L. (2007). *Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems* / Translated from Polish by I. D. Rudinsky. Moscow: Goryachaya Liniya — Telekom, 452 p.
8. Severtsev, N. A., Mukhin, A. V., & Efimov, I. A. (2007). Mathematical foundations of decision-making theory ensuring system reliability and

- safety. In: *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”* (Vol. 2, pp. 121–123). EDN: <https://elibrary.ru/NDUPWV>
9. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. V., & Efanov, D. V. (2019). *Fundamentals of reliability theory and technical diagnostics*. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 588 p. ISBN: 978-5-8114-3453-4. EDN: <https://elibrary.ru/IZBJPZ>
  10. Nadezhkin, V. A. (2025). Optimization of diagnostics of railway automation and remote control systems based on technical condition. In: *Actual problems in the transport industry: Proceedings of the All-Russian Scientific Research Conference, Voronezh, April 25, 2025* (pp. 35–38). Voronezh: LLC Publishing and Printing Center “Nauchnaya Kniga”. EDN: <https://elibrary.ru/DABEQJ>
  11. Tarasov, E. M., Tarasova, A. E., & Nadezhkin, V. A. (2022). On the issue of automation of technical diagnostics and monitoring. *Science and Education for Transport*, (1), 362–364. EDN: <https://elibrary.ru/ZLIYYT>
  12. Tarasov, E. M., & Nadezhkin, V. A. (2024). Diagnostics in the life cycle of insulating joints of track circuits. *Transport: Science, Technology, Management. Scientific Information Collection*, (2), 45–50. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-02-6>. EDN: <https://elibrary.ru/DSUOVV>
  13. Efanov, D. V. (2016). *Functional control and monitoring of railway automation and remote control devices: monograph*. Saint Petersburg: FGBOU VO PGUPS, 171 p. ISBN: 978-5-7641-0933-6. EDN: <https://elibrary.ru/XAFAIN>
  14. Efanov, D. V. (2014). Method of automating the verification of operation logic of diagnostic objects in remote monitoring systems. *Transport of the Urals*, (3), 58–62. EDN: <https://elibrary.ru/SVNLBZ>
  15. Sapozhnikov, V. V., & Sapozhnikov, V. V. (2004). *Fundamentals of technical diagnostics*. Moscow: Marshrut, 316 p. ISBN: 5-89035-123-0. EDN: <https://elibrary.ru/QNRRAL>
  16. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. V., & Lykov, A. A. (2004). Theorems of analysis for detecting “time delay” type faults. *Electronic Modeling*, 26(3), 83–93.

17. Tarasov, E., Nadezhkin, V., Nadezhkina, S., [et al.]. (2023). Insulating joints as a destabilizing factor in the operation of the track circuit. In: *VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC VI 2023), Karshi, June 14–16, 2023* (p. 1019). Les Ulis: EDP Sciences S A. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341101019>. EDN: <https://elibrary.ru/YMJDQR>
18. Sapozhnikov, Val. V., Sapozhnikov, Vl. V., & Shamanov, V. I. (2003). *Reliability of railway automation, remote control and communication systems: textbook for railway transport universities* / Ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow: Marshrut, 263 p. ISBN: 5-89035-119-2. EDN: <https://elibrary.ru/QNRGQL>
19. Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R. N., [et al.]. (2001). The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 638–646.
20. Sorokin, A. S. (2008). Mathematical modeling of reliability assessment of technological systems. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*, (5), 28–37. EDN: <https://elibrary.ru/JVZBJT>

### ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Надежкин Вадим Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте  
*Приволжский государственный университет путей сообщения*  
 ул. Свободы, 2В, г. Самара, 443066, Российская Федерация  
[vadim\\_nadezhkin@mail.ru](mailto:vadim_nadezhkin@mail.ru)

**Надежкина Снежана Андреевна**, преподаватель кафедры Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте  
*Приволжский государственный университет путей сообщения*  
 ул. Свободы, 2В, г. Самара, 443066, Российская Федерация  
[snezhana.sarycheva.97@mail.ru](mailto:snezhana.sarycheva.97@mail.ru)

**DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Vadim A. Nadezhkin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport

*Volga State Transport University*

*2, Svobody Str., Samara, 443066, Russian Federation*

*vadim\_nadezhkin@mail.ru*

*SPIN-code: 8267-7012*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3704-1290>*

*Scopus Author ID: 58087664700*

**Snezhana A. Nadezhkina**, Lecturer at the Department of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport

*Volga State Transport University*

*2, Svobody Str., Samara, 443066, Russian Federation*

*snezhana.sarycheva.97@mail.ru*

*SPIN-code: 5291-4300*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-267X>*

Поступила 20.10.2025

После рецензирования 17.11.2025

Принята 09.12.2025

Received 20.10.2025

Revised 17.11.2025

Accepted 09.12.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-388

EDN: VKNSFW

УДК 004.89:658.012.011.56



Научная статья |

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

## РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ИНТЕГРАЦИЕЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

*А.А. Андреев*

### *Аннотация*

**Обоснование.** В исследовании приведено обоснование использования гибридных подходов, сочетающих методы многокритериального анализа (АНР, TOPSIS, PROMETHEE) с современными технологиями обработки данных, для проектирования адаптивных интерактивных систем поддержки принятия решений (СППР). Такие подходы позволяют автоматически настраивать веса критериев и эффективно обрабатывать большие объёмы информации в условиях неопределённости. Задачей данного типа является поиск оптимального ранжирования альтернатив в многокритериальных задачах, при котором система динамически адаптируется к изменяющимся предпочтениям пользователя и внешним условиям, обеспечивая баланс между точностью, скоростью и интерактивностью. В работе представлены: архитектура гибридной модели СППР, функции оценки близости к идеальному решению (в TOPSIS) и матрицы парных сравнений (в АНР), результаты сравнительной оценки эффективности гибридного подхода относительно традиционных статичных методов MCDA по критериям точности и времени вычислений при обработке больших данных (объём  $> 10^6$  записей). Показано, что предложенный подход сокращает время принятия решений на 25–35 % и повышает точность

ранжирования на 15–20 % по сравнению с изолированным использованием методов многокритериального анализа.

**Цель** – повышение эффективности принятия решений в сложных организационных системах путём использования гибридных методов многокритериального анализа с интеграцией современных технологий обработки данных для задач стратегического и оперативного планирования.

**Материалы и методы.** Главный метод исследования – экономико-математический и системный анализ. В работе используется гибридный подход, сочетающий методы многокритериального анализа (АНР, TOPSIS, PROMETHEE) с технологиями обработки больших данных для решения задач ранжирования альтернатив в интерактивных системах поддержки принятия решений. Статья базируется на комплексе источников, включая научную литературу по системам принятия решений, публикации по многокритериальному анализу, материалы конференций, статистические данные по применению СППР в логистике, финансах и здравоохранении, а также документацию по программным инструментам (Python, Scikit-learn, Tableau).

**Результаты.** В статье подробно рассмотрены принципы и архитектура адаптивных интерактивных систем поддержки принятия решений, интегрирующих методы многокритериального анализа с современными технологиями обработки данных. Показано, что гибридный подход обеспечивает динамическую адаптацию весов критериев и эффективную обработку больших объёмов информации в реальном времени. Полученные данные, включая сравнительный анализ методов MCDA, архитектуру модели и результаты тестирования на примерах из логистики, финансов и здравоохранения, могут быть эффективно использованы организациями при проектировании и внедрении СППР для повышения точности, скорости и прозрачности процессов принятия решений в условиях неопределённости.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений; многокритериальный анализ; адаптивные системы; интерактивный интерфейс; большие данные

**Для цитирования.** Андреев, А. А. (2025). Разработка адаптивных интерактивных систем поддержки принятия решений с интеграцией многокритериального анализа и машинного обучения. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 65–79. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-388>

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

## DEVELOPMENT OF ADAPTIVE INTERACTIVE DECISION SUPPORT SYSTEMS WITH MULTICRITERIAL ANALYSIS AND MACHINE LEARNING INTEGRATION

*A.A. Andreev*

### *Abstract*

**Background.** The study provides a rationale for using hybrid approaches that combine multi-criteria analysis methods (AHP, TOPSIS, PROMETHEE) with modern data processing technologies to design adaptive interactive decision support systems (DSS). These approaches allow for automatic weighting of criteria and efficient processing of large amounts of information under uncertainty. The goal of this type of task is to find the optimal ranking of alternatives in multi-criteria problems, where the system dynamically adapts to changing user preferences and external conditions, ensuring a balance between accuracy, speed, and interactivity. The paper presents the architecture of a hybrid DSS model, the functions for evaluating the closeness to the ideal solution (in TOPSIS) and the matrices of pairwise comparisons (in AHP), and the results of a comparative evaluation of the effectiveness of the hybrid approach compared to traditional static MCDA methods in terms of accuracy and computation time when processing large data sets (with a volume of  $> 10^6$  records). It has

been shown that the proposed approach reduces decision-making time by 25–35% and increases the accuracy of ranking by 15–20% compared to the isolated use of multi-criteria analysis methods.

**Purpose.** Improving the efficiency of decision-making in complex organizational systems by using hybrid methods of multi-criteria analysis and integrating modern data processing technologies for strategic and operational planning tasks.

**Materials and methods.** The main research method is economic-mathematical and system analysis. The paper uses a hybrid approach that combines multi-criteria analysis methods (AHP, TOPSIS, PROMETHEE) with big data processing technologies to solve problems of ranking alternatives in interactive decision support systems. The article is based on a range of sources, including scientific literature on decision-making systems, publications on multi-criteria analysis, conference materials, statistical data on the application of DSS in logistics, finance, and healthcare, as well as documentation on software tools (Python, Scikit-learn, and Tableau).

**Results.** The article discusses in detail the principles and architecture of adaptive interactive decision support systems that integrate multi-criteria analysis methods with modern data processing technologies. It is shown that the hybrid approach provides dynamic adaptation of criterion weights and efficient processing of large amounts of information in real time. The obtained data, including a comparative analysis of MCDA methods, the model architecture, and the test results based on examples from logistics, finance, and healthcare, can be effectively used by organizations when designing and implementing DSS to improve the accuracy, speed, and transparency of decision-making processes in uncertain environments.

**Keywords:** decision support system; multi-criteria analysis; adaptive systems; interactive interface; big data

**For citation.** Andreev, A. A. (2025). Development of adaptive interactive decision support systems with multicriterial analysis and machine learning integration. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 65–79. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-388>

## Введение

Современные организационные системы функционируют в условиях высокой динамики, многокритериальности и неопределённости входных данных. Традиционные системы поддержки принятия решений (СППР) часто не способны эффективно обрабатывать большие объёмы разнородной информации и оперативно реагировать на изменения внешней среды [2; 5]. Это приводит к снижению точности решений, увеличению времени их принятия и недостаточной вовлечённости пользователей. Многокритериальный анализ (MCDA), включающий методы АНР, TOPSIS и PROMETHEE, остаётся основой для структурирования сложных задач принятия решений [8; 10; 14; 21]. Однако в условиях больших данных и необходимости динамической адаптации эти методы требуют интеграции с современными технологиями обработки информации и интерактивными интерфейсами [1; 9].

Анализ современных источников подтверждает актуальность гибридных систем поддержки принятия решений. Сторонники гибридного подхода (MCDA + ML) отмечают повышение точности и скорости. Чечнев В. Б. классифицирует методы MCDA и отмечает, что интеграция с машинным обучением позволяет динамически корректировать веса в режиме реального времени [6]. Mardani et al. в обзоре 2000–2014 гг. (дополненном данными 2020 г.) показывают, что гибридные модели повышают точность ранжирования на 12–25 % при объёмах  $>10^5$  записей [12]. Ishizaka A. и Nemery P. демонстрируют успешное применение метода АНР+TOPSIS с нейронными сетями в промышленности [11].

Критики указывают на риски, например, Ларичев О. И. подчёркивает субъективность шкалы Саати и опасность переобучения моделей машинного обучения при малых выборках [2; 16]. Belton V. и Stewart T.J. отмечают рост вычислительной сложности при интеграции PROMETHEE с большими данными [7]. Подиновский В. В. предупреждает о потере интерпретируемости решений при

чрезмерной автоматизации весов [5].

Таким образом, несмотря на риски, преобладает мнение о перспективности гибридных систем при условии контроля согласованности и прозрачности.

*Цель исследования* – разработка концепции адаптивных интерактивных СППР, обеспечивающих гибкость, масштабируемость и прозрачность процессов принятия решений в сложных организационных системах.

### **Материалы и методы**

Главный метод исследования – экономико-математический и системный анализ. В работе используется гибридный подход, сочетающий методы многокритериального анализа (АНР, TOPSIS, PROMETHEE) с технологиями обработки больших данных для решения задач ранжирования альтернатив в интерактивных системах поддержки принятия решений.

Статья базируется на комплексе источников, включая научную литературу по системам принятия решений, публикации по многокритериальному анализу, материалы конференций, статистические данные по применению СППР в логистике, финансах и здравоохранении, а также документацию по программным инструментам (Python, Scikit-learn, Tableau) [2; 3; 6; 7; 10-14].

Этапы методологии:

1. Формализация задачи – сбор критериев, построение матриц парных сравнений (АНР) [14].
2. Гибридная обработка данных – применение TOPSIS для ранжирования, интеграция с технологиями обработки больших данных [12; 18].
3. Разработка интерфейса – создание динамических дашбордов с возможностью корректировки весов в реальном времени [11; 19].
4. Интеграция и тестирование – подключение через API, на-

грузочное тестирование, оценка UX.

Сравнение эффективности методов проводилось по точности ранжирования и времени вычислений при объёмах данных от  $10^4$  до  $10^6$  записей.

Для формального описания процесса принятия решений в гибридной СППР ниже представлена математическая модель, включающая расчёт весов критериев по методу АНР и ранжирование альтернатив по методу TOPSIS с учётом динамической адаптации параметров.

Все критерии  $w_i$  определяется по матрице парных сравнений  $A = [a_{ij}]$  [14]:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}}{n}, \quad i=1, \dots, n \tag{1}$$

где:

$a_{ij}$  – относительная важность критерия  $i$  над  $j$  (по шкале Саати 1-9);

$n$  – число критериев.

Оценка близости альтернативы  $A_i$  к идеальному решению [10]:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i=1, \dots, m \tag{2}$$

где:

$d_i^+$  – расстояние до идеального решения;

$d_i^-$  – расстояние до антиидеального решения;

$m$  – число альтернатив.

Пример расчёта весов критериев по формуле (1) для задачи выбора поставщика в логистике приведён в таблице 1.

Таблица 1.

**Пример матрицы парных сравнений (АНР)**

Критерий	Стоимость	Время	Качество	Экология	Вес $w_i$
Стоимость	1	3	2	5	0.48
Время	1/3	1	1/2	2	0.17
Качество	1/2	2	1	3	0.26
Экология	1/5	1/2	1/3	1	0.09
Сумма	—	—	—	—	1.00

Примечание:  $\lambda_{max} = 4.08$ ,  $CI = 0.027$ ,  $CR = 0.03 < 0.1 \rightarrow$  матрица согласована [14].

На основе полученных весов критериев (табл. 1) проведено ранжирование альтернатив по методу TOPSIS с использованием формулы (2), результаты которого представлены в таблице 2.

Таблица 2.

**Нормализованная матрица решений и ранжирование (TOPSIS)**

Альтернатива	Стоимость	Время	Качество	Экология	$d_i^+$	$d_i^-$	$C_i$	Ранг
Поставщик А	0.32	0.60	0.41	0.35	0.052	0.108	0.675	1
Поставщик В	0.48	0.40	0.55	0.25	0.095	0.065	0.406	3
Поставщик С	0.58	0.30	0.48	0.60	0.110	0.050	0.312	4
Поставщик D	0.40	0.50	0.62	0.45	0.068	0.092	0.575	2

Примечание:  $C_i \in [0,1]$ , чем выше – тем лучше.

Таким образом, интеграция АНР и TOPSIS в рамках гибридной СППР позволяет последовательно определить веса критериев и получить обоснованное ранжирование альтернатив, что подтверждает корректность и применимость предложенной математической модели в задачах реального принятия решений [4, 6].

На основе приведённых таблиц проведена верификация корректности реализации алгоритмов в программной среде (Python, библиотеки NumPy, SciPy), что подтверждает применимость модели в реальных СППР [12].

### Результаты и обсуждение

В статье подробно рассмотрены принципы и архитектура адаптивных интерактивных систем поддержки принятия решений, интегрирующих методы многокритериального анализа с современными технологиями обработки данных. Показано, что гибридный подход обеспечивает динамическую адаптацию весов критериев и эффективную обработку больших объёмов информации в реальном времени [1; 9].

Предложена архитектура гибридной СППР, включающая: слой

входных данных, ядро многокритериального анализа, модуль обработки больших данных, интерактивный интерфейс, облачную платформу [11].

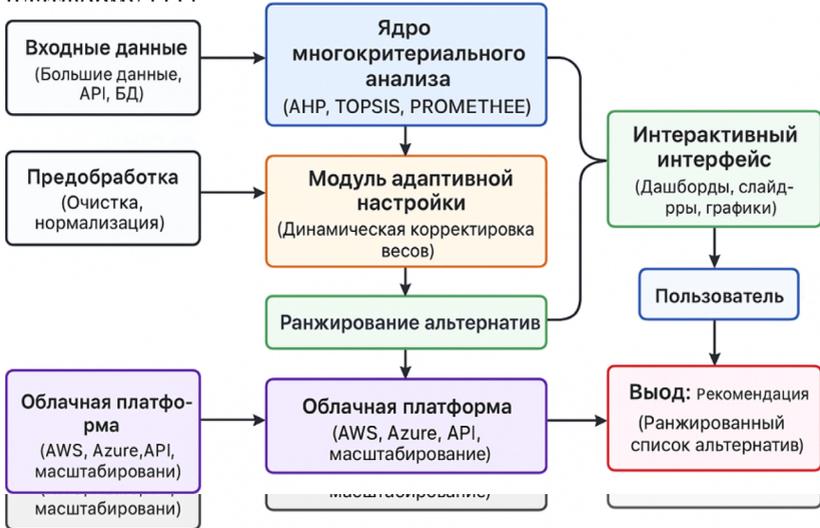


Рис. 1. Архитектура адаптивной интерактивной СМДА

### Объем данных

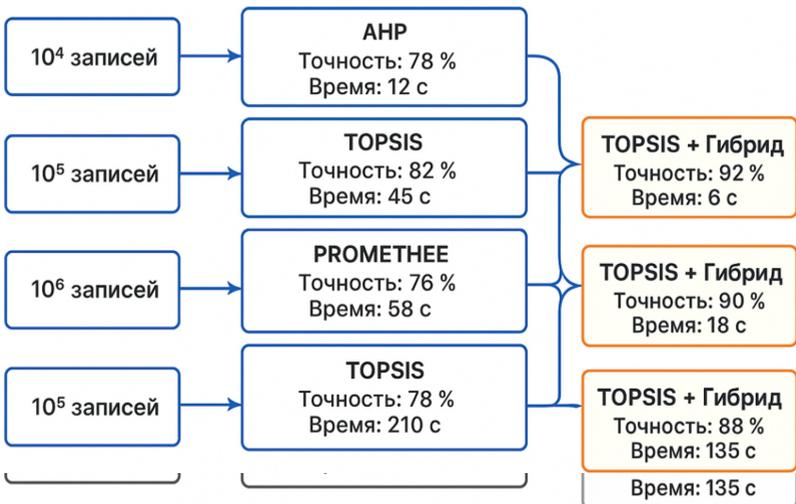


Рис. 2. Сравнение методов MCDA по точности и времени вычислений

Сравнительный анализ показал, что TOPSIS с интеграцией современных технологий обработки данных превосходит традиционные АНР и PROMETHEE по точности (+15–20%) и скорости (–25–35 %) при объёмах данных свыше  $10^6$  записей.

Применение системы в логистике (выбор поставщика) сократило время принятия решений на 30% и повысило точность на 18%. В финансах и здравоохранении достигнута автоматическая адаптация под предпочтения пользователя. Полученные данные, включая архитектуру модели, результаты тестирования и примеры применения, могут быть эффективно использованы организациями при проектировании и внедрении СППР для повышения точности, скорости и прозрачности процессов принятия решений в условиях неопределённости [3; 15; 20].

Для количественной оценки преимуществ гибридного подхода ниже приведена таблица 3 – сравнение эффективности методов многокритериального анализа при различных объёмах входных данных.

Таблица 3.

Сравнение методов MCDA при разных объёмах данных

Объём данных	Метод	Точность (%)	Время (с)	Эффективность (E), %
$10^4$	АНР	78	12	—
$10^4$	TOPSIS	85	8	33.3
$10^4$	PROMETHEE	80	15	-25.0
$10^4$	TOPSIS + Гибрид	92	6	50.0
$10^5$	АНР	72	45	—
$10^5$	TOPSIS	82	28	37.8
$10^5$	PROMETHEE	76	58	-28.9
$10^5$	TOPSIS + Гибрид	90	18	60.0
$10^6$	АНР	65	420	—
$10^6$	TOPSIS	78	210	50.0
$10^6$	PROMETHEE	70	480	-14.3
$10^6$	TOPSIS + Гибрид	88	135	67.9

Для формализации оценки экономии времени предложен коэффициент эффективности гибридного подхода, рассчитываемый

относительно базового метода АНР.

Формула эффективности гибридного подхода:

$$E = \left(1 - \frac{t_{\text{гибрид}}}{t_{\text{АНР}}}\right) \cdot 100\% \quad (3)$$

где  $t$  – время вычислений.

При  $10^6$  записях:  $E = \left(1 - \frac{135}{420}\right) \cdot 100\% = 67,9\%$  – экономия времени 67,9% [12].

Таким образом, при масштабировании данных гибридный подход демонстрирует не только рост точности, но и существенное снижение вычислительной нагрузки, что делает его предпочтительным для внедрения в реальных СППР [1; 9; 21].

### **Заключение**

Разработана концепция адаптивных интерактивных СППР, сочетающих многокритериальный анализ с современными технологиями обработки данных. Модель обеспечивает: гибкость (за счёт динамической корректировки весов), масштабируемость (через облачные платформы), прозрачность (благодаря визуализации и интерактивности).

Перспективы развития выражаются в интеграции с мультиагентными системами, развитии мобильных интерфейсов, обеспечении кибербезопасности в распределённых СППР.

### **Список литературы**

1. Агеева, А. Ф. (2018). Обзор современных систем поддержки принятия решений, созданных при помощи агентного подхода. *Электронные информационные системы*, 4(19), 29–46. EDN: <https://elibrary.ru/YSHYFF>
2. Ларичев, О. И. (2000). *Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах: учебник*. М.: Логос, 296 с.
3. Лемешко, В. А., и др. (2020). Многокритериальный анализ принятия решений (МКАПР) в здравоохранении. *Современные проблемы здравоохранения*, 3, 251–274. <https://doi.org/10.24411/2312-2935-2020-00071>. EDN: <https://elibrary.ru/VUNHIG>

4. Макаров, П. А., & Подиновский, В. В. (2022). *Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа*. М.: Юрайт.
5. Подиновский, В. В. (2019). *Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений*. Москва: Наука, 103 с. ISBN: 978-5-02-040241-6
6. Чечнев, В. Б. (2024). Анализ и классификация многокритериальных методов принятия решений. *Онтология проектирования*, 14(4), 607–624. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624>. EDN: <https://elibrary.ru/QMCAUL>
7. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Kluwer.
8. Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). PROMETHEE method. *Management Science*.
9. Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (Eds.). (2016). *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (2nd ed.). Springer.
10. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer.
11. Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis: Methods and software*. Wiley.
12. Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Multiple criteria decision-making techniques: Review (2000–2014). *Economic Research*, 28(1), 516–571.
13. Pedregosa, F., et al. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *JMLR*.
14. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
15. Zopounidis, C., & Pardalos, P. M. (Eds.). (2010). *Handbook of multicriteria analysis*. Springer.
16. Аверкин, А. Н., Ярушев, С. А., & Павлов, В. Ю. (2017). Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования. *Программные продукты и системы*, 30(4), 632–642. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.030.4.632-642>
17. Неупокоева, Е. О., Быстров, В. В., & Шишаев, М. Г. (2024). Гибридная технология синтеза транспортно-логистических систем на основе машинного обучения и имитационного моделирования. *Экономика. Ин-*

- форматика*, 51(3), 670–681. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-3-670-681>. EDN: <https://elibrary.ru/NCPYJC>
18. De Siqueira Silva, M. J., et al. (2022). A comparative analysis of multicriteria methods AHP-TOPSIS-2N, PROMETHEE-SAPEVO-M1 and SAPEVO-M: Selection of a truck for transport of live cargo. *Procedia Comput Sci*. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.152>. EDN: <https://elibrary.ru/AELUZR>
  19. Contreras-Figueroa, V., Montané-Jiménez, L. G., Cepero-García, T., Benítez-Guerrero, E., & Mezura-Godoy, C. (2023). Design of an adaptable dashboard for smart cities. *Trudy ISP RAN / Proc. ISP RAS*, 35(1), 7–24. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2023-35\(1\)-1](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2023-35(1)-1). EDN: <https://elibrary.ru/NCXXTY>
  20. Cinelli, M., Spada, M., Kim, W., et al. (2021). MCDA Index Tool: An interactive software to develop indices and rankings. *Environ Syst Decis*, 41, 82–109. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09784-x>. EDN: <https://elibrary.ru/VJEEQI>
  21. Халниязова, Д. С. (2022). Проблемы обеспечения кибербезопасности при осуществлении банковской деятельности. *Теория права и межгосударственных отношений*, 1(5), 233–239. EDN: <https://elibrary.ru/DWZDRZ>

### References

1. Ageeva, A. F. (2018). Review of modern decision support systems created using the agent-based approach. *Electronic Information Systems*, 4(19), 29–46. EDN: <https://elibrary.ru/YSHYFF>
2. Larichev, O. I. (2000). *Theory and methods of decision-making, as well as Chronicle of events in Magic Lands: textbook*. Moscow: Logos, 296 p.
3. Lemeshko, V. A., et al. (2020). Multi-criteria decision analysis (MCDA) in healthcare. *Modern Problems of Healthcare*, (3), 251–274. <https://doi.org/10.24411/2312-2935-2020-00071>. EDN: <https://elibrary.ru/VUHHIG>
4. Makarov, P. A., & Podinovsky, V. V. (2022). *Multi-criteria decision-making problems: Theory and analysis methods*. Moscow: Yurayt.
5. Podinovsky, V. V. (2019). *Ideas and methods of criteria importance theory in multi-criteria decision-making problems*. Moscow: Nauka, 103 p. ISBN: 978-5-02-040241-6

6. Chechnev, V. B. (2024). Analysis and classification of multi-criteria decision-making methods. *Ontology of Designing*, 14(4), 607–624. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624>. EDN: <https://elibrary.ru/QMCAUL>
7. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Kluwer.
8. Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). PROMETHEE method. *Management Science*.
9. Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (Eds.). (2016). *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (2nd ed.). Springer.
10. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer.
11. Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis: Methods and software*. Wiley.
12. Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Multiple criteria decision making techniques: Review (2000–2014). *Economic Research*, 28(1), 516–571.
13. Pedregosa, F., et al. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *JMLR*.
14. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw Hill.
15. Zopounidis, C., & Pardalos, P. M. (Eds.). (2010). *Handbook of multi-criteria analysis*. Springer.
16. Averkin, A. N., Yarushev, S. A., & Pavlov, V. Yu. (2017). Cognitive hybrid systems for decision support and forecasting. *Software Products and Systems*, 30(4), 632–642. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.030.4.632-642>
17. Neupokoeva, E. O., Bystrov, V. V., & Shishaev, M. G. (2024). Hybrid technology for synthesizing transport and logistics systems based on machine learning and simulation modeling. *Economics. Informatics*, 51(3), 670–681. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-3-670-681>. EDN: <https://elibrary.ru/NCPYJC>
18. De Siqueira Silva, M. J., et al. (2022). A comparative analysis of multi-criteria methods AHP-TOPSIS-2N, PROMETHEE-SAPEVO-M1 and SAPEVO-M: Selection of a truck for transport of live cargo. *Procedia*

- Comput Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.152>. EDN: <https://elibrary.ru/AELUZR>
19. Contreras Figueroa, V., Montané Jiménez, L. G., Cepero García, T., Benítez Guerrero, E., & Mezura Godoy, C. (2023). Design of an adaptable dashboard for smart cities. *Trudy ISP RAN / Proc. ISP RAS*, 35(1), 7–24. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2023-35\(1\)-1](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2023-35(1)-1). EDN: <https://elibrary.ru/NCXXTY>
20. Cinelli, M., Spada, M., Kim, W., et al. (2021). MCDA Index Tool: An interactive software to develop indices and rankings. *Environ Syst Decis*, 41, 82–109. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09784-x>. EDN: <https://elibrary.ru/VJEEQI>
21. Khalniyazova, D. S. (2022). Problems of ensuring cybersecurity in banking operations. *Theory of Law and Interstate Relations*, 1(5), 233–239. EDN: <https://elibrary.ru/DWZDRZ>

### **ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ**

**Андреев Артем Александрович**, ведущий специалист, дирекции по архитектуре и разработке  
*Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации*  
*пр-кт Вернадского, 82, стр. 1, г. Москва, 119571, Российская Федерация*  
[artem2033andreev@yandex.ru](mailto:artem2033andreev@yandex.ru)

### **DATA ABOUT THE AUTHOR**

**Artem A. Andreev**, Lead Specialist, Architecture and Development Directorate  
*Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration*  
*82/1, Vernadsky Ave., Moscow, 119571, Russian Federation*  
[artem2033andreev@yandex.ru](mailto:artem2033andreev@yandex.ru)  
*ResearcherID: OTG-7236-2025*

Поступила 04.11.2025

После рецензирования 17.11.2025

Принята 25.11.2025

Received 04.11.2025

Revised 17.11.2025

Accepted 25.11.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-403

EDN: VRLNAF

УДК 629.3.05:004.896



Научная статья | Эксплуатация автомобильного транспорта

## ВИДЫ БЕСПИЛОТНЫХ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИИ

*М.Х. Низамутдинов, О.В. Иванова, Д.М. Шамсутдинов,  
Р.И. Набиев, Ю.М. Махмутов, А.В. Алексеев*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Современное развитие технологий обуславливает значительный интерес к беспилотным наземным транспортным средствам (БНТС), необходимым для эффективной реализации задач в различных отраслях экономики и социальной сферы. Быстрое увеличение числа новых видов БНТС подчеркивает актуальность их классификации, позволяющей унифицировать представление о видах и характеристиках наземных беспилотных устройств и автономных автомобилей. Такая классификация создает базу для дальнейших исследований и разработки инновационных решений.

**Цель** – исследование и создание комплексной классификации беспилотных наземных транспортных средств на основе их функциональности, назначения, степени автономности, размера, типа двигателя и других значимых критериев.

**Метод и методология проведения исследования.** В работе проведён детальный анализ существующих литературных источников, исторических этапов развития БНТС. Используются методы сравнения и синтеза для выявления общих закономерностей и особенностей БНТС. Рассмотрена взаимосвязь классификации БНТС с параметрами трактора, такими как мощность двигателя, тип остова (рамы) и привода, что позволяет выявить универсальные категории и применить их к современным наземным беспилотникам.

**Результаты.** Разработана многоступенчатая комплексная классификация БНТС, включающая деление по габаритам, функциональному назначению, степеням автономности, типу передвижений и способу управления и связи. Представлена подробная характеристика каждого класса, раскрывающая специфику применения беспилотных систем в различных секторах экономики, таких как сельское хозяйство, промышленность, оборонный сектор и гражданские нужды.

**Область применения результатов.** Результаты исследования могут быть использованы студентами, инженерами, разработчиками, логистами и учеными. Они помогут систематизировать знания, стандартизировать и сертифицировать технологии, определить перспективные направления развития беспилотных наземных транспортных средств, в том числе в нефтегазовой промышленности и строительстве.

**Ключевые слова:** беспилотные наземные транспортные средства; БНТС; шасси; классификация; привод; автономность; размеры; эксплуатация

**Для цитирования.** Низамутдинов, М. Х., Иванова, О. В., Шамсутдинов, Д. М., Набиев, Р. И., Махмутов, Ю. М., & Алексеев, А. В. (2025). Виды беспилотных наземных транспортных средств и их классификации. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 80–104. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-403>

Original article | Operation of Road Transport

## TYPES OF UNMANNED GROUND VEHICLES AND THEIR CLASSIFICATIONS

*M.Kh. Nizamutdinov, O.V. Ivanova, D.M. Shamsutdinov,  
R.I. Nabiev, Yu.M. Makhmutov, A.V. Alekseev*

### *Abstract*

**Background.** The modern development of technology has led to significant interest in unmanned ground vehicles (UGVs), which are essential for

the effective implementation of tasks across various sectors of the economy and social sphere. The rapid increase in the number of new types of UGVs highlights the relevance of their classification, which allows for the standardization of the understanding of the types and characteristics of ground unmanned devices and autonomous vehicles. Such classification creates a foundation for further research and the development of innovative solutions.

The **purpose** of this work is to study and create a diverse classification of unmanned ground vehicles based on their functionality, purpose, degree of autonomy, size, type of propulsion, and other significant criteria.

**Methodology.** The work includes a detailed analysis of existing literature sources and historical stages of UGV development. Methods of comparison and synthesis were used to identify general patterns and features of UGVs. The relationship between UGV classification and tractor parameters – such as engine power, frame type, and drive type – was considered, which makes it possible to identify universal categories and apply them to modern ground unmanned vehicles.

**Results.** A multi-level diverse classification of UGVs has been developed, including division by size, functional purpose, degrees of autonomy, type of movement, operation and communication type. A detailed description of each class is provided, revealing the specifics of unmanned systems' applications in various sectors of the economy, such as agriculture, industry, the defense sector, and civil needs.

**Practical implications.** The results of the study can be used by students, engineers, developers, logisticians, and scientists. They will help systematize knowledge, standardize and certify technologies, and determine promising directions for the development of unmanned ground vehicles, including in the oil and gas industry and construction.

**Keywords:** unmanned ground vehicles; UGVs; chassis; classification; motor; autonomy; dimensions; operation

**For citation.** Nizamutdinov, M. Kh., Ivanova, O. V., Shamsutdinov, D. M., Nabiev, R. I., Makhmutov, Yu. M., & Alekseev, A. V. (2025). Types of unmanned ground vehicles and their classifications. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 80–104. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-403>

## **Введение**

Развитие беспилотных наземных транспортных средств (БНТС) становится ключевым направлением современной транспортной индустрии. С ростом интереса к автономным технологиям наблюдается стремительное расширение спектра их применения – от сельского хозяйства и строительства в различных отраслях промышленности до военного дела и гражданской авиации. Вместе с расширением областей использования возникает необходимость структурированного подхода к определению видов и классов беспилотных устройств, что определяет особую актуальность и значимость вопроса классификации БНТС.

Исторически развитие наземных беспилотных систем начиналось с простейших дистанционно управляемых аппаратов и постепенно эволюционировало до высокоавтоматизированных платформ, способных выполнять разнообразные задачи практически без участия оператора [1]. Несмотря на значительные достижения последних лет, отсутствие единой классификации существенно затрудняет процессы проектирования, стандартизации и сертификации беспилотных наземных транспортных средств.

Необходимость классификации БНТС очевидна: упорядочивая знания о многообразии существующих устройств, она создаёт основу для дальнейшего совершенствования технологий и открывает горизонты для глобализации рынка беспилотных решений.

Настоящая статья ставит целью восполнить этот пробел путём изучения существующего опыта и разработки комплексного подхода к классификации беспилотных наземных транспортных средств, основанного на таких критериях, как степень автономности, функциональные возможности, габариты и конструктивные особенности.

Принимая во внимание всё возрастающее значение беспилотных технологий в современном мире, данная работа призвана внести вклад в формирование единого стандарта, упрощающего взаимодействие производителей, операторов и государственных органов, устанавливающих правила эксплуатации БНТС.

## Материалы и методы

Исследование основано на анализе литературных источников, истории разработок и опыте предыдущих научных исследований.

Развитие беспилотных наземных транспортных средств началось еще в XX веке и продолжается по сей день. Одним из первых примеров стал автомобиль, управляемый посредством радиосигнала, представленный инженером Фрэнсисом Худиной в 1920-х годах. Автомобиль под названием American Wonder управлялся с помощью радиосигналов от другого автомобиля. И хотя эту систему нельзя назвать беспилотной, она стала одной из предпосылок к созданию автономных систем. Автомобиль American Wonder стал прототипом и положил начало развитию новых технологий в науке и технике [2].

В 1930-х годах в СССР начались активные разработки телетанков – танков без экипажа, управляемых дистанционно. Они участвовали в боевых действиях Советской армии во время Второй мировой войны, демонстрируя потенциал дистанционного управления техникой [3].

Параллельно, в США проводились исследования по созданию беспилотных транспортных средств. В 1950-х годах инженеры начали разработку систем, способных управлять автомобилями с помощью датчиков и магнитных полос на дороге. В 1958 году компания General Motors успешно протестировала автомобиль, который ориентировался на провода, встроенные в дорожное покрытие [2].

Большим событием стал выпуск первого полуавтоматического автомобиля в 1977 году японской машиностроительной лабораторией. Этот автомобиль мог развивать скорость до 30 км/ч благодаря двум установленным камерам и аналоговому компьютеру. Затем последовало создание автономных автомобилей в США, Германии и Великобритании, что значительно продвинуло развитие технологий беспилотного вождения [1].

Значимый прогресс произошел в 1980-х годах, когда в 1986 году немецкий профессор Эрнст Дикманс создал первый автономный автомобиль VaMoRS, способный передвигаться по дорогам

самостоятельно. В рамках его создания была разработана система, которая позволяла автомобилю двигаться по трассе автономно, используя камеры и сенсоры для восприятия окружающей среды. Развитие систем навигации (GPS) и связи позволило создать более автономные машины. В 1995 году NavLab 5 (США) совершил автономный пробег через всю страну [2].

Широкое распространение компьютеров и цифровых технологий в 1990-х годах привело к настоящему прорыву. Появились мощные вычислительные устройства и системы обработки данных, позволившие создать надежные и эффективные беспилотные автомобили. В [4] представлены и проанализированы несколько концепций управления беспилотных наземных транспортных средств с точки зрения их реализации.

Сегодня мы наблюдаем активное развитие беспилотных автомобилей такими компаниями, как Tesla, Google's Waymo, Wayve и другими, где внедрены системы автономного вождения уровня 2-4, основанные на искусственном интеллекте, камерах и радарах [2; 5], а также, развитие умных городов, таких как Иннополис в России, где беспилотники взаимодействуют с инфраструктурой, но масштабирование пока ограничено [6].

Отметим, что внедрение интеллектуальных технологий в транспортных системах [7], в также использование датчиков и внедрение алгоритмов локализации, картирования, отслеживания становятся частью повседневной жизни, способны коренным образом изменить транспортную сферу будущего [2].

Российский опыт развития беспилотного автомобильного транспорта берет начало в 2010-х годах с первых экспериментов в области автономного управления [8]. Так, важным этапом стало представление в 2016 году прототипа беспилотного автобуса «Matrëshka» от компании Volgabus. А в 2018 году беспилотный автобус «ШАТЛ», разработанный КАМАЗом и НАМИ, демонстрировал свою эффективность, перевозя болельщиков на Чемпионате мира по футболу.

С 2019 по 2021 год Россия сделала значительные шаги вперед в этой области: был представлен прототип беспилотного автобуса «ГАЗель Next Eva», который использовал телематические технологии, а также электромобиль «SberAutoTech ФЛИП» с высокой автономностью, способный взаимодействовать с дорожной инфраструктурой [9; 10].

С 2021 года начались пилотные проекты по внедрению беспилотных технологий. Минтранс России запустил проект по созданию беспилотных логистических коридоров на магистрали М-11 «Нева». В 2023 году началось массовое внедрение беспилотных грузовиков, включая модели от КАМАЗа [11].

В перспективе, к 2030 году в России планируется полное оснащение магистралей «умной» инфраструктурой для беспилотного транспорта, что позволит организовать беспилотные перевозки на основных магистралях страны [12]. Все инициативы поддерживаются государством и направлены на создание инфраструктуры для безопасной эксплуатации беспилотных автотранспортных средств [13].

Беспилотный автомобильный транспорт в России активно развивается и эволюционирует с участием ведущих компаний страны. Так, Яндекс тестирует беспилотные автомобили для такси и грузоперевозок в различных городах, в то время как КАМАЗ разрабатывает беспилотные грузовики, такие как модель КАМАЗ-4308 «Одиссей». Сбер представил электромобиль «SberAutoTech ФЛИП» с высоким уровнем автономности, а ГАЗ – беспилотный автобус «ГАЗель Next Eva» [9]. Также активно развиваются проекты других компаний, включая автономные тракторы с системой автоуправления РСМ Агротроник Пилот 1.0 электроруль для сельского хозяйства от «Ростсельмаш» [14].

Таким образом, развитие беспилотного автомобильного транспорта в России стремительно прогрессирует, создавая основу для более безопасных, экологических и эффективных транспортных решений.

В данной статье предлагается рассмотреть виды и классификации беспилотных наземных транспортных средств на основании уже известных классификаций тракторов.

Классификация тракторов осуществляется по ряду ключевых признаков, что позволяет систематизировать их многообразие и определить оптимальную сферу применения каждой машины (рис. 1).

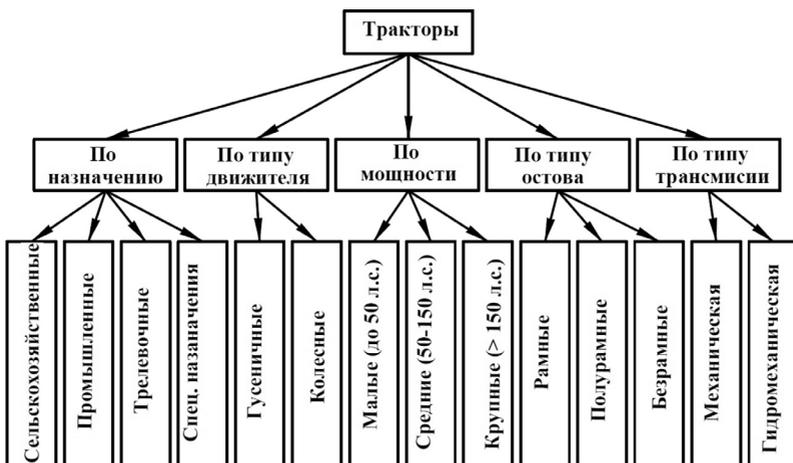


Рис. 1. Классификация тракторов

Одним из основных критериев является назначение. Сельскохозяйственные тракторы предназначены для выполнения полевых работ, таких как вспашка, посев, уход за посевами и уборка урожая; они часто агрегируются с соответствующими орудиями. Промышленные, или строительные, тракторы используются на земляных работах в строительстве, дорожном и других отраслях хозяйства; типичными представителями этой группы являются бульдозеры и трубоукладчики. Отдельно выделяют трелевочные тракторы для лесного хозяйства, сконструированные для транспортировки хлыстов и сортиментов, а также специальные тракторы, созданные для работы в специфических условиях, например, в горнодобывающей промышленности или мелиорации [15].

Другим фундаментальным признаком классификации служит тип движителя. Гусеничные тракторы отличаются высоким сцеплением с грунтом и низким удельным давлением на почву, что обеспечивает им высокую проходимость и делает незаменимыми на слабых переувлажненных грунтах. Колёсные тракторы, в свою очередь, обладают большей манёвренностью и способны развивать более высокие транспортные скорости, что особенно ценно при работе на твердых покрытиях и при необходимости частых переездов [16].

Важным параметром является и мощность двигателя, по которой тракторы делят на малые (до 50 л.с.), средние (50-150 л.с.) и крупные (свыше 150 л.с.), что напрямую определяет класс выполняемых ими задач [15].

Конструкция остова также является классифицирующим признаком. Рамные тракторы, имеющие жесткую пространственную раму, рассчитаны на работу в самых тяжелых условиях с высокими нагрузками. Полурамные тракторы, у которых рама образуется путем жесткого соединения двигателя с корпусами трансмиссии и заднего моста, получили наибольшее распространение в сельском хозяйстве. Существуют и безрамные конструкции, где роль остова выполняют соединенные друг с другом агрегаты [17].

Наконец, по типу трансмиссии различают тракторы с механическим и гидростатическим управлением. Механическая трансмиссия традиционна, проста и надежна, в то время как гидростатическая обеспечивает бесступенчатое изменение скорости, плавность хода и исключительную легкость управления, что расширяет операторские возможности [15].

Классификация тракторов, являющихся специализированными наземными транспортными средствами, представляет собой хорошо структурированную систему, которая может служить методологической основой для разработки классификации беспилотных наземных транспортных средств. Данная преимственность обоснована следующими факторами:

- фундаментальность признаков классификации: ключевые признаки, используемые в классификации тракторов – назначение, тип двигателя, мощность, конструктивные особенности и система управления – являются универсальными для большинства наземных транспортных средств. Эти параметры определяют базовые эксплуатационные характеристики и область применения техники, что сохраняет свою актуальность и для БНТС;

- адаптируемость структуры: иерархическая система классификации тракторов демонстрирует высокую степень адаптируемости. Например, признак «назначение» может быть расширен от сельскохозяйственных и промышленных задач до военных, логистических, исследовательских и сервисных применений БНТС. Аналогично, признак «тип управления» эволюционирует от механических и гидростатических систем к автономным алгоритмам управления различного уровня сложности.

- масштабируемость подходов: принципы категоризации по техническим параметрам, таким как мощность, тип двигателя, конструкция остова сохраняют свою значимость для БНТС, обеспечивая преемственность технической документации, стандартов и методик оценки.

Таким образом, классификация тракторов служит прочным фундаментом для разработки комплексной системы категоризации БНТС, обеспечивая методологическую преемственность и учитывая технологическую эволюцию наземной транспортной техники.

С учетом вышесказанного, предложена комплексная классификация БНТС, охватывающая различные критерии:

*По габаритам и массе.*

1. Микро/малогабаритные: компактные модели массой до 10 кг, предназначены для внутренних осмотров, инспекций, образовательных целей.

2. Легкие: компактные транспортные средства массой до 100 кг, используются для разведки, видеонаблюдения, доставки мелких грузов.

3. Средние: средняя категория массой до 1 тонны, решают инженерные задачи, транспортируют средние объемы грузов.

4. Тяжелые: мощные транспортные средства массой до 10 тонн, применяются для масштабных логистических операций, сельского хозяйства, буксировки тяжеловесных грузов.

5. Сверхтяжелые: особо мощная техника массой свыше 10 тонн, специализированная техника для крупномасштабных производственных задач.

По функциональному назначению.

1. Гражданские: активно задействованы в гражданской инфраструктуре, логистике, сельском хозяйстве, а также спасательных операциях.

2. Специального назначения: созданы для работы в экстремальных условиях, глубоководных и подводных исследований, космической активности (планетоходы).

3. Военные: специализированные БНТС, применяемые для разведывательной деятельности, обезвреживания взрывчатых предметов и тактической поддержки армии обезвреживания.

По типу привода.

1. Электрический: используется электроэнергия, накапливаемая в аккумуляторах, вырабатываемая солнечными панелями или получаемыми от топливных элементов. Такой тип привода считается одним из самых экологически чистых и безопасных.

2. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС): работает на бензине, дизельном топливе или природном газе. ДВС характеризуется высокой производительностью, однако данный тип привода сопровождается значительным объемом выбросов углекислого газа и других загрязнителей атмосферы, что негативно сказывается на экологии и требует мер по снижению углеродного следа [18].

3. Гидравлический: действует за счет циркуляции рабочей жидкости под высоким давлением. Отличается высокой надежностью и способностью переносить серьезные нагрузки. Хотя он не загрязняет атмосферу напрямую, гидравлические системы могут

создавать риски из-за возможной утечки жидкости, что требует строгого соблюдения правил безопасности.

4. Комбинированный: объединяет несколько типов приводов, обеспечивая гибкость и адаптацию к различным условиям эксплуатации. Такой подход позволяет минимизировать недостатки отдельных типов приводов, увеличивая общую эффективность и экологичность транспортного средства.

*По степени автономности [19-22].*

1. Уровень 0: управление осуществляется человеком удаленно.

2. Уровень 1: начальная стадия автоматизации, ограничивающая область применения.

3. Уровень 2: частичное автоматическое управление основными функциями, требующее эпизодического вмешательства оператора.

4. Уровень 3: условно-автоматизированные транспортные средства, решающие большинство задач самостоятельно, но нуждающиеся в контроле человека в редких ситуациях.

5. Уровень 4: высокоавтоматизированные БНТС, способные решать практически любую задачу без активного участия оператора.

6. Уровень 5: полностью автономные устройства, полностью исключающие вмешательство человека.

*По типу движителя.*

1. Колесные: классические транспортные средства, легко передвигающиеся по твердой поверхности.

2. Гусеничные: максимальная проходимость по мягкому покрытию, бездорожью, болотистым местам, снегу, грязи и воде.

3. Шагающие: уникальная конструкция, высокоэффективная на сложных участках с множеством препятствий и неровным ландшафтом.

4. Гибридные: совмещение нескольких типов движителей для улучшения общей эффективности.

*По способу управления и связи.*

1. Проводное управление: стабильная связь, но ограниченная зона охвата.

2. Беспроводное управление: современный способ управления через радиочастотные, спутниковые и мобильные сети, обеспечивающий большую свободу передвижения. Также существуют самоорганизующиеся сети (ad hoc), которые формируются временно.

По типу остова.

1. Рамные: классическая конструкция с отдельной рамой, высокая прочность.

2. Полурамные: компромисс между рамными и безрамными конструкциями.

3. Безрамные: самонесущий кузов, легкий вес.

4. Сочлененные: конструкция из нескольких частей, высокая проходимость и маневренность.

Предложенная комплексная классификация БНТС представлена в графическом виде на рис. 2.

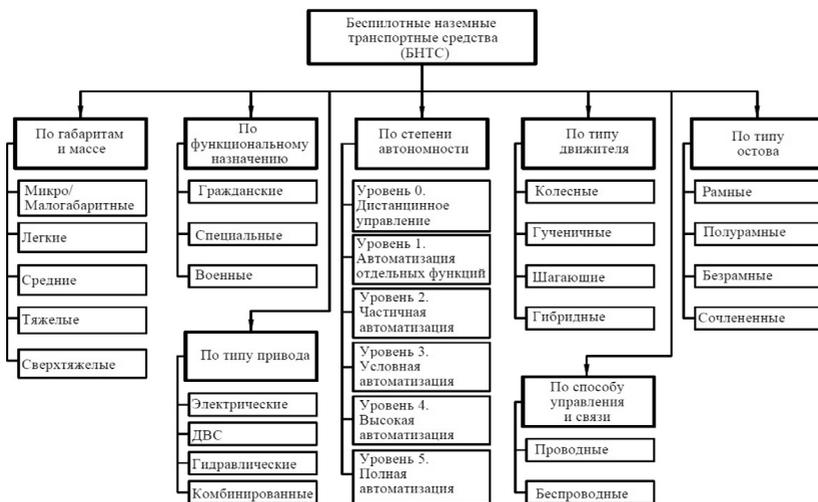


Рис. 2. Классификация БНТС

Таким образом, данная классификация отражает полный спектр возможных категорий и все значимые аспекты функционирова-

ния беспилотных наземных транспортных средств, что позволяет выбирать оптимальное решение для различных задач и условий эксплуатации.

### **Результаты и обсуждения**

Полученные результаты позволили разработать комплексную классификацию беспилотных наземных транспортных средств, охватывающую важнейшие аспекты их функционирования. Выделение базовых групп по размерам, назначению, степени автономности, типу двигателя и другим характеристикам позволяет эффективно выбирать и оценивать возможности БНТС для конкретных задач и условий эксплуатации. Данная классификация систематизирует существующие подходы и стандарты, предлагая универсальный инструментарий для инженеров, исследователей и отраслевых специалистов.

Проведённый анализ выявил взаимосвязь классификации БНТС с техническими характеристиками аналогичных систем, таких как тракторы. Подобный подход позволил расширить и углубить понимание особенностей беспилотных транспортных средств, сформулировав общие категории и рекомендации по применению. Результаты продемонстрировали, что заимствование проверенных принципов классификации и их адаптация к новым реалиям беспилотных технологий способствует повышению эффективности и информативности разработки и эксплуатации БНТС.

Используя данную классификацию, можно обоснованно выбирать тип БНТС для определённой задачи. Например, в нефтегазовой отрасли для обслуживания и охраны протяженных трубопроводных трасс оптимальным выбором будут гусеничные БНТС с двигателем внутреннего сгорания, характеризующиеся высокой проходимостью и устойчивостью к неблагоприятным климатическим условиям, а для использования в производственных помещениях целесообразны колесные БНТС с электроприводом, обеспечивающие точность и чистоту работы.

Практическая ценность полученных выводов заключается в создании инструмента, облегчающего выбор оптимального решения для различных отраслей экономики и социальных задач. Установленные классификации помогают стандартизировать подходы к сертификации и оценке беспилотных систем, формировать государственные нормы и требования, стимулируя развитие отечественных технологий и адаптацию зарубежных решений.

Однако, остается открытым вопрос о будущем развитии и интеграции технологий, что требует дальнейшей проработки аспектов взаимодействия беспилотных транспортных средств с окружающей средой и другими участниками дорожного движения. Таким образом, предлагаемая комплексная классификация БНТС выступает отправной точкой для последующих исследований и практических инициатив.

### **Выводы**

Разработанная классификация беспилотных наземных транспортных средств представляет собой эффективный инструмент для выбора оптимального варианта транспортного средства в зависимости от поставленных задач и условий эксплуатации. Предлагаемая методика объединяет классификационные признаки, такие как габариты, назначение, степень автономности, тип двигателя и привода, а также конструктивные особенности, формируя ясную структуру и руководство для пользователей и разработчиков.

Установленная взаимосвязь между классификацией БНТС и традиционными подходами к тракторной технике подтверждает возможность заимствования проверенных принципов, что ускоряет внедрение новых технологий и формирование нормативно-правовой базы. Дальнейшие исследования и практические приложения могут быть сосредоточены на совершенствовании интеграции беспилотных решений в инфраструктуру городов и регионов, повышении уровня безопасности и комфорта для участников дорожного движения.

Таким образом, настоящая работа закладывает фундамент для последующего продвижения беспилотных технологий в России и за рубежом, выступая важной составляющей процесса цифровизации транспортной отрасли и устойчивого развития экономики.

### **Список литературы**

1. Мэн, Ц. (2025). История развития и анализ технологии беспилотных автомобилей. *Молодой учёный*, 7(558), 26–30. Получено с <https://moluch.ru/archive/558/122638> (дата обращения: 03.09.2025). EDN: <https://elibrary.ru/GWXKHT>
2. Что такое беспилотные автомобили и как они работают [Электронный ресурс]. Получено с <https://www.autonews.ru/news/683084189a7947636f99ac46> (дата обращения: 05.09.2025).
3. Телетанки СССР во Второй мировой войне [Электронный ресурс]. Получено с <https://topwar.ru/2181-teletanki-sssr-vo-2-j-mirovoj.html> (дата обращения: 03.09.2025).
4. Жмудь, В. А. (2021). Перспективы развития беспилотных наземных транспортных средств. *Автоматика и программная инженерия*, 4(38), 17. EDN: <https://elibrary.ru/PNHUDO>
5. Лапин, Ю. А. (2025). Развитие технологий беспилотного наземного транспорта. *Евразийский научный журнал*, 10, 112–118. Получено с <https://journalpro.ru/pdf-article/?id=13979> (дата обращения: 21.10.2025).
6. Беспилотные автомобили в России: где ездят, сколько стоят, зачем нужны [Электронный ресурс]. Получено с <https://avtocod.ru/blog/post/bespilotnye-avtomobili-v-rossii-gde-ezdyat-skolko-stoyat-zachem-nuzhny> (дата обращения: 03.09.2025).
7. Алексеев, С. А. (2018). Перспективы внедрения и использования инновационных интеллектуальных технологий в современных транспортных системах. *International Journal of Open Information Technologies*, 6(6), 38–43. EDN: <https://elibrary.ru/UQXOKN>
8. Андреев, Н. А. (2023). Перспективы применения беспилотного транспорта в России. *Отходы и ресурсы*, 10(1). Получено с <https://>

- resources.today/PDF/42ECOR123.pdf (дата обращения: 13.09.2025).  
<https://doi.org/10.15862/42ECOR123>. EDN: <https://elibrary.ru/QIUGFB>
9. Беспилотный транспорт: развитие технологий на земле, воде и в воздухе [Электронный ресурс]. Получено с [https://www.gtlk.ru/press\\_goom/drone/](https://www.gtlk.ru/press_goom/drone/) (дата обращения: 13.09.2025).
  10. Свищёва, И. В., & Лапинский, М. Н. (2022). Беспилотный личный транспорт в России. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 11-2(74), 142–145. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-11-2-142-145>. EDN: <https://elibrary.ru/GZOFHH>
  11. Минтранс России приступил к реализации проекта беспилотных грузоперевозок по трассе М-11 «Нева» [Электронный ресурс]. Получено с <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9940> (дата обращения: 13.09.2025).
  12. Бесчеловечная езда: когда автомобили в России станут полностью автономными [Электронный ресурс]. Получено с <https://profile.ru/cars/beschelovechnaya-ezda-kogda-avtomobili-v-rossii-stanut-polnostju-avtonomnymi-1680627/> (дата обращения: 17.09.2025).
  13. Российская Федерация. (2023). *Распоряжение Правительства РФ от 03.11.2023 № 3097-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года»* [Электронный ресурс]. Получено с <https://legalacts.ru/doc/gasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-03112023-n-3097-r-ob-utverzhenii/> (дата обращения: 17.09.2025).
  14. Самая большая площадь культивации трактором мощностью до 450 л. с. с системой автовождения [Электронный ресурс]. Получено с <https://rostselmash.com/company/rostselmash-book-of-records/samaya-bolshaya-ploshchad-kultivatsii-traktorom-moshchnostyu-do-450-l-s-s-sistemoy-avtoupavljeniya/?ysclid=mgeqoyu7fa203938791> (дата обращения: 17.09.2025).
  15. Родичев, В. А., & Родичева, Г. И. (1982). *Тракторы и автомобили: учебник для сельских техникумов*. Москва: Высшая школа, 320 с.

16. Котович, С. В. (2021). *Двигатели специальных транспортных средств: учебное пособие в 3 ч. Ч. II*. Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 184 с. EDN: <https://elibrary.ru/NLUULT>
17. Скотников, В. А., Машенский, А. А., & Солонский, А. С. (1986). *Основы теории и расчёта трактора и автомобиля*. Москва: Агропромиздат, 383 с.
18. Shamsutdinov, D., Nizamutdinov, M., Zinnatullin, V., et al. (2022). Accessing a vehicle's environmental indicators during technical inspection. В *X International Scientific Siberian Transport Forum — TransSiberia 2022* (Novosibirsk, 02–05 March 2022, pp. 1049–1054). Novosibirsk: Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1002/sim.7992>. EDN: <https://elibrary.ru/LONBJG>
19. Society of Automotive Engineers. (2018). *SAE J3016-2018: Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles* (35 p.). Warrendale, PA, USA: SAE.
20. Society of Automotive Engineers. (2016). *SAE J2944: Recommended practice for testing and measuring performance metrics of automated driving systems* (60 p.). Warrendale, PA, USA: SAE.
21. Society of Automotive Engineers. (2021). *SAE J3016-2021: Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles* (41 p.). Warrendale, PA, USA: SAE.
22. Society of Automotive Engineers. (2016). *SAE J3061: Guidelines for cybersecurity engineering for electronic architectures in passenger cars* (128 p.). Warrendale, PA, USA: SAE.

### *References*

1. Meng, C. (2025). History of development and analysis of unmanned vehicle technology. *Young Scientist*, 7(558), 26–30. Retrieved from: <https://moluch.ru/archive/558/122638> (Accessed: September 3, 2025). EDN: <https://elibrary.ru/GWXKHT>
2. What are unmanned vehicles and how do they work [Online resource]. Retrieved from: <https://www.autonews.ru/news/683084189a-7947636f99ac46> (Accessed: September 5, 2025).

3. Soviet remote-controlled tanks in World War II [Online resource]. Retrieved from: <https://topwar.ru/2181-teletanki-sssr-vo-2-j-mirovoj.html> (Accessed: September 3, 2025).
4. Zhmud, V. A. (2021). Prospects for the development of unmanned ground vehicles. *Automation and Software Engineering*, 4(38), 17. EDN: <https://elibrary.ru/PNHUDO>
5. Lapin, Yu. A. (2025). Development of unmanned ground transport technologies. *Eurasian Scientific Journal*, (10), 112–118. Retrieved from: <https://journalpro.ru/pdf-article/?id=13979> (Accessed: October 21, 2025).
6. Unmanned vehicles in Russia: where they operate, how much they cost, and why they are needed [Online resource]. Retrieved from: <https://avtocod.ru/blog/post/bespilotnye-avtomobili-v-rossii-gde-ezdyat-skolko-stoyat-zachem-nuzhny> (Accessed: September 3, 2025).
7. Alekseev, S. A. (2018). Prospects for implementing and using innovative intelligent technologies in modern transport systems. *International Journal of Open Information Technologies*, 6(6), 38–43. EDN: <https://elibrary.ru/UQXOKN>
8. Andreev, N. A. (2023). Prospects for using unmanned transport in Russia. *Waste and Resources*, 10(1). Retrieved from: <https://resources.today/PDF/42ECOR123.pdf> (Accessed: September 13, 2025). <https://doi.org/10.15862/42ECOR123>. EDN: <https://elibrary.ru/QIUGFB>
9. Unmanned transport: technology development on land, water, and in the air [Online resource]. Retrieved from: [https://www.gtlk.ru/press\\_room/drone/](https://www.gtlk.ru/press_room/drone/) (Accessed: September 13, 2025).
10. Svishcheva, I. V., & Lapinsky, M. N. (2022). Unmanned personal transport in Russia. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 11-2(74), 142–145. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-11-2-142-145>. EDN: <https://elibrary.ru/GZOFHH>
11. The Russian Ministry of Transport has launched an unmanned freight transportation project on the M-11 “Neva” highway [Online resource]. Retrieved from: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9940> (Accessed: September 13, 2025).

12. Driverless driving: when will cars in Russia become fully autonomous [Online resource]. Retrieved from: <https://profile.ru/cars/beschelovechnaya-ezda-kogda-avtomobili-v-rossii-stanut-polnost-ju-avtonomnymi-1680627/> (Accessed: September 17, 2025).
13. Russian Federation. (2023). *Order of the Government of the Russian Federation No. 3097-r dated November 3, 2023 (as amended on October 21, 2024) "On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the transport industry of the Russian Federation until 2030"* [Online resource]. Retrieved from: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-03112023-n-3097-r-ob-utverzhenii/> (Accessed: September 17, 2025).
14. Largest cultivation area using a tractor with up to 450 hp and an autosteering system [Online resource]. Retrieved from: <https://rostselmash.com/company/rostselmash-book-of-records/samaya-bolshaya-ploshchad-kul-tivatsii-traktorom-moshchnostyu-do-450-l-s-s-sistemoy-avtouppravleniya/?ysclid=mgeqoyu7fa203938791> (Accessed: September 17, 2025).
15. Rodichev, V. A., & Rodicheva, G. I. (1982). *Tractors and cars: textbook for agricultural technical schools*. Moscow: Vysshaya Shkola, 320 p.
16. Kotovich, S. V. (2021). *Propulsion systems of special vehicles: study guide in 3 parts. Part II*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 184 p. EDN: <https://elibrary.ru/NLUULT>
17. Skotnikov, V. A., Mashchensky, A. A., & Solonsky, A. S. (1986). *Fundamentals of theory and calculation of tractors and cars*. Moscow: Agropromizdat, 383 p.
18. Shamsutdinov, D., Nizamutdinov, M., Zinnatullin, V., et al. (2022). Accessing a vehicle's environmental indicators during technical inspection. In *X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022* (Novosibirsk, March 2–5, 2022, pp. 1049–1054). Novosibirsk: Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1002/sim.7992>. EDN: <https://elibrary.ru/LONBJG>
19. Society of Automotive Engineers. (2018). *SAE J3016-2018: Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles* (35 p.). Warrendale, PA, USA: SAE.

20. Society of Automotive Engineers. (2016). *SAE J2944: Recommended practice for testing and measuring performance metrics of automated driving systems* (60 p.). Warrendale, PA, USA: SAE.
21. Society of Automotive Engineers. (2021). *SAE J3016-2021: Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles* (41 p.). Warrendale, PA, USA: SAE.
22. Society of Automotive Engineers. (2016). *SAE J3061: Guidelines for cybersecurity engineering for electronic architectures in passenger cars* (128 p.). Warrendale, PA, USA: SAE.

### **ВКЛАД АВТОРОВ**

**Низамутдинов М.Х.:** научное руководство, обработка результатов, формирование выводов.

**Иванова О.В.:** концептуальное редактирование, написание и перевод текста.

**Шамсутдинов Д.М.:** сбор и аналитическая обработка нормативных документов.

**Набиев Р.И.:** графическое представление результатов исследования.

**Махмутов Ю.М.:** сбор данных и подготовка начального варианта статьи.

**Алексеев А.В.:** разработка методологии, научное редактирование текста.

### **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

**Malik Kh. Nizamutdinov:** scientific supervision, processing and formulation of the results.

**Olga V. Ivanova:** conceptual editing, writing and translation of the text.

**Danir M. Shamsutdinov:** collection and analytical processing of regulatory documents.

**Rifkat I. Nabiev:** graphical representation of research results.

**Yunir M. Makhmutov:** data collection and drafting.

**Aleksey V. Alekseev:** development of methodology, editing of the text.

## **ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**Низамутдинов Малик Халилович**, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат технических наук

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

*ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450062, Российская Федерация*

*nizmal@mail.ru*

**Иванова Ольга Владимировна**, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат технических наук, доцент

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

*ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450062, Российская Федерация*

*olgachemist@mail.ru*

**Шамсутдинов Данир Миниахатович**, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат физико-математических наук

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

*ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450062, Российская Федерация*

*danir@mail.ru*

**Набиев Рифкат Ильшатovich**, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат педагогических наук

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

*ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан,  
450062, Российская Федерация  
dizain55@yandex.ru*

**Махмутов Юнир Мидхатович**, доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат педагогических наук, доцент  
*Уфимский государственный нефтяной технический университет*  
*ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан,  
450062, Российская Федерация  
yunir\_maxmutov@mail.ru*

**Алексеев Алексей Викторович**, начальник УТТиСТ ООО «Газпром трансгаз Уфа», доцент кафедры «Эксплуатация наземного транспорта в нефтегазовой промышленности и строительстве», кандидат технических наук  
*Уфимский государственный нефтяной технический университет*  
*ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан,  
450062, Российская Федерация  
utt-aalekseev@ufa-tr.gazprom.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Malik Kh. Nizamutdinov**, Assistant Professor, Department of Operation of Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Industry, Candidate of Technical Science  
*Ufa State Petroleum Technological University*  
*1, Kosmonavtov Str., Ufa, 450062, Bashkortostan, Russian Federation*  
*nizmal@mail.ru*  
*SPIN-code: 7729-9170*  
*ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9447-6126>*  
*ResearcherID: KIK-7379-2024*

**Olga V. Ivanova**, Assistant Professor, Department of Operation of Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Industry, Candidate of Technical Science, Associate Professor  
*Ufa State Petroleum Technological University*  
*1, Kosmonavtov Str., Ufa, 450062, Bashkortostan, Russian Federation*  
*olgachemist@mail.ru*  
*SPIN-code: 1380-7421*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6678-8369>*  
*ResearcherID: S-4929-2017*  
*Scopus AuthorID: 57195293974*

**Danir M. Shamsutdinov**, Assistant Professor, Department of Operation of Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Industry, Candidate Of Physical and Mathematical Sciences  
*Ufa State Petroleum Technological University*  
*1, Kosmonavtov Str., Ufa, 450062, Bashkortostan, Russian Federation*  
*danir@mail.ru*  
*SPIN-code: 1334-8596*  
*ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4981-3698>*  
*ResearcherID: IQR-7200-2023*  
*Scopus AuthorID: 6507089452*

**Rifkat I. Nabiev**, Assistant Professor, Department of Operation of Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Industry, Candidate of Pedagogical Science  
*Ufa State Petroleum Technological University*  
*1, Kosmonavtov Str., Ufa, 450062, Bashkortostan, Russian Federation*  
*dizain55@yandex.ru*  
*SPIN-code: 4883-7004*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0920-6780>*

*ResearcherID: ACQ-3678-2022*

*Scopus AuthorID: 56154833900*

**Yunir M. Makhmutov**, Assistant Professor, Department of Operation of Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Industry, Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor

*Ufa State Petroleum Technological University*

*1, Kosmonavtov Str., Ufa, 450062, Bashkortostan, Russian Federation*

*yunir\_maxmutov@mail.ru*

*SPIN-code: 8274-2319*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2575-7195>*

*ResearcherID: OAJ-6058-2025*

**Aleksey V. Alekseev**, Head of the Department of Technological Transport and Special Equipment, Gazprom Transgaz Ufa, Assistant Professor, Department of Operation of Ground Transport in Oil, Gas, and Construction Industry, Candidate of Technical Science

*Ufa State Petroleum Technological University*

*1, Kosmonavtov Str., Ufa, 450062, Bashkortostan, Russian Federation*

*utt-aalekseev@ufa-tr.gazprom.ru*

*SPIN-code: 8137-3019*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7063-5640>*

Поступила 20.10.2025

После рецензирования 05.11.2025

Принята 22.11.2025

Received 20.10.2025

Revised 05.11.2025

Accepted 22.11.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-407

EDN: FIZCUW

УДК 004.85:004.932.2:681.5.015



Научная статья | Искусственный интеллект в промышленных системах

## АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

*А.А. Акулов, Д.С. Талдыкин, А.В. Гришкина, Н.М. Ганжа*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Современные системы машинного зрения в значительной степени опираются на сверточные нейронные сети, которые демонстрируют высокую результативность при анализе изображений за счет способности извлекать иерархические представления признаков. Повышение качества распознавания достигается увеличением глубины архитектур и числа параметров, но данный подход сопровождается ростом вычислительных затрат, повышенной чувствительностью к шуму и снижением устойчивости к вариациям масштаба и освещенности. Актуализируется задача поиска архитектурных решений, обеспечивающих более эффективное извлечение признаков без существенного увеличения вычислительной сложности. Перспективным направлением является использование многомасштабных сверточных операций, позволяющих учитывать локальный и глобальный контекст изображения, а также внедрение механизмов внимания, обеспечивающих адаптивную концентрацию вычислительных ресурсов на наиболее информативных областях и признаках.

**Цель** – формирование архитектурного подхода к построению сверточных нейронных сетей, основанного на совмещении многомасштабной сверточной обработки и механизмов внимания, ориентированного на повышение эффективности алгоритмов машинного зрения при сохранении приемлемого уровня вычислительных затрат.

**Материалы и методы.** В статье рассмотрены три архитектуры сверточных нейронных сетей, включающие базовую CNN, многомасштабную CNN и расширенную модель с механизмом внимания. Проанализированы операции двумерной свертки, пакетной нормализации и нелинейной активации, а также способы агрегации признаков, полученных на различных пространственных масштабах. Выполнена аналитическая оценка вычислительной сложности архитектур с учетом числа параметров, глубины сети и объема операций прямого прохода.

**Результаты.** Применение многомасштабной сверточной обработки расширяет область восприятия сети и повышает устойчивость к вариациям размеров объектов за счет одновременного анализа признаков на разных уровнях детализации. Внедрение механизмов внимания обеспечивает адаптивное перераспределение весов между признаками, снижает влияние шумовых и нерелевантных компонентов и повышает селективность анализа изображений.

**Ключевые слова:** машинное зрение; нейронные сети; сверточная нейронная сеть; механизм внимания; многомасштабные свертки; устойчивость алгоритмов; диагностика и мониторинг

**Для цитирования.** Акулов, А. А., Талдыкин, Д. С., Гришкина, А. В., & Ганжа, Н. М. (2025). Анализ архитектур сверточных нейронных сетей для систем технического зрения. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 105–128. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-407>

Original article | Artificial Intelligence in Industrial Systems

## ANALYSIS OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK ARCHITECTURES FOR MACHINE VISION SYSTEMS

*A.A. Akulov, D.S. Taldykin, A.V. Grishkina, N.M. Ganzha*

### *Abstract*

**Background.** Modern machine vision systems largely rely on convolutional neural networks, which demonstrate high performance in image

analysis due to their ability to extract hierarchical feature representations. Improvement in recognition quality is commonly achieved by increasing network depth and the number of parameters; however, this approach is associated with higher computational costs, increased sensitivity to noise, and reduced robustness to variations in scale and illumination. This circumstance highlights the need for architectural solutions that enable more efficient feature extraction without a significant increase in computational complexity. A promising direction involves the use of multiscale convolutional operations that capture both local and global image context, as well as the integration of attention mechanisms that provide adaptive concentration of computational resources on the most informative regions and features.

**Purpose.** To formulate an architectural approach to the design of convolutional neural networks based on the combination of multiscale convolutional processing and attention mechanisms, aimed at improving the efficiency of machine vision algorithms while maintaining an acceptable level of computational cost.

**Materials and methods.** The article examines three convolutional neural network architectures, including a baseline CNN, a multiscale CNN, and an extended model incorporating an attention mechanism. Operations of two dimensional convolution, batch normalization, and nonlinear activation are analyzed, along with methods for aggregating features obtained at different spatial scales. An analytical assessment of computational complexity is performed with consideration of the number of parameters, network depth, and the volume of operations during the forward pass.

**Results.** The application of multiscale convolutional processing expands the receptive field of the network and improves robustness to variations in object size through simultaneous analysis of features at different levels of detail. The integration of attention mechanisms provides adaptive redistribution of feature weights, reduces the influence of noise and irrelevant components, and enhances the selectivity of image analysis.

**Keywords:** machine vision; neural networks; convolutional neural network; attention mechanism; multiscale convolutions; algorithm robustness; diagnostics and monitoring

**For citation.** Akulov, A. A., Taldykin, D. S., Grishkina, A. V., & Gan-zha, N. M. (2025). Analysis of convolutional neural network architectures for machine vision systems. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 105–128. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-407>

## Введение

Современные методы машинного зрения развиваются преимущественно в направлении повышения точности извлечения признаков при одновременном снижении вычислительных затрат. Применение сверточных нейронных сетей показало высокую эффективность в задачах классификации, детектирования и сегментации изображений, что обусловлено их способностью формировать иерархические представления признаков различного уровня абстракции. Однако рост глубины и числа параметров моделей нередко приводит к избыточным вычислениям и ухудшению обобщающей способности. Вследствие этого актуальной задачей остается поиск архитектурных решений, обеспечивающих баланс между точностью и скоростью обработки данных.

Одним из направлений повышения эффективности является использование многомасштабных сверточных блоков, позволяющих учитывать контекст изображений на разных уровнях детализации [14]. Подобный подход обеспечивает более полное описание локальных и глобальных структур, что особенно важно при анализе сложных сцен, где объекты различаются по размеру, форме и текстуре. Дополнительный прирост качества достигается при внедрении механизмов внимания, которые распределяют вычислительные ресурсы между наиболее информативными областями изображения. Совмещение многомасштабных операций и внимания формирует гибридные архитектуры, способные адаптивно выделять значимые признаки и игнорировать шумовые компоненты.

В рамках данной статьи рассмотрены три архитектуры сверточных нейронных сетей: базовая CNN, многомасштабная CNN-MS и расширенная CNN-MS-Attn, включающая блок внимания [2]. Проведен сравнительный анализ их структурных особенностей, опи-

саны формальные зависимости, определяющие операции свертки, нормализации и активации, а также предложены схемы для оценки вычислительной сложности. Рассмотрены подходы к проектированию архитектур с точки зрения оптимального соотношения числа параметров, глубины сети и объема операций. Приведены теоретические обоснования выбора многомасштабных фильтров и механизмов внимания, позволяющих повысить устойчивость сети к вариациям масштаба и контраста входных изображений.

### Материалы и методы

Технологию машинного зрения можно представить как двухуровневую систему, объединяющую аппаратные и алгоритмические компоненты. Аппаратный уровень отвечает за сбор визуальных данных, в то время как алгоритмический уровень выполняет обработку данных, сегментацию и классификацию [5].

Были рассмотрены три архитектурных подхода к построению сверточных нейронных сетей: стандартная CNN, многомасштабная CNN-MS и модифицированная CNN-MS-Attn с механизмом внимания. Каждая архитектура отличается способом обработки входных данных, принципом агрегирования признаков и вычислительной сложностью [3].

Стандартная CNN. Базовая сверточная нейронная сеть CNN выполняет двумерную свертку входного изображения с ядром фиксированного размера. Входное изображение обозначено как

$$I \in RH \times W \times C, \quad (1)$$

где  $H$  и  $W$  – пространственные размеры,  $C$  – число каналов.

Свертка с ядром  $K$  размером  $kh \times kw$  вычисляется по формуле

$$S(i,j) = (I \cdot K)(i,j) = \sum_{m=0}^{k_h-1} \sum_{n=0}^{k_w-1} I(i+m, j+n) \cdot K(m,n), \quad (2)$$

$i, j$  – координаты позиции в выходной карте признаков;

$m, n$  – координаты элементов ядра свертки;

$k_p, k_w$  – высота и ширина ядра свертки;

$K(m,n)$  – вес (коэффициент) ядра свертки в позиции  $(m,n)$ ;

Результирующая карта признаков формируется последовательным применением таких операций с последующей пакетной нормализацией и активацией:

$$F^{(l)} = ReLU(BN(S^{(l)})), \quad (3)$$

Каждый слой сети выполняет переход от локальных структур к более абстрактным признакам [1]. Глобальное усреднение по пространству и полносвязный слой завершают архитектуру, обеспечивая классификацию признаков. Базовая CNN характеризуется устойчивостью и простотой реализации, однако ограничена фиксированным масштабом восприятия, что снижает ее эффективность при анализе объектов разных размеров [11].

CNN-MS: многомасштабная свертка. Для повышения устойчивости к вариациям масштаба используется многомасштабный подход. В данной архитектуре входная карта признаков обрабатывается несколькими сверточными ядрами различных размеров  $K(s)$ , где  $s=1..S$ . Для каждого масштаба выполняется свертка:

$$S^{(s)}(i, j) = m = \sum_{m=0}^{k_h^{(s)}-1} \sum_{n=0}^{k_w^{(s)}-1} I(i+m, j+n) \cdot K^{(s)}(m, n), \quad (4)$$

Такое объединение расширяет количество каналов и обеспечивает одновременное восприятие контекстной информации на разных уровнях детализации [6]. После агрегации выполняется нормализация и свертка  $1 \times 1$ , приводящая число каналов к требуемому размеру:

$$F^{(l)} = ReLU(BN(Con_{1 \times 1}(S_{MS}))), \quad (5)$$

Расширенная модель CNN-MS-Attn включает механизм внимания, который регулирует вклад признаков, полученных с разных масштабов. Для каждого масштаба  $s$  вводится карта весов внимания  $A(s)(i, j)$ . Выходной сигнал многомасштабного блока с вниманием определяется выражением:

$$s_{MS-Attn}(i, j) = \sum_{s=1}^S A^{(s)}(i, j) \cdot S^{(s)}(i, j), \quad (6)$$

где :

$$A^{(s)}(i, j) = \frac{\exp(\varphi(S^{(s)}(i, j)))}{\sum_{r=1}^S \exp(\varphi(S^{(r)}(i, j)))}, \quad (7)$$

где  $\varphi$  – функция генерации весов, реализуемая в виде линейного преобразования или небольшой сверточной сети.

Такое представление позволяет архитектуре динамически определять, какой масштаб содержит наиболее значимую информацию в конкретной пространственной позиции. При этом суммарная сумма весов по всем масштабам равна единице, что обеспечивает корректную нормировку распределения внимания [17]. Введение механизма внимания позволяет улучшить селективность восприятия признаков и повысить устойчивость сети к шуму и нерелевантным фрагментам изображения. На рисунках 1, 2 и 3 отображены основные элементы представленных в работе архитектур.



Рис. 1. Архитектура CNN

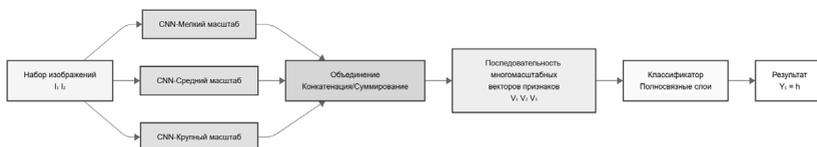


Рис. 2. Архитектура CNN-MS

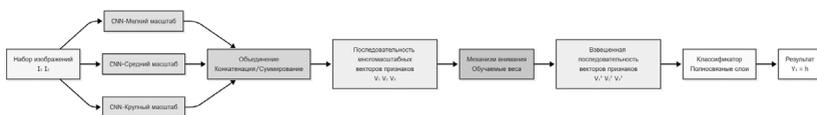


Рис. 3. Архитектура CNN-MS-Attn

Для стабилизации обучения используется пакетная нормализация, обеспечивающая приведение статистик активаций к нулевому среднему и единичной дисперсии. В качестве функции активации применяется  $ReLU(x) = \max(0, x)$ , что предотвращает насыщение градиентов и ускоряет сходимость [8].

Предварительная обработка включала нормализацию значений интенсивности, чтобы свести к минимуму колебания освещенности. Нормализация проводилась в соответствии с уравнением:

$$I_{norm}(x; y) = \frac{I(x; y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}, \quad (8)$$

Где функция  $I(x; y)$  обозначает интенсивность пикселя, а  $I_{min}$  и  $I_{max}$  – это минимальное и максимальное значения яркости изображения соответственно. Эффективность предварительной обработки была продемонстрирована снижением влияния неравномерного освещения на 12-15%.

Для подавления высокочастотного шума был применен фильтр Гаусса, где  $\sigma=1,5$ , за которыми последовали адаптивная пороговая обработка и операции эрозии и расширения для выделения контуров [13].

Базовая CNN обеспечивает минимальную вычислительную нагрузку, но ограничена фиксированным восприятием контекста. Модель CNN-MS позволяет учитывать различный масштаб объектов, увеличивая выразительность признакового пространства. Архитектура CNN-MS-Attn, дополняемая механизмом внимания, реализует адаптивное перераспределение весов между масштабами, что повышает селективность анализа изображений и устойчивость сети к помехам [19]. В Таблице 1 приведено качественное сравнение архитектур с учетом их структурных свойств и аналитических характеристик.

*Таблица 1.*

**Сравнительная характеристика архитектур CNN, CNN-MS и CNN-MS-Attn**

Параметр / характеристика	Базовая CNN	CNN-MS	CNN-MS-Attn
<b>Структурная основа</b>	Последовательная цепочка стандартных сверточных блоков с ядром $3 \times 3$	Многомасштабные сверточные блоки с ядрами $3 \times 3$ , $5 \times 5$ и $7 \times 7$	Многомасштабные блоки, дополненные канално-пространственным вниманием
<b>Тип агрегации признаков</b>	Последовательное накопление признаков по глубине сети	Конкатенация или взвешенная сумма карт признаков разных масштабов	Агрегация многомасштабных признаков с динамическим взвешиванием по важности

<b>Механизмы внимания</b>	Отсутствуют	Отсутствуют	Включены канальное (SE-подобное) и пространственное внимание
<b>Глубина сети</b>	L слоев, каждый с Conv–BN–ReLU	L слоев, внутри каждого — три параллельные ветви	L слоев с многомасштабными блоками внимания
<b>Количество параметров (отн.)</b>	Низкое	Среднее	Повышенное за счет параметров внимания
<b>Использование памяти</b>	Низкое, линейный рост по числу слоев	Умеренное, увеличено из-за параллельных ветвей	Выше среднего, требует хранения карт
<b>Устойчивость к вариациям масштаба</b>	Низкая, ограничена фиксированным размером ядра	Повышенная за счет многомасштабной обработки	Высокая, обеспечивается сочетанием разных масштабов и внимания
<b>Чувствительность к шуму</b>	Средняя	Сниженная	Минимальная благодаря механизму внимания
<b>Интерпретируемость признаков</b>	Высокая	Средняя	Сложнее интерпретировать из-за взвешивания карт
<b>Потенциальные области применения</b>	Базовые задачи классификации и распознавания простых образов	Обработка изображений с объектами различного размера	Анализ сложных сцен, детектирование объектов с перекрытиями
<b>Преимущества</b>	Простота реализации, стабильность обучения	Учет разных уровней детализации, улучшенное представление признаков	Избирательность внимания, адаптивная фокусировка на информативных областях
<b>Ограничения</b>	Ограниченное восприятие контекста	Рост вычислительных затрат	Увеличение числа параметров и времени обучения

Такое усложнение структуры увеличивает число параметров незначительно, так как веса внимания рассчитываются над компактными пространственными представлениями [20]. В итоге достигается сбалансированное соотношение между точностью,

устойчивостью и вычислительными затратами, что делает архитектуру CNN-MS-Attn перспективной для практического применения в системах машинного зрения, ориентированных на адаптивное восприятие визуальных сцен [4].

### **Результаты и обсуждение**

Предложенный подход направлен на повышение эффективности алгоритмов машинного зрения за счет интеграции многомасштабной сверточной обработки и механизмов внимания в единую архитектурную схему. Проведенный анализ показал, что каждая из рассмотренных архитектур обладает специфическим набором свойств, определяющих ее применимость в различных вычислительных сценариях.

Для базовой CNN характерна линейная структура и последовательное извлечение признаков, что обеспечивает простоту обучения и низкую вычислительную стоимость. Однако фиксированный размер ядра ограничивает способность сети адаптироваться к объектам различного масштаба и уровню детализации. Подобная зависимость приводит к снижению устойчивости при анализе сцен, где присутствуют объекты, отличающиеся размерами или контрастом [12].

Архитектура CNN-MS демонстрирует улучшенное представление визуальных признаков за счет параллельной обработки данных свертками разных размеров. Многомасштабная агрегация формирует более полное описание контекстных связей и способствует увеличению чувствительности к локальным структурам изображения [7]. Такое построение расширяет зону восприятия сети, обеспечивая баланс между сохранением мелких деталей и интеграцией глобальных зависимостей. Аналитическая оценка показывает, что увеличение числа фильтров приводит к росту числа операций пропорционально количеству масштабов, однако этот рост компенсируется повышением информативности признаков и уменьшением числа ложных активаций на ранних этапах обработки.

Дополнение архитектуры механизмом внимания в модели CNN-MS-Attn обеспечивает дополнительный уровень адаптации. Канальное внимание регулирует вклад признаков по их информативности, устранив избыточные или коррелированные компоненты. Пространственное внимание концентрирует ресурсы сети на областях изображения, содержащих структурно значимые элементы. В результате объединенное действие двух модулей позволяет формировать более избирательное и контекстно зависимое описание входных данных [18]. Такая организация обработки снижает чувствительность сети к шуму и нерелевантным фрагментам изображения.

С точки зрения вычислительной сложности введение блоков внимания приводит к умеренному увеличению числа параметров, однако операции внимания выполняются над сжатыми представлениями признаков, что ограничивает рост затрат. Теоретический анализ показывает, что доля дополнительных вычислений не превышает 15–20 % от полной стоимости прямого прохода многомасштабной модели. Это позволяет применять CNN-MS-Attn в системах, где критичен баланс между точностью и скоростью обработки [16].

С точки зрения устойчивости к искажениям изображений ожидается, что многомасштабное восприятие повышает стабильность модели при изменении масштаба, а механизм внимания снижает чувствительность к вариациям освещенности и локальным шумам. Вследствие этого комбинированная архитектура должна обеспечивать более высокую согласованность откликов при анализе изображений различного качества. В отличие от классической CNN, способной ошибочно реагировать на малозначимые детали, модифицированная структура концентрируется на областях с наибольшей вероятностью принадлежности к целевым объектам.

При оценке моделей в теоретической постановке могут использоваться стандартные метрики – Accuracy, Precision, Recall и F1.

Аналитические зависимости показывают, что для архитектур с многомасштабной обработкой и вниманием ожидается повышение точности и полноты распознавания при одинаковом уровне регуляризации [10]. Для задач с несбалансированными классами особое значение имеет показатель F1, так как он отражает способность модели одновременно сохранять высокую точность и полноту. Таблица 2 отображает сравнение данных показателей среди данных трех архитектур.

Таблица 2.

**Сравнение ожидаемых метрик качества для различных архитектур сверточных сетей**

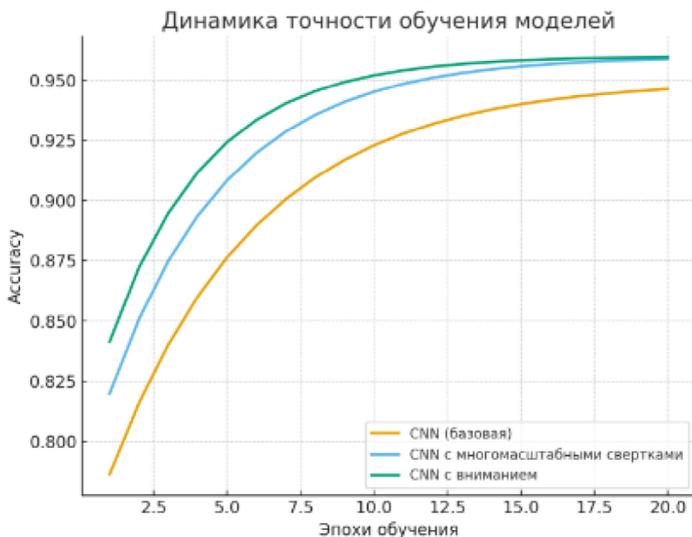
Метрика	Базовая CNN	CNN-MS	CNN-MS-Attn	Комментарий
<b>Accuracy</b> (точность классификации)	Средний уровень, ограничен фиксированным масштабом восприятия	Повышенный уровень за счет учета разных пространственных масштабов	Наивысший уровень благодаря адаптивному распределению внимания	Отражает общую способность модели корректно классифицировать изображения
<b>Precision</b> (точность положительных ответов)	Умеренная, может снижаться при сложных фонах	Повышенная за счет более селективных признаков	Высокая, благодаря подавлению ложных активаций блоком внимания	Характеризует достоверность положительных решений
<b>Recall</b> (полнота)	Средняя, ограничена малым радиусом восприятия	Повышенная, благодаря охвату локальных и глобальных контуров	Высокая, обеспечивается концентрацией внимания на значимых областях	Показывает способность модели находить все целевые объекты
<b>F1</b> (гармоническая оценка точности и полноты)	Сбалансированная, но ниже при несбалансированных данных	Повышенная за счет лучшего равновесия между точностью и полнотой	Максимальная среди трех архитектур, отражает высокий уровень адаптивности	Оптимальный показатель для задач с несбалансированными классами

Особое внимание уделяется анализу вычислительных требований. Для сверточных блоков вычислительная сложность возрастает квадратично относительно размера ядра, что особенно заметно при переходе от  $3 \times 3$  к  $7 \times 7$ . В многомасштабной схеме увеличение числа фильтров компенсируется снижением глубины отдельных ветвей и сокращением повторяющихся операций. Это приводит к рациональному распределению вычислений между параллельными масштабами. Добавление механизма внимания увеличивает общий объем памяти для хранения карт весов, однако не оказывает значительного влияния на пропускную способность сети при современном уровне оптимизации вычислений на графических процессорах [9].

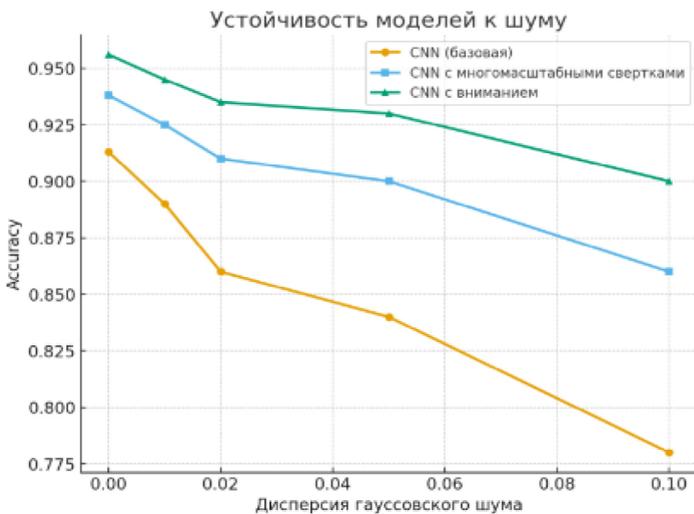
На рисунках 4 и 5 представлен сравнительный графический анализ динамики обучения и помехоустойчивости рассмотренных моделей. Результаты показывают, что архитектура CNN-MS-Attn обеспечивает повышенную точность терминала, а также снижает вариативность на протяжении процесса обучения. Подобное поведение демонстрирует повышенную стабильность при обучении и более устойчивую способность к обобщению. Однако, базовый CNN характеризуется выраженными колебаниями точности во время оптимизации, что указывает на чувствительность к возмущениям при обучении. Многомасштабные конфигурации CNN-MS и CNN-MS-Attn демонстрируют более монотонное и плавное улучшение показателей производительности, что свидетельствует об эффективной конвергенции и отсутствии переобучения в оцениваемых условиях.

Систематическое изучение предлагаемых сетевых архитектур показывает, что совместное применение создает трехуровневую иерархию обработки объектов. Во-первых, происходит первоначальное извлечение локальных визуальных шаблонов. Во-вторых, происходит последующее объединение информации в нескольких пространственных масштабах. В-третьих, данное применение механизмов привлечения внимания для выделения наиболее информативных областей изображения. Очевидно, что подобная архитектурная композиция обеспечивает основу для повышения

точности локализации объектов и надежности классификации при работе в сложных и визуально неоднородных сценах.



**Рис. 4.** График точности для трех моделей



**Рис. 5.** График устойчивости к шуму для трех моделей

Аналитические результаты, полученные в данном исследовании, обеспечивают основу для интеграции многомасштабных представлений и механизмов, основанных на внимании, в рамках сверточных нейронных сетей. В частности, модели CNN-MS и CNN-MS-Attn подходят для задач, требующих интерпретации характеристик с учетом контекста и высокой степени устойчивости к внешним помехам и шуму.

### **Заключение**

Проведенная оценка архитектурных решений сверточных нейронных сетей, предназначенных для повышения производительности алгоритмов технического зрения, показала, что увеличение сложности структуры приводит к улучшению адаптивного восприятия визуальной информации, в то время требуется умеренное увеличение вычислительных ресурсов.

Базовый CNN основан на последовательном процессе выделения признаков с использованием сверточных ядер фиксированного размера, что обеспечивает простоту реализации и стабильность процесса обучения. Тем не менее, ограниченные возможности по захвату расширенного пространственного контекста снижают эффективность при обработке объектов разного масштаба или в изменяющихся условиях освещения. Многомасштабная архитектура CNN-MS устраняет данное ограничение за счет параллельного применения сверточных фильтров с различными размерами полей восприятия, тем самым создавая составное представление объектов, которое объединяет как локальные детали, так и глобальные характеристики изображения. Такой подход эффективно расширяет поле восприятия сети и повышает устойчивость к искажениям, связанным с масштабом.

Расширенная модель CNN-MS-Attn расширяет многомасштабную структуру за счет включения механизмов внимания, которые позволяют избирательно распределять вычислительный акцент на наиболее информативных областях входных данных. Внимание,

ориентированное на канал, адаптивно перестраивает карты объектов в соответствии с их относительной важностью, в то время как пространственное внимание усиливает реакцию сети на структурно значимые области изображения. Комплексная интеграция механизмов обеспечивает более четкое представление объектов и способствует снижению влияния шума и фоновых помех.

С точки зрения вычислительных требований показано, что рост сложности операций при переходе от стандартных фильтров размером  $3 \times 3$  к более крупным ядрам  $5 \times 5$  и  $7 \times 7$  имеет квадратичный характер. Введение многомасштабных ветвей позволяет рационально распределять вычислительные ресурсы между фильтрами различных размеров. Использование внимания дополнительно улучшает энергоэффективность за счет исключения избыточных активаций и фокусировки вычислений на релевантных областях изображения.

Рассмотренные архитектуры образуют иерархию усложнения, что формирует устойчивую основу для построения интеллектуальных систем, способных работать в условиях ограниченных вычислительных ресурсов при сохранении высокой точности классификации. Совмещение многомасштабных операций и механизмов внимания представляет собой перспективное направление развития архитектур нейронных сетей, способное обеспечить высокий уровень точности, устойчивости и обобщающей способности при решении широкого спектра задач компьютерного зрения.

**Информация о спонсорстве.** Данная статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования – Минобрнауки РФ) по теме: «Разработка программного обеспечения в интересах агропромышленного комплекса для мониторинга состояния ботвы и плодов тепличных растений с помощью машинного зрения и искусственного интеллекта» (шифр научной темы FSFM-2025-0002).

### Список литературы

1. Анисимовский, В. В., Пенкин, М. А., Дорохов, Е. А., и др. (2023). Слепое устранение размытия изображения с использованием многозадачной свёрточной нейронной сети и пространственно-вариативной рекуррентной нейронной сети. В *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон»* (№ 33, с. 455–462). <https://doi.org/10.20948/graphicon-2023-455-462>. EDN: <https://elibrary.ru/FFTMZE>
2. Акулов, А. А., Омельченко, Н. А., Талдыкин, Д. С., & Ганжа, Н. М. (2025). Перспективы и эффективность применения систем машинного зрения в агропромышленном комплексе Российской Федерации. В *Актуальные проблемы современного общества, науки и образования* (с. 14–19). Пенза: Наука и Просвещение. EDN: <https://elibrary.ru/RSFSOQ>
3. Багаев, И. И. (2020). Анализ понятий «нейронная сеть» и «свёрточная нейронная сеть», обучение свёрточной нейросети при помощи модуля TensorFlow. *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*, 8(1), 15–22. <https://doi.org/10.18503/2306-2053-2020-8-1-15-22>. EDN: <https://elibrary.ru/IZBILN>
4. Башилов, А. М., Королев, В. А., & Легеза, В. Н. (2019). Новые возможности цифрового видеонаблюдения при интеграции с биотехническими и информационно-управляющими системами. *Вестник НГИЭИ*, 7(98), 39–49. EDN: <https://elibrary.ru/DSNIVW>
5. Блинов, Р. В., Бычков, К. В., Кирчева, А. С., & Мамедов, И. В. (2023). Исследование новых методов компьютерного зрения для распознавания объектов и обработки изображений. В *Технические и математические науки. Студенческий научный форум* (Т. 5, с. 5–10). Москва: Международный центр науки и образования. EDN: <https://elibrary.ru/UXBDEI>
6. Бобырь, М. В., Емельянов, С. Г., & Милостная, Н. А. (2023). Система технического зрения в задаче определения расстояний от видеокамеры до объекта. *Известия Юго-Западного государственного*

- университета, 27(3), 34–51. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-34-51>. EDN: <https://elibrary.ru/NCUHZQ>
7. Газеев, Е. Д. (2024). Применение машинного зрения в сельском хозяйстве. В *Автоматизированные системы управления и информационные технологии* (с. 426–431). Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. EDN: <https://elibrary.ru/QQHPRK>
  8. Ивлиев, С. А. (2020). *Методы и алгоритмы интеллектуального анализа данных о сложных проблемных ситуациях с использованием нейросетевого подхода* (Диссертация кандидата технических наук). EDN: <https://elibrary.ru/QKYWNZ>
  9. Куликов, А. А. (2024). Совершенствование топологии нейросетевой модели для сегментации объектов на цифровых снимках на основе свёрточных нейронных сетей. *Computational Nanotechnology*, 11(3), 57–63. <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2024-11-3-57-63>. EDN: <https://elibrary.ru/QGYEQJ>
  10. Немковский, Г. Б., Ашапкина, М. С., Ефимов, С. А., & Деревянко, Е. А. (2025). Анализ графической информации методами машинного обучения. *Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования*, 2(83), 66–74. EDN: <https://elibrary.ru/KNLGMN>
  11. Обухов, А. Д., Патутин, К. И., & Назарова, А. О. (2022). Алгоритмы обработки данных в автоматических системах управления на основе компьютерного зрения. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 28(4), 573–585. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.04.pp.573-585>. EDN: <https://elibrary.ru/FQPXII>
  12. Плаксин, И. Е., & Трифанов, А. В. (2021). Анализ систем интеллектуального управления в сельском хозяйстве. *АгроЭкоИнженерия*, 4(109), 82–94. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-82-94>. EDN: <https://elibrary.ru/ERQYHS>
  13. Пожидаева, Д. С., Левин, М. Ю., Нагорнов, С. А., и др. (2023). Совершенствование алгоритма машинного зрения в биотехнических

- системах с применением нейронных сетей. *Наука в центральной России*, 6(66), 102–110. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-6-102-110>. EDN: <https://elibrary.ru/NJJKLT>
14. Рыбаков, А. В., Выборнов, Н. А., & Рыбаков, И. А. (2022). Анализ методов компьютерного зрения, перспективных для применения в агропромышленном комплексе. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*, 1(57), 128–138. EDN: <https://elibrary.ru/QFRGLF>
  15. Celeghin, A., Borriero, A., Orsenigo, D., Diano, M., Guerrero, C., Perotti, A., Petri, G., & Tamietto, M. (2023). Convolutional neural networks for vision neuroscience: Significance, developments, and outstanding issues. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 17, Article 1153572. <https://doi.org/10.3389/fncom.2023.1153572>. EDN: <https://elibrary.ru/SZTZEF>
  16. He, B., Fan, C., Mu, X., & Wang, R. (2024). Mobile robot tracking system based on machine vision and laser radar. *Vestnik of Pacific National University*, 2(73), 63–70. <https://doi.org/10.38161/1996-3440-2024-2-63-70>. EDN: <https://elibrary.ru/BWDBSL>
  17. Khanam, R., Hussain, M., Hill, R., & Allen, P. (2024). A comprehensive review of convolutional neural networks for defect detection in industrial applications. *IEEE Access*, 12, 94250–94295. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3425166>. EDN: <https://elibrary.ru/ISBXHG>
  18. Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2022). A survey of convolutional neural networks: Analysis, applications, and prospects. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 33, 6999–7019. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3084827>. EDN: <https://elibrary.ru/YIYHMA>
  19. Raj, R., & Kos, A. (2025). An extensive study of convolutional neural networks: Applications in computer vision for improved robotics perceptions. *Sensors*, 25, Article 1033. <https://doi.org/10.3390/s25041033>. EDN: <https://elibrary.ru/SVWYRH>
  20. Zhao, X., Wang, L., Zhang, Y., Han, X., Deveci, M., & Parmar, M. (2024). A review of convolutional neural networks in computer vision.

*Artificial Intelligence Review*, 57, Article 99. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6>. EDN: <https://elibrary.ru/SHNOJQ>

### References

1. Anisimovsky, V. V., Penkin, M. A., Dorokhov, E. A., et al. (2023). Blind image deblurring using a multi-task convolutional neural network and a spatially variant recurrent neural network. In *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "GraphiCon"* (No. 33, pp. 455–462). <https://doi.org/10.20948/graphicon-2023-455-462>. EDN: <https://elibrary.ru/FFTMZE>
2. Akulov, A. A., Omelchenko, N. A., Taldykin, D. S., & Ganja, N. M. (2025). Prospects and effectiveness of using machine vision systems in the agro-industrial complex of the Russian Federation. In *Topical problems of modern society, science and education* (pp. 14–19). Penza: Nauka i Prosveshchenie. EDN: <https://elibrary.ru/RSFSOQ>
3. Bagaev, I. I. (2020). Analysis of the concepts “neural network” and “convolutional neural network”, training a convolutional neural network using the TensorFlow module. *Mathematical and Software Support of Systems in Industrial and Social Spheres*, 8(1), 15–22. <https://doi.org/10.18503/2306-2053-2020-8-1-15-22>. EDN: <https://elibrary.ru/IZBILN>
4. Bashilov, A. M., Korolev, V. A., & Legeza, V. N. (2019). New possibilities of digital video surveillance when integrated with biotechnical and information-controlled systems. *Bulletin of NGIEI*, 7(98), 39–49. EDN: <https://elibrary.ru/DSNIVW>
5. Blinov, R. V., Bychkov, K. V., Kircheva, A. S., & Mamedov, I. V. (2023). Research of new computer vision methods for object recognition and image processing. In *Technical and Mathematical Sciences. Student Scientific Forum* (Vol. 5, pp. 5–10). Moscow: International Center for Science and Education. EDN: <https://elibrary.ru/UXBDEI>
6. Bobyr, M. V., Emelyanov, S. G., & Milostnaya, N. A. (2023). Machine vision system in the task of determining distances from a video camera to an object. *Proceedings of Southwestern State University*, 27(3),

- 34–51. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-34-51>. EDN: <https://elibrary.ru/NCUHZQ>
7. Gazeev, E. D. (2024). Application of machine vision in agriculture. In *Automated Control Systems and Information Technologies* (pp. 426–431). Perm: Perm National Research Polytechnic University. EDN: <https://elibrary.ru/QQHPKR>
  8. Ivliev, S. A. (2020). *Methods and algorithms of intelligent data analysis of complex problem situations using a neural network approach* (Doctoral dissertation in Engineering Sciences). EDN: <https://elibrary.ru/QKYWNZ>
  9. Kulikov, A. A. (2024). Improving the topology of a neural network model for segmenting objects in digital images based on convolutional neural networks. *Computational Nanotechnology*, 11(3), 57–63. <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2024-11-3-57-63>. EDN: <https://elibrary.ru/QGYEQJ>
  10. Nemkovsky, G. B., Ashapkina, M. S., Efimov, S. A., & Derevyanko, E. A. (2025). Analysis of graphical information using machine learning methods. *Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation*, 2(83), 66–74. EDN: <https://elibrary.ru/KNLGMN>
  11. Obukhov, A. D., Patutin, K. I., & Nazarova, A. O. (2022). Data processing algorithms in automatic control systems based on computer vision. *Bulletin of Tambov State Technical University*, 28(4), 573–585. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.04.pp.573-585>. EDN: <https://elibrary.ru/FQPXII>
  12. Plaksin, I. E., & Trifanov, A. V. (2021). Analysis of intelligent control systems in agriculture. *AgroEcoEngineering*, 4(109), 82–94. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-82-94>. EDN: <https://elibrary.ru/ERQYHS>
  13. Pozhidaeva, D. S., Levin, M. Yu., Nagornov, S. A., et al. (2023). Improving a machine vision algorithm in biotechnical systems using neural networks. *Science in Central Russia*, 6(66), 102–110. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-6-102-110>. EDN: <https://elibrary.ru/NJJKLT>

14. Rybakov, A. V., Vybornov, N. A., & Rybakov, I. A. (2022). Analysis of computer vision methods promising for application in the agro-industrial complex. *Caspian Journal: Management and High Technologies*, 1(57), 128–138. EDN: <https://elibrary.ru/QFRGLF>
15. Celeghin, A., Borriero, A., Orsenigo, D., Diano, M., Guerrero, C., Perotti, A., Petri, G., & Tamietto, M. (2023). Convolutional neural networks for vision neuroscience: Significance, developments, and outstanding issues. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 17, Article 1153572. <https://doi.org/10.3389/fncom.2023.1153572>. EDN: <https://elibrary.ru/SZTZEF>
16. He, B., Fan, C., Mu, X., & Wang, R. (2024). Mobile robot tracking system based on machine vision and laser radar. *Vestnik of Pacific National University*, 2(73), 63–70. <https://doi.org/10.38161/1996-3440-2024-2-63-70>. EDN: <https://elibrary.ru/BWDBSL>
17. Khanam, R., Hussain, M., Hill, R., & Allen, P. (2024). A comprehensive review of convolutional neural networks for defect detection in industrial applications. *IEEE Access*, 12, 94250–94295. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3425166>. EDN: <https://elibrary.ru/ISBXHG>
18. Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2022). A survey of convolutional neural networks: Analysis, applications, and prospects. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 33, 6999–7019. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3084827>. EDN: <https://elibrary.ru/YYIHMA>
19. Raj, R., & Kos, A. (2025). An extensive study of convolutional neural networks: Applications in computer vision for improved robotics perceptions. *Sensors*, 25, Article 1033. <https://doi.org/10.3390/s25041033>. EDN: <https://elibrary.ru/SVWYRH>
20. Zhao, X., Wang, L., Zhang, Y., Han, X., Deveci, M., & Parmar, M. (2024). A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 57, Article 99. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6>. EDN: <https://elibrary.ru/SHNOJQ>

## **ДАнные ОБ АВТОРАХ**

**Акулов Алексей Андреевич**, к.т.н., доцент кафедры Логистики и транспортно-технологических систем ГУУ, доцент кафедры «Детали машин и теория механизмов» МАДИ  
*ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет; ФГБОУ ВО Государственный университет управления  
пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация; пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация  
a.akulov.98@mail.ru*

**Талдыкин Дмитрий Сергеевич**, аспирант, младший научный сотрудник Лаборатории реверсивного инжиниринга ГУУ, ассистент кафедры «Детали машин и теория механизмов» МАДИ  
*ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет; ФГБОУ ВО Государственный университет управления  
пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация; пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, РФ  
dima.dima.taldykin@mail.ru*

**Гришкина Анна Вячеславовна**, аналитик Центра интеллектуальной собственности и трансфера технологий  
*ФГБОУ ВО Государственный университет управления  
пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация  
annagrishkina.0401@yandex.ru*

**Ганжа Никита Михайлович**, лаборант кафедры «Детали машин и теория механизмов»  
*ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет  
пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация  
nikita.ganzha180@gmail.com*

**DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Alexey A. Akulov**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Logistics and Transport and Technological Systems; Associate Professor of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; State University of Management  
64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation;  
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation  
a.akulov.98@mail.ru*

**Dmitry S. Taldykin**, Postgraduate Student, Junior Researcher at the Laboratory of Reverse Engineering; Assistant of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; State University of Management  
64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation;  
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation  
dima.dima.taldykin@mail.ru*

**Anna V. Grishkina**, Analyst, Center for Intellectual Property and Technology Transfer

*State University of Management  
99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation  
annagrishkina.0401@yandex.ru*

**Nikita M. Ganzha**, Laboratory Assistant of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University  
64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation  
nikita.ganzha180@gmail.com*

Поступила 20.11.2025

После рецензирования 11.12.2025

Принята 24.12.2025

Received 20.11.2025

Revised 11.12.2025

Accepted 24.12.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-408

EDN: FYSLCV



УДК 631.155

Научная статья | Искусственный интеллект в промышленных системах

## АНАЛИЗ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ И МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕГУЛЯТОРНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

*М.Ю. Карелина, А.В. Подгорный,  
А.В. Гришкина, Н.М. Ганжа*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Интенсивное внедрение цифровых технологий и алгоритмов искусственного интеллекта в агропромышленный комплекс опережает формирование специализированной нормативно-правовой и технической базы, что создает ограничения для практической интеграции интеллектуальных систем в производственные процессы. Существующие стратегические документы формируют общие направления цифровой трансформации, но не обеспечивают отраслевой детализации требований к архитектуре, надежности и верификации систем искусственного интеллекта. Технические стандарты и строительные нормы ориентированы преимущественно на универсальные инженерные решения и не учитывают специфику интеллектуальных биотехнических систем, а правовое регулирование обработки данных не выделяет технологическую информацию агропромышленного комплекса в самостоятельную категорию регулирования. Указанные обстоятельства определяют необходимость комплексного анализа нормативной среды и разработки системной модели ее трансформации, ориентированной на создание условий для устойчивого и технологически обоснованного внедрения искусственного интеллекта в агропромышленный комплекс Российской Федерации.

**Цель** – формирование системного представления о состоянии нормативно-правовой и технической базы интеграции систем искусственного интеллекта в агропромышленный комплекс Российской Федерации, а также выявление ключевых направлений ее развития, обеспечивающих возможность масштабного внедрения интеллектуальных технологий в теплицах.

**Материалы и методы.** Материалами статьи являются стратегические документы федерального уровня, нормативные правовые акты, государственные программы цифрового развития, технические стандарты, строительные нормы и документы, регулирующие обработку данных. В работе применены методы системного и структурного анализа нормативной документации, сравнительный анализ регуляторных актов различных уровней, а также качественно-количественная оценка степени нормативной готовности ключевых кластеров регулирования на основе нормированной шкалы зрелости.

**Результаты.** Выявлена неоднородность нормативной среды интеграции искусственного интеллекта в агропромышленный комплекс, обусловленная несогласованностью стратегических, технических, отраслевых и правовых документов. Установлено, что стратегический уровень регулирования обладает высокой степенью сформированности, тогда как технические, строительные и отраслевые регламенты не обеспечивают условий для практического внедрения интеллектуальных систем в тепличных хозяйствах. Сформирована многоуровневая модель нормативной трансформации, ориентированная на развитие режима данных, создание отраслевых стандартов доверенности ИИ и формирование требований цифровой готовности объектов закрытого грунта.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект; агропромышленный комплекс; нормативное регулирование; технические стандарты; цифровая трансформация

**Для цитирования.** Карелина, М. Ю., Подгорный, А. В., Гришкина, А. В., & Ганжа, Н. М. (2025). Анализ нормативно-технической готовности и модель трансформации регуляторной среды для

интеграции систем искусственного интеллекта в агропромышленный комплекс. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 129–149. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-408>

Original article | Artificial Intelligence in Industrial Systems

## ASSESSING REGULATORY-TECHNICAL READINESS AND A TRANSFORMATION MODEL FOR INTEGRATING ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS INTO THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

*M.Yu. Karelina, A.V. Podgorny,  
A.V. Grishkina, N.M. Ganzha*

### *Abstract*

**Background.** The intensive deployment of digital technologies and artificial intelligence algorithms in the agro-industrial complex outpaces the development of a specialized regulatory and technical framework, which creates constraints on the practical integration of intelligent systems into production processes. Existing strategic policy documents define general directions for digital transformation but do not provide sector-specific detailing of requirements for the architecture, reliability, and verification of artificial intelligence systems. Technical standards and construction regulations are primarily oriented toward universal engineering solutions and do not account for the specificity of intelligent biotechnical systems, while data governance frameworks do not distinguish technological information of the agro-industrial complex as an independent category of regulation. These circumstances determine the need for a comprehensive analysis of the regulatory environment and the development of a systemic model for its transformation, aimed at creating conditions for the sustainable and technologically grounded deployment of artificial intelligence in the agro-industrial complex of the Russian Federation.

The **purpose** of the article is to develop a systemic understanding of the current state of the regulatory and technical framework for the integration of artificial intelligence systems into the agro-industrial complex of the Russian Federation, as well as to identify key directions for its development that enable large-scale deployment of intelligent technologies in greenhouse facilities.

**Materials and methods.** The materials of the article include federal-level strategic documents, regulatory legal acts, national digital development programs, technical standards, construction codes, and documents governing data processing. The study employs methods of systemic and structural analysis of regulatory documentation, comparative analysis of regulatory acts at different levels, and a qualitative-quantitative assessment of the regulatory readiness of key governance clusters based on a normalized maturity scale.

**Results.** The analysis revealed structural heterogeneity in the regulatory environment for the integration of artificial intelligence into the agro-industrial complex, caused by inconsistencies among strategic, technical, sectoral, and legal documents. It was established that the strategic level of regulation demonstrates a high degree of development, while technical, construction, and sectoral regulations do not provide sufficient conditions for the practical deployment of intelligent systems in greenhouse enterprises. A multi-level regulatory transformation model was developed, focused on the advancement of data governance regimes, the creation of sector-specific AI trust standards, and the formulation of digital readiness requirements for controlled-environment agricultural facilities.

**Keywords:** artificial intelligence; agro-industrial complex; regulatory framework; technical standards; digital transformation

**For citation.** Karelina, M. Yu., Podgorny, A. V., Grishkina, A. V., & Ganzha, N. M. (2025). Assessing regulatory-technical readiness and a transformation model for integrating artificial intelligence systems into the agro-industrial complex. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 129–149. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-408>

## **Введение**

Развитие агропромышленного комплекса характеризуется структурной модернизацией производственных процессов, основанных на применении цифровых платформ, сенсорных систем и алгоритмов искусственного интеллекта.

Повышение эффективности ресурсного обеспечения и укрепление технологической устойчивости становится ключевым фактором конкурентоспособности отрасли. Внедрение интеллектуальных технологий позволяет обеспечивать стабильность производственных циклов в условиях изменчивых внешних факторов.

Интеграция автоматизированных модулей и технологий машинного зрения в тепличные хозяйства ограничена уровнем зрелости нормативно-правовой и отраслевой документации. Структура действующего регулирования включает стратегические документы федерального уровня, технические стандарты общего назначения, правовые акты в сфере обработки данных и отдельные строительные нормы.

Данная система является фрагментированной, так как отдельные ее элементы не образуют целостной нормативной среды, способной обеспечивать устойчивое внедрение интеллектуальных технологий в производственные процессы агропромышленного комплекса.

В рамках статьи выполнена комплексная оценка нормативной среды внедрения систем искусственного интеллекта в агропромышленный комплекс Российской Федерации. Анализ позволяет выявить степень зрелости ключевых кластеров регулирования, определить фундаментальные ограничения существующей нормативной архитектуры и сформулировать направления ее развития, обеспечивающие повышение технологической устойчивости, снижение регуляторных рисков и создание условий для масштабного внедрения интеллектуальных технологий в агропромышленные комплексы.

### **Материалы и методы**

В условиях высокой динамичности технологических процессов в тепличных хозяйствах нормативная база должна эволюционировать синхронно с развитием интеллектуальных систем, включая компьютерное зрение, сенсорные сети и автономные модули управления микроклиматом [16]. Взаимосвязь документов становится основой для определения ключевых направлений корректировки нормативной среды.

Национальная стратегия развития искусственного интеллекта, закрепленная Указом Президента Российской Федерации от 10.10.2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» [12], задает основные ориентиры развития отечественных технологий ИИ, определяет принципы безопасности, требования к нормативной гармонизации и формирует основу для запуска федеральных проектов, стимулирующих внедрение интеллектуальных систем в производство. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [10] развивает данные положения на уровне отраслевой цифровизации экономики, создавая платформу для разработки программного обеспечения и инструментов обработки больших данных. Элементы программы трансформируются в отраслевые инициативы, влияющие на организацию цифровых процессов в тепличных комплексах [3].

Стратегическое направление цифровой трансформации АПК фокусируется на формировании единой информационной среды отрасли, стандартизации данных, создании цифровых сервисов мониторинга и автоматического контроля. В совокупности эти документы формируют нормативную базу, в рамках которой возможно проектирование интеллектуальных комплексов, предназначенных для обработки биотехнических данных, управления микроклиматическими режимами и автоматизированную координацию инфраструктурных систем.

Технические стандарты, включающие ГОСТ Р 59276-2020 «Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения дове-

рия. Общие положения» [18], ГОСТ Р 59486-2021 «Слаботочные системы. Кабельные системы. Кабельные системы для высокопроизводительных сетей в центрах обработки данных. Основные положения» [19] и комплекс стандартов ГОСТ 34 [4], обеспечивают методическую основу для проектирования архитектуры интеллектуальных систем. Положения стандартов формируют единый понятийный аппарат, и задают структуру жизненного цикла автоматизированных систем. Отличительная особенность ГОСТов заключается в том, что они определяют требования к инженерной части ИИ-систем, что делает их значимыми для проектирования тепличных комплексов.

Инженерно-строительная нормативная база, представленная СП 107.13330 «Теплицы и парники» [8], является основой для проектных параметров, влияющих на возможность интеграции интеллектуальных систем в рабочую среду тепличных объектов. В документе содержатся теплотехнические требования, стандарты освещения и вентиляции, правила размещения инженерных систем, которые определяют условия корректной работы датчиков, камер и систем мониторинга.

Правовое регулирование обработки информации обеспечивается Федеральными законами № 149-ФЗ от 27.07.2006 г. «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» [13] и № 152-ФЗ от 27.07.2006 г. «О персональных данных» [14]. Эти документы устанавливают требования к защите данных, безопасной эксплуатации информационных систем, обработке персональной и биометрической информации. В тепличных хозяйствах данные требования применяются к системам технического зрения, которые могут фиксировать персонал, и к платформам мониторинга, обеспечивающим хранение и обработку больших массивов технологических данных.

Для систематизации нормативных источников в Таблице 1 представлены ключевые нормативные документы и их характеристики.

Таблица 1.

**Ключевые нормативные документы и их характеристики**

Наименование документа	Полное название	Целевое направление	Основные положения	Значение для АПК
Указ Президента РФ № 490	«О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации»	Развитие ИИ до 2030 года	Приоритет отечественных технологий, формирование экосистемы ИИ, нормативное регулирование, безопасность	Основа для разработки алгоритмических систем в АПК
Национальная программа «Цифровая экономика»	«Цифровая экономика Российской Федерации»	Цифровизация экономики	Цифровые платформы, ИИ, инфраструктура данных, безопасность	Формирование цифровой среды для агросектора
Распоряжение Правительства РФ № 3309-р	«Об утверждении стратегического направления цифровой трансформации АПК до 2030 года»	Цифровизация АПК	Единая ИС, стандартизация данных, сервисная архитектура	Интеграционная рамка для ИИ в сельском хозяйстве
ГОСТ Р 59276-2020	«Информационные технологии. Искусственный интеллект. Термины и определения»	Базовая терминология	Определения, классификация, принципы	Нормативная база для описания ИИ-модулей
ГОСТ Р 59486-2021	«Информационные технологии. Искусственный интеллект. Качество данных»	Качество данных	Критерии качества, верификация, управление данными	Повышение точности алгоритмов АПК
ГОСТ 34 серии	«Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы»	Автоматизация	Жизненный цикл АСУ, проектирование, ввод в эксплуатацию	Архитектурная совместимость систем
СП 107.13330	«Теплицы и парники»	Нормирование инженерных систем	Микроклимат, конструкции, вентиляция	Параметры для алгоритмических систем в теплицах

Федеральный закон № 149-ФЗ	«Об информации, информационных технологиях и о защите информации»	Информационная безопасность	Правила защиты данных, ИБ требований	Защита ИИ-систем в теплицах
Федеральный закон № 152-ФЗ	«О персональных данных»	Защита персональных данных	Биометрия, законность, безопасность	Регулирование видеосистем в АПК
Федеральный закон № 264-ФЗ	«О развитии сельского хозяйства»	Модернизация АПК	Госсубсидии, инновации, развитие отрасли	Основания для поддержки ИИ-внедрения

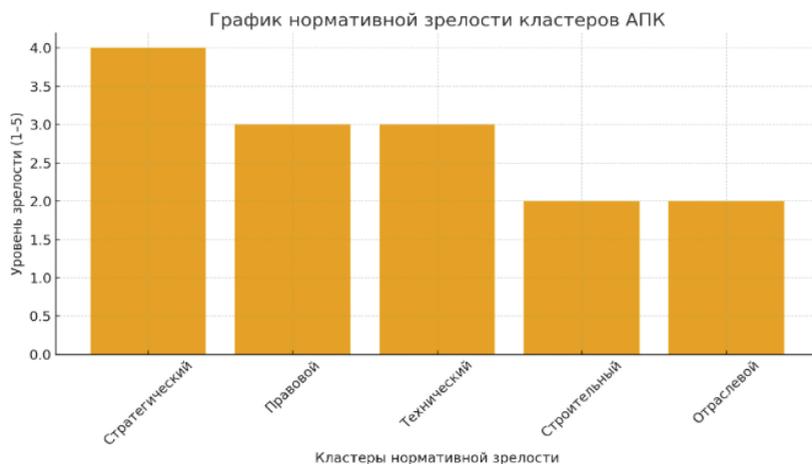
В настоящее время расширения нормативной базы требуется в нескольких направлениях. Стратегические документы задают долгосрочные цели технологического развития, однако в них отсутствуют конкретные отраслевые требования для применения ИИ в агропромышленных комплексах. Технические стандарты не учитывают параметры функционирования биотехнических процессов в тепличных условиях, включая требования к устойчивости алгоритмов в условиях изменяющегося микроклимата [1]. Строительные нормы не рассматривают цифровую готовность объектов и параметры размещения интеллектуальных систем. Законы по регулированию обработки данных не формируют отдельного режима для данных, хотя их значимость сопоставима с персональными и коммерчески важными данными.

### Результаты и обсуждение

Сопоставление стратегических документов, технических стандартов, правового регулирования данных позволяет выявить структурные закономерности, определяющие зрелость нормативной среды и ее способность поддерживать интеллектуализацию производственных процессов объектов закрытого грунта.

Интеграция полученных результатов позволила выполнить формализованную оценку степени готовности нормативной базы ключевых кластеров регулирования, определяющих возможность

внедрения ИИ [3]. Для расчета приведенных уровней зрелости использовалась нормированная пятибалльная шкала, основанная на качественно-количественной оценке четырех критериев: полнота нормативного регулирования, глубина и конкретность требований, согласованность нормативных актов и соответствие положений современным технологическим потребностям АПК [20]. Каждому кластеру присваивались значения по указанным критериям с последующим вычислением среднего арифметического и округлением до ближайшего целого значения. Интерпретация уровня зрелости представлена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Нормативная зрелость кластеров АПК

Данный график отражает неоднородность нормативной системы. Стратегический кластер демонстрирует наивысшую зрелость, что объясняется наличием развитой системы стратегических документов, определяющих общенациональные цели развития искусственного интеллекта [2]. Правовой и технического уровни занимают промежуточные позиции, обеспечивая базовую регуляторную опору, но не предоставляя отраслевой детализации. Строительный и отраслевой кластеры характеризуются минимальной зрелостью,

что обусловлено отсутствием стандартов цифровой готовности тепличных объектов, недостатком требований к размещению сенсорных систем, каналов связи, вычислительных модулей и отсутствием специализированных регламентов для систем.

Результаты оценки показывают, что отсутствие синхронности нормативного развития является ключевым фактором, препятствующим широкому внедрению ИИ в тепличных комплексах. Преобладание стратегических документов над техническими и отраслевыми нормами формирует ситуацию, при которой направление развития определено, но практическая регуляторная инфраструктура отсутствует [15]. В результате производственные предприятия вынуждены формировать индивидуальные регуляторные решения, что приводит к увеличению затрат, снижению масштабируемости технологий и возникновению дополнительных юридических рисков.

Отсутствие специализированных отраслевых стандартов существенно ограничивает применение систем технического зрения, так как остаются неформализованными требования к рабочим характеристикам сенсорных сетей, архитектурным принципам алгоритмов выявления стрессовых состояний растений и процедурам верификации интеллектуальных модулей в биотехнических условиях. Имеющиеся технические нормативы не формируют эксплуатационно-ориентированной регуляторной среды, необходимой для практического внедрения указанных технологий.

Анализ нормативной зрелости показывает существенный разрыв между правовым регулированием и фактической структурой данных, циркулирующих в тепличных комплексах. Данные не обладают формализованным юридическим статусом, что вызывает неопределенность в вопросах владения и использования информации. Корректировка нормативной среды должна быть направлена на создание:

- режима агроданных,
- отраслевых стандартов доверенности ИИ,

- строительных норм цифровой готовности теплиц,
- требований к качеству данных и методам тестирования алгоритмов,
- механизмов гармонизации стратегических, технических и отраслевых документов.

Сформирован набор целей, определяющий необходимые направления развития документации. Одной из ключевых целей является создание интегрированного стандарта доверенности ИИ для агропромышленного комплекса, включающего методы оценки корректности алгоритмов, проверку качества данных, требования к отказоустойчивости и принципы документирования алгоритмических решений [5]. Стандарт позволит стандартизировать требования к интеллектуальным системам, гарантируя их предсказуемость и безопасность.

Следующая цель связана с формированием завершеного правового режима данных, генерируемых информационными системами агропромышленного комплекса. Создание режима предполагает юридическую формализацию категории отраслевой информации, включающей технологические, биотехнические, спектральные, пространственные и управленческие данные, составляющие цифровую среду агрохолдинга. Это обеспечит возможность интеграции данных из разных источников в экосистему АПК [11].

Основной целью выступает необходимость согласования требований между стратегическими документами, техническими стандартами и отраслевыми регламентами. Создание единой сквозной архитектуры нормативного регулирования обеспечит предсказуемость правовой среды и ускорит внедрение интеллектуальных технологий в агропромышленный комплекс.

### **Заключение**

Стратегические документы государственной политики определяют долгосрочные ориентиры развития искусственного интел-

лекта. Однако отсутствие нормативной детализации приводит к тому, что сформулированные стратегические цели не транслируются в технологически применимые требования. Это ограничивает возможность разработки унифицированных производственных практик, соответствующих современным алгоритмическим методам [6]. Для обеспечения практической применимости стратегические положения должны трансформироваться в регламенты, описывающие конкретные параметры функционирования ИИ-систем, включая методы валидации, формы контроля качества и уровни автономности.

Анализ правового регулирования данных демонстрирует, что существующие нормы не учитывают специфики данных, которые обладают высокой значимостью для построения цифровых моделей. Отсутствие правового статуса ограничивает возможность их систематизации и последующего использования в отраслевых информационных системах [7]. Это снижает точность алгоритмов прогнозирования и препятствует развитию сервисных моделей управления производственными процессами, основанных на анализе больших данных.

Выявленные закономерности указывают на необходимость построения многоуровневой модели нормативной трансформации, в структуре которой каждый уровень выполняет строго определенную функцию. Базовый уровень включает стандарты данных, определяющие структуру, качество, условия хранения и формы использования данных [9]. Следующий уровень содержит технические требования к алгоритмическим системам, охватывающие методы верификации, критерии устойчивости, требования к интерпретируемости и регламенты обеспечения надежности. Отраслевой уровень направлен на формирование регламентов эксплуатации ИИ-систем в тепличных хозяйствах, включая требования к точности определения биотехнических параметров, регламенты применения технического зрения и процедуры оценки функционирования систем [17]. Верхний уровень обеспечивает согласован-

ность отраслевых процессов со стратегическими целями развития искусственного интеллекта.

Внедрение интеллектуальных технологий в агропромышленный комплекс невозможно без системной доработки нормативной среды. Дальнейшее развитие нормативных документов должно обеспечивать снижение технологических рисков, устранение регуляторных неопределенностей, повышение воспроизводимости внедряемых решений и обеспечение возможности построения масштабируемых архитектур цифрового растениеводства. Сформированная модель нормативной трансформации создает условия для согласования требований, что обеспечивает повышение технологической устойчивости агропромышленного комплекса и повышает уровень устойчивости продовольственного обеспечения.

**Информация о спонсорстве.** Данная статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования – Минобрнауки РФ) по теме: «Разработка программного обеспечения в интересах агропромышленного комплекса для мониторинга состояния ботвы и плодов тепличных растений с помощью машинного зрения и искусственного интеллекта» (шифр научной темы FFSM-2025-0002).

### *Список литературы*

1. Александров, И., Дарошка, В., Исаков, А., Чеховских, И., Оль, Е., & Борисова, Е. (2021). Сельское хозяйство в эпоху Индустрии 4.0: мировой опыт и российская практика построения цифровой бизнес-модели в агропромышленных комплексах. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125806058>. EDN: <https://elibrary.ru/WWGNOH>
2. Голубев, И. (2021). Цифровизация и использование технологий искусственного интеллекта в технической модернизации агро-

- промышленного комплекса. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129104006>
3. Горлов, И., Усенко, Л., Холодов, О., Холодова, М., Мосолова, Н., & Мосолова, Д. (2021). Концептуальные подходы к планированию и прогнозированию сельскохозяйственного производства в условиях цифровизации. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032022>
  4. Государственный комитет СССР по стандартам. (1991). *ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания*. Москва: Издательство стандартов.
  5. Кашкин, С., & Алтухов, А. (2021). Искусственный интеллект и платформенное право для развития цифрового агропромышленного комплекса РФ. *Журнал российского права*, 176(7), 122–129. <https://doi.org/10.17803/1729-5920.2021.176.7.122-129>. EDN: <https://elibrary.ru/FMLDDX>
  6. Кулик, А., Андросова, А., Соловьева, Н., & Зуппело, А. (2021). Цифровая трансформация: проблемы и тенденции развития сельскохозяйственных стартапов. В *Материалы 3-й Международной конференции «Пространственное развитие территорий» (SDT 2020)*. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.210710.041>
  7. Мещерягина, В., Вилачева, М., Курдюмов, А., Кярова, М., & Теммоева, С. (2021). Механизм правового регулирования инновационных технологий в агропромышленном комплексе Евразийского экономического союза: реалии и перспективы. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126203015>. EDN: <https://elibrary.ru/SYVUDA>
  8. Министерство регионального развития Российской Федерации. (2012). *СП 107.13330.2012. Теплицы и парники. Актуализированная редакция СНиП 2.10.04-85*. Москва: Минрегион России.
  9. Нетребская, О. (2021). Интегральное знание как методологическая основа для проектирования систем искусственного интеллекта. *Journal of Physics: Conference Series*, 1925. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1925/1/012064>. EDN: <https://elibrary.ru/TLTUOU>

10. Правительство Российской Федерации. (2017, 28 июля). *Цифровая экономика Российской Федерации* (распоряжение № 1632-р). *Собрание законодательства Российской Федерации*, 32, ст. 5138.
11. Правительство Российской Федерации. (2023, 23 ноября). *Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года* (распоряжение № 3309-р). Получено с официального интернет-портала правовой информации: <https://publication.pravo.gov.ru>
12. Президент Российской Федерации. (2019, 10 октября). *О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации* (Указ № 490). *Собрание законодательства Российской Федерации*, 41, ст. 5700.
13. Российская Федерация. (2006, 27 июля). *Об информации, информационных технологиях и о защите информации* (Федеральный закон № 149-ФЗ). *Собрание законодательства Российской Федерации*, 31, ст. 3448.
14. Российская Федерация. (2006, 27 июля). *О персональных данных* (Федеральный закон № 152-ФЗ). *Собрание законодательства Российской Федерации*, 31, ст. 3451.
15. Токарев, К. (2021). Искусственный интеллект и цифровые технологии в технических системах II-2021 (AIDTTS II-2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 2060. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2060/1/011001>
16. Утрендеева, К., Рябцева, Е., & Рябцев, А. (2021). Правовое обеспечение цифровизации агропромышленного комплекса России: проблемы и перспективы развития. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 666. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052014>
17. Фастович, Г., & Капсаргина, С. (2021). Внедрение информационных технологий в сельскохозяйственный сектор как один из критериев эффективной государственной политики в области аг-

- ропромышленного комплекса Российской Федерации. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032089>
18. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. (2021). *ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения*. Москва: Стандартинформ.
  19. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. (2021). *ГОСТ Р 59486-2021. Слаботочные системы. Кабельные системы. Кабельные системы для высокопроизводительных сетей в центрах обработки данных. Основные положения*. Москва: Стандартинформ.
  20. Шашкова, И., Романова, Л., Куприянова, М., & Черкашина, Л. (2022). Использование современных роботизированных систем в агропромышленном комплексе. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 949. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012024>

### *References*

1. Alexandrov, I., Daroshka, V., Isakov, A., Chekhovskikh, I., Ol, E., & Borissova, E. (2021). Agriculture in the era of Industry 4.0: Global experience and Russian practice of building a digital business model in agro-industrial complexes. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202125806058>. EDN: <https://elibrary.ru/WWGNOH>
2. Golubev, I. (2021). Digitalization and the use of artificial intelligence technologies in the technical modernization of the agro-industrial complex. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202129104006>
3. Gorlov, I., Usenko, L., Kholodov, O., Kholodova, M., Mosolova, N., & Mosolova, D. (2021). Conceptual approaches to planning and forecasting agricultural production in the context of digitalization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032022>

4. State Committee of the USSR for Standards. (1991). *GOST 34.601-90. Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Stages of creation*. Moscow: Publishing House of Standards.
5. Kashkin, S., & Altukhov, A. (2021). Artificial intelligence and platform law for the development of the digital agro-industrial complex of the Russian Federation. *Journal of Russian Law*, 176(7), 122–129. <https://doi.org/10.17803/1729-5920.2021.176.7.122-129>. EDN: <https://elibrary.ru/FMLDDX>
6. Kulik, A., Androsova, A., Solovyova, N., & Zuppelo, A. (2021). Digital transformation: Problems and trends in the development of agricultural startups. In *Proceedings of the 3rd International Conference “Spatial Development of Territories” (SDT 2020)*. <https://doi.org/10.2991/aeb-mr.k.210710.041>
7. Meshcheryagina, V., Vilacheva, M., Kurdyumov, A., Kyarova, M., & Temmoeva, S. (2021). Mechanism of legal regulation of innovative technologies in the agro-industrial complex of the Eurasian Economic Union: Realities and prospects. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126203015>. EDN: <https://elibrary.ru/SYVUDA>
8. Ministry of Regional Development of the Russian Federation. (2012). *SP 107.13330.2012. Greenhouses and hotbeds. Updated version of SNiP 2.10.04-85*. Moscow: Minregion of Russia.
9. Netrebskaya, O. (2021). Integral knowledge as a methodological basis for designing artificial intelligence systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 1925. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1925/1/012064>. EDN: <https://elibrary.ru/TLTUOU>
10. Government of the Russian Federation. (2017, July 28). *Digital economy of the Russian Federation* (Order No. 1632-r). *Collection of Legislation of the Russian Federation*, 32, Art. 5138.
11. Government of the Russian Federation. (2023, November 23). *On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the agro-industrial and fishery complexes of the Russian Federation for the period up to 2030* (Order No. 3309-r). Retrieved from the official legal information portal: <https://publication.pravo.gov.ru>

12. President of the Russian Federation. (2019, October 10). *On the development of artificial intelligence in the Russian Federation* (Decree No. 490). *Collection of Legislation of the Russian Federation*, 41, Art. 5700.
13. Russian Federation. (2006, July 27). *On information, information technologies and information protection* (Federal Law No. 149-FZ). *Collection of Legislation of the Russian Federation*, 31, Art. 3448.
14. Russian Federation. (2006, July 27). *On personal data* (Federal Law No. 152-FZ). *Collection of Legislation of the Russian Federation*, 31, Art. 3451.
15. Tokarev, K. (2021). Artificial intelligence and digital technologies in technical systems II 2021 (AIDTTS II 2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 2060. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2060/1/011001>
16. Utrendeeva, K., Ryabtseva, E., & Ryabtsev, A. (2021). Legal support for the digitalization of the agro-industrial complex of Russia: Problems and prospects of development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 666. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052014>
17. Fastovich, G., & Kapsargina, S. (2021). Implementation of information technologies in the agricultural sector as one of the criteria of effective state policy in the field of the agro-industrial complex of the Russian Federation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032089>
18. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. (2021). *GOST R 59276-2020. Artificial intelligence systems. Methods of ensuring trust. General provisions*. Moscow: Standartinform.
19. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. (2021). *GOST R 59486-2021. Low-voltage systems. Cable systems. Cable systems for high-performance networks in data centers. General provisions*. Moscow: Standartinform.
20. Shashkova, I., Romanova, L., Kupriyanova, M., & Cherkashina, L. (2022). Use of modern robotic systems in the agro-industrial complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 949. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012024>

## **ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**Карелина Мария Юрьевна**, доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой Логистики и транспортно-технологических систем ГУУ, заведующий кафедрой «Детали машин и теория механизмов» МАДИ ФГБОУ ВО *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет*; ФГБОУ ВО *Государственный университет управления*  
*пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация; пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, РФ*  
*karelinamu@mail.ru*

**Подгорный Артем Велимирович**, преподаватель кафедры «Детали машин и теория механизмов» МАДИ, специалист ГУУ ФГБОУ ВО *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет*; ФГБОУ ВО *Государственный университет управления*  
*пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация; пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, РФ*  
*pavtxt@mail.ru*

**Гришкина Анна Вячеславовна**, аналитик Центра интеллектуальной собственности и трансфера технологий ФГБОУ ВО *Государственный университет управления*  
*пр-т Рязанский, 99, г. Москва, 109542, Российская Федерация*  
*annagrishkina.0401@yandex.ru*

**Ганжа Никита Михайлович**, лаборант кафедры «Детали машин и теория механизмов» ФГБОУ ВО *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет*  
*пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация*  
*nikita.ganzha180@gmail.com*

## DATA ABOUT THE AUTHORS

**Maria Yu. Karelina**, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Department of Logistics and Transport and Technological Systems; Head of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms  
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; State University of Management*  
*64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation;*  
*99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation*  
*karelinamu@mail.ru*

**Artem V. Podgorny**, Lecturer of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms; Specialist  
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; State University of Management*  
*64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation;*  
*99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation*  
*pavtxt@mail.ru*

**Anna V. Grishkina**, Analyst, Center for Intellectual Property and Technology Transfer  
*State University of Management*  
*99, Ryazansky Ave., Moscow, 109542, Russian Federation*  
*annagrishkina.0401@yandex.ru*

**Nikita M. Ganzha**, Laboratory Assistant of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms  
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University*  
*64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation*  
*nikita.ganzha180@gmail.com*

Поступила 15.11.2025  
После рецензирования 10.12.2025  
Принята 24.12.2025

Received 15.11.2025  
Revised 10.12.2025  
Accepted 24.12.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-404

EDN: NWDWMP

УДК 656.1:004.9:351.811.12



Научная статья | Управление процессами перевозок

## ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГОРОДОВ ЮФО

*Т.В. Коновалова, С.Л. Надирян, А.В. Гонтарук*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Современные российские города-миллионники сталкиваются с необходимостью цифровой трансформации пассажирского транспорта. В условиях роста населения и увеличения транспортной нагрузки цифровизация становится ключевым инструментом создания интеллектуальной транспортной среды. Сравнительный анализ двух крупнейших городов Южного Федерального Округа - Краснодара и Ростова-на-Дону - позволяет выявить различные подходы к реализации цифровых технологий в транспортной сфере.

**Цель** – провести сравнительный анализ уровня, механизмов и практических эффектов цифровизации пассажирского транспорта в Краснодаре и Ростове-на-Дону.

**Метод и методология проведения работы.** В исследовании использовались сравнительный и системный анализ. Для оценки применялась многоуровневая система критериев, включающая электронную оплату проезда, системы информирования пассажиров, инструменты планирования поездок и интеграцию с системами управления дорожным движением.

**Результаты.** Выявлены две различные модели цифровизации. В Краснодаре реализуется ведомственная модель, ориентированная на

создание удобной платежной экосистемы (ЕТК, банковские карты, NFC). В Ростове-на-Дону применяется интеграционная модель, где цифровизация транспорта является частью общегородской системы управления и направлена на оптимизацию транспортных потоков через глубокую интеграцию с АСУ ДД. Интеграционная модель демонстрирует более высокий стратегический потенциал для развития умной городской мобильности.

**Область применения результатов:** Результаты исследования могут быть использованы органами городского управления, транспортными операторами и разработчиками цифровых решений при планировании и реализации программ цифровой трансформации пассажирского транспорта.

**Ключевые слова:** цифровизация; пассажирский транспорт; умный город; сравнительный анализ; электронная оплата; АСУ ДД

**Для цитирования.** Коновалова, Т. В., Надирян, С. Л., & Гонтарук, А. В. (2025). Влияние цифровизации на эффективность работы пассажирского транспорта: сравнительный анализ городов ЮФО. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 150–163. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-404>

Original article | Transportation Process Management

## THE IMPACT OF DIGITALIZATION ON PASSENGER TRANSPORT EFFICIENCY: A COMPARATIVE ANALYSIS OF CITIES IN THE SOUTHERN FEDERAL DISTRICT

*T.V. Konovalova, S.L. Nadiryan, A.V. Gontaruk*

### *Abstract*

**Background.** Modern Russian cities with millions of residents face the need for digital transformation of passenger transport. In the context of population growth and increasing traffic load, digitalization is becoming a

key tool for creating an intelligent transport environment. A comparative analysis of the two largest cities in the Southern Federal District - Krasnodar and Rostov-on-Don - reveals different approaches to the implementation of digital technologies in the transport sector.

The **purpose** is to conduct a comparative analysis of the level, mechanisms and practical effects of digitalization of passenger transport in Krasnodar and Rostov-on-Don.

**Methodology.** The study used comparative and system analysis. A multi-level criteria system was used for the assessment, including electronic fare payment, passenger information systems, trip planning tools, and integration with traffic management systems.

**Results.** Two different models of digitalization have been identified. Krasnodar implements a departmental model focused on creating a convenient payment ecosystem (ETC, bank cards, NFC). An integration model is used in Rostov-on-Don, where the digitalization of transport is part of the citywide management system and is aimed at optimizing traffic flows through deep integration with automated control systems. The integration model demonstrates a higher strategic potential for the development of smart urban mobility.

**Practical implications.** The results of the study can be used by city governments, transport operators and developers of digital solutions in the planning and implementation of digital transformation programs for passenger transport.

**Keywords:** digitalization; passenger transport; smart city; comparative analysis; electronic payment; automated control system

**For citation.** Konovalova, T. V., Nadiryan, S. L., & Gontaruk, A. V. (2025). The impact of digitalization on passenger transport efficiency: A comparative analysis of cities in the Southern Federal District. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 150–163. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-404>

Современные крупные и крупнейшие российские города сталкиваются с необходимостью трансформации традиционных техно-

логий перевозок. Рост численности населения, увеличение транспортной нагрузки и растущие требования пассажиров к комфорту обуславливают потребность в изменениях. Ключевым инструментом такой трансформации выступает цифровизация, направленная на создание интеллектуальной транспортной среды. Однако практическая реализация этих процессов демонстрирует значительную вариативность. Сравнительный анализ двух крупнейших городов-миллионников Южного Федерального Округа: Краснодара и Ростова-на-Дону, представляется репрезентативным, так как они обладают схожим социально-экономическим и демографическим статусом, а также сопоставимой нагрузкой на транспортную инфраструктуру. Целью настоящего исследования является проведение сравнительного анализа уровня, механизмов и практических эффектов цифровизации пассажирского транспорта в Краснодаре и Ростове-на-Дону [1; 2]. Объектом исследования выступают системы пассажирского транспорта этих городов, а предметом исследования являются процессы их цифровизации. Методологическую основу работы составляют сравнительный и системный анализ.

Цифровизация пассажирского транспорта представляет собой комплексный процесс внедрения информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) во все элементы транспортной системы города. В научной литературе данное направление часто рассматривается в рамках концепции «умного города» и её транспортной составляющей – «умной мобильности». Ключевой сущностью цифровизации транспорта является фундаментальная трансформация бизнес-моделей и управленческих подходов через использование данных как ключевого актива. Это создает основу для перехода от управления транспортными средствами к управлению мобильностью пассажиров как услугой, что находит свое выражение в парадигме МaaS (Mobility as a Service) [3-5].

Для системного сравнительного анализа процессов цифровизации в городах необходима четкая методологическая основа. В рамках данного исследования используется многоуровневая систе-

ма критериев, охватывающих наиболее релевантные аспекты для пассажира и оператора.

Первым критерием выступает электронная оплата проезда. Её анализ включает не только факт наличия безналичных расчетов, но и их зрелость: разнообразие способов, уровень проникновения и бесшовности, а также гибкость тарификации.

Вторым критически важным критерием являются системы информирования пассажиров в реальном времени. Их зрелость определяется точностью прогнозирования времени прибытия транспорта на остановку, доступностью этой информации через разнообразные каналы, а также полнотой предоставляемых данных.

Третьим критерием служат инструменты планирования поездов, которые эволюционируют от статичных маршрутных схем к динамичным мультимодальным маршрутизаторам.

Четвертый, инфраструктурный критерий, – это внедрение систем интеллектуального управления транспортными потоками, таких как АСУ ДД (Автоматизированная система управления дорожным движением). Их роль заключается в использовании данных с транспорта общего пользования для приоритезации его движения, что напрямую влияет на повышение скорости сообщения и регулярности движения [6; 7].

Последующий анализ позволяет выявить как общие тенденции, так и существенные различия в подходах к цифровизации пассажирского транспорта в двух крупнейших городах Юга России. Оба города демонстрируют активное внедрение базовых элементов цифровой экосистемы, однако их стратегические акценты и достигнутые результаты имеют выраженную специфику. Анализ цифровой экосистемы Краснодара показывает, что ключевым драйвером преобразований здесь стало планомерное внедрение Единой транспортной карты (ЕТК) и системы безналичной оплаты. Значимым шагом стало внедрение оплаты банковскими картами и через NFC-модули смартфонов. В рамках проекта «Умный транспорт» был осуществлен массовый монтаж ГЛОНАСС-оборудования на подвижном со-

стве, что позволило организовать базовый мониторинг местоположения транспорта в реальном времени. Однако получаемые данные интегрированы в городскую систему недостаточно глубоко: они в основном транслируются через агрегаторы, такие как Яндекс.Карты, в то время как собственное мобильное приложение «КТК» обладает ограниченным функционалом. Таким образом, в Краснодаре сформирована модель, которую можно охарактеризовать как «пассажиро-ориентированная платежная экосистема». Её основное достоинство заключается в создании удобного и унифицированного канала для расчета за проезд, в то время как сервисы, основанные на данных, развиты в меньшей степени [8-10].

Анализ ситуации в Ростове-на-Дону дает иную картину, где цифровизация транспорта является интегрированным компонентом масштабной программы по созданию «умной» городской инфраструктуры. Как и в Краснодаре, здесь успешно функционирует система «Единый билет». Однако принципиальное отличие заключается в глубокой интеграции данных с транспорта общего пользования в единую Автоматизированную систему управления дорожным движением (АСУ ДД). Транспортные средства, оснащенные GPS/ГЛОНАСС-трекерами, выступают в роли датчиков городского трафика, а их данные используются для алгоритмического принятия решений. Это позволяет реализовывать приоритетный проезд городского пассажирского транспорта на перекрестках, динамически корректировать маршруты и расписания. Информирование пассажиров организовано через более зрелую платформу, тесно интегрированную с городским геоинформационным сервисом 2ГИС. Кроме того, в Ростове-на-Дону реализована амбициозная программа по оснащению остановочных павильонов «умными» элементами – электронными табло и точками доступа к Wi-Fi. Политика в отношении открытых данных здесь также выглядит более прогрессивной. Следовательно, в Ростове-на-Дону сформирована модель «инфраструктурно-интегрированной интеллектуальной системы», где цифровизация транспорта подчинена общей задаче оптимизации городских транспортных потоков [11-13].

Для наглядности результаты сравнительного анализа по ключевым критериям представлены в таблице 1.

Таблица 1.

### Сравнительный анализ Краснодара и Ростова-на-Дону

Критерий	Краснодар	Ростов-на-Дону
Электронная оплата проезда		
Охват и зрелость электронной оплаты	Высокий. ЕТК, банковские карты, NFC. Унификация платежей на транспорте.	Высокий. «Единый билет», банковские карты. Сопоставимый уровень.
Ключевой фокус цифровизации	Удобство и унификация платежей для пассажира.	Оптимизация транспортных потоков города в целом.
Системы информирования пассажиров в реальном времени		
Точность и доступность онлайн-расписания	Средняя. Данные доступны через агрегаторы (Яндекс.Карты). Собственное приложение «КТК» развито слабо.	Высокая. Глубокая интеграция с 2ГИС и городскими сервисами. Высокая надежность данных.
Инструменты планирования поездок		
Политика открытых данных	Ограниченная.	Более открытая. Стимулирование сторонних разработчиков.
Создание цифрового профиля пассажира	Средняя. Данные доступны через агрегаторы	Средняя. Данные доступны через агрегаторы
Внедрение систем интеллектуального управления транспортными потоками		
Наличие «умных» остановок	Единичные пилотные проекты.	Развитая программа внедрения. Значительное количество остановок с табло и Wi-Fi.
Уровень интеграции с АСУ ДД	Развивается. Данные используются в основном для мониторинга.	Высокий. Данные транспорта – ключевой элемент для управления светофорами и приоритизации.
Онлайн-мониторинг безопасности	Высокий. Цифровой комплекс следит за состоянием инфраструктуры, выявляет угрозы и минимизирует аварии.	Средний. Цифровой комплекс следит за состоянием инфраструктуры.

Проведенный сравнительный анализ позволяет выявить сформировавшиеся модели цифровизации, оценить их эффективность и обозначить системные проблемы. Полученные результаты де-

монстрируют, что при внешней схожести базовых технологий, Краснодар и Ростов-на-Дону реализуют принципиально разные стратегии, которые можно классифицировать как ведомственную и интеграционную модели соответственно. В Краснодаре сложилась ведомственная модель («пассажиرو-ориентированная платежная экосистема»), где фокус цифровизации сосредоточен на модернизации взаимодействия с пассажиром. Ключевым критерием успеха здесь выступает удобство и бесшовность оплаты проезда. Безусловным достижением данной модели является массовый охват населения электронными платежами. Однако эффективность этой модели ограничена рамками транспортной системы. Данные используются пассивно – для информационного, а не для управленческого реагирования. Низкий уровень интеграции с городской АСУ ДД не позволяет трансформировать эти данные в инструмент повышения скорости и регулярности движения.

Напротив, в Ростове-на-Дону реализуется интеграционная модель («инфраструктурно-интегрированная интеллектуальная система»), где цифровизация транспорта является подсистемой общегородского управления. В этой модели пассажирский транспорт рассматривается как ключевой элемент городской мобильности, данные о котором используются для оптимизации работы всей улично-дорожной сети. Главным достижением здесь является синергетический эффект: приоритетный проезд пассажирского транспорта на перекрестках, динамическое согласование маршрутов напрямую повышает его конкурентоспособность. Однако данная модель требует значительно более высоких первоначальных затрат, сложной межведомственной координации и развитой IT-инфраструктуры города [13].

Оценка эффективности выявленных моделей не может быть однозначной. С точки зрения операционной эффективности (скорость, регулярность, согласованность с общим трафиком) интеграционная модель Ростова-на-Дону демонстрирует более высокие потенциальные результаты. С точки зрения пользовательского удобства в узком

смысле (простота и вариативность оплаты) ведомственная модель Краснодара может быть оценена высоко. Однако в стратегической перспективе именно интеграционная модель закладывает основу для перехода к более сложным сервисам, таким как MaaS (Mobility as a Service). Обе модели сталкиваются и с общими проблемами. К ним относится цифровое неравенство, технологическая зависимость и проблема необходимости постоянных инвестиций.

Таким образом, из проведенного анализа видно, что выбор модели цифровизации является стратегическим решением, определяющим не только текущее состояние транспортной системы, но и ее будущий потенциал для развития умной городской мобильности [14]. Проведенное исследование позволило выявить и системно проанализировать две различные стратегические модели трансформации [15]. Интеграционная модель Ростова-на-Дону демонстрирует более высокий стратегический потенциал, поскольку направлена на устранение коренной причины транспортных проблем – неэффективности использования улично-дорожной сети. Ведомственная модель Краснодара, хотя и успешно решает тактические задачи повышения удобства расчетов, не оказывает столь же существенного влияния на ключевые параметры транспортной системы – скорость и регулярность перевозок.

### **Список литературы**

1. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. (2022). *Концепция «умного города» в Российской Федерации*. Москва: Минстрой России, 65 с.
2. Российская Федерация. (2014). *О стратегическом планировании в Российской Федерации: Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ* (ред. от 31.07.2020).
3. Миткевич, П. В. (2025). Влияние цифровой трансформации на развитие региональных пассажирских перевозок. *Региональные проблемы преобразования экономики*, 3(173). <https://doi.org/10.26726/rppe2025v3iodto>. EDN: <https://elibrary.ru/XUXDYO>

4. Иноземцева, А. Ю., & Коновалова, Т. В. (2019). Цифровая трансформация пассажирского транспорта. В *Механика, оборудование, материалы и технологии: электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции* (Краснодар, 29–30 октября 2019 года, с. 613–616). Краснодар: ООО «Принт Терра». EDN: <https://elibrary.ru/JIXMJD>
5. Изюмский, А. А., Надирян, С. Л., Леонова, И. О., & Гонтарук, А. В. (2025). Цифровые трансформации транспорта в городе Краснодар. В *Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств: сборник научных трудов по материалам XX Международной научно-технической конференции* (Саратов, 24 июня 2025 года, с. 40–46). Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А. EDN: <https://elibrary.ru/VYJTDY>
6. Изюмский, А. А., Надирян, С. Л., & Коцурба, С. В. (2023). Цифровизация – единственный путь развития автомобильных перевозок. *International Journal of Advanced Studies*, 13(4), 118–127. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-4-118-127>. EDN: <https://elibrary.ru/DTCBRL>
7. Портал «Открытые данные» Ростова-на-Дону [Электронный ресурс]. Получено с <https://data-rostovgd.ru/> (дата обращения: 29.10.2023).
8. Официальный портал Администрации муниципального образования города Краснодар. Раздел «Транспорт» [Электронный ресурс]. Получено с <https://krasnodar.ru/> (дата обращения: 29.10.2023).
9. Коновалова, Т. В., Надирян, С. Л., & Недашковская, А. О. (2016). Анализ общих затрат на транспорт производственных предприятий при выборе инсорсинга или аутсорсинга. *Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки*, 6–7, 198–200. EDN: <https://elibrary.ru/WHHLQB>
10. Bratzel, S. (1999). Conditions of success in sustainable urban transport policy – policy change in «relatively successful» European cities. *Transport Reviews*, 19(2), 177–190.

11. Pucher, J. (1995). Urban passenger transport in the United States and Europe: A comparative analysis of public policies. Part 2. Public transport, overall comparisons and recommendations. *Transport Reviews*, 15(3), 211–227.
12. Lohse, D. (1997). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2: Verkehrsplanung* (2. Aufl.). Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH, 326 p.
13. Regirer, S. A., Smirnov, N. N., & Chenchik, A. E. (2007). Mathematical model of moving collectives interaction: Public transport and passengers. *Automation and Remote Control*, 68(7), 1225–1238. <https://doi.org/10.1134/S0005117907070107>. EDN: <https://elibrary.ru/LKGOXF>
14. Mao, B.-H., Wang, M., Ho, T.-K., & Chen, H.-B. (2022). A review and prospect of urban public transit level-of-service research. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 22(1), 2–13.
15. Dahim, M. (2021). Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7(12), 2030–2042. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091776>. EDN: <https://elibrary.ru/ATRZWP>

### *References*

1. Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. (2022). *Concept of a “smart city” in the Russian Federation*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 65 p.
2. Russian Federation. (2014). *On strategic planning in the Russian Federation: Federal Law No. 172-FZ dated June 28, 2014 (as amended on July 31, 2020)*.
3. Mitkevich, P. V. (2025). Impact of digital transformation on the development of regional passenger transportation. *Regional Problems of Economic Transformation*, (3)(173). <https://doi.org/10.26726/rppe-2025v3iodto>. EDN: <https://elibrary.ru/XUXDYO>
4. Inozemtseva, A. Yu., & Konovalova, T. V. (2019). Digital transformation of passenger transport. In *Mechanics, equipment, materials and*

- technologies: Electronic collection of scientific articles based on materials of the International Scientific and Practical Conference* (Krasnodar, October 29–30, 2019, pp. 613–616). Krasnodar: LLC “Print Terra”. EDN: <https://elibrary.ru/JIXMJD>
5. Izyumsky, A. A., Nadiryman, S. L., Leonova, I. O., & Gontaruk, A. V. (2025). Digital transformations of transport in the city of Krasnodar. In *Topical issues of organizing road transportation, traffic safety and vehicle operation: Collection of scientific papers based on materials of the XX International Scientific and Technical Conference* (Saratov, June 24, 2025, pp. 40–46). Saratov: Yuri Gagarin Saratov State Technical University. EDN: <https://elibrary.ru/VYJTDY>
  6. Izyumsky, A. A., Nadiryman, S. L., & Kotsurba, S. V. (2023). Digitalization – the only path for the development of road transportation. *International Journal of Advanced Studies*, 13(4), 118–127. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-4-118-127>. EDN: <https://elibrary.ru/DTCBRL>
  7. “Open Data” portal of Rostov-on-Don [Online resource]. Retrieved from: <https://data-rostovgd.ru/> (Accessed: October 29, 2023).
  8. Official portal of the Administration of the Krasnodar Municipal Formation. “Transport” section [Online resource]. Retrieved from: <https://krasnodar.ru/> (Accessed: October 29, 2023).
  9. Konovalova, T. V., Nadiryman, S. L., & Nedashkovskaya, A. O. (2016). Analysis of total transportation costs for manufacturing enterprises when choosing insourcing or outsourcing. *Humanities, Socio-Economic and Social Sciences*, (6–7), 198–200. EDN: <https://elibrary.ru/WHHLQB>
  10. Bratzel, S. (1999). Conditions of success in sustainable urban transport policy – policy change in “relatively successful” European cities. *Transport Reviews*, 19(2), 177–190.
  11. Pucher, J. (1995). Urban passenger transport in the United States and Europe: A comparative analysis of public policies. Part 2. Public transport, overall comparisons and recommendations. *Transport Reviews*, 15(3), 211–227.

12. Lohse, D. (1997). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2: Verkehrsplanung* (2nd ed.). Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH, 326 p.
13. Regirer, S. A., Smirnov, N. N., & Chenchik, A. E. (2007). Mathematical model of moving collectives interaction: Public transport and passengers. *Automation and Remote Control*, 68(7), 1225–1238. <https://doi.org/10.1134/S0005117907070107>. EDN: <https://elibrary.ru/LKGOXF>
14. Mao, B.-H., Wang, M., Ho, T.-K., & Chen, H.-B. (2022). A review and prospect of urban public transit level of service research. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 22(1), 2–13.
15. Dahim, M. (2021). Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7(12), 2030–2042. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091776>. EDN: <https://elibrary.ru/ATRZWP>

### ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Коновалова Татьяна Вячеславовна**, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой «Транспортных процессов и технологических комплексов»

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»*

*ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация*

*tan\_kon@mail.ru*

**Надирян София Леоновна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортных процессов и технологических комплексов»

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»*

*ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация*

*sofi008008@yandex.ru*

**Гонтарук Алиса Викторовна**, студент кафедры «Транспортных процессов и технологических комплексов»  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»*  
*ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация*  
*alisagont14@gmail.com*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Tatiana V. Konovalova**, PhD in Economics, Associate Professor, Head of the Department of Transport Processes and Technological Complexes  
*Kuban State Technological University*  
*2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation*  
*tan\_kon@mail.ru*

**Sofia L. Nadiryana**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Processes and Technological Complexes  
*Kuban State Technological University*  
*2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation*  
*sofi008008@yandex.ru*

**Alisa V. Gontaruk**, Student of the Department of Transport Processes and Technological Complexes  
*Kuban State Technological University*  
*2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation*  
*alisagont14@gmail.com*

Поступила 05.10.2025  
После рецензирования 03.11.2025  
Принята 15.11.2025

Received 05.10.2025  
Revised 03.11.2025  
Accepted 15.11.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-381

EDN: VCJESB



УДК 656.02

Научная статья | Управление процессами перевозок

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТЕЙНЕРОПОТОКА МЕЖДУ КОНТЕЙНЕРНЫМИ ПОЕЗДАМИ ПОСТОЯННОГО ФОРМИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОПУТНЫХ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ

*С.П. Вакуленко, А.М. Насыбуллин, Л.Р. Айсина*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Научным сообществом рассматривается возможность организации движения контейнерных поездов постоянного формирования, совершающих попутные операции по выгрузке и погрузке контейнеров. В силу потенциальной конфигурации маршрутов таких контейнерных поездов будут появляться разные направления контейнеропотоков, в т.ч. угловые, которые могут быть освоены разными поездными маршрутами. Отсутствие методики, определяющей целесообразность перегрузки контейнеров между контейнерными поездами в пути следования свидетельствует о необходимости развития научных исследований в данной области.

**Цель исследования** заключается в предложении формализации математического описания распределения контейнеропотоков на поезда различных маршрутов с учетом потенциальной попутной погрузки, выгрузки или перегрузки на поезда разных маршрутов.

**Метод и методология работы.** В статье использована совокупность методов анализа, синтеза, дедукции и индукции.

**Результаты.** Авторами предлагается адаптация методики назначения остановок контейнерным поездам постоянного формирования с целью произведения оценки как эксплуатационных, так и времен-

ных затрат при анализе различных комбинаций маршрутов для перевозки контейнеров.

**Область применения результатов.** Настоящая статья может представлять практический интерес для Центра фирменного транспортного обслуживания – филиала ОАО «РЖД», а также проектных институтов, оценивающих возможность реализации перспективных разработок.

**Ключевые слова:** контейнер; перегрузка; контейнерный поезд; контейнеропоток; планирование

**Для цитирования.** Вакуленко, С. П., Насыбуллин, А. М., & Айсина, Л. Р. (2025). Распределение контейнеропотока между контейнерными поездами постоянного формирования с учетом выполнения попутных грузовых операций. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 164–180. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-381>

Original article | Transportation Process Management

## **DISTRIBUTION OF CONTAINER FLOW AMONG FIXED-FORMATION CONTAINER TRAINS WITH CONSIDERATION OF IMPLEMENTING FREIGHT OPERATIONS**

*S.P. Vakulenko, A.M. Nasybullin, L.R. Aysina*

### *Abstract*

**Background.** The scientific community is exploring the concept of fixed-formation container trains that perform loading and unloading operations while in motion. The configuration of such routes could generate container flows in various directions, including diagonal flows, which would be serviced by different train routes. The lack of a methodology to assess the feasibility of transshipping containers between these trains during their transportation underscores the need for further scientific research in this area.

**Purpose.** This study aims to propose a formalized mathematical framework for distributing container flows across trains on different routes. This framework accounts for potential concurrent loading, unloading, or transshipment between trains on various routes.

**Methodology.** In this paper methods of analysis, synthesis, induction and deduction were used.

**Results.** The authors propose an adaptation of a methodology for scheduling stops for fixed-formation container trains. This adapted approach is designed to assess both operational and time-related costs when evaluating different route combinations for container transportation.

**Practical implications.** This study's findings could be useful for the Transport Service Centre (a branch of Russian Railways, JSC) and for companies responsible for the Strategic Planning for the Comprehensive Development of Railway Transport in implementing advanced transportation innovations.

**Keywords:** container; transshipment; container train; container traffic; planning

**For citation.** Vakulenko, S. P., Nasybullin, A. M., & Aysina, L. R. (2025). Distribution of container flow among fixed-formation container trains with consideration of implementing freight operations. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 164–180. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-381>

## Введение

В современных условиях наблюдается структурная трансформация грузопотоков, характеризующаяся растущей контейнеризацией, в том числе и массовых грузов, а также продолжающимся переходом части грузопотока на автомобильный транспорт. Как следствие, для сохранения конкурентных позиций железнодорожного транспорта необходимы изменения в технологических и сервисных подходах в вопросах организации перевозочного процесса для сохранения текущей клиентской базы и привлечения дополнительной [1].

РУТ (МИИТ) и ВНИИЖТ совместно работают над разработкой новых сервисов грузовых перевозок, предполагающих курсирование контейнерных поездов постоянного формирования (КППФ) с возможностью попутной погрузки или выгрузки контейнеров. Для этого в 2020 году была утверждена технология «Холодный экспресс» [2], ориентированная, в основном, на контейнеризацию и попутную погрузку/выгрузку контейнеров с грузами, требующими соблюдения температурного режима в процессе транспортировки и хранения. Так же разрабатывалась концепция ускоренной перевозки грузов более широкой номенклатуры грузов [3; 4].

Однако при масштабировании концепции курсирования контейнерных поездов с попутной погрузкой / выгрузкой потребуется не только подготовка контейнерных терминалов, но и технология, обеспечивающая возможность взаимодействия контейнерных поездов друг с другом.

Публикации в научных изданиях и отраслевых СМИ отражают большое количество факторов, потенциально оказывающих влияние на реализацию технологии курсирования КППФ: эксплуатационно-технологические, финансовые, маркетинговые и нормативно-правовые. Кроме того, отличие принципиальных вопросов в разработке плана формирования поездов (далее – ПФП) для КППФ требует адаптации основных подходов классического планирования к новому сервису грузоперевозок [5-7].

Разработка технологии курсирования контейнерных поездов с попутной погрузкой или выгрузкой должна базироваться на экономической эффективности принципиальных подходов.

*Целью данного исследования* является предложение формализации математического описания распределения контейнеропотоков на поезда различных маршрутов с учетом потенциальной попутной погрузки, выгрузки или перегрузки на поезда другого маршрута.

ПФП для контейнерных поездов с переработкой контейнеров в пути следования имеет те же цели, что и «классический» план

формирования грузовых поездов (оптимизация совокупных издержек, связанных с накоплением вагонов и работой консолидирующих вагонопотоки станций), однако должен учитывать не изменение составности в пути следования, а изменение заполнения вагонов контейнерами.

### **Материалы и методы**

Помимо задач маршрутизации, планирование перевозок КППФ требует решения задач погрузочно-выгрузочных операций — оптимального размещения контейнеров на подвижном составе. Данная задача накладывает дополнительные технологические ограничения на процесс формирования состава, определяемые необходимостью соблюдения норм [8]. Множество допустимых конфигураций размещения контейнеров на платформе, включаемой в состав поезда определяется ограничениями по осевой нагрузке, общему весу и габаритам. При попутной выгрузке и последующей погрузке соблюдение условия совместного размещения контейнеров на платформе, а также неперевышения массы поезда, должно проверяться снова. Вопросы размещения контейнеров на составе в условиях попутных выгрузок и погрузок рассматривались в работе [9].

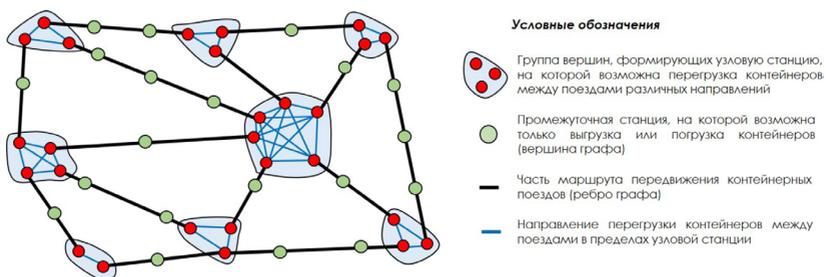
Для принятия решения о назначении остановок контейнерным поездам необходимо определять величины корреспонденций и на основании минимизации эксплуатационных затрат принимать решения о назначении конкретному поезду остановки на конкретной попутной станции. Описание возможностей решения этой задачи представлено в [9]. Однако эта задача может решаться только на уже сформированной сети станций, открытых для работы с контейнерными поездами постоянного формирования, совершающих попутные остановки в пути следования. В предлагаемом решении принимаются допущения, не позволяющие в полной мере раскрыть преимущества технологии перевозочного процесса КППФ:

– не учитываются колебания величины контейнеропотока при назначении фиксированных попутных остановок;

– не рассматривается возможность перегрузки контейнеров между поездами.

Для обеспечения перегрузки контейнеров между КППФ в работах [10; 11] предложено формирование специализированных контейнерных безгорочных распределительных (сортировочных [12]) парков станций. Предварительные аргументы в пользу создания специализированных станций или выделения отдельных парков для обработки контейнеров представлены в [10; 11; 13; 14].

Разработка ПФП для КППФ может опираться на предложения [7; 9]. В данном случае сеть представляет из себя граф, вершины которого являются станциями, открытыми для работы с КППФ, а ребрами являются участки между станциями. Узловые станции представляют из себя группу вершин, связанных между собой ребрами, отражающими перегрузку контейнеров на станции и с другими станциями (вершинами) ребрами, отражающими участки маршрутов (рисунок 1).



**Рис. 1.** Полигон обращения контейнерных поездов постоянного формирования

## Теория

Для множества станций  $N$  определение маршрутов следования и размеров движения КППФ осуществляется на основании доработанной методики, в которой учитывалась минимизация эксплуатационных затрат при курсировании КППФ [9].

В продолжение цикла ранее выполненных исследований предлагается постановка задачи, учитывающая организацию маршру-

тов с учетом минимизации эксплуатационных затрат, а также соблюдением ограничений в работе перегонов и станций. В таблице 1 представлены переменные с соответствующими определениями, используемые в рамках формализации задачи.

Таблица.

## Переменные и их определения

Переменная	Обозначение
$N$	Множество станций (вершин графа), $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_{max}\}$
$n$	Станция на сети (одна из вершин графа), $n \in N, k = \{1, 2, 3, \dots, max\}$
$CList$	Множество струй корреспонденции контейнеропотока. Для каждой корреспонденции определены станция отправления ( $a$ ), станция назначения ( $b$ ) и объем ( $V_{a,b}$ )
$C(a, b)$	Объем корреспонденции от станции отправления ( $a$ ) до станции назначения ( $b$ )
$D$	Вместимость поезда, в ДФЭ
$A = A_{travel} \cup A_{load}$	Множество ребер сети, где $A_{travel}$ – ребра транспортировки между станциями $n, n + 1$ ; $n, n + 1 \in N$ $A_{load}$ – множество ребер графа, соединяющих вершины узловой станции $n$ и отражающих возможность перегрузки между поездами маршрутов $r_{i,j}$
$tr_{n,n+1}$	Ребро $tr_{n,n+1}$ – ребро, характеризующее перемещение на поезде между попутными станциями ( $n$ и $n + 1$ ). $tr_{n,n+1} \in A_{travel}$ Ребро $tr_{n,n+1}$ может быть освоено поездами маршрута $r_{i,j}$ Ребро так же характеризуется значением параметра пропускной способности для контейнерных поездов
$P_{n,n+1}$	Пропускная способность участка между станциями $n$ и $n + 1$
$r_{i,j}$	Маршрут поезда между парой станций $i, j, r_{i,j} \in RList$
$RList$	Множество маршрутов $r_{i,j}$ на анализируемом полигоне обращения контейнерных поездов
$load_{r_{i,j},r_{i,j}}^n$	Ребра, соединяющие между собой вершины, образующие узловую станцию, на которой возможна перегрузка контейнеров между поездами различных маршрутов $load_{r_{i,j},r_{i,j}}^n \in A_{load}$
$load_n^{max}$	Предельное количество перегрузочных операций на станции $n$ (операций/сут)
$cost_{tr_{n,n+1}}$	Стоимость проследования поезда между станциями $n$ и $n + 1$ $tr_{n,n+1} \in A_{travel}$ (руб/ДФЭ)
$cost_{st_n}$	Стоимость организации остановки на станции $n, n \in N$
$cost_{load}^n$	Стоимость перегрузки одного контейнера на станции $n, n \in N$
$time_{tr_{n,n+1}}$	Время прохождения дуги $tr_{n,n+1}$ .
$time_{load_{r_{i,j},r_{i,j}}^n}$	Продолжительность нахождения контейнера на станции $n$ в ожидании перегрузки
$T(a, b)$	$T(a, b)$ – нормативный срок доставки корреспонденции от станции отправления ( $a$ ) до станции назначения ( $b$ )

$f_c^{tr_{n,n+1}} \in \mathbb{Z}^+$	Поток контейнеров (в ДФЭ) корреспонденции $C(a, b)$ , проходящий по ребру $tr_{n,n+1}$
$f_n^{r_{i,j}, r_{i,j}}$	Поток контейнеров, перегружаемых на станции $n$ между поездами маршрутов $r_{i,j}$
$z_{r_{i,j}} \in \mathbb{Z}^+$	Количество поездов на маршруте $r_{i,j}$
$U_{r_{i,j}}$	Стоимость эксплуатационных затрат, включающая в себя прохождение участка между станциями, а также стоимость остановки (в случае ее назначения) и перегрузочных операций

В качестве допущения принимается, что значения переменных, ограничивающих работу инфраструктуры, заранее известны [15].

Целевой функцией является минимизация общих затрат на поездные назначения, учитывающая не только саму транспортировку контейнеров в составе поездов, но и суммарные затраты на перегрузки в пути следования:

$$F = \sum_{r_{i,j} \in RList} z_{r_{i,j}} \times U_{r_{i,j}} \rightarrow \min \tag{1}$$

В отличие от эксплуатационных затрат на поездные назначения, описанных в [9], в настоящей статье переменная включает в себя и перегрузочные операции:

$$U_{r_{i,j}} = \sum cost_{tr_{n,n+1}} + \sum cost_{st_n} + \sum cost_{load}^n \tag{2}$$

При этом для выполнения целевой функции должны соблюдаться ограничения [16], представленные в формулах 3–5.

Суммарное количество поездов, перемещаемых по ребру не может превышать значение пропускной способности ребра.

$$\sum_{C(a,b)} \frac{f_c^{tr_{n,n+1}}}{D} \leq p_{n,n+1}, \quad \forall tr_{n,n+1} \in A_{travel} \tag{3}$$

Поток контейнеров, перегружаемых на узловой станции не может превышать перерабатывающую способность контейнерного терминала узловой станции.

$$f_n^{r_{i,j}, r_{i,j}} \leq load_n^{max}, \quad \forall n \in N \tag{4}$$

Срок доставки на каждом маршруте  $r_{i,j}$ , включающим прохождение различных ребер графа [17] не может превышать предельного срока доставки корреспонденции  $T(a, b)$ .

$$\sum_{C(a,b)} time_{tr_{n,n+1}} + time_{load}^n_{r_{i,j}, r_{i,j}} \leq T(a, b) \tag{5}$$

## Результаты и обсуждение

Для оптимизации потенциальных перегрузок между маршрутами поездов должна определяться последовательность прибытия поездов на перегрузочный терминал [18,19]. Дополнительное условие должно итерационно дорабатывать сформированный план формирования и учитывать возможность ожидания поезда подходящего маршрута  $r_{ij}$  в условиях непревышения нормативного срока доставки контейнера  $T(a,b)$ , а также учитывать резервные мощности терминала, отражающие физическую возможность размещения контейнера в зоне накопления.

Для оценивания потребности в перегрузке контейнеров на каждой из станций  $n$ ,  $n \in N$ , возможно введение дополнительной переменной, отражающей значение потенциального спроса на такие перегрузочные операции ( $S_n$ ).

$$S_n(\tau_n) = \frac{S_n^{max}}{1 + \exp \varphi_n \times (\tau_n - \tau_n^0)} \quad (6)$$

где  $S_n^{max}$  – максимальное значение величины спрогнозированного спроса на перегрузку контейнеров между поездами на станции  $n$ , ДФЭ/ед. врем (в качестве единицы времени может рассматриваться суточный период, неделя, месяц, год и др);

$\tau_n$  – продолжительность простоя контейнеров на станции  $n$  после выгрузки из одного поезда и в ожидании погрузки в другой поезд, ч;

$\tau_n^D$  – пороговая продолжительность простоя контейнера на станции  $n$  в ожидании перегрузки, при превышении которой спрос начинает значительно снижаться, ч (данный параметр напрямую влияет на суммарную продолжительность транспортировки);

$\varphi_n$  – положительный коэффициент эластичности спроса на перегрузку контейнеров между поездами на станции  $n$  по времени (определяется на основании маркетинговых исследований),  $\varphi_n > 0$ .

Как видно из формулы (5), в условиях конкурентной борьбы между автомобильным и железнодорожным транспортом в грузоперевозках на средние и дальние расстояния, ключевым фактором, помимо стоимости, является продолжительность транспортиров-

ки. Продолжительность простоя контейнера на станции в ожидании перегрузки ( $\tau_n$ ) напрямую оказывает влияние на суммарную продолжительность транспортировки, что так же отражается на конкурентоспособности перевозки для потенциального грузоотправителя.

### **Заключение**

Предлагаемая формализация задачи по распределению контейнеропотоков на поезда с учетом потенциальной перегрузки между поездами различных маршрутов в пути следования является теоретическим исследованием, требующим детальной проработки.

Практической реализации предложений должно предшествовать масштабное маркетинговое исследование, направленное на установление количественной зависимости объема спроса от ключевого сервисного параметра – периода накопления контейнеров на узловых распределительных станциях.

Подход к оценке затрат на накопление и переработку контейнеров на станциях перегрузки, учитывающий эластичность спроса в зависимости от периода накопления поездных формирований является перспективным направлением, требующим проведения исследования особенностей и формализации транспортных потребностей грузоотправителей в части требований к регулярности транспортного сообщения КППФ.

### **Список литературы**

1. Скачков, А. А., Мехедов, М. И., & Петров, В. В. (2018). Перевозка скоропортящихся грузов по технологии «Холодный экспресс». *Железнодорожный транспорт*, 9, 51–54. EDN: <https://elibrary.ru/VJUSLA>
2. ОАО «РЖД». (2020). *Типовая технология перевозки грузов поездами «Холодный экспресс»* [Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 05.03.2020 № 493/р]. Екатеринбург: УралЮрИздат, 24 с.
3. Виноградов, С. А., Мехедов, М. И., Вакуленко, С. П., & Якубень, А. Ю. (2021). Перспективы развития ускоренных грузовых пе-

- ревозок. *Железнодорожный транспорт*, 4, 10–15. EDN: <https://elibrary.ru/BXHFJJ>
4. Виноградов, С. А., Мехедов, М. И., Хомов, А. В., & Шведин, К. И. (2022). Развитие перевозок грузов в интермодальных транспортных грузовых единицах. *Железнодорожный транспорт*, 2, 7–11. EDN: <https://elibrary.ru/JPIRK>
  5. Прокофьев, М. Н. (2018). *Совершенствование технологии ускоренных грузовых перевозок железнодорожным транспортом* (Кандидатская диссертация). Москва, 213 с. EDN: <https://elibrary.ru/DLEKFK>
  6. Братусь, А. С., Иванова, А. П., Туманов, М. А., & Базюта, А. С. (2024). Формирование математической модели оптимизации перевозок с учётом реальных условий логистики на железнодорожном полигоне. В *Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы: материалы IV Международной научно-практической конференции* (Москва, 25 сентября 2024 года, с. 318–329). Москва: Российский университет транспорта. EDN: <https://elibrary.ru/RBOBWR>
  7. Козлов, П. А., Козлова, В. П., & Туманов, М. А. (2023). Управление транспортными потоками при случайном разбросе в параметрах. *Наука и техника транспорта*, 1, 90–95. EDN: <https://elibrary.ru/UQJZOO>
  8. *Технические условия размещения и крепления грузов* [Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС)].
  9. Насыбуллин, А. М. (2024). *Развитие технологии перевозочного процесса контейнерными поездами постоянного формирования* (Кандидатская диссертация). Москва, 256 с. EDN: <https://elibrary.ru/EBWPQA>
  10. Вакуленко, С. П., Насыбуллин, А. М., Айсина, Л. Р., и др. (2022). Новые подходы к организации переработки контейнеропотоков. *Железнодорожный транспорт*, 11, 4–11. EDN: <https://elibrary.ru/WNCKBN>

11. Вакуленко, С. П., Колин, А. В., Насыбуллин, А. М., и др. (2021). От сортировки вагонов к сортировке контейнеров на сети железных дорог. *Экономика железных дорог*, 9, 52–59. EDN: <https://elibrary.ru/BEXXAW>
12. Минаков, П. А., & Шмаль, В. Н. (2021). Исследование основных характеристик системы обслуживания поездопотока в парке сортировочной станции в условиях предоставления «окон» на прилегающих участках. В *Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвящённой 125-летию университета* (Москва, 22 октября 2021 года, с. 389–395). Москва: Российский университет транспорта. <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.52>
13. Вакуленко, С. П., Колин, А. В., Насыбуллин, А. М., и др. (2023). От сортировки вагонов – к сортировке контейнеров: организация работы контейнерных распределительных терминалов. *Транспортное дело России*, 6, 356–359. [https://doi.org/10.52375/20728689\\_2023\\_6\\_356](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_6_356). EDN: <https://elibrary.ru/ACAFET>
14. Колин, А. В., Насыбуллин, А. М., Бакин, А. А., и др. (2024). Техно-технологический портрет контейнерно-распределительной станции. *Логистика*, 8(213), 16–20. EDN: <https://elibrary.ru/LANQEC>
15. Бородин, А. Ф., Лаханкин, Е. А., Кравченко, А. А., и др. (2024). Расчёт возможностей железнодорожной инфраструктуры для пропуска объёмов перевозок грузов и порожних вагонов. *Логистика и управление цепями поставок*, 21(2), 47–60. EDN: <https://elibrary.ru/JYRGUH>
16. Шмаль, В. Н., & Павлов, С. С. (2024). *Математические модели принятия управленческих решений*. Екатеринбург: Издательские решения, 98 с. ISBN: 978-5-0064-7117-7. EDN: <https://elibrary.ru/TKTLJA>
17. Минаков, П. А., & Шмаль, В. Н. (2024). Нормирование манёвровой работы на железнодорожном транспорте. *Транспортное дело России*, 2, 241–244. EDN: <https://elibrary.ru/KGVFDS>

18. Ершов, А. Д. (2023). Разработка нормативного графика движения поездов в крупном железнодорожном узле без увязки ниток графика грузовых поездов в местах стыкования. В *Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Международной научно-практической конференции* (Москва: Российский университет транспорта, с. 131–137). <https://doi.org/10.30932/9785002182794-2023-131-137>. EDN: <https://elibrary.ru/WVFXQM>
19. Ершов, А. Д. (2023). Актуальные проблемы управления движением поездов в крупных железнодорожных узлах. В *Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции* (Москва: ЗАО «Университетская книга», с. 136–140). EDN: <https://elibrary.ru/ADSWVL>

### *References*

1. Skachkov, A. A., Mekhedov, M. I., & Petrov, V. V. (2018). Transportation of perishable goods using the “Cold Express” technology. *Railway Transport*, (9), 51–54. EDN: <https://elibrary.ru/VJUSLA>
2. JSC “Russian Railways” (RZD). (2020). *Standard technology for cargo transportation by “Cold Express” trains* [Approved by Order No. 493/r of JSC “RZD” dated March 5, 2020]. Yekaterinburg: UralYurIzdat, 24 p.
3. Vinogradov, S. A., Mekhedov, M. I., Vakulenko, S. P., & Yakuben, A. Yu. (2021). Prospects for the development of accelerated freight transportation. *Railway Transport*, (4), 10–15. EDN: <https://elibrary.ru/BXHFJJ>
4. Vinogradov, S. A., Mekhedov, M. I., Khomov, A. V., & Shvedin, K. I. (2022). Development of cargo transportation in intermodal transport units. *Railway Transport*, (2), 7–11. EDN: <https://elibrary.ru/JIPIRK>
5. Prokofiev, M. N. (2018). *Improving accelerated freight transportation technology by rail* (Doctoral dissertation). Moscow, 213 p. EDN: <https://elibrary.ru/DLEKFK>
6. Bratus, A. S., Ivanova, A. P., Tumanov, M. A., & Bazyuta, A. S. (2024). Forming a mathematical model for optimizing transportation considering real logistics conditions on a railway polygon. In *Digital trans-*

- formation of transport: problems and prospects: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference* (Moscow, September 25, 2024, pp. 318–329). Moscow: Russian University of Transport. EDN: <https://elibrary.ru/RBOBWR>
7. Kozlov, P. A., Kozlova, V. P., & Tumanov, M. A. (2023). Managing transport flows with random parameter dispersion. *Science and Technology in Transport*, (1), 90–95. EDN: <https://elibrary.ru/UQJZOO>
  8. *Technical conditions for cargo placement and securing* [Appendix 3 to the Agreement on International Railway Freight Traffic (SMGS)].
  9. Nasybullin, A. M. (2024). *Developing transportation technology for container trains of permanent formation* (Doctoral dissertation). Moscow, 256 p. EDN: <https://elibrary.ru/EBWPQA>
  10. Vakulenko, S. P., Nasybullin, A. M., Aisina, L. R., et al. (2022). New approaches to organizing container flow processing. *Railway Transport*, (11), 4–11. EDN: <https://elibrary.ru/WNCKBN>
  11. Vakulenko, S. P., Kolin, A. V., Nasybullin, A. M., et al. (2021). From car sorting to container sorting on the railway network. *Economics of Railways*, (9), 52–59. EDN: <https://elibrary.ru/BEXXAW>
  12. Minakov, P. A., & Shmal, V. N. (2021). Studying the main characteristics of the train flow service system in a marshalling yard park under conditions of providing “windows” on adjacent sections. In *Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov — Founder of Transport Science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 125th Anniversary of the University* (Moscow, October 22, 2021, pp. 389–395). Moscow: Russian University of Transport. <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.52>
  13. Vakulenko, S. P., Kolin, A. V., Nasybullin, A. M., et al. (2023). From car sorting to container sorting: organizing the operation of container distribution terminals. *Transport Business in Russia*, (6), 356–359. [https://doi.org/10.52375/20728689\\_2023\\_6\\_356](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_6_356). EDN: <https://elibrary.ru/ACAFET>
  14. Kolin, A. V., Nasybullin, A. M., Bakin, A. A., et al. (2024). Technical and technological profile of a container distribution station. *Logistics*, 8(213), 16–20. EDN: <https://elibrary.ru/LAHQEC>

15. Borodin, A. F., Lakhankin, E. A., Kravchenko, A. A., et al. (2024). Calculating railway infrastructure capacity for handling freight and empty wagon traffic volumes. *Logistics and Supply Chain Management*, 21(2), 47–60. EDN: <https://elibrary.ru/JYRGUH>
16. Shmal, V. N., & Pavlov, S. S. (2024). *Mathematical models for managerial decision-making*. Yekaterinburg: Publishing Solutions, 98 p. ISBN: 978-5-0064-7117-7. EDN: <https://elibrary.ru/TKTLJA>
17. Minakov, P. A., & Shmal, V. N. (2024). Standardizing shunting operations in railway transport. *Transport Business in Russia*, (2), 241–244. EDN: <https://elibrary.ru/KGVFDS>
18. Ershov, A. D. (2023). Developing a normative train schedule in a large railway hub without coordinating freight train lines at junctions. In *Intelligent Transport Systems: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference* (Moscow: Russian University of Transport, pp. 131–137). <https://doi.org/10.30932/9785002182794-2023-131-137>. EDN: <https://elibrary.ru/WVFXQM>
19. Ershov, A. D. (2023). Current issues in train traffic management in large railway hubs. In *Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov – Founder of Transport Science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Moscow: ZAO “University Book”, pp. 136–140). EDN: <https://elibrary.ru/ADSWVL>

## ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Вакуленко Сергей Петрович**, заместитель директора Научно-исследовательского института транспорта, заведующий кафедрой «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», кандидат технических наук, профессор

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»*

*ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация*

**Насыбуллин Айрат Марсович**, заместитель начальника научно-образовательного центра «Независимые комплексные транспортные исследования», кандидат технических наук  
*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»*  
*ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация*  
*nasybullin.airat@mail.ru*

**Айсина Лилия Ринатовна**, старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы»  
*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»*  
*ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация*  
*l.r.aysina@mail.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Sergey P. Vakulenko**, Deputy Director of the Scientific Research Institute of Transport, Head of the Department “Transport Business Management and Intelligent Systems”, PhD, Professor  
*Russian University of Transport*  
*9 build. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation*  
*SPIN-code: 1039-5188*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6471-8690>*

**Airat M. Nasybullin**, Deputy Head of the Scientific and Educational Center “Independent Integrated Transport Research”, PhD  
*Russian University of Transport*  
*9 build. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation*

*nasybullin.airat@mail.ru*

*SPIN-code: 1082-9336*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1814-4059>*

**Liliya R. Aysina**, Senior Teacher of the Department “Transport Business Management and Intelligent Systems”

*Russian University of Transport*

*9 build. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation*

*[l.r.aysina@mail.ru](mailto:l.r.aysina@mail.ru)*

*SPIN-code: 3177-5980*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9458-6441>*

Поступила 30.09.2025

После рецензирования 15.10.2025

Принята 30.10.2025

Received 30.09.2025

Revised 15.10.2025

Accepted 30.10.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-382

EDN: BTJKLU



UDC 656.13

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

## RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF DIFFERENT NEURAL NETWORK MODELS IN TRAFFIC FLOW PREDICTION

*Jixiao Jiang*

### *Abstract*

This paper compares the effectiveness of support vector machine (SVM), convolutional neural network-long short-term memory (CNN-LSTM), and support vector machine-long short-term memory (SVM-LSTM) models for traffic flow prediction in intelligent transportation systems (ITS). This research aims to explore the application scenarios of different machine learning and neural network models in traffic flow forecasting, focusing on verifying the effectiveness of the CNN-LSTM and the SVM-LSTM models designed in this paper in integrating spatial feature extraction with time series modeling. Experimental validation is conducted on real-world long- and short-term traffic flow datasets, and the performance of each model is systematically evaluated in terms of the number of prediction errors, computational efficiency, and robustness. Through a comprehensive analysis of metrics such as the coefficient of determination ( $R^2$ ) and root mean square error (RMSE), this research provides a basis for the appropriate selection of prediction models in ITS and offers theoretical support for future research in multimodal traffic data fusion modeling.

**Purpose.** Through systematic comparative studies, a more efficient and reliable model is screened out for the traffic flow prediction subsystem in ITS, and the effectiveness of the hybrid model in integrating multi-dimensional features is explored, thus providing an empirical basis for further optimization of model accuracy in the future.

**Materials and methods.** This research used a long-term traffic flow dataset from France and a short-term traffic flow dataset from Italy. Predic-

tion experiments were conducted in the MATLAB environment using support vector machines (SVMs), CNN-LSTM models, and an SVM-LSTM model with a loss function. The method for determining model effectiveness is based on linear regression theory, focusing on calculating the number of error data and evaluating the data fit using metrics. The method for determining model effectiveness is based on linear regression theory, focusing on calculating the number of error data and evaluating the data fit using metrics.

**Results.** Experimental results based on real-world traffic flow datasets show that the SVM-LSTM model exhibits the best overall performance in long-term traffic flow prediction. The CNN-LSTM model demonstrates excellent time series modeling capabilities in short-term traffic flow prediction. In terms of computational efficiency, the SVM-LSTM model improves prediction accuracy by 10.2% compared to the CNN-LSTM model. Therefore, the fusion of SVM and LSTM combines the advantages of spatial feature extraction and time series modeling, and its deployment in ITS can improve traffic flow prediction efficiency.

**Keywords:** traffic flow prediction; machine learning; neural networks; modeling; intelligent transportation systems

**For citation.** Jiang, J. (2025). Research on the effectiveness of different neural network models in traffic flow prediction. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 181–200. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-382>

Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

*Цзисяо Цзян*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Данная статья сравнивает эффективность моделей метода опорных векторов (SVM), сверточной нейронной сети с дол-

гой краткосрочной памятью (CNN-LSTM) и гибридной модели SVM-LSTM для прогнозирования транспортных потоков в интеллектуальных транспортных системах (ИТС). Целью данного исследования является изучение сценариев применения различных моделей машинного обучения и нейронных сетей в прогнозировании транспортных потоков с упором на проверку эффективности моделей CNN-LSTM и SVM-LSTM, разработанных в данной статье, при интеграции извлечения пространственных признаков с моделированием временных рядов. Экспериментальная проверка проводится на реальных наборах данных о долгосрочных и краткосрочных транспортных потоках, а производительность каждой модели систематически оценивается с точки зрения количества ошибок прогнозирования, вычислительной эффективности и надежности. Благодаря всестороннему анализу таких метрик, как коэффициент детерминации ( $R^2$ ) и среднеквадратическая ошибка (RMSE), данное исследование обеспечивает основу для рационального выбора моделей прогнозирования в ИТС и предлагает теоретическую поддержку для будущих исследований в области моделирования слияния данных о многомодальных транспортных потоках.

**Цель.** В ходе систематических сравнительных исследований отбирается более эффективная и надежная модель для подсистемы прогнозирования транспортных потоков в ИТС, а также изучается эффективность гибридной модели при интеграции многомерных характеристик, что обеспечивает эмпирическую основу для дальнейшей оптимизации точности модели в будущем.

**Материалы и методы.** В этом исследовании использовались долгосрочные данные о транспортных потоках во Франции и краткосрочные данные о транспортных потоках в Италии. Эксперименты по прогнозированию проводились в среде MATLAB с использованием опорных векторных машин (SVM), моделей CNN-LSTM и модели SVM-LSTM с функцией потерь. Метод определения эффективности модели основан на теории линейной регрессии и фокусируется на подсчете количества ошибок в данных и оценке соответствия дан-

ных с помощью метрик. Метод определения эффективности модели основан на теории линейной регрессии и фокусируется на подсчете количества ошибок в данных и оценке соответствия данных с помощью метрик.

**Результаты.** Экспериментальные результаты, основанные на реальных наборах данных о транспортных потоках, показывают, что модель SVM-LSTM демонстрирует наилучшую общую производительность при долгосрочном прогнозировании транспортных потоков. Модель CNN-LSTM демонстрирует превосходные возможности моделирования временных рядов при краткосрочном прогнозировании транспортных потоков. С точки зрения вычислительной эффективности, модель SVM-LSTM сокращает время обучения на 10,2% по сравнению с моделью CNN-LSTM. Таким образом, сочетание SVM и LSTM сочетает преимущества извлечения пространственных признаков и моделирования временных рядов, а его применение в ИТС может повысить эффективность прогнозирования транспортных потоков.

**Ключевые слова:** прогнозирование транспортных потоков; машинное обучение; нейронные сети; моделирование; интеллектуальные транспортные системы

**Для цитирования.** Цзян, Цзисяо (2025). Исследование эффективности различных моделей нейронных сетей для прогнозирования транспортных потоков. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 181–200. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-382>

## Introduction

The accuracy of traffic flow prediction directly affects the implementation of ITS management [1]. Efficient traffic flow prediction can provide a scientific basis for early warning of traffic congestion and alleviate traffic pressure [2]. With the continuous development of ITS, methods based on machine learning and neural network models have shown significant advantages in accurately processing complex traffic data [3; 4]. These methods are not only capable of handling the irregu-

lar structure of traffic networks, but are also able to incorporate various traffic flow characteristics to achieve more accurate predictions [5; 6].

However, machine learning and single neural network models are sensitive to noise and missing values in traffic flow data, and their generalization ability is limited in large-scale datasets involving extreme events or unknown scenarios [7]. Furthermore, the effective integration of complex spatiotemporal dependencies and the accumulation of error data in long-term predictions also hinder practical applications. To address this issue, researchers integrated machine learning with neural network models for traffic flow prediction experiments, and the experimental results demonstrated prediction accuracy that is difficult to achieve with traditional methods [8; 9]. The core advantage of this model framework is that neural networks (particularly CNNs, LSTMs, and graph neural networks) can efficiently learn the dynamic evolution of traffic patterns from time series and identify the interactions between intersections within a road network [10; 11]. The introduction of a machine learning framework allows the neural network model to select key prediction indicators, further improving the robustness and accuracy of the predictions. Ali et al. combined the machine learning gated recurrent unit (GRU) and graph convolutional network (GCN) to identify spatial and temporal variations in road patterns, achieving highly accurate predictions [12]. Chauhan et al. used a bidirectional GRU to extract the spatiotemporal correlations of traffic flow on roads from sensor-generated data and significantly improved prediction efficiency by introducing attention [13]. This combination enables the model to not only accurately predict traffic flow and congestion levels, providing critical decision-making support for intelligent signal control, but also contributes to building more efficient modern transportation systems for cities.

However, these studies failed to explain the reasons for the efficiency improvement from the perspective of the internal mechanisms of the model architecture, and did not compare the extent to which the combination of machine learning and neural networks enhances prediction

accuracy. To address this issue, this article systematically compares SVM, CNN-LSTM, and a novel SVM-LSTM model with a loss function. By analyzing the inherent mechanisms of different architectures in feature extraction and time series modeling, we uncover the root causes of efficiency differences. Furthermore, through controlled variable experiments, we quantitatively evaluate the actual improvement in prediction accuracy achieved by integrating machine learning and neural networks. These results not only provide a superior solution for traffic flow prediction but also provide empirical evidence for the value of model hybridization strategies, promoting their development in ITS.

### Materials and methods

SVMs are primarily used for traffic flow classification and regression problems. Their core principle is to maximize the distance between two classes of samples and their corresponding hyperplane, separating them [14]. For linearly inseparable data, SVMs use a kernel function to map the data into a high-dimensional space, making it linearly separable. The SVM structure used in this paper is shown in Fig. 1.

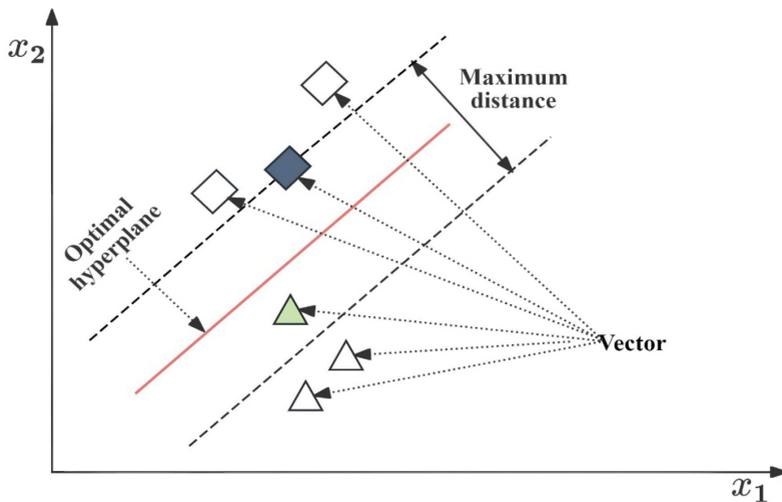


Fig. 1. SVM main structure

The linear kernel function in SVMs provides a concise and efficient solution to the linear separability problem. The linear kernel function used in this paper is expressed in Equation 1.

$$K(x_i, x) = x_i^T x_j \tag{1}$$

where  $x_i$  and  $x_j$  denote the input vectors to the SVM; and  $T$  denotes the transposed matrix.

SVMs improve generalization by maximizing the number of samples closest to the decision boundary across all classification results. The core SVM model is shown in Equation 2.

$$f(x) = \text{sign} \left( \sum_{i=1}^n y_i K(x_i, x_j) + b \right) \tag{2}$$

where  $y_i$  denotes the label of the training sample and  $b$  denotes the bias term.

By combining the linear kernel function with the sign function, SVM can directly learn the complex high-dimensional data in the input space and effectively solve the nonlinear traffic flow classification problem.

CNN is a deep learning model designed for processing grid-like sequence data. It extracts local features of traffic flow by sliding convolution kernels on input data, and stacks multiple layers to display more complex specific states. The CNN architecture used in this arti-

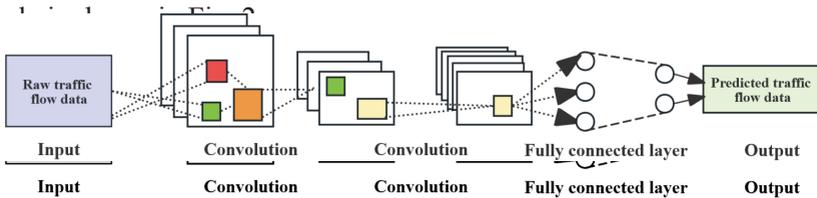


Fig. 2. CNN architecture

The fully connected layer is a component of the CNN that integrates high-level information and outputs decisions. Its significance lies in nonlinearly mapping some of the features extracted by the

convolutional layer. The fully connected layer can be expressed as Equation 3.

$$z = \sum_{i=1}^n w_i a_i + b_j \quad (3)$$

where  $w_i$  denotes the CNN model weights;  $a_i$  denotes the activation output of the  $i$ -th neuron; and  $b_j$  denotes the bias term.

The convolution operation is a mathematical operation that CNNs perform on the input traffic flow, performing a local weighted summation, expressed as Equation 4.

$$S(i, j) = \sum_{m=0}^{m-1} \sum_{n=0}^{n-1} I(i + m, j + m) \cdot F \quad (4)$$

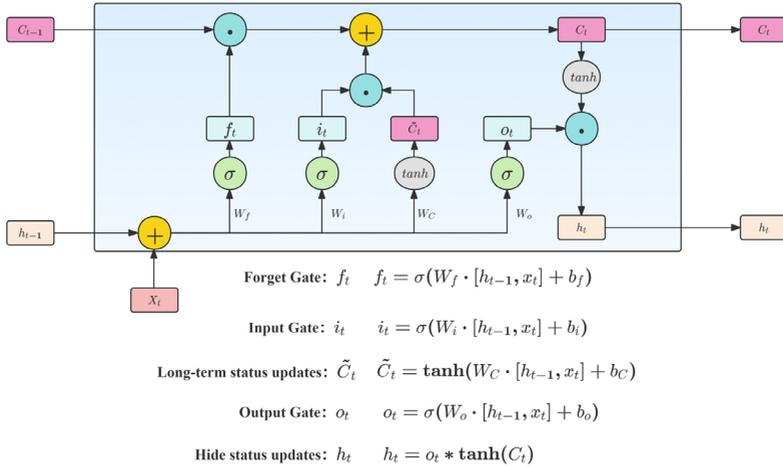
where  $(i, j)$  denotes the spatial position coordinates in the output feature map;  $I$  denotes the input data;  $m$  and  $n$  denote the relative positions inside the convolution kernel; and  $F$  denotes the weight parameter of CNN.

The local weighting and information integration represented by Equations 3 and 4 can significantly reduce the number of model parameters, improving the computational efficiency and generalization ability of the CNN.

The gating mechanism and internal state of LSTM enable it to memorize the periodic patterns of traffic flow and flexibly analyze the characteristics contained in traffic flow [15]. The classic LSTM model structure and modeling equations are shown in Fig. 3.

In Fig. 3,  $X_t$  is the input traffic flow data (in vector form);  $H_t$  is the hidden state at the previous time step;  $C_t$  is the cell state at the previous time step;  $\sigma$  is the sigmoid activation function;  $\tanh$  is the regulation function used to stabilize the model;  $W_p$ ,  $W_p$ ,  $W_c$ , and  $W_o$  are the weight matrices that the model needs to learn;  $b_p$ ,  $b_p$ ,  $b_c$ , and  $b_o$  are the bias terms that the model needs to learn.

For stable traffic flow prediction tasks, LSTM training requires optimization via an external loss function. The optimization objective of the entire model can be expressed as Equation 5.



**Fig. 3.** LSTM model structure and modeling equations

$$\mathcal{L} = \sum_{i=0}^N \sum_{t=0}^T q(y_t, \hat{y}_t) \quad (5)$$

where  $N$  denotes the number of samples in deep training;  $T$  denotes the length of the input sequence;  $q$  denotes the point-by-point loss function, which measures the error between the predicted value and the true value;  $y_t$  denotes the original traffic flow of the  $i$ -th sample at time  $t$ ; and  $\hat{y}_t$  denotes the predicted traffic flow of the  $i$ -th sample at time  $t$ .

To ensure that the LSTM can effectively exploit the dynamic patterns of traffic flow data, a regularization term is added to the original loss function to prevent overfitting. This anti-overfitting process can be expressed as Equation 6.

$$\mathcal{L}_{regularized} = \mathcal{L} + \lambda \cdot \Omega(\theta) \quad (6)$$

where  $\lambda$  denotes the regularization strength hyperparameter;  $\Omega$  denotes L2 regularization; and  $\theta$  denotes all LSTM weight parameters.

To improve the generalization ability of the LSTM model, it is necessary to constrain the generation of model parameters so that the model can filter out noise and irrelevant details in the original data. This process can be expressed as Equation 7.

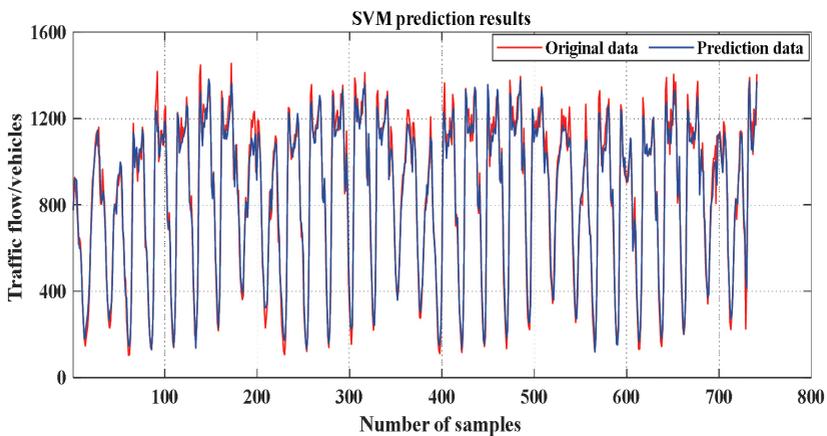
$$R_{\text{params}} = \rho \|W\|_F^2 \quad (7)$$

where  $\rho$  denotes the hybrid hyperparameter, which controls the ratio of the weight parameters to the weight matrix.

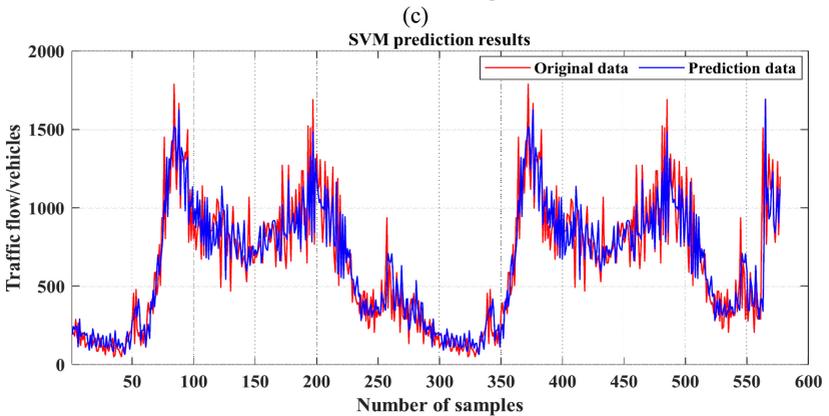
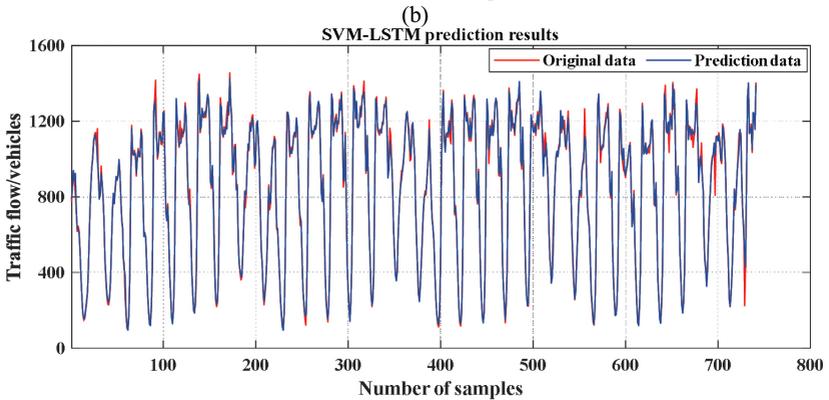
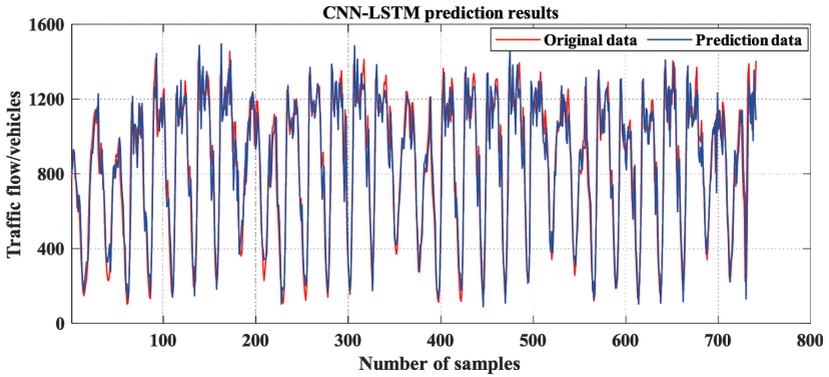
In the MATLAB environment, the SVM layer, CNN layer, and LSTM layer are stacked in series to build the model required for the experiment, and finally the prediction results are output through a unified fully connected layer.

### Experiments and Discussion

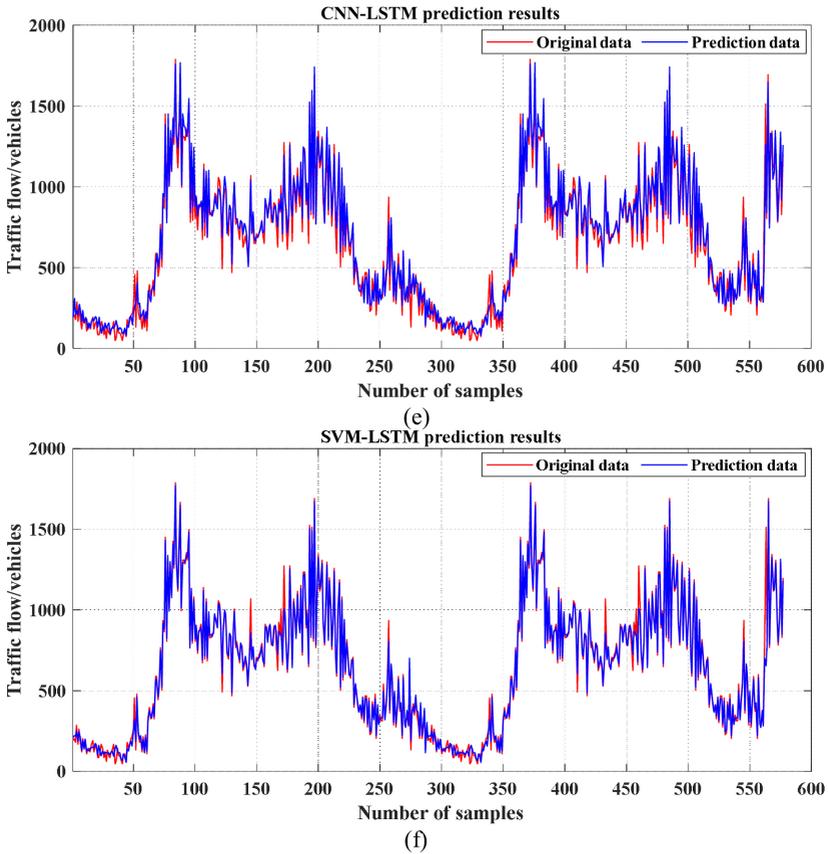
For traffic flow datasets from France and Italy (UTD19), abnormal sensor readings are first identified and corrected through threshold filtering, followed by time series interpolation to fill missing values. Finally, multi-source data undergo normalization to eliminate dimensional effects, thereby providing high-quality data for prediction experiments. For the French road dataset, we selected traffic flow data from detector No. 52 in January 2016, sampled every hour for a total of 744 data points. For the Italian road dataset, we selected traffic flow data from detector No. 2082 on September 26-27, 2016, sampled every five minutes for a total of 576 data points. The prediction results of different models are shown in Fig. 4.



(a)



(d)



**Fig. 4.** Comparison of traffic flow predictions by different models:

(a) Prediction results of the SVM model on the French road dataset, (b) Prediction results of the CNN-LSTM model on the French road dataset, (c) Prediction results of the SVM-LSTM model on the French road dataset, (d) Prediction results of the SVM model on the Italian road dataset, (e) Prediction results of the CNN-LSTM model on the Italian road dataset, (f) Prediction results of the SVM-LSTM model on the Italian road dataset

Fig. 4 shows that in both long-term and short-term traffic flow prediction, the SVM has the worst prediction accuracy, while the CNN-LSTM and SVM-LSTM models perform well in data fit. Detailed evaluation metrics for the three models are shown in Table 1.

Table 1.

**Results of evaluation metrics of different models**

Detector number	Model	Number of error data	R <sup>2</sup>	RMSE
No. 52	SVM	174	0.715	65.409
	CNN-LSTM	128	0.824	57.083
	SVM-LSTM	81	0.907	29.154
No. 2082	SVM	115	0.655	83.927
	CNN-LSTM	69	0.791	60.624
	SVM-LSTM	43	0.884	35.012

According to Table 1, in both long-term and short-term traffic flow prediction, the SVM model exhibits the highest error due to the limited capability of its kernel function in handling nonlinear data, preventing it from effectively capturing temporal dynamics like LSTM. The SVM-LSTM model achieves the best results due to the complementary advantages of its structure and loss function. In contrast, the CNN in the CNN-LSTM model focuses more on extracting feature relationships between adjacent detectors. Furthermore, the spatial dependence of the experimental data is weak, resulting in inferior performance compared to the SVM-LSTM combination, which is specialized for time series modeling.

To test the effectiveness of the synergistic mechanism between time series modeling and the loss function in the SVM-LSTM model, reveal the model’s generalization ability on other datasets and its shortcomings such as noise sensitivity, and provide clear guidance for its application in ITS, this paper conducted verification experiments using data from detectors 156-158 in France’s road dataset from May and detectors 2254-2256 in Italy from September 28-30.

The May data from detectors 156-158 was used because it offers stable meteorological conditions during this season, avoiding the impact of extreme weather and making it a suitable benchmark scenario. Consecutively numbered detectors are located on consecutive sections of the main road, allowing various models to effectively capture the spatiotemporal correlation characteristics of traffic flow. A comparison of various evaluation metrics for detectors 156-158 is shown in Fig. 5.

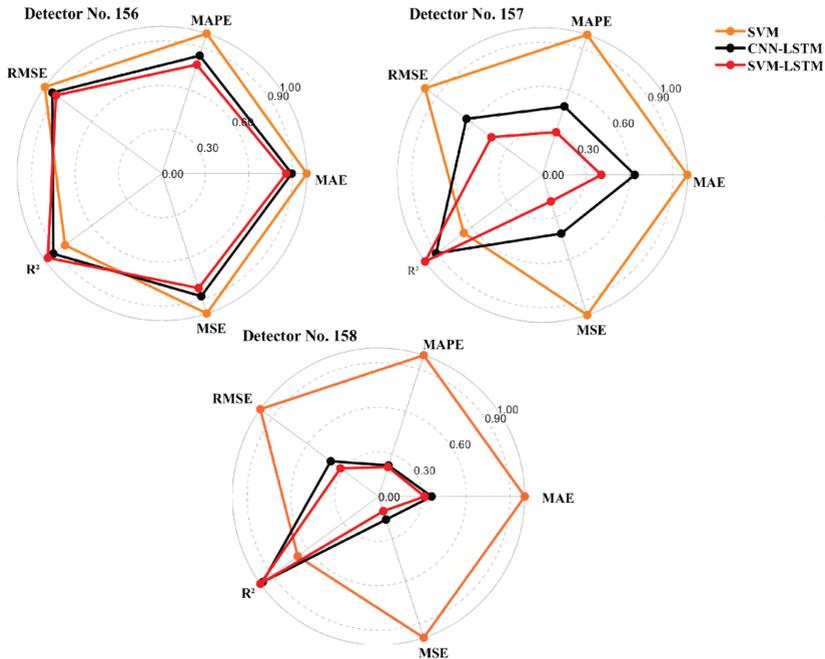


Fig. 5. Comparison of prediction evaluation metrics of different detectors

Fig. 5 shows that the performance of the three models on detector 156 is similar, but the SVM-LSTM model still demonstrates the best performance. For detectors 157 and 158, the prediction ability of SVM-LSTM is significantly better than that of SVM and CNN-LSTM models, which proves that it can maintain good generalization in high-noise scenarios.

The data from detectors 2254 to 2256 covers the weekend holiday period from September 28 to 30. The abnormal congestion patterns caused by peak weekend travel and the asymmetric traffic waveforms generated by return trips can effectively test the ability of various models to handle sudden changes in traffic conditions. Moreover, these detectors are located at critical nodes of the urban expressway, making them highly sensitive to traffic fluctuations. This makes them particu-

larly suitable for validating the generalization capability of models in complex road networks. The evaluation metrics obtained from detectors 2254-2256 are shown in Table 2.

Table 2.

**Evaluation metrics results of detectors No. 2254-2256**

Detector number	Model	Number of error data	R <sup>2</sup>	RMSE
No. 2254	SVM	168	0.741	87.249
	CNN-LSTM	115	0.820	64.857
	SVM-LSTM	72	0.901	37.740
No. 2255	SVM	154	0.767	78.355
	CNN-LSTM	104	0.853	57.325
	SVM-LSTM	63	0.919	34.791
No. 2256	SVM	137	0.784	76.585
	CNN-LSTM	92	0.861	56.847
	SVM-LSTM	57	0.924	30.172

Table 2 shows that compared with the SVM model, the SVM-LSTM model’s R<sup>2</sup> value increases by 21.6% and its RMSE decreases by 55.8%. Compared with the CNN-LSTM model, the SVM-LSTM model’s R<sup>2</sup> value increases by 10.2% and its RMSE decreases by 40.8%. This demonstrates that the SVM-LSTM model can more effectively handle the nonlinear characteristics and temporal dependencies in traffic flow data, thereby achieving more efficient prediction.

**Conclusions**

This paper systematically compares the performance of three models, SVM, CNN-LSTM, and SVM-LSTM, in traffic flow prediction and draws a clear conclusion: the SVM-LSTM hybrid model shows significant advantages in both prediction accuracy and stability. Experimental results on traffic flow datasets in France and Italy show that the model achieves a maximum R<sup>2</sup> of 0.907 and a minimum RMSE of 29.154 in long-term predictions. It also performs well in short-term predictions, with R<sup>2</sup> further improved to 0.924 and RMSE reduced to 30.172. These evaluation metrics fully demonstrate the SVM-LSTM model’s effec-

tiveness in handling the nonlinear characteristics and temporal dependencies of traffic flow data.

The SVM-LSTM model's outstanding performance stems primarily from its inclusion of a loss function. This model effectively captures the complex nonlinear patterns in traffic flow data through its SVM component, while simultaneously utilizing an LSTM network to process time series, enabling it to maintain optimal forecasting performance despite sudden traffic changes, peak congestion, and complex road network fluctuations. Therefore, this model is a preferred choice for deployment in ITS systems, enabling accurate predictions of traffic flow changes at key nodes over the next 5-30 minutes, providing data support for adaptive signal control systems. Furthermore, traffic management departments can leverage the model's predictive capabilities to establish early warning mechanisms and proactively deploy emergency management measures based on the forecast results, thereby enhancing the overall ITS response capabilities.

### *References*

1. Zhang, D., Wang, P., Ding, L., Wang, X., & He, J. (2025). Spatio-temporal contrastive learning based adaptive graph augmentation for traffic flow prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26(1), 1304–1318. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3487982>
2. Topilin, I., Jiang, J., Feofilova, A., & Beskopylny, N. (2025). Traffic flow prediction via a hybrid CPO-CNN-LSTM attention architecture. *Smart Cities*, 8(5), 148. <https://doi.org/10.3390/smartcities8050148>. EDN: <https://elibrary.ru/SLMTAC>
3. Song, Y., Luo, R., Zhou, T., Zhou, C., & Su, R. (2024). Graph attention informer for long-term traffic flow prediction under the impact of sports events. *Sensors*, 24(15), 4796. <https://doi.org/10.3390/s24154796>. EDN: <https://elibrary.ru/DBAEIR>
4. Dong, Z., Zhou, Y., & Bao, X. (2024). A short-term vessel traffic flow prediction based on a DBO-LSTM model. *Sustainability*, 16(13), 5499. <https://doi.org/10.3390/su16135499>. EDN: <https://elibrary.ru/QAHHNX>

5. Liu, S., Lin, W., Wang, Y., Yu, D. Z., Peng, Y., & Ma, X. (2024). Convolutional neural network based bidirectional gated recurrent unit additive attention mechanism hybrid deep neural networks for short-term traffic flow prediction. *Sustainability*, *16*(5), 1986. <https://doi.org/10.3390/su16051986>. EDN: <https://elibrary.ru/OWHDOM>
6. Ding, C., Zhu, L., Shen, L., Li, Z., Li, Y., & Liang, Q. (2024). The intelligent traffic flow control system based on 6G and optimized genetic algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3467269>
7. Zhan, W. (2024). Traffic flow prediction and intelligent road network optimization under artificial intelligence. In: *2024 International Conference on Distributed Computing and Optimization Techniques (IC-DCOT), Bengaluru, India* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ICDCOT61034.2024.10515363>
8. Strizhko, M. A. (2024). Neural network prediction of traffic flow parameters in intelligent traffic light control systems. *Automation and Modeling in Design and Management*, (2), 45–53. <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2024-2-45-539>. EDN: <https://elibrary.ru/EQCCND>
9. Zagidullin, R. R., & Khaibullin, A. N. (2025). Predicting traffic congestion using machine learning methods. *International Journal of Advanced Studies*, *15*(2), 202–216. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2025-15-2-347>. EDN: <https://elibrary.ru/HHJBXM>
10. Malovetskaya, E. V., & Mozalevskaya, A. K. (2023). Application possibilities of ARIMA models for forecasting car traffic flows. *T Comm: Telecommunications and Transport*, *17*(1), 33–41. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-1-33-41>. EDN: <https://elibrary.ru/CXMLBK>
11. Zhang, J., Wang, J., Zang, H., Ma, N., Skitmore, M., Qu, Z., Skulmoski, G., & Chen, J. (2024). The application of machine learning and deep learning in intelligent transportation: A scientometric analysis and qualitative review of research trends. *Sustainability*, *16*(14), 5879. <https://doi.org/10.3390/su16145879>. EDN: <https://elibrary.ru/JFJQKQ>
12. Ali, A., Ullah, I., Ahmad, S., Wu, Z., Li, J., & Bai, X. (2025). An attention-driven spatio-temporal deep hybrid neural networks for traf-

- fic flow prediction in transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26(9), 14154–14168. <https://doi.org/10.1109/TITS.2025.3540852>
13. Chauhan, N. S., Kumar, N., & Eskandarian, A. (2024). A novel confined attention mechanism driven bi-GRU model for traffic flow prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(8), 9181–9191. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3375890>
  14. Lyapin, A. D. (2025). Comparative analysis of SVM (Support Vector Machine) and RF (Random Forest) algorithms. *Bulletin of Science*, (6), 1816–1824. EDN: <https://elibrary.ru/UPZYEF>
  15. Platonova, A. I., & Popov, V. S. (2025). Comparison of the accuracy of time series forecasting models: ARIMA, Prophet, LSTM and GRU. *Modern Innovations, Systems and Technologies*, (5), 3061–3070. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2025-5-2-3061-3070>. EDN: <https://elibrary.ru/LDSMFM>

### Список литературы

1. Zhang, D., Wang, P., Ding, L., Wang, X., & He, J. (2025). Spatio-temporal contrastive learning-based adaptive graph augmentation for traffic flow prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26(1), 1304–1318. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3487982>
2. Topilin, I., Jiang, J., Feofilova, A., & Beskopylny, N. (2025). Traffic flow prediction via a hybrid CPO-CNN-LSTM-attention architecture. *Smart Cities*, 8(5), 148. <https://doi.org/10.3390/smartcities8050148>. EDN: <https://elibrary.ru/SLMTAC>
3. Song, Y., Luo, R., Zhou, T., Zhou, C., & Su, R. (2024). Graph attention informer for long-term traffic flow prediction under the impact of sports events. *Sensors*, 24(15), 4796. <https://doi.org/10.3390/s24154796>. EDN: <https://elibrary.ru/DBAEIR>
4. Dong, Z., Zhou, Y., & Bao, X. (2024). A short-term vessel traffic flow prediction based on a DBO-LSTM model. *Sustainability*, 16(13), 5499. <https://doi.org/10.3390/su16135499>. EDN: <https://elibrary.ru/QAHHNX>
5. Liu, S., Lin, W., Wang, Y., Yu, D. Z., Peng, Y., & Ma, X. (2024). Convolutional neural network-based bidirectional gated recurrent

- unit-additive attention mechanism hybrid deep neural networks for short-term traffic flow prediction. *Sustainability*, 16(5), 1986. <https://doi.org/10.3390/su16051986>. EDN: <https://elibrary.ru/OWHDOM>
6. Ding, C., Zhu, L., Shen, L., Li, Z., Li, Y., & Liang, Q. (2024). The intelligent traffic flow control system based on 6G and optimized genetic algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3467269>
  7. Zhan, W. (2024). Traffic flow prediction and intelligent road network optimization under artificial intelligence. In *2024 International Conference on Distributed Computing and Optimization Techniques (ICDCOT), Bengaluru, India* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ICDCOT61034.2024.10515363>
  8. Стрижко, М. А. (2024). Нейросетевое прогнозирование параметров транспортных потоков в интеллектуальных системах светофорного регулирования. *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*, (2), 45–53. <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2024-2-45-539>. EDN: <https://elibrary.ru/EQCCND>
  9. Загидуллин, Р. Р., & Хайбуллин, А. Н. (2025). Прогнозирование транспортной загруженности с использованием методов машинного обучения. *International Journal of Advanced Studies*, 15(2), 202–216. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2025-15-2-347>. EDN: <https://elibrary.ru/HHJBXM>
  10. Маловецкая, Е. В., & Мозалевская, А. К. (2023). Возможности применения моделей ARIMA при построении прогнозных значений вагонопотоков. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 17(1), 33–41. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-1-33-41>. EDN: <https://elibrary.ru/CXMLBK>
  11. Zhang, J., Wang, J., Zang, H., Ma, N., Skitmore, M., Qu, Z., Skulmoski, G., & Chen, J. (2024). The application of machine learning and deep learning in intelligent transportation: A scientometric analysis and qualitative review of research trends. *Sustainability*, 16(14), 5879. <https://doi.org/10.3390/su16145879>. EDN: <https://elibrary.ru/JFJQKQ>
  12. Ali, A., Ullah, I., Ahmad, S., Wu, Z., Li, J., & Bai, X. (2025). An attention-driven spatio-temporal deep hybrid neural networks for traf-

- fic flow prediction in transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26(9), 14154–14168. <https://doi.org/10.1109/TITS.2025.3540852>
13. Chauhan, N. S., Kumar, N., & Eskandarian, A. (2024). A novel confined attention mechanism driven bi-GRU model for traffic flow prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(8), 9181–9191. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3375890>
14. Ляпин, А. Д. (2025). Сравнительный анализ алгоритмов SVM (Support Vector Machine) и RF (Random Forest). *Вестник науки*, (6), 1816–1824. EDN: <https://elibrary.ru/UPZYEF>
15. Платонова, А. И., & Попов, В. С. (2025). Сравнение точности моделей прогнозирования временных рядов: ARIMA, Prophet, LSTM и GRU. *Современные инновации, системы и технологии*, (5), 3061–3070. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2025-5-2-3061-3070>. EDN: <https://elibrary.ru/LDSMFM>

#### DATA ABOUT THE AUTHOR

**Jixiao Jiang**, Postgraduate Student, Department of Transportation and Organization  
*Don State Technical University*  
*1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation*  
*[jiangjixiao@outlook.com](mailto:jiangjixiao@outlook.com)*  
*ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4376-790X>*

#### ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Цзисяо Цзян**, аспирант, кафедра Организация перевозок и дорожного движения  
*Донской государственный технический университет*  
*площадь Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Российская Федерация*  
*[jiangjixiao@outlook.com](mailto:jiangjixiao@outlook.com)*  
*ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4376-790X>*

Поступила 02.10.2025

После рецензирования 18.10.2025

Принята 27.10.2025

Received 02.10.2025

Revised 18.10.2025

Accepted 27.10.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-383

EDN: QBAGUN

УДК 625.162



Научная статья | Управление процессами перевозок

## РОЛИКОВЫЙ ПРОТИВОТАРАННЫЙ БАРЬЕР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕЕЗДА

*А.М. Насыбуллин, П.В. Лутцева, А.Р. Цурикова*

### *Аннотация*

**Обоснование.** В настоящее время современные устройства заграждения железнодорожных переездов направлены на обеспечение безопасности железнодорожного подвижного состава, при этом игнорируя жизнь и здоровье участников дорожного движения. В связи с этим требуется разработка новых устройств заграждения переезда, обеспечивающих снижения тяжести последствий для всех участников дорожного движения. Концептуальные предложения предлагаемой конструкции были разработаны коллективом авторов в рамках реализации учебной дисциплины «Проектная деятельность» и удостоены призового места на конкурсе проектов РУТ (МИИТ) в номинации «Инновационный проект». Авторами отмечается, что представленные предложения носят концептуальный характер, требующий значительной доработки, включающей в себя уточнение требований к материалам, проверку ударо-прочностных характеристик и прочие технические усовершенствования.

**Цель.** Создание новой конструкции заграждения переезда позволяющей минимизировать последствия от дорожно-транспортных происшествий.

**Метод и методология работы.** В статье использована совокупность методов анализа, синтеза и виртуального прототипирования.

**Результаты.** Авторами предлагается новое устройство заграждения железнодорожного переезда, представляющее собой конструк-

цию, состоящую из противотаранных ворот с роликовыми отбойниками, размещенных под углом к оси автомобильной дороги.

**Область применения результатов.** Настоящая статья может представлять практический интерес для департамента безопасности движения ОАО «РЖД», Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», а также лиц, принимающих решения в рамках реализации Национального проекта «Безопасные качественные дороги».

**Ключевые слова:** устройство заграждения переезда; противотаранные ворота; роликовый отбойник; мягкое противотаранное устройство; железнодорожный переезд

**Для цитирования.** Насыбуллин, А. М., Лутцева, П. В., & Цурикова, А. Р. (2025). Роликовый противотаранный барьер железнодорожного переезда. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 201–220. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-383>

Original article | Transportation Process Management

## ROLLER-TYPE ANTI-RAM BARRIER FOR RAILWAY CROSSING

*A.M. Nasybullin, P.V. Lutseva, A. R. Tsurikova*

### *Abstract*

**Background.** Current modern railway crossing barriers prioritize the safety of trains while neglecting the protection of motorists and passengers. Therefore, new barrier systems must be developed to minimize risks for all road users. The conceptual proposals for the proposed construction were developed by a team of authors as part of the implementation of the academic course “Project Activity”. These proposals were awarded a prize in the “Innovative Project” category at the Russian University of Transport Project Competition. The authors acknowledge that the proposals submitted are conceptual in nature and require further refinement. This includes

specifying the materials, verifying the strength parameters, and making technical improvements.

**Purpose.** The purpose is to create a new barrier structure for the crossing in order to minimize the consequences of road accidents.

**Methodology.** The study employs a combination of analytical, synthesis and virtual prototyping methods.

**Results.** The authors propose a novel railway crossing barrier device, which consists of crash-resistant gates equipped with roller bumpers, installed at an angle to the roadway axis.

**Practical implications.** This paper may be of practical interest to the Traffic Safety and Security Department of JSC Russian Railways, as well as to the Infrastructure Directorate of JSC Russian Railways. It may also be of interest to decision-makers involved in implementing the “Safe Quality Roads” national project.

**Keywords:** railway crossing barrier system; crash-resistant gates; roller bumper; soft crash barrier; railway crossing

**For citation.** Nasybullin, A. M., Lutseva, P. V., & Tsurikova, A. R. (2025). (2025). Roller-type anti-ram barrier for railway crossing. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 201–220. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-383>

## Введение

Пересечения железных и автомобильных дорог в одном уровне являются одними из наиболее сложных и опасных элементов транспортной сети, которые оказывают существенное влияние на эффективность эксплуатации и безопасность движения как железнодорожного, так и автомобильного транспорта. В настоящее время на железных дорогах России условия эксплуатации железнодорожных переездов значительно изменились по сравнению со временем их проектирования и строительства. Повысились скорости и массы подвижного состава, увеличился парк автомобилей (практически в 1,5 раза за 2013-2018 гг.) и, как следствие, существенно возросли интенсивность и плотность транспортного по-

тока через железнодорожные переезды. Пересечения автомобильных дорог с железнодорожными путями в одном уровне приводят к задержкам (иногда значительным) в движении транспортных средств, но одной из наиболее острых проблем, связанных с эксплуатацией переездов, остаётся риск крупных аварий с вероятностью тяжёлых последствий для пострадавших, окружающей среды и объектов железнодорожного транспорта.

Это в свою очередь требует круглосуточного присутствия на переездах дежурных сотрудников, что, однако, не обеспечивает необходимый уровень безопасности движения ввиду влияния человеческого фактора.

По данным Госавтоинспекции [1], ежегодно регистрируется около 200 дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на железнодорожных переездах, при этом статистика не включает случаи смертности, наступившие по истечении трёх и более суток после происшествия, поэтому фактические значения выше зафиксированных официальной статистикой.

Несмотря на существующий тренд на снижение количества ДТП, который связан не с повышением дисциплины участников дорожного движения, а с сокращением количества железнодорожных переездов, значения данных показателей, приведенных к количеству эксплуатируемых переездов, в среднем, практически, не уменьшаются. Это говорит о необходимости совершенствования существующих решений и (или) разработке новых, обеспечивающих безопасность на переездах.

Нельзя не отметить, что помимо прямого ущерба жизни и здоровью участников дорожного движения [2], столкновения на железнодорожных переездах провоцируют сбои в соблюдении графика движения поездов [3; 4], механические повреждения подвижного состава [5; 6] и элементов железнодорожной инфраструктуры, что в совокупности формирует значительные экономические издержки для владельца инфраструктуры, владельца подвижного состава и перевозчика [7-10].

Анализ корневых причин, демонстрирующих многоуровневую структуру причинно-следственных связей, приводящих к аварийным ситуациям на железнодорожных переездах, представлен на рисунке 1. Дерево корневых причин демонстрирует не только непосредственные, но и системные и организационные причины аварий, формализация которых может позволить сосредоточиться на устранении первопричин повторных инцидентов.

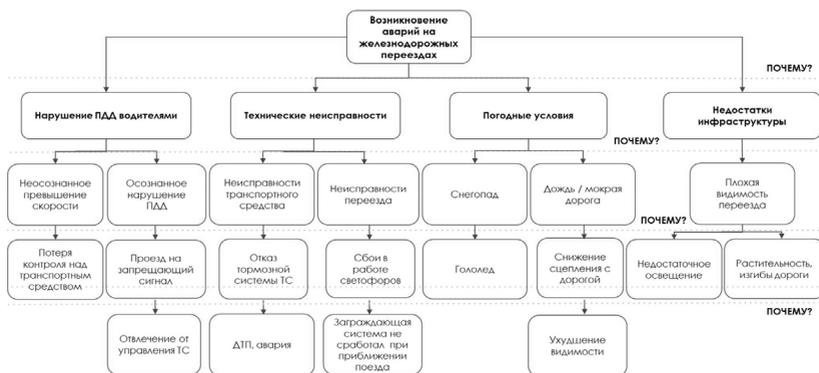


Рис. 1. Дерево корневых причин возникновения аварий на железнодорожных переездах

## Материалы и методы

Исследования в области оценки эффективности переездной сигнализации, а также разработки методов повышения надежности функционирования систем оповещения и заградительных устройств представлены в работах [6; 11-17].

Все существующие системы, применяемые на железнодорожных переездах, можно разделить системы, реализующие ограждающие и заграждающие функции.

Под ограждающими функциями понимается функция, которая ориентирована на снижение риска ДТП, за счет своевременного уведомления участников дорожного движения, а также работников железнодорожного транспорта. Система, реализующая ограждающую функцию, предупреждает водителей о двух основных опасностях:

о самом факте приближения к железнодорожному переезду и (или) о поезде, который может находиться на этом переезде или приближаться к нему. Такая система не способна полностью исключить вероятность возникновения ДТП. К средствам, входящим в системы, реализующие ограждающие функции, относятся переездная сигнализация, шлагбаумы, а также прочие меры – от установки знаков, удовлетворяющих требования Правил дорожного движения (Правил технической эксплуатации железных дорог), до внедрения современных цифровых технических решений.

Под заграждающими функциями понимаются физические барьеры, которые препятствуют въезду автотранспорта при приближении железнодорожного подвижного состава. К таким средствам относятся: шлагбаумы, противотаранные ворота (в т.ч. шлагбаумы) и болларды, а также устройства заграждения переезда (УЗП).

Авторы статьи исходят из того, что читатели знакомы с особенностями конструкций вышеперечисленных средств ограждения и заграждения, поэтому при описании будут отмечены эксплуатационные особенности рассматриваемых систем.

**Шлагбаум является** простым, но наименее надежным техническим решением для ограждения железнодорожных переездов. Конструкция шлагбаумов отличается минимальными требованиями к пространству для монтажа и низкой капиталоемкостью, что обуславливает их применение на переездах с незначительной транспортной нагрузкой. Однако их принципиальным недостатком является низкая сопротивляемость несанкционированному преодолению – как за счет объезда (или обхода пешеходами), так и путем механического разрушения при динамическом воздействии.

**Устройство заграждения переезда** – является более эффективным техническим решением, однако анализ эксплуатационных характеристик УЗП выявил ряд особенностей, среди которых:

– повышенные требования к очистке рабочего механизма от атмосферных осадков и загрязнений, удовлетворение которых напрямую влияет на работоспособность устройства

– низкая статичность и износостойкость конструкции, а также смежных асфальтированных элементов дорожного покрытия переезда, влияющая на пропускную способность переезда за счет существенного снижения скорости транспортных средств при прохождении деформирующих покрытий.

– вероятность блокировки транспортного средства в межбашенном пространстве, что становится причиной возникновения ДТП;

– ограниченная высотная зона защиты при взаимодействии с тяжеловесными транспортными средствами (особенно высокими), которые способны нарушить габарит железнодорожного подвижного состава [18] за счет попадания элементов транспортного средства при частичном или полном его разрушении. Поэтому УЗП наиболее удачна для остановки преимущественно легковых транспортных средств.

Современным средством, призванным решить перечисленные в настоящей статье проблемы, являются противотаранный шлагбаум с комбинированным размещением УЗП, а также противотаранные ворота, которые обеспечивают максимальный уровень защиты железнодорожных переездов за счет устойчивости к ударным нагрузкам.

При этом противотаранные ворота, в отличие от противотаранных шлагбаумов, полностью исключают несанкционированный проезд и предотвращают возможное попадание элементов легковых и грузовых транспортных средств в пределы габарита приближения строений и подвижного состава.

Анализ способов ограждения железнодорожных переездов установил, что единственно эффективным способом защиты железнодорожной инфраструктуры от вероятности попадания транспортных средств или отдельных его частей являются противотаранные ворота.

Сводное сравнение способов защиты ограждения железнодорожных переездов представлено в таблице 1.

Таблица 1.

**Сравнение способов заграждения железнодорожных переездов**

Критерий сравнения	Противотаранный шлагбаум	УЗП	УЗП + шлагбаум	Противотаранные ворота
Скорость срабатывания, сек	30-45	40-50	50	25
Исключение проникновения людей при закрытом переезде	-	-	-	+
Обеспечение безопасности водителя автомобиля	-	-	-	-
Обеспечение безопасности железнодорожного подвижного состава	+	-	-	+
Предотвращение выхода частей транспортных средств за габариты устройств заграждения	-	-	-	+
Предотвращение выезда грузового автомобиля	+	-	+	+
Предотвращение выезда легкового автомобиля	-	+	+	+
Исключение дублирования функции заграждения	-	-	-	+
Не создает шумовое воздействие при прохождении транспортного средства	-	-	-	+

**Теория**

Анализ технических особенностей устройств заграждения переезда установил, что ни одно из перечисленных технических средств, предназначенных для заграждения переезда, не гарантирует сохранность жизни водителя и пассажиров, при этом приоритет поставлен в обеспечении безопасности исключительно железнодорожного подвижного состава. Поэтому необходим поиск новых технико-технологических решений, обеспечивающих снижение тяжести последствий для водителей и пассажиров в случае столкновения автомобиля с устройствами заграждения переезда.

Проведенный анализ преимуществ и недостатков современных заградительных систем позволил сформулировать ключевые требования нового технического решения, которое должно обеспечивать выполнение следующих критически важных функций:

- предотвращение несанкционированного выезда транспортных средств как грузовых, так и легковых;
- сохранности жизни (здоровья) водителей и пассажиров;
- противодействие обходу или объезду со стороны пешеходов и велосипедистов (средств индивидуальной мобильности);
- устойчивость к внешним воздействиям, включая неблагоприятные погодные условия;
- высокий уровень визуальной идентификации заграждения для своевременного распознавания участниками дорожного движения;
- исключение дублирования с другими заградительными устройствами.

Заградительное устройство, совмещающее в себе все перечисленные функции должно сочетать заградительную и амортизирующую функции позволяющую смягчить удар от столкновения транспортного средства за счет механизма управляемого разрушения, а также повышенную устойчивость к внешним воздействиям, что в совокупности должно повысить эффективность и безопасность системы заграждения переезда.

### **Результаты и обсуждение**

В рамках настоящей статьи авторами предлагается новая конструкция заграждения железнодорожного переезда, прототипом которого являются противотаранные ворота (рисунок 2), применяемые для защиты инфраструктуры от несанкционированного проезда (тарана) автомобильного и (или) железнодорожного транспорта, адаптированные под требования ГОСТ 58351-2019.

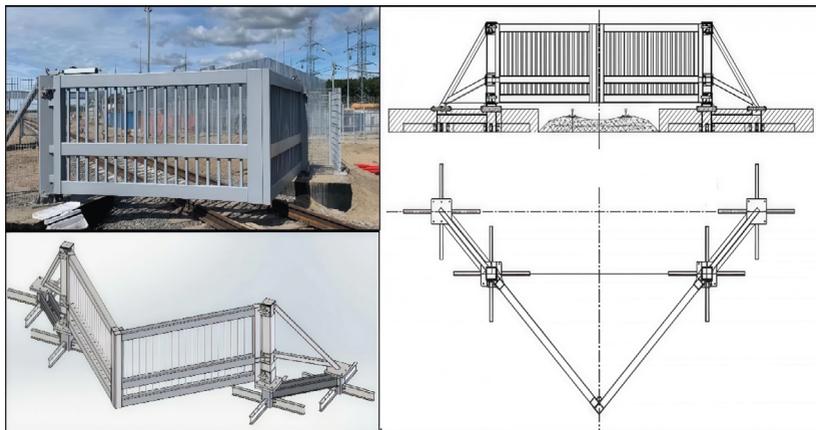


Рис. 2. Противотаранные ворота типа «Кашалот»

Основу предлагаемой конструкции составляют два подвижных полотна противотаранных ворот оснащенные поворотными механизмами, обеспечивающими крепление и перемещение полотен ворот (рисунок 3).

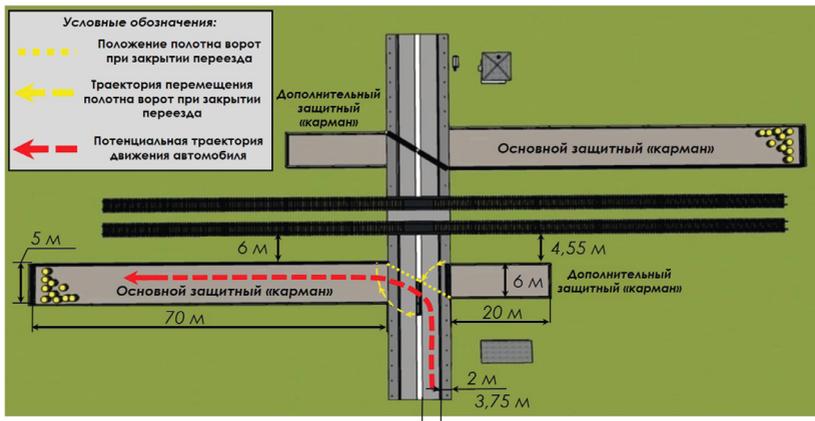
Ключевое отличие предлагаемого от существующего решения заключается в:

- расположении противотаранных ворот под углом 15 градусов относительно оси железнодорожного пути – положение способствует касательному восприятию ударных нагрузок от транспортного средства

- Наличии цилиндрических роликов (валиков) типа «Road Roller System» (заполненных пенополиуретаном), установленные на противотаранных воротах и вращающиеся вокруг своей оси (рисунок 4 и 5) [19].

Особенность роликовых отбойников заключается в возможности поглощать энергию удара благодаря амортизирующим/демпфирующим композитным элементам, а также устойчивостью к динамическим нагрузкам и корректировать направление движущегося транспортного средства (рисунок 4).

А) 2D визуализация



Б) 3D визуализация

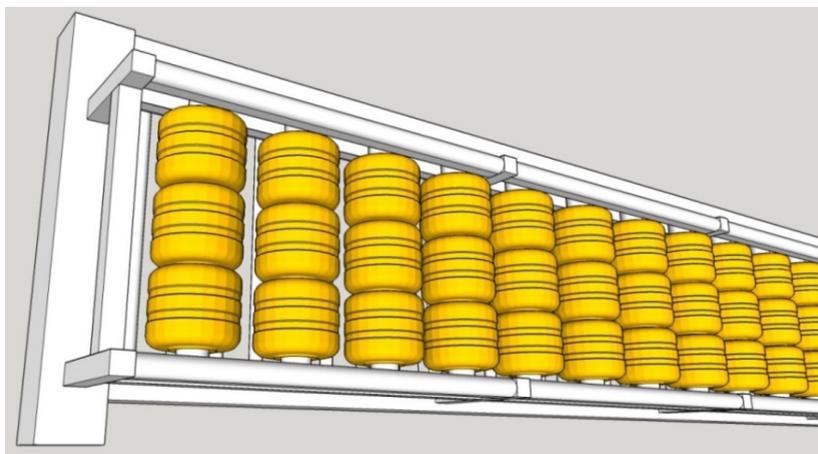


Рис. 3. Визуализация разрабатываемого устройства заграждения переезда

Дополнительной особенностью противотаранных ворот является наличие специальной гибкой рамы (рисунок 5) изменяющей своё состояние за счет контролируемой деформации. Гибкая рама позволит обеспечить необходимую подвижность общей конструкции, позволяя адаптироваться к вектору воздействия со стороны транспортного средства.



**Рис. 4.** Визуализация испытания (краш-тест) системы барьерного ограждения, оснащенного роликовыми отбойниками



**Рис. 5.** Гибкая рама и трехъярусный ряд валиков (роликов)

Конфигурация элементов предлагаемого заграждающего устройства так же предусматривает наличие основных и дополнительных защитных «карманов» для финальной остановки автомобилей (рисунок 3).

Основной защитный «карман» предназначен для восприятия непогашенной кинетической энергии после столкновения с противотаранными воротами, который для наилучшего контроля неуправляемого транспортного средства предлагается также оснастить отбойником на гибкой раме. В качестве дополнительного улавливающего амортизирующего устройства в торце основных

защитных карманов должны размещаться группы специальных пластиковых емкостей, воспринимающих финальный удар от транспортного средства.

Дополнительные защитные «карманы» выполняют функцию зон безопасности для размещения транспортных средств, оказавшихся в зоне железнодорожного переезда в момент закрытия противотаранных ворот.

Предлагаемая конструкция противотаранных ворот и инфраструктурных элементов железнодорожного переезда обладает следующими преимуществами:

- благодаря особенности конструкции и системе защитных карманов обеспечивается безопасность водителей и пассажиров при возникновении аварийной ситуации на железнодорожном переезде;

- снижение степени разрушения транспортных средств за счет реализации механизма управляемого разрушения и применения амортизирующих элементов;

- конструктивное исполнение противотаранных ворот предусматривает возможность быстрой замены отдельных элементов и оперативного восстановления основных функций устройства заграждения переезда.

Совокупность решений для оборудования основного защитного кармана обеспечивает смягчение удара и снижение кинетической энергии транспортного средства при столкновении с заграждающим устройством.

### **Заключение**

Предлагаемая конструкция противотаранных ворот, выполняющая заградительную функцию для железнодорожной инфраструктуры, сочетает меры по повышению сохранности жизни и здоровья людей и снижению тяжести ущерба транспортным средствам.

В качестве направления дальнейших исследований коллективом авторов рассматривается формализация показателей железнодорожных переездов, определяющих потребность в размещении

разрабатываемой конструкции, а также моделирование конструкции, ее экспериментальное испытание и оптимизация параметров для повышения надежности и эффективности работы в реальных условиях эксплуатации.

### **Список литературы**

1. Министерство внутренних дел Российской Федерации. *Показатели состояния безопасности дорожного движения* [Электронный ресурс]. Получено с <http://stat.gibdd.ru/>
2. Жаворонков, В. А. (2020). Особенности дорожно-транспортных происшествий, совершаемых на железнодорожных переездах, и меры по их предупреждению. *Транспортное право и безопасность*, 1(33), 87–97. EDN: <https://elibrary.ru/GMVXXP>
3. Левин, Д. Ю., Зо, А. Х., & Шмаль, В. Н. (2013). Что необходимо для выполнения графика. *Мир транспорта*, 11(1(45)), 110–119. EDN: <https://elibrary.ru/QABPRF>
4. Shmal, V. N., Minakov, P. A., & Aisina, L. R. (2020). The task of organizing suburban and urban traffic on sections with branches. В *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020* (Novosibirsk, 22–24 сентября 2020 года, Vol. 953, p. 012085). Bristol: IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/953/1/012085>. EDN: <https://elibrary.ru/SHDRCN>
5. Рязанов, Э. М., Жуйков, М. В., & Павлюков, А. Э. (2014). Моделирование работоспособности крэш-системы электропоезда при аварийных столкновениях. *Транспорт Урала*, 4(43), 44–49. EDN: <https://elibrary.ru/TFCSDR>
6. Ercegovac, P., Stojić, G., Tanackov, I., & Sremac, S. (2022). Application of statistical analysis for risk estimate of railway accidents and traffic incidents at level crossings. *ENTRENOVA — ENTERPRISE RESEARCH INNOVATION*, 8(1), 225–238. <https://doi.org/10.54820/entreno-va-2022-0021>. Получено с <https://hrcak.srce.hr/ojs/index.php/entreno-va/article/view/23858>

7. Айсина, Л. Р., & Хисамова, А. А. (2024). Анализ целесообразности применения модульной организации движения пригородных электропоездов на участках Решетниково – Тверь и Решетниково – Конаково ГРЭС. *Техника и технология транспорта*, 33(2). EDN: <https://elibrary.ru/DAWDTE>
8. Айсина, Л. Р., & Хисамова, А. А. (2024). Перспективы организации движения пригородных электропоездов по модульному типу на Ленинградском направлении Октябрьской железной дороги. *Вестник транспорта Поволжья*, 4(106), 95–102. EDN: <https://elibrary.ru/YXRRRU>
9. Шматченко, В. В., Меремсон, Ю. Я., & Иванов, В. Г. (2022). Специфика безопасности движения на железнодорожных переездах. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, 19(1), 143–154. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-19-1-143-154>. EDN: <https://elibrary.ru/ZJQOXX>
10. Айсина, Л. Р. (2021). Анализ практического опыта развития транспортных услуг в сфере пригородных и пригородно-городских железнодорожных перевозок. В *Фёдор Петрович Кочнев — выдающийся организатор транспортного образования и науки в России: труды международной научно-практической конференции* (Москва, 22–23 апреля 2021 года, с. 255–260). Отв. редактор А. Ф. Бородин, сост. Р. А. Ефимов. Москва: Российский университет транспорта. EDN: <https://elibrary.ru/NSKZLF>
11. Вакуленко, С. П., Роменский, Д. Ю., & Айсина, Л. Р. (2020). Разработка предложений по обустройству одноуровневых пешеходных переходов через железнодорожные пути на участках с интенсивным движением поездов. *Вестник транспорта Поволжья*, 4(82), 44–51. EDN: <https://elibrary.ru/LXFTGO>
12. Карпущенко, Н. И., Величко, Д. В., & Колмогорова, Т. В. (2011). Проблема обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах. *Транспорт Российской Федерации*, 4(35), 47–50. EDN: <https://elibrary.ru/OJAADX>
13. Платов, А. А. (2014). Анализ аварийности и причин возникновения транспортных происшествий на железнодорожных переездах.

- Современные проблемы транспортного комплекса России*, 4(1), 38–42. EDN: <https://elibrary.ru/RUDLTZ>
14. Попов, А. Н., & Гришаев, С. Ю. (2020). Безопасность движения при остановке автотранспорта на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом. *Транспорт Урала*, 1(64), 39–42. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2020-1-39-42>. EDN: <https://elibrary.ru/BBNRUQ>
  15. Тарасов, Е. М., Железнов, Д. В., & Герус, В. Л. (2015). Оценка эффективности существующей переездной сигнализации. *Вестник транспорта Поволжья*, 6(54), 58–61. EDN: <https://elibrary.ru/VIUXON>
  16. Amaral, V., Marques, F., Lourenço, A., Barata, J., & Santana, P. (2016). Laser-based obstacle detection at railway level crossings. *Journal of Sensors*, 2016, Article ID 1719230. Получено с <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2016/1719230>
  17. Ballay, M., Sventeková, E., Kubiátko, T., & Macurová, L. (2019). The impact of critical elements on the formation and consequences of accident at railway crossings. В *Proceedings of 23rd International Scientific Conference Transport Means 2019* (pp. 963–969). Получено с [https://www.researchgate.net/publication/351307632\\_THE\\_IMPACT\\_OF\\_CRITICAL\\_ELEMENTS\\_ON\\_THE\\_FORMATION\\_AND\\_CONSEQUENCES\\_OF\\_ACCIDENT\\_AT\\_RAILWAY\\_CROSSINGS](https://www.researchgate.net/publication/351307632_THE_IMPACT_OF_CRITICAL_ELEMENTS_ON_THE_FORMATION_AND_CONSEQUENCES_OF_ACCIDENT_AT_RAILWAY_CROSSINGS)
  18. ГОСТ 9238-2013. *Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений*.
  19. Государственная компания «Российские автомобильные дороги». (2025). *Инновационное барьерное ограждение на пересечении ЦКАД и М-1 «Беларусь» доказало свою эффективность* [Электронный ресурс]. Получено с <https://russianhighways.ru/press/news/127930/>

### *References*

1. Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation. *Indicators of road safety status* [Online resource]. Retrieved from: <http://stat.gibdd.ru/>

2. Zhavoronkov, V. A. (2020). Features of road traffic accidents occurring at railway crossings and measures to prevent them. *Transport Law and Safety*, 1(33), 87–97. EDN: <https://elibrary.ru/GMVXXP>
3. Levin, D. Yu., Zo, A. Kh., & Shmal, V. N. (2013). What is needed to meet the schedule. *World of Transport*, 11(1(45)), 110–119. EDN: <https://elibrary.ru/QABPRF>
4. Shmal, V. N., Minakov, P. A., & Aisina, L. R. (2020). The task of organizing suburban and urban traffic on sections with branches. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XIII International Scientific Conference “Architecture and Construction 2020”* (Novosibirsk, September 22–24, 2020, Vol. 953, p. 012085). Bristol: IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/953/1/012085>. EDN: <https://elibrary.ru/SHDRCN>
5. Ryazanov, E. M., Zhuikov, M. V., & Pavlyukov, A. E. (2014). Modeling the performance of an electric train crash system in emergency collisions. *Transport of the Urals*, 4(43), 44–49. EDN: <https://elibrary.ru/TFCSDR>
6. Ercegovac, P., Stojić, G., Tanackov, I., & Sremac, S. (2022). Application of statistical analysis for risk estimate of railway accidents and traffic incidents at level crossings. *ENTRENOVA — ENTERprise REsearch InNOVation*, 8(1), 225–238. <https://doi.org/10.54820/entreno-va-2022-0021>. Retrieved from: <https://hrcak.srce.hr/ojs/index.php/entreno-va/article/view/23858>
7. Aisina, L. R., & Khisamova, A. A. (2024). Analysis of the feasibility of using modular organization of commuter electric train traffic on the Reshetnikovo — Tver and Reshetnikovo — Konakovo GRES sections. *Technique and Technology of Transport*, 33(2). EDN: <https://elibrary.ru/DAWDTE>
8. Aisina, L. R., & Khisamova, A. A. (2024). Prospects for organizing commuter electric train traffic using a modular approach on the Leningrad direction of the Oktyabrskaya Railway. *Bulletin of Transport of the Volga Region*, 4(106), 95–102. EDN: <https://elibrary.ru/YXRRRU>
9. Shmatchenko, V. V., Meremson, Yu. Ya., & Ivanov, V. G. (2022). Specific features of traffic safety at railway crossings. *Proceedings of Petersburg*

- Transport University*, 19(1), 143–154. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-19-1-143-154>. EDN: <https://elibrary.ru/ZJQOXX>
10. Aisina, L. R. (2021). Analysis of practical experience in developing transport services in the field of commuter and commuter-urban rail transportation. In *Fyodor Petrovich Kochnev — an outstanding organizer of transport education and science in Russia: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Moscow, April 22–23, 2021, pp. 255–260). Executive editor: A. F. Borodin; compiler: R. A. Efimov. Moscow: Russian University of Transport. EDN: <https://elibrary.ru/NSKZLF>
  11. Vakulenko, S. P., Romensky, D. Yu., & Aisina, L. R. (2020). Developing proposals for equipping at-grade pedestrian crossings over railway tracks in areas with intensive train traffic. *Bulletin of Transport of the Volga Region*, 4(82), 44–51. EDN: <https://elibrary.ru/LXFTGO>
  12. Karpushenko, N. I., Velichko, D. V., & Kolmogorova, T. V. (2011). The problem of ensuring traffic safety at railway crossings. *Transport of the Russian Federation*, 4(35), 47–50. EDN: <https://elibrary.ru/OJAADX>
  13. Platov, A. A. (2014). Analysis of accident rates and causes of transport incidents at railway crossings. *Modern Problems of the Russian Transport Complex*, 4(1), 38–42. EDN: <https://elibrary.ru/RUDLTZ>
  14. Popov, A. N., & Grishaev, S. Yu. (2020). Traffic safety when vehicles stop at railway crossings before an approaching train. *Transport of the Urals*, 1(64), 39–42. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2020-1-39-42>. EDN: <https://elibrary.ru/BBNRUQ>
  15. Tarasov, E. M., Zheleznov, D. V., & Gerus, V. L. (2015). Assessing the effectiveness of existing level crossing signaling. *Bulletin of Transport of the Volga Region*, 6(54), 58–61. EDN: <https://elibrary.ru/VIUXON>
  16. Amaral, V., Marques, F., Lourenço, A., Barata, J., & Santana, P. (2016). Laser-based obstacle detection at railway level crossings. *Journal of Sensors*, 2016, Article ID 1719230. Retrieved from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2016/1719230>
  17. Ballay, M., Sventeková, E., Kubiátko, T., & Macurová, L. (2019). The impact of critical elements on the formation and consequences of accident

at railway crossings. In *Proceedings of the 23rd International Scientific Conference “Transport Means 2019”* (pp. 963–969). Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/351307632\\_THE\\_IMPACT\\_OF\\_CRITICAL\\_ELEMENTS\\_ON\\_THE\\_FORMATION\\_AND\\_CONSEQUENCES\\_OF\\_ACCIDENT\\_AT\\_RAILWAY\\_CROSSINGS](https://www.researchgate.net/publication/351307632_THE_IMPACT_OF_CRITICAL_ELEMENTS_ON_THE_FORMATION_AND_CONSEQUENCES_OF_ACCIDENT_AT_RAILWAY_CROSSINGS)

18. GOST 9238-2013. *Dimensions of railway rolling stock and clearance envelopes*.
19. State Company “Russian Highways”. (2025). *Innovative barrier fencing at the intersection of the Central Ring Road and M-1 “Belarus” has proven its effectiveness* [Online resource]. Retrieved from: <https://russianhighways.ru/press/news/127930/>

#### **ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**Насыбуллин Айрат Марсович**, к.т.н., доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы»  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»  
ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация  
[nasybullin.airat@mail.ru](mailto:nasybullin.airat@mail.ru)

**Лутцева Полина Валентиновна**, студент

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»  
ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация

**Цурикова Арина Романовна**, студент

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»

*ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Airat M. Nasybullin**, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department Transport Business Management and Intelligent Systems”  
*Russian University of Transport*  
*9 build. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation*  
*nasybullin.airat@mail.ru*  
*SPIN-code: 1082-9336*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1814-4059>*

**Polina V. Lutseva**, student

*Russian University of Transport*  
*9 build. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation*

**Arina R. Tsurikova**, student

*Russian University of Transport*  
*9 build. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation*

Поступила 01.10.2025

После рецензирования 18.10.2025

Принята 26.10.2025

Received 01.10.2025

Revised 18.10.2025

Accepted 26.10.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-385

EDN: GRQUDG

УДК 656.61:351.86:007



Научная статья | Транспортные и транспортно-технологические системы

## СОСТОЯНИЕ СИНГУЛЯРНОСТИ БЕЗОПАСНОСТИ: ПЕРЕХОД К РЕФЛЕКСИВНОЙ СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*А.Е. Ранверсман*

### *Аннотация*

**Обоснование.** В исследовании обосновывается необходимость введения понятийного и модельного инструментария, позволяющего отразить динамику эволюции системы обеспечения транспортной безопасности. Развитие транспортного комплекса сопровождается изменениями, которые затрагивают инфраструктуру, технические средства и распределение функций между человеком и технологическим контуром, что приводит к формированию новых принципов управления безопасностью. В этой связи возникает потребность в аналитической модели уровней зрелости (С0-С5), которая позволяет проследить направление эволюции и определить структурные признаки перехода от регламентированных процедур к рефлексивному управлению. Одновременно вводится понятие «состояние сингулярности безопасности» как предельное состояние зрелости системы обеспечения транспортной безопасности, достигаемое за счёт перехода к саморегуляции и объединения технических, аналитических и человеческих компонентов в единый рефлексивный контур.

**Цель** – теоретическое обоснование концепции состояния сингулярности безопасности и разработка модели уровней зрелости (С0-С5) системы обеспечения транспортной безопасности, отражающей переход от традиционных организационно-регламенти-

рованных процедур к интеллектуально-адаптивным механизмам предупреждения угроз.

**Материалы и методы.** Главный метод исследования – моделирование, использованное для разработки модели уровней зрелости и построения рефлексивного контура функционирования системы обеспечения транспортной безопасности. Методологическую основу составляет системный и междисциплинарный подход, опирающийся на теории управления сложными и социотехническими системами, кибернетический подход и риск-ориентированную логику. Теоретическую и нормативную базу составили правовые акты Российской Федерации, международные документы ICAO и EASA, а также стратегические материалы Минтранса и Международного транспортного форума. В исследовании применялись системно-структурный и нормативно-правовой анализ, контент-анализ стратегических документов и логико-прогностические методы.

**Результаты.** В ходе исследования разработана модель уровней зрелости (C0-C5) и введено понятие «состояние сингулярности безопасности» как предельное состояние зрелости системы обеспечения транспортной безопасности. Оно характеризует этап, при котором система достигает уровня саморефлексии и саморегуляции, где механизмы реагирования и предотвращения угроз основаны на непрерывной самообновляемой модели управления рисками, а технические средства, аналитические модули и человеческое участие объединяются в единый рефлексивный контур. Полученные результаты могут быть использованы для диагностики уровня зрелости системы, определения направления её дальнейшей эволюции и обоснования требований к подготовке специалистов в условиях цифровой трансформации.

**Ключевые слова:** транспортная безопасность; модель уровней зрелости; состояние сингулярности безопасности; предиктивное управление; когнитивная интеграция; рефлексивный контур; цифровая трансформация

**Для цитирования.** Ранверсман, А. Е. (2025). Состояние сингулярности безопасности: переход к рефлексивной системе обеспе-

чения транспортной безопасности. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 221–261. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-385>

Original article | Transport and Transport-Technological Systems

## THE STATE OF SECURITY SINGULARITY: TRANSITION TOWARD A REFLEXIVE SYSTEM OF TRANSPORT SECURITY

*A.E. Ranversman*

### *Abstract*

**Background.** The study substantiates the need to introduce a conceptual and model-based framework capable of capturing the evolutionary dynamics of the transport security system. The ongoing transformation of the transport sector is accompanied by changes affecting infrastructure, technical means and the distribution of functions between human and technological components, which leads to the emergence of new principles of security governance. In this context, there is a growing need for a maturity-level analytical model (C0-C5) that makes it possible to trace the trajectory of this evolution and identify the structural features of the transition from regulatory procedures to reflexive forms of management. The study also introduces the concept of the “state of security singularity” as the limit state of maturity of the transport security system, achieved through the shift toward self-regulation and the integration of technical means, analytical modules and human participation into a unified reflexive-integrated loop.

**Purpose.** The study aims to conceptualize the state of security singularity and to develop a maturity-level model (C0-C5) that reflects the transition from traditional organizational and regulatory procedures to intellectually adaptive mechanisms of threat pre-emption.

**Materials and methods.** The principal research method is modeling, which was used to develop the maturity-level model (C0-C5) and to con-

struct the reflexive-integrated loop governing the functioning of the transport security system.

The methodological foundation is based on a systemic and interdisciplinary approach, drawing upon theories of complex and socio-technical systems, the cybernetic logic of security management, and a risk-oriented approach. The theoretical and regulatory basis of the study includes legal acts of the Russian Federation, ICAO and EASA documents, as well as strategic materials of the Ministry of Transport of the Russian Federation and the International Transport Forum. The research methods additionally include system-structural and normative-legal analysis, content analysis of strategic documents, and logic-prognostic (foresight) methods.

**Results.** The study proposes and theoretically grounds the concept of the “state of security singularity” as the limit state of maturity of the transport security system. It characterizes the stage at which the system reaches the level of self-reflection and self-regulation, where the mechanisms of response and threat prevention are based on a self-renewing risk management model, and the technical means, analytical modules and human participation are integrated into a unified reflexive-integrated loop. The maturity-level model (C0-C5) developed in the course of the research serves as the analytical framework for identifying the trajectory of this evolution and for assessing the degree of system readiness for further transitions. The obtained results can be used for diagnosing the level of system maturity, determining strategic directions of its development and defining competency requirements for security specialists under conditions of digital transformation.

**Keywords:** transport security; maturity-level model; state of security singularity; reflexive-integrated loop; self-renewing risk management; digital transformation; adaptive security architecture

**For citation.** Ranversman, A. E. (2025). The state of security singularity: transition toward a reflexive system of transport security. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 221–261. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-385>

## **Введение**

Развитие транспортного комплекса Российской Федерации на современном этапе ориентировано стратегическими приоритетами государственной политики, направленными на цифровую трансформацию, повышение технологической устойчивости и модернизацию механизмов обеспечения безопасности. В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации подчёркивается, что «большие вызовы создают существенные риски для общества, экономики, системы государственного управления, но одновременно представляют собой важный фактор для появления новых возможностей и перспектив научно-технологического развития» [1, п. 14]. Среди таких вызовов выделяются «новые гибридные внешние угрозы национальной безопасности, в том числе военные, террористические, информационные и биологические...» и «усиление их взаимосвязи с внутренними угрозами национальной безопасности» [1, п. 15, подп. ж]. Ответ на эти вызовы предполагает переход к новым технологическим и организационным моделям обеспечения безопасности. В том же документе указывается на необходимость перехода «к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении (...) результатов обработки больших объемов данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта» [1, п.21, подп. а], а также на приоритет развития систем, ориентированных на «укрепление (...) национальной безопасности страны в условиях роста гибридных угроз» [1, п. 21, подп. д].

Таким образом, федеральный стратегический курс задаёт направление, в рамках которого система обеспечения безопасности транспортного комплекса постепенно приобретает способности к опережающему управлению рисками и адаптивности к условиям изменяющихся угроз.

На сегодняшний день в транспортной отрасли данные положения реализуются в том числе через механизмы цифровизации и ин-

теграции информационно-аналитических компонентов. В Докладе о реализации Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года подчёркиваются развитие Единой государственной информационной системы обеспечения транспортной безопасности (ЕГИС ОТБ), внедрение интеллектуальных средств мониторинга и досмотра, оптимизация процессов обмена данными и повышение эффективности межведомственного взаимодействия [2]. Эти процессы формируют основу, задавая траекторию перехода от преимущественно регламентированного исполнения мер к управлению, основанному на анализе данных и оценке риска.

Однако темпы роста транспортных потоков дают основания предполагать, что текущая цифровая трансформация является лишь первым этапом адаптации системы к будущим условиям функционирования. Согласно долгосрочным прогнозам ICAO, мировой пассажирский авиапоток к 2045 году увеличится более чем в два раза по сравнению с докризисным периодом [3, с. 57]. Аналогичные тенденции представлены в ITF Transport Outlook 2023, где ожидается рост глобального пассажирского спроса на 79% к 2050 году и почти двукратное увеличение объёма грузовых перевозок [4, с. 15]. Расширение транспортной инфраструктуры и появление новых форм мобильности, включая беспилотные и аэромобильные системы, сопровождаются повышенными требованиями к устойчивости и адаптивности систем защиты. EASA отмечает, что ключевым условием общественного принятия аэромобильных систем является уровень безопасности, сопоставимый с авиационными стандартами [5, с. 73], что подтверждает определяющую роль факторов безопасности и управления рисками в устойчивом развитии новых транспортных технологий.

В этих условиях ключевое значение приобретает вопрос о предельных характеристиках развития системы обеспечения транспортной безопасности, связанный с пониманием того, каким образом может быть достигнута способность к опережающему

управлению рисками. В связи с этим в настоящем исследовании вводится понятие «состояние сингулярности безопасности» как предельного состояния зрелости системы обеспечения транспортной безопасности, чьё содержательное наполнение требует теоретического обоснования и дальнейшего раскрытия через модель уровней зрелости системы.

*Цель настоящего исследования* - теоретическое обоснование концепции состояния сингулярности безопасности и разработка модели уровней зрелости (C0-C5) системы обеспечения транспортной безопасности, отражающей переход от традиционных организационно-регламентированных процедур к интеллектуально-адаптивным механизмам упреждения угроз.

### **Материалы и методы**

Методологической основой исследования является системный и междисциплинарный подход, в рамках которого обеспечение транспортной безопасности рассматривается как интегрированная социотехническая система, включающая правовые, организационные, инженерно-технические и информационно-аналитические компоненты. Теоретическая база исследования опирается на положения теории управления сложными системами, кибернетического подхода, концепции риск-ориентированного управления, а также идеи адаптивности, описывающие механизмы самоорганизации и устойчивости управляемых систем.

В качестве методологической опоры используются нормативные правовые акты Российской Федерации в сфере транспортной безопасности, международные документы ICAO и EASA, а также стратегические материалы Международного транспортного форума и Министерства транспорта Российской Федерации.

В исследовании применяются следующие методы:

- системно-структурный анализ, позволяющий рассматривать систему обеспечения транспортной безопасности как многоуровневую иерархическую структуру;

- нормативно-правовой и контент-анализ, используемые для реконструкции логики развития национальных и международных документов;
- моделирование, применяемое при разработке модели уровней зрелости (C0-C5) и построении рефлексивного контура функционирования системы;
- логико-прогностический метод, позволяющий определить возможную траекторию эволюции системы обеспечения транспортной безопасности в условиях цифровой трансформации.

## **Результаты и обсуждение**

### **Эволюция теоретических и нормативных подходов к обеспечению транспортной безопасности**

Система обеспечения транспортной безопасности в России формировалась как ответ на необходимость институционализации мер защиты объектов транспортного комплекса от актов незаконного вмешательства. На ранних этапах безопасность обеспечивалась в формате общей охранной деятельности и ведомственного контроля без единой системы выявления и предотвращения угроз и без самостоятельного института транспортной безопасности [6].

Институционализация отрасли началась с авиационного транспорта. Воздушным кодексом от 1997 года впервые была введена обязанность обеспечения авиационной безопасности как самостоятельной деятельности, отличной от общей охраны. На общетранспортный уровень регулирование было распространено в 2007 году с принятием Федерального закона № 16-ФЗ «О транспортной безопасности», который оформил единую систему, определил её участников, базовые понятия и порядок применения мер, введя нормативное определение обеспечения транспортной безопасности как «реализация определяемой государством системы правовых, экономических, организационных и иных мер в сфере

транспортного комплекса, соответствующих угрозам совершения актов незаконного вмешательства» [7, п. 4, ст. 1].

С середины 2010-х годов развитие нормативной базы сопровождалось уточнением процедур категорирования объектов и оценки их уязвимости, а также дальнейшим упорядочением деятельности сил обеспечения транспортной безопасности. Данные изменения получили отражение в соответствующих методических рекомендациях для различных видов транспорта [8-11], что усилило формализованность процессов и повысило степень управляемости системы.

В настоящее время развитие международных подходов [12-14] ориентирует систему обеспечения транспортной безопасности на более высокий уровень информационной связности и аналитической поддержки принятия решений. В национальной практике эти тенденции проявляются через цифровизацию процессов и развитие ЕГИС ОТБ, что постепенно смещает акцент от разрозненной фиксации событий к их обработке и сопоставлению.

Таким образом, развитие нормативного регулирования и применение цифровых решений обеспечили институциональную зрелость системы, однако в условиях усложняющейся технологической среды механизм её функционирования определяется не только нормами, но и тем, каким образом между собой взаимодействуют уровни сбора, обработки и применения информации. Это требует её рассмотрения не только как правового института, но и как функционирующей модели с распределением ролей и уровней управления.

### **Структура действующей системы обеспечения транспортной безопасности с позиции кибернетики**

В рамках системного и междисциплинарного подхода обеспечение транспортной безопасности рассматривается как совокупность правовых, организационных, инженерно-технических и информационно-аналитических компонентов, направленных на защиту объектов транспортной инфраструктуры и транспортных

средств от актов незаконного вмешательства. В качестве объекта системно-структурного анализа выступают нормативные и стратегические документы, определяющие порядок функционирования и траекторию развития системы обеспечения транспортной безопасности [2; 7; 15-24]. Анализ указанных источников позволяет реконструировать её функционирование как многоуровневую структуру, включающую:

- сенсорный уровень, на котором технические средства фиксируют исходные данные о событиях и параметрах контролируемой среды, обеспечивая их доступность для последующей интерпретации исполнителями;
- аналитический уровень, на котором осуществляется интерпретация поступающих данных и оценка риска. В действующей модели он имеет человекоцентричный характер и реализуется на трёх плоскостях: (1) на операционном уровне - работниками подразделений транспортной безопасности через ситуативную оценку при осуществлении мер защиты; (2) на уровне субъекта транспортной инфраструктуры - через систематизацию и передачу информации по установленным каналам; (3) на федеральном уровне - через обобщение и интерпретацию поступающих сведений, результаты которых служат основанием для корректировки нормативного регулирования;
- стратегический уровень, на котором результаты агрегированной аналитики преобразуются в управленческие решения: (1) на федеральном уровне - через их отражение в нормативном регулировании; (2) на уровне субъекта транспортной инфраструктуры - через организационные и процедурные решения по реализации установленных норм и требований.

С позиций кибернетической теории управления система обеспечения транспортной безопасности представляет собой иерархическую многоуровневую структуру с элементами об-

ратной связи. В классическом понимании кибернетики эффективность функционирования любой системы определяется степенью замкнутости информационных контуров и способностью преобразовывать внешние возмущения в корректирующие действия [25; 26].

Применительно к транспортной безопасности это означает, что устойчивость системы определяется не только наличием сенсорных данных, но и скоростью возврата результатов проанализированных данных в управленческий контур, позволяя корректировать меры защиты. В идеальной кибернетической модели между этими уровнями формируются замкнутые обратные связи, при которых управленческие решения на стратегическом уровне определяют нормативную и организационную конфигурацию функционирования системы, влияющую на работу сенсорного и аналитического уровней, а те, в свою очередь, обеспечивают возврат актуализированных данных в управляющий контур. Такая взаимосвязанность обеспечивает адаптивность и предиктивность системы – способность не только реагировать на угрозы, но и прогнозировать их развитие.

На основе сопоставления идеальной кибернетической модели с действующей практикой функционирования системы обеспечения транспортной безопасности становится возможным сделать вывод, что реальное её исполнение характеризуется преобладанием управленческого контура, тогда как обратная связь между анализом данных и управленческим возвратом решения остаётся частично разомкнутой. Информационный обмен в установленных процедурах носит преимущественно отчётный характер, и переработанные сведения не всегда оперативно трансформируются в корректировку применяемых мер, что снижает способность системы к быстрой адаптации и упреждающему реагированию на изменение характера угроз. Устранение указанного разрыва возможно за счёт усиления предиктивных и адаптивных механизмов управления.

### **Концепции предиктивного и адаптивного управления безопасностью**

В современных условиях цифровой трансформации обеспечение безопасности становится затруднительным без прогнозирования и динамической коррекции управленческих решений. Это связано с тем, что технологическое развитие и усложнение угроз происходят быстрее, чем обновляются организационно-правовые механизмы реагирования. Указанные условия предопределяют обращение к концепциям предиктивного и адаптивного управления безопасностью, которые формируют переходный этап от регламентированной к рефлексивной модели функционирования системы.

Предиктивное управление безопасностью (от англ. predictive security management) основано на упреждающем выявлении потенциальных угроз и рисков до момента их реализации. В международной практике его ключевые принципы концептуально соотносятся с глобальными приоритетами ИКАО, сформулированными в Global Aviation Security Plan (в части повышения осведомлённости о рисках и упреждающего реагирования) [12, с. 16], а также с выводами ITF Transport Outlook 2023, где подчёркивается, что «Demand for passenger and freight transport will continue to grow in the coming decades across all world regions, regardless of the scenario» («Спрос на пассажирские и грузовые перевозки будет продолжать расти в предстоящие десятилетия во всех мировых регионах вне зависимости от сценария») [4, с. 74], что объективно усиливает необходимость более раннего принятия управленческих решений и прогнозно-ориентированного управления. Содержательно данный подход предполагает интеграцию данных, поступающих от технических средств и внешних источников аналитической информации в единый механизм прогнозирования риска.

В обобщённом виде принципы предиктивного управления могут быть представлены следующим образом:

- постоянный мониторинг и анализ динамических параметров среды;

- использование методов машинного обучения и искусственного интеллекта для прогнозирования рисков;
- ранжирование угроз по вероятности и критичности последствий;
- реализация упреждающих мер защиты без ожидания наступления события.

Применительно к транспортной безопасности предиктивный подход обеспечивает переход от фиксированных регламентов к риск-ориентированным сценариям реагирования и способствует формированию интеллектуальных систем поддержки решений.

Адаптивное управление безопасностью является развитием предиктивного подхода и направлено на поддержание устойчивости системы при изменяющихся внешних условиях. Его методологическая основа восходит к общей теории систем и идеям самоорганизующегося поведения сложных систем [27-30]. В отличие от предиктивного управления, ориентированного на упреждающее обнаружение угроз, адаптивное управление обеспечивает динамическую перенастройку системы в зависимости от текущего уровня риска и контекста событий. В обобщённом виде к его характерным принципам относятся:

- наличие механизма непрерывной обратной связи между сенсорным, аналитическим и стратегическим уровнями;
- самообучение системы на основе накопленных данных о нарушениях и результатах реагирования;
- перераспределение ресурсов и приоритетов в зависимости от контекста ситуации;
- динамическая оптимизация мер защиты с учётом вероятностной оценки риска.

Реализация адаптивного управления предполагает усиление интеллектуальных модулей анализа и корректировки мер защиты на основе текущих параметров риска, а также более глубокую интеграцию информационно-аналитических платформ и данных от технических средств обеспечения транспортной безопасности. В

нормативно-стратегическом контексте данная логика развития отражена в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года, где в числе приоритетов обозначается развитие интеллектуальных транспортных систем и расширение применения цифровых технологий.

Таким образом, концепции предиктивного и адаптивного управления образуют взаимосвязанный контур развития системы обеспечения транспортной безопасности: первая обеспечивает упреждающее прогнозирование угроз, вторая – адаптацию к изменяющимся условиям. Их сочетание формирует методологическую основу рефлексивной модели, характеризующейся когнитивной интеграцией человека, технологий и нормативной среды и создаёт теоретические предпосылки для разработки модели уровня зрелости системы обеспечения транспортной безопасности.

### **Сущность и категориальные признаки состояния сингулярности безопасности**

Понятие «сингулярность» в строгом научном смысле сформировалось в математике. В современном математическом подходе сингулярность описывается как состояние, при котором объект перестаёт соответствовать нормальному (регулярному) режиму описания. Как указывают Г.-М. Гройль, К. Лоссен и Е. Шустин, «... singularities ... always refer to a situation which is not regular, that is, not the usual, or expected, one» («...сингулярности... всегда относятся к ситуации, которая не является регулярной, то есть выходит за пределы обычного или ожидаемого состояния») [31, с. 1].

В классической кибернетике зарождение категории сингулярности связано с развитием идеи замкнутого контура саморегулирования, при котором система перестаёт быть объектом внешнего управления и приобретает способность поддерживать собственные параметры функционирования. У Н. Виннера эта логика впервые была описана через принцип автономного поддержания состояния системы: «There are, however, feedback chains in which no

human element intervenes» («Однако существуют такие контуры обратной связи, в которых участие человека отсутствует.») [25, с. 131]. Этот пример является исходной формой саморегуляции, из которой в последующем развивается концепция предельных состояний управляемых систем.

Дальнейшее развитие эта логика получила у У.Р. Эшби, который связывает предельное состояние управляемой системы с её способностью самостоятельно изменять собственную организацию в ответ на нарушение устойчивости. Описывая механизм ультраустойчивости, Эшби фиксирует не просто реакцию на воздействие среды, а поиск системой такого внутреннего состояния, при котором корректировка перестает требовать внешнего управляющего воздействия. Этот процесс он объясняет следующим образом: «If the field leads the point to a critical state, a step-function will change value and the field will be changed. If the new field again leads the point to a critical state, again a step-function will change and again the field will be changed; and so on. The two factors, then, generate a process» («Если поле приводит точку к критическому состоянию, шаг-функция изменяет своё значение и тем самым изменяет поле. Если новое поле снова приводит точку к критическому состоянию, шаг-функция вновь изменяется, и поле снова меняется; и так далее. Таким образом эти два фактора порождают процесс») [26, с. 91].

Далее он уточняет, что результатом такого процесса становится избирательное удержание устойчивых состояний: «... an ultrastable system acts selectively towards the fields of the main variables, rejecting those that lead the representative point to a critical state but retaining those that do not» («...ультраустойчивая система действует избирательно по отношению к возможным полям основных переменных: отклоняющие её в критическое состояние отбрасываются, а не приводящие к критическим состояниям – сохраняются») [26, с. 91].

Тем самым Эшби формализует переход от адаптации как внешнего исправления к самонастройке как внутреннему свойству систе-

мы – именно это концептуально лежит в основании будущей категории сингулярности как предельного состояния управляемой системы.

В советской школе кибернетики идея предельного состояния системы, в котором управление перестаёт быть внешним и становится внутренне присущим свойством самой системы, была концептуально сформулирована в работе А. А. Соболева, А. И. Китова и А. А. Ляпунова «Кибернетика - общие черты» [32]. Авторы показали, что высший уровень развития управляемой системы связан с переходом от внешнего регулирования к такому режиму, при котором система изменяет собственные параметры и алгоритм функционирования, опираясь на результаты собственной работы и механизм обратной связи. Иными словами, корректирующее воздействие перестаёт поступать извне и становится частью внутреннего контура функционирования системы.

Таким образом, высший этап развития управляемой системы можно охарактеризовать как состояние, при котором механизм регулирования превращается во внутреннее свойство самой системы. Система не только реагирует на внешние воздействия, но и самостоятельно перестраивает собственные параметры и алгоритм функционирования на основе результатов собственной работы.

Перенос данной логики в сферу транспортной безопасности возможен ввиду того, что современные технические средства обеспечения транспортной безопасности уже обладают отдельными признаками кибернетических систем, включающих элементы обратной связи. Они фиксируют параметры контролируемого объекта, осуществляют их первичную интерпретацию и сигнализируют о наличии потенциального отклонения (например, выделение зоны интереса на рентгенотелевизионном изображении, подача тревожного сигнала стационарным металлоискателем или детектором паров взрывчатых веществ). При этом формирование решения о применении мер воздействия остаётся внешним по отношению к технологическому контуру и осуществляется работником подразделения транспортной безопасности. Таким образом, тех-

нологический контур уже приобретает элементы предиктивности, однако полный цикл – от обнаружения к выбору и инициированию реагирования – остаётся незамкнутым и составляет границу перехода к состоянию сингулярности безопасности.

В данном исследовании *состояние сингулярности безопасности* представляет собой *предельное состояние зрелости системы обеспечения транспортной безопасности, при котором она достигает уровня саморефлексии и саморегуляции, когда механизмы реагирования и предотвращения угроз основаны на непрерывной самообновляемой модели управления рисками, а технические средства, аналитические модули и человеческое участие объединяются в единый рефлексивный контур.*

При этом важно подчеркнуть, что состояние сингулярности безопасности не тождественно технологической сингулярности. В последнем случае акцент смещается на автономизацию алгоритмов и утрату контроля со стороны человека, тогда как в системе обеспечения транспортной безопасности сохраняется обязательное участие работника, выполняющего функцию носителя правовой и ситуационной ответственности. Таким образом, сингулярность безопасности означает не отказ от человеческого участия, а его трансформацию – от операционной деятельности к когнитивно-аналитической.

Категориальные признаки состояния сингулярности безопасности могут быть представлены в следующем виде:

- целостность информационно-управленческого цикла, обеспечивающего замкнутость обратных связей;
- способность системы к самообновлению процедур реагирования на основе анализа накопленных данных;
- переход от статических алгоритмов контроля к динамически формируемым сценариям безопасности;
- интеграция технических, аналитических и организационных контуров в единую рефлексивную логику функционирования;

- смещение роли работника от оператора технических систем к интерпретатору данных и модератору управленческих решений;
- опережающий характер реагирования, основанный на прогнозной модели оценки риска.

Перечисленные признаки формируют основание для последующей операционализации сингулярности безопасности через модель уровней зрелости системы обеспечения транспортной безопасности (C0-C5), в которой состояние сингулярности будет выступать предельным уровнем зрелости развития системы (уровень C5).

### **Модель и структурное описание уровней зрелости системы обеспечения транспортной безопасности (C0-C5)**

Для того чтобы отразить движение системы обеспечения транспортной безопасности от текущего состояния к предельному уровню зрелости, необходим инструмент, позволяющий зафиксировать промежуточные стадии её развития. Модель, отражающая данную траекторию, представлена в виде последовательности уровней зрелости (C0-C5) системы.

Поскольку модель представлена в ступенчатой визуально-структурной форме (матрица уровней и графическая схема), её внешнее восприятие может быть сопоставлено с известными maturity-подходами (СММІ, ISO/IEC 330xx (SPICE), BPMМ, ITIL, COBIT, OPM3). Однако сходство ограничивается исключительно формой представления, тогда как содержательно данный инструмент фиксирует не степень формализованности процессов, а изменение самой логики функционирования системы и источника инициирования реагирования – от организационно-регламентированной логики управления к рефлексивной (саморегулируемой) среде, в которой упреждение угроз становится внутренним свойством системы.

Для операционализации данной логики далее приводится концептуальная матрица уровней зрелости (C0-C5), задающая структурные признаки переходов между состояниями системы (Таблица 1).

Таблица 1.

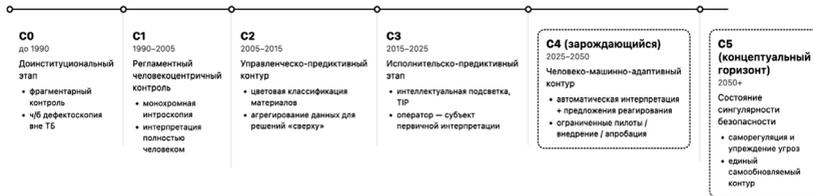
**Матрица уровней зрелости системы обеспечения  
транспортной безопасности (C0–C5)**

<b>Уровень</b>	<b>Тип управ- ленческого контура</b>	<b>Функци- ональная роль работ- ника ПТБ</b>	<b>Уровень инте- грации данных</b>	<b>Модель реа- гирования</b>
<b>C0 доинституци- ональный</b>	отсутствует	отсутствует (институт не сформиро- ван)	данные не соби- раются системно	реагирование постфактум, эпизодиче- ское
<b>C1 регламент- ный</b>	норматив- но-регла- ментирован- ный	исполнитель в пределах полномочий	разрозненные данные, отчёт- ный характер	реагирование по факту, по алгоритму
<b>C2 управленче- ско-предик- тивный</b>	управленче- ско-предик- тивный	исполнитель без само- стоятельной риск-интер- претации	агрегированные данные для управленческих решений	упреждаю- щее реаги- рование по указанию руководства
<b>C3 исполнитель- ско-предик- тивный</b>	исполни- тельно-пред- диктивный	исполнитель как субъект первичной интерпрета- ции риска	сквозная инте- грация данных для опоры на собственную оценку	упреждаю- щее реаги- рование по инициативе исполнителя
<b>C4 адаптивный</b>	человеко- машинно- адаптивный	верификатор и модератор предложений системы	автоматическая интерпретация данных и пред- варительная классификация угроз	адаптивное реагирование в режиме реального времени
<b>C5 состояние сингулярно- сти безопасности</b>	рефлексив- ный (само- регулируе- мый)	когнитивный надзор за системой	единый само- обновляемый контур	рефлективная саморегуля- ция и упре- ждение

Перечисленные уровни отражают не только логическую, но и технологическую динамику развития системы обеспечения транспортной безопасности. При этом важно отметить, что в реальной практике отрасль находится в переходной зоне между уровнями C2-C3, тогда как элементы C4 присутствуют лишь точечно – в фор-

мате пилотных решений и отдельных технологических внедрений. Уровень C5 рассматривается как предельный этап зрелости, имеющий концептуальный характер.

Для демонстрации этой динамики уместно представить модель уровней зрелости в виде временной последовательности, отражающей переход от исторически сложившихся форм контроля к рефлексивной форме управления и интеллектуально-адаптивным механизмам предупреждения угроз (рисунок 1). При этом важно подчеркнуть, что временная шкала сформирована на основе мировой технологической эволюции, поскольку именно она наиболее полно отображает логику смены уровней. Национальное развитие соотносится с этой шкалой не по календарным датам, а по достигнутому уровню зрелости и фактической глубине применения технологий.



Примечание. Временные рамки отражают международную эволюцию технологий; в национальных практиках возможно отставание внедрения. Уровни C4–C5 – целевая траектория, не доминирующая на текущем этапе.

**Рис. 1.** Временная шкала модели уровней зрелости системы

Для наглядности дальнейшее изложение структуры уровней зрелости представлено последовательно - от начального состояния (C0) к предельному (C5). Каждый уровень фиксирует качественные изменения в механизмах управления, роли работника подразделения транспортной безопасности, характере обработки данных и модели реагирования. Ниже приводится их содержательное описание.

*Уровень C0 - доинституциональный*

Уровень C0 характеризует состояние, предшествующее формированию системы обеспечения транспортной безопасности

как самостоятельного института. Управление транспортной безопасностью на данном этапе носит фрагментарный и преимущественно реактивный характер, опираясь не на систему управления рисками, а на общие меры охраны объектов и контроля доступа. Технические средства обеспечения транспортной безопасности отсутствуют либо используются эпизодически и не встраиваются в единую информационную среду. Обработка данных не осуществляется в системном режиме, что исключает возможность аналитики и прогнозирования. Работник подразделения транспортной безопасности как профессиональная единица не присутствует, поскольку соответствующая функция ещё не институционализована. Реагирование на угрозы осуществляется по факту их проявления и не носит упреждающего или адаптивного характера.

*Уровень С1 - регламентный*

Уровень С1 отражает этап, на котором система обеспечения транспортной безопасности функционирует исключительно в рамках предписанных процедур и алгоритмов реагирования. Распознавание угрозы происходит только после её проявления, а действия работника подразделения транспортной безопасности носят реактивный характер. Функциональная роль работника ограничивается исполнением регламентированных действий в пределах установленных полномочий. Принятие решения происходит не в результате оценочной деятельности, а в силу наступления формально определённого события (например, срабатывания технического средства или выявления факта нарушения). Информация о происшествиях фиксируется и передаётся для последующего анализа, однако результаты этого анализа возвращаются в систему лишь через нормативно установленные изменения и не преобразуются в оперативно доступный механизм превентивного управления. На данном уровне отсутствует самостоятельная интерпретация риска, а реагирование осуществляется постфактум, строго в соответствии с закреплёнными алгоритмами.

*Уровень С2 – управленческо-предиктивный*

На уровне С2 упреждение угроз реализуется через управленческие решения, поступающие сверху и доводимые до исполнителей руководством подразделения. Руководитель не формирует прогноз самостоятельно, а транслирует полученную информацию и связанные с ней меры, такие как введение усиленных мер защиты, изменение уровня безопасности или установление дополнительных требований к досмотру. Исполнитель по-прежнему действует в рамках регламентированных процедур, однако реагирование инициируется не фактом наступления события (как на уровне С1), а поступившим управленческим сигналом. Предиктивность на данном этапе носит централизованный характер и выражается в том, что система начинает реагировать упреждающе, хотя инициатива остаётся на стороне вышестоящего звена.

*Уровень С3 – исполнительско-предиктивный*

На уровне С3 способность к предвосхищению угроз появляется на уровне исполнителя. Работник подразделения транспортной безопасности принимает решение о применении мер усиленного контроля не только после наступления события и не в результате управленческого решения, а исходя из самостоятельной оценки складывающейся обстановки. Основанием для такого решения становятся наблюдаемое поведение лица, особенности его действий, несоответствие намерений и контекста ситуации, а также совокупность внешних признаков, свидетельствующих о возможном риске. Впервые появляется возможность упреждающего реагирования «на месте», когда инициатива запуска мер исходит от исполнителя. Руководитель сохраняет координирующую и подтверждающую роль, однако исходная точка распознавания риска смещается на уровень непосредственного исполнителя, что отражает переход от строго регламентированной модели к модели, включающей элементы самостоятельной оценочной деятельности.

*Уровень С4 – человеко-машинно-адаптивный*

На данном уровне первичное распознавание и предварительная классификация угроз осуществляется техническими средствами и информационными системами, способными автоматически интерпретировать поступающие данные и определять вероятность наличия риска. Система не ограничивается сигнализацией факта отклонения, а формирует предложение по реагированию, которое подтверждается или корректируется работником подразделения транспортной безопасности. Человек остаётся носителем итогового управленческого решения, однако иницилирующее звено смещается от исполнителя к технологическому контуру, что обеспечивает адаптивность реагирования и сокращает временной разрыв между моментом выявления потенциальной угрозы и началом применения мер по защите.

*Уровень С5 - состояние сингулярности безопасности*

Уровень С5 представляет предельную стадию зрелости системы обеспечения транспортной безопасности, при которой механизм предотвращения угроз становится саморегулируемым и действует упреждающе не только во временном, но и в пространственном отношении. В отличие от предыдущих уровней, где инициатива реагирования принадлежит либо руководящему звену, либо исполнителю, на уровне С5 исходная точка принятия решения смещается в технологический контур: система самостоятельно выявляет, интерпретирует и иницирует применение мер до момента соприкосновения потенциального нарушителя с рубежами контроля.

Ключевым отличием данного уровня является перенос фильтрации угроз за пределы точки досмотра, в так называемую зону предварительного упреждения, что позволяет не допускать концентрации рисков в области непосредственного контроля и сохранять пропускную способность объекта транспортной инфраструктуры. Перераспределение пассажиропотока либо перевод отдельных лиц в зоны углублённого контроля осуществляется автоматически на ос-

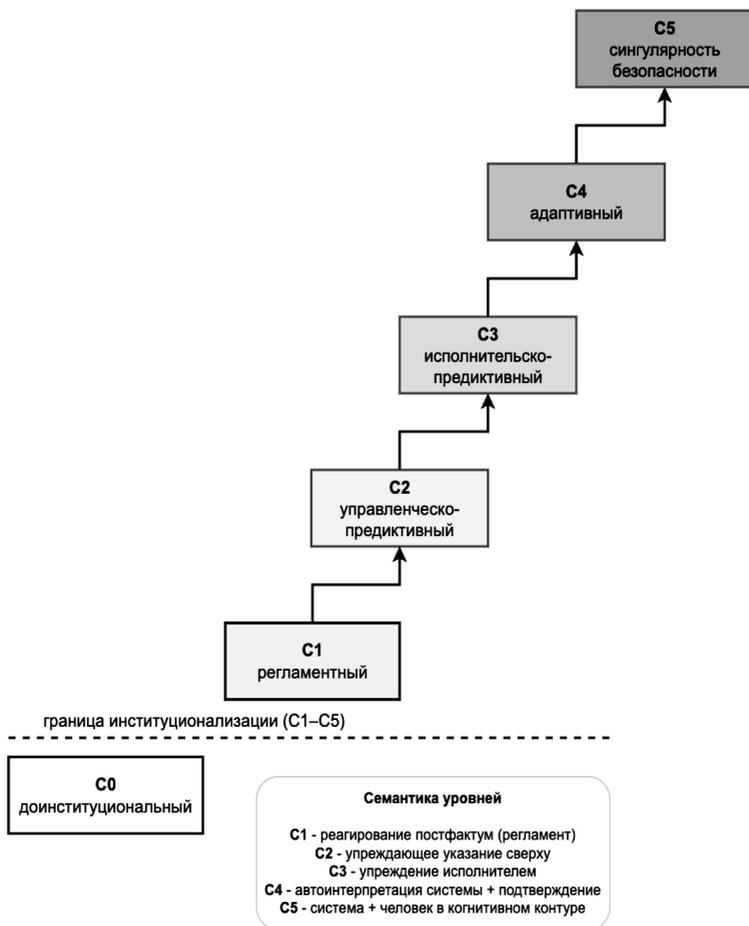
нове динамической конфигурации параметров безопасности, формируемой системой в режиме реального времени.

На этом уровне участие работника подразделения транспортной безопасности носит характер когнитивного надзора и выражается не в иницировании реагирования, а в проверке корректности исполнения автоматически сформированных системой решений в сложных или неоднозначных ситуациях, когда требуется экспертное толкование конкретных обстоятельств. Доступ к информации о потенциальных рисках обеспечивается через расширенные визуальные интерфейсы (AR/VR-очки, ситуационные панели, когнитивные терминалы), позволяющие получать не только сигнал о наличии потенциальной угрозы, но и видеть предшествующую динамику – изменение параметров потока, особенности траектории перемещения и другие индикаторы риска.

В конечном виде уровень C5 характеризует переход к саморефлективной модели безопасности, в которой предотвращение угроз становится внутренним свойством системы, а не реакцией на внешнее событие. Отличительной чертой является не только автоматическое выявление и инициация мер защиты, но и способность системы пересматривать собственные параметры функционирования в реальном времени, обеспечивая устойчивость к изменению профиля угроз без остановки процессов и без снижения пропускной способности. Человек сохраняется в контуре управления как гарант правомерности и корректности применения мер безопасности, однако его участие носит надсистемный характер и направлено на поддержание доверия и легитимности работы технологического контура. Тем самым сингулярность безопасности представляет собой состояние, при котором система обладает свойством самонастройки, самоподдержания и упреждающего предотвращения рисков без необходимости иницирования реагирования со стороны человека.

Эволюция системы обеспечения транспортной безопасности представлена в виде ступенчатой модели уровней зрелости

(C0-C5), отражающей переход от доинституционального состояния к предельному уровню, при котором управление приобретает рефлексивный характер. Блок-схема иллюстрирует изменение источника инициирования реагирования: от традиционных организационно-регламентированных процедур к интеллектуально-адаптивным механизмам упреждения угроз.



**Рис. 2.** Блок-схема модели уровней зрелости системы обеспечения транспортной безопасности (C0–C5)

Для того чтобы диагностировать не только уровень участия человека в принятии решений, но и степень технологической оснащённости системы, модель зрелости должна рассматриваться в двух взаимосвязанных контурах – человеческом и техническом. Первый отражает распределение субъектности и инициативы в реагировании, второй – глубину и характер выявления угроз техническими средствами. Однако на практике развитие системы обеспечения транспортной безопасности связано не только с технологическими и когнитивными изменениями, но и с эволюцией управленческой архитектуры, определяющей, каким образом решения возникают и распространяются внутри системы.

Поэтому зрелость системы проявляется одновременно в трёх контурах:

- техническом (уровень автономности выявления угроз),
- информационно-аналитическом (глубина обработки и интерпретации данных),
- организационно-нормативном (характер управленческого цикла и распределение инициативы).

Именно сочетание этих трёх контуров позволяет объективно определить, на какой стадии развития находится система и насколько она приближается к состоянию сингулярности безопасности. Сводная оценка представлена в таблице 2.

Таблица 2.

**Индикаторы проявления уровней зрелости (C0–C5) с учётом роли исполнителя и технических средств**

Блок	Критерии	Индикатор проявления (с примерами)	Уровень модели	Роль исполнителя
(предсистемный уровень)			C0	Профессиональный субъект ещё отсутствует (функция не институционализирована)

<b>Технический</b>	Степень автономности первичного выявления угроз	Средства фиксируют факт наличия потенциально опасного объекта без участия работника (пример: стационарный металлоискатель (рамка) подаёт сигнал, если обнаружен металл)	С2	Исполнитель реагирует только после сигнала, без интерпретации
	Адресное указание зоны внимания	Система не только сигнализирует, но и локализует предполагаемую область риска (пример: радиоскопическая установка (портал) или рентгенотелевизионная установка (интроскоп) выделяет «зону интереса»)	С3	Исполнитель использует локализацию для оценки и инициирует реагирование
	Автоматизация интерпретации	Алгоритм не просто фиксирует, но классифицирует объект (пример: интеллектуальные интроскопы нового поколения, определяющие тип предмета — «жидкость», «нож», «оружие», и предлагающие меру реагирования)	С4	Исполнитель подтверждает или корректирует решение системы
	Пространственно-упреждающее предотвращение	Система перераспределяет потоки до точки контроля, автоматически перенаправляет риск-субъектов (пример: интеллектуальная перенастройка маршрута до входа в зону досмотра)	С5	Исполнитель в роли когнитивного надзора

<b>Информационно-аналитический</b>	Тип обрабатываемых данных	Используется совокупность признаков, а не единичное срабатывание (пример: видеоаналитика отслеживает траекторию перемещения лица, сопоставляя несколько параметров поведения)	C3	Исполнитель дополняет технический сигнал контекстной оценкой и инициирует реагирование «на месте»
	Интеграция источников данных	Данные от разных технических средств объединяются в единый аналитический контур (пример: система сопоставляет данные от интроскопа и портала без участия человека)	C4	Исполнитель выполняет адаптивно-корректирующую роль (подтверждает или корректирует решение системы)
	Формат представления информации	Применяются когнитивные интерфейсы (AR/VR, ситуационные панели), обеспечивающие динамическую картину риска	C5	Исполнитель осуществляет когнитивный надзор: подключается только при неоднозначности результата
	Характер управленческого уровня	Управление строится по схеме: «событие > фиксация > передача > последующее решение». Корректировка всегда запаздывает	C1	Исполнитель действует строго по регламенту, без оценочной деятельности
	Источник инициирования изменений	Решение о введении мер (усиление контроля, изменение уровня безопасности) исходит исключительно сверху и доводится до исполнителя через руководство	C2	Исполнитель исключительно исполняет управленческое решение, не участвует в его формировании

<b>Организа- ционно-норма- тивный</b>	Локальная инициатива	Допускается упре- ждающее реагирова- ние на месте в пре- делах полномочий исполнителя	C3	Исполнитель впервые становится инициато- ром приме- нения мер до внешнего распоряже- ния
	Динамичность и адаптив- ность	Корректировка мер происходит в процессе функци- онирования, а не постфактум	C4	Исполнитель выполняет адаптивную функцию - подтвержда- ет/коррек- тирует ре- шение, по- рождаемое системой
	Предиктив- ность орга- низационной среды	Управленческие ме- ханизмы работают упреждающе, меры конфигурируются до входа угрозы в зону контроля	C5	Исполнитель выполняет надзорную (когни- тивную) функцию, а не операци- онную

*Примечание:* стационарные и ручные металлоискатели и иные устройства сигнализационного типа относятся к уровню C2, поскольку фиксируют единичный признак и не выполняют аналитическую интерпретацию риска. Они не могут быть отнесены к уровню C3, так как не обеспечивают распознавания устойчивых поведенческих или корреляционных признаков угрозы.

Таким образом, представленная модель демонстрирует, что развитие системы обеспечения транспортной безопасности не сводится к модернизации технических средств, а представляет собой последовательную трансформацию распределения субъектности между человеком и технологическим контуром. Сдвиг от реактивного исполнения к упреждающему реагированию, а затем –

к когнитивному надзору отражает переход от организационно-регламентированной системы к самонастраивающейся среде безопасности. Это создаёт методологические основания для оценки степени зрелости системы и позволяет выявить условия, при которых возможно достижение состояния сингулярности безопасности.

### **Заключение**

Проведённое исследование позволило обосновать концептуальный переход от традиционной регламентной модели обеспечения транспортной безопасности к модели уровней зрелости (C0-C5), в которой состояние сингулярности безопасности понимается как предельное состояние зрелости системы обеспечения транспортной безопасности, при котором она достигает уровня саморефлексии и саморегуляции, когда механизмы реагирования и предотвращения угроз основаны на непрерывной самообновляемой модели управления рисками, а технические средства, аналитические модули и человеческое участие объединяются в единый рефлексивный контур.

Разработанная модель показывает, что движение к состоянию сингулярности безопасности носит поступательный характер и предполагает последовательное перераспределение инициативы внутри системы: от нормативно установленного реагирования (C1) и управленческого упреждения угроз (C2) – к субъектности исполнителя при принятии решений (C3), далее к технологически иницируемому реагированию в связке «человек-машина» (C4) и, наконец, к когнитивному надзору в условиях саморегулируемого контура (C5), где человек сохраняет надсистемную функцию контроля правомерности и легитимности решений. Таким образом, достижение состояния сингулярности безопасности выступает не как одномоментный скачок, а как логический результат эволюционного усложнения механизмов управления рисками.

Полученные результаты могут быть использованы для диагностики уровня зрелости системы, определения направления её

дальнейшей эволюции и обоснования требований к подготовке специалистов в условиях цифровой трансформации.

Развитие системы обеспечения транспортной безопасности в логике представленной модели требует переосмысления роли человека и механизмов нормативного регулирования. По мере приближения к адаптивным и рефлексивным уровням (С4–С5) меняется характер участия работника: от операционного исполнения – к аналитической интерпретации данных и контролю корректности функционирования технологического контура. Это, в свою очередь, предполагает смещение акцента подготовки с процедурных навыков на когнитивные и прогностические компетенции, связанные с оценкой риска, ситуационным анализом и подтверждением правомерности автоматизированных решений, а также поэтапную эволюцию нормативно-технической базы в сторону включения механизмов цифровой поддержки и упреждающего реагирования.

Дальнейшее развитие данной линии исследования связано с определением условий достижения уровня С5 в реальной практике, которые включают требования к профессиональной подготовке работников, обновлению нормативной базы, а также уточнение структуры взаимосвязи технических и аналитических систем. Это задаёт направление для последующих исследований, ориентированных на переход от концептуальной модели к операционализации принципов состояния сингулярности безопасности в отраслевой практике.

### *Список литературы*

1. Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (2024). Получено с официального интернет-портала правовой информации.
2. Доклад о реализации Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (2025). Получено с официального интернет-портала Министерства транспорта Российской Федерации.

3. Международная организация гражданской авиации (2019). *Aviation Benefits Report 2019*. Монреаль: ИКАО. Получено с: <https://icao.assyst-uc.com/sites/default/files/sp-files/sustainability/Documents/AVIATION-BENEFITS-2019-web.pdf> (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
4. Международный транспортный форум (2023). *ITF Transport Outlook 2023*. Париж: OECD/ITF. <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>
5. Европейское агентство по авиационной безопасности (2021). *Study on the Societal Acceptance of Urban Air Mobility in Europe*. Cologne: EASA. Получено с: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-full-report.pdf> (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
6. Попов, Е. А., Штырхунова, Н. А., & Абрамян, С. К. (2021). Эволюция транспортной безопасности в России. *Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки*, (4-2), 126–128. <https://doi.org/10.23672/x7501-1481-8798-n>. EDN: <https://elibrary.ru/RGBUHA>
7. Федеральный закон № 16-ФЗ от 9 февраля 2007 г. «О транспортной безопасности» (2007). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_66069/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
8. ГОСТ Р 57119-2016. *Методика проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств. Общие требования* (2019). Москва: Стандартинформ, 18 с.
9. Распоряжение Федерального дорожного агентства от 10 ноября 2014 г. № 2159-р «Об издании и применении ОДМ 218.6.013-2014 „Методические рекомендации по разработке планов обеспечения транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств городского наземного электрического транспорта“» (2014). Получено с официального интернет-портала Федерального дорожного агентства Росавтодор: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/prikazy-rasporyazheniya/12717> (дата обращения: 16 октября 2025 г.).

10. Распоряжение Росавтодора от 15 ноября 2011 г. № 871-р «Об издании и применении ОДМ 218.4.007-2011 „Методические рекомендации по проведению оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры в сфере дорожного хозяйства“ (вместе с „ОДМ 218.4.007-2011. Отраслевой дорожный методический документ“») (2011). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_125293/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125293/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
11. Приказ Росжелдора от 7 марта 2013 г. № 73 «Об отмене приказа Росжелдора от 25 октября 2011 г. № 515 „Об утверждении Методических рекомендаций по проведению оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств железнодорожного транспорта“» (2013). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_145508/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145508/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
12. Международная организация гражданской авиации (2024). *Global Aviation Security Plan*. Монреаль: ИКАО. Получено с: [https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/Security/Documents/GLOBAL AVIATION SECURITY PLAN 2nd Ed.RU.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/Security/Documents/GLOBAL%20AVIATION%20SECURITY%20PLAN%202nd%20Ed.RU.pdf) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
13. Международная организация гражданской авиации (2017). *Aviation Security Manual* (Doc 8973) (10-е изд.). Монреаль: ИКАО. ISBN: 978-92-9258-277-7
14. Европейское агентство по авиационной безопасности (2023). *Artificial Intelligence Roadmap 2.0. A Human-Centric Approach to AI in Aviation*. Cologne: EASA. Получено с: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-roadmap-20> (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
15. Постановление Правительства Российской Федерации от 5 октября 2020 г. № 1605 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищённости объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов

- транспортной инфраструктуры воздушного транспорта» (2020). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_364707/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364707/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
16. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 октября 2020 г. № 1633 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищённости объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта» (2020). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_365316/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365316/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
  17. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 октября 2020 г. № 1637 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, учитывающих уровни безопасности для транспортных средств морского и внутреннего водного транспорта» (2020). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_364993/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364993/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
  18. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 октября 2020 г. № 1638 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищённости объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры морского и речного транспорта» (2020). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_364994/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364994/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
  19. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 октября 2020 г. № 1640 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, учитывающих уровни безопасности для транспортных средств автомобильного транспорта и город-

- ского наземного электрического транспорта» (2020). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_364995/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364995/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
20. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 октября 2020 г. № 1641 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищённости объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов инфраструктуры внеуличного транспорта (в части метрополитенов)» (2020). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_365322/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365322/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
21. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 октября 2020 г. № 1642 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищённости объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры автомобильного транспорта» (2020). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_365313/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365313/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
22. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2020 г. № 2201 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищённости объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры дорожного хозяйства» (2020). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_371982/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371982/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
23. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» (2021). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_3363/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_3363/)

- ru/document/cons\_doc\_LAW\_402052/ (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
24. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 16 февраля 2011 г. № 56 «О Порядке информирования субъектами транспортной инфраструктуры и перевозчиками об угрозах совершения и о совершении актов незаконного вмешательства на объектах транспортной инфраструктуры и транспортных средствах» (2011). Получено из СПС «КонсультантПлюс»: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_112010/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_112010/) (дата обращения: 16 октября 2025 г.).
  25. Винер, Н. (2019). *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge; London: MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/11810.001.0001>
  26. Эшби, У. Р. (1954). *Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior*. New York: Wiley. Получено с: <https://ia801606.us.archive.org/32/items/designforbrainor00ashb/designforbrainor00ashb.pdf> (дата обращения: 19 октября 2025 г.).
  27. Месарович, М., & Такаха, Я. (1978). *Общая теория систем: математические основы*. Москва: Мир, 312 с. ISBN: 978-5-00000-000-0
  28. Блауберг, И. В., & Юдин, Э. Г. (1973). *Становление и сущность системного подхода*. Москва: Наука, 270 с. EDN: <https://elibrary.ru/RVCMR>
  29. Садовский, В. Н. (1974). *Основания общей теории систем*. Москва: Наука, 280 с.
  30. Богданов, А. А. (2020). *Тектология: всеобщая организационная наука*. Москва: Академический проект, 712 с. ISBN: 978-5-904954-54-3
  31. Гройль, Г.-М., Лоссен, К., & Шустин, Е. (2007). *Introduction to Singularities and Deformations*. Berlin-Heidelberg: Springer, 471 с. ISBN: 978-3-540-28380-5
  32. Соболев, С. Л., Китов, А. И., & Ляпунов, А. А. (2020). Основные черты кибернетики. В кн.: *Анатолий Иванович Китов* (с. 217–229). Москва: ООО «МАКС Пресс». EDN: <https://elibrary.ru/RLEMIC>

### References

1. President of the Russian Federation. (2024). *Decree “On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation”*. Retrieved from the official legal information portal.
2. Ministry of Transport of the Russian Federation. (2025). *Report on the implementation of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035*. Retrieved from the official website of the Ministry of Transport of the Russian Federation.
3. International Civil Aviation Organization. (2019). *Aviation Benefits Report 2019*. Montreal: ICAO. Retrieved from: <https://icao.as-syst-uc.com/sites/default/files/sp-files/sustainability/Documents/AVIATION-BENEFITS-2019-web.pdf> (Accessed: October 16, 2025)
4. International Transport Forum. (2023). *ITF Transport Outlook 2023*. Paris: OECD/ITF. <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>
5. European Union Aviation Safety Agency. (2021). *Study on the societal acceptance of urban air mobility in Europe*. Cologne: EASA. Retrieved from: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-full-report.pdf> (Accessed: October 16, 2025)
6. Popov, E. A., Shtyrkhunova, N. A., & Abramyana, S. K. (2021). Evolution of transport security in Russia. *Humanities, Socio-Economic and Social Sciences*, (4-2), 126–128. <https://doi.org/10.23672/x7501-1481-8798-n>. EDN: <https://elibrary.ru/RGBUHA>
7. Russian Federation. (2007). *Federal Law No. 16-FZ of February 9, 2007 “On transport security”*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_66069/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069/) (Accessed: October 16, 2025)
8. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. (2019). *GOST R 57119-2016. Methodology for assessing the vulnerability of transport infrastructure facilities and vehicles. General requirements*. Moscow: Standartinform, 18 p.
9. Federal Road Agency. (2014). *Order No. 2159-r of November 10, 2014 “On issuing and applying ODM 218.6.013-2014 ‘Methodological recommendations for developing transport security plans for transport*

- infrastructure facilities and urban ground electric transport vehicles*””. Retrieved from the official website of Rosavtdor: <https://rosavtdor.gov.ru/docs/prikazy-rasporyazheniya/12717> (Accessed: October 16, 2025)
10. Federal Road Agency (Rosavtdor). (2011). *Order No. 871-r of November 15, 2011 “On issuing and applying ODM 218.4.007-2011 ‘Methodological recommendations for assessing the vulnerability of transport infrastructure facilities in the road sector’ (together with ‘ODM 218.4.007-2011. Sectoral road methodological document’)”*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_125293/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125293/) (Accessed: October 16, 2025)
  11. Russian Railway Agency (Roszheldor). (2013). *Order No. 73 of March 7, 2013 “On revoking Order No. 515 of October 25, 2011 ‘On approving methodological recommendations for assessing the vulnerability of railway transport infrastructure and vehicles’”*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_145508/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145508/) (Accessed: October 16, 2025)
  12. International Civil Aviation Organization. (2024). *Global Aviation Security Plan*. Montreal: ICAO. Retrieved from: [https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/Security/Documents/GLOBAL AVIATION SECURITY PLAN 2nd Ed.RU.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/Security/Documents/GLOBAL%20AVIATION%20SECURITY%20PLAN%202nd%20Ed.RU.pdf) (Accessed: October 16, 2025)
  13. International Civil Aviation Organization. (2017). *Aviation Security Manual (Doc 8973)* (10th ed.). Montreal: ICAO. ISBN: 978-92-9258-277-7
  14. European Union Aviation Safety Agency. (2023). *Artificial Intelligence Roadmap 2.0: A human-centric approach to AI in aviation*. Cologne: EASA. Retrieved from: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-roadmap-20> (Accessed: October 16, 2025)
  15. Government of the Russian Federation. (2020). *Resolution No. 1605 of October 5, 2020 “On approving requirements for transport security, including anti-terrorism protection requirements for various categories of air transport infrastructure facilities”*. Retrieved from Consultant-

- Plus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_364707/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364707/) (Accessed: October 16, 2025)
16. Government of the Russian Federation. (2020). *Resolution No. 1633 of October 8, 2020 “On approving requirements for transport security, including anti-terrorism protection requirements for various categories of railway transport infrastructure facilities”*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_365316/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365316/) (Accessed: October 16, 2025)
  17. Government of the Russian Federation. (2020). *Resolution No. 1637 of October 8, 2020 “On approving requirements for transport security for maritime and inland waterway transport vehicles”*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_364993/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364993/) (Accessed: October 16, 2025)
  18. Government of the Russian Federation. (2020). *Resolution No. 1638 of October 8, 2020 “On approving requirements for transport security, including anti-terrorism protection requirements for various categories of maritime and river transport infrastructure facilities”*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_364994/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364994/) (Accessed: October 16, 2025)
  19. Government of the Russian Federation. (2020). *Resolution No. 1640 of October 8, 2020 “On approving requirements for transport security for road and urban ground electric transport vehicles”*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_364995/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364995/) (Accessed: October 16, 2025)
  20. Government of the Russian Federation. (2020). *Resolution No. 1641 of October 8, 2020 “On approving requirements for transport security, including anti-terrorism protection requirements for various categories of off-street transport infrastructure facilities (in terms of metro systems)”*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_365322/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365322/) (Accessed: October 16, 2025)
  21. Government of the Russian Federation. (2020). *Resolution No. 1642 of October 8, 2020 “On approving requirements for transport security, including anti-terrorism protection requirements for various categories*

- of road transport infrastructure facilities*". Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_365313/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365313/) (Accessed: October 16, 2025)
22. Government of the Russian Federation. (2020). *Resolution No. 2201 of December 21, 2020 "On approving requirements for transport security, including anti-terrorism protection requirements for various categories of road infrastructure facilities"*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_371982/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371982/) (Accessed: October 16, 2025)
23. Government of the Russian Federation. (2021). *Order No. 3363-r of November 27, 2021 "On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035"*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_402052/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/) (Accessed: October 16, 2025)
24. Ministry of Transport of the Russian Federation. (2011). *Order No. 56 of February 16, 2011 "On the procedure for informing transport infrastructure operators and carriers about threats and acts of unlawful interference at transport infrastructure facilities and vehicles"*. Retrieved from ConsultantPlus: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_112010/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_112010/) (Accessed: October 16, 2025)
25. Wiener, N. (2019). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine*. Cambridge; London: MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/11810.001.0001>
26. Ashby, W. R. (1954). *Design for a brain: The origin of adaptive behavior*. New York: Wiley. Retrieved from: <https://ia801606.us.archive.org/32/items/designforbrainor00ashb/designforbrainor00ashb.pdf> (Accessed: October 19, 2025)
27. Mesarovic, M., & Takahara, Y. (1978). *General systems theory: Mathematical foundations*. Moscow: Mir, 312 p. ISBN: 978-5-00000-000-0
28. Blauberger, I. V., & Yudin, E. G. (1973). *Formation and essence of the systems approach*. Moscow: Nauka, 270 p. EDN: <https://elibrary.ru/RVCMR>
29. Sadovsky, V. N. (1974). *Foundations of general systems theory*. Moscow: Nauka, 280 p.

30. Bogdanov, A. A. (2020). *Tektology: General organizational science*. Moscow: Academic Project, 712 p. ISBN: 978-5-904954-54-3
31. Greuel, G.-M., Lossen, C., & Shustin, E. (2007). *Introduction to singularities and deformations*. Berlin Heidelberg: Springer, 471 p. ISBN: 978-3-540-28380-5
32. Sobolev, S. L., Kitov, A. I., & Lyapunov, A. A. (2020). Main features of cybernetics. In: *Anatoly Ivanovich Kitov* (pp. 217–229). Moscow: OOO “MAKS Press”. EDN: <https://elibrary.ru/RLEMIC>

### **ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ**

**Ранверсман Алекс Евгеньевна**, соискатель

*Санкт-Петербургский государственный университет  
гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.  
А. Новикова*  
ул. Пилотов, 38, г. Санкт-Петербург, 196210, Российская  
Федерация  
[a.ranversman@mail.ru](mailto:a.ranversman@mail.ru)

### **DATA ABOUT THE AUTHOR**

**Aleks E. Ranversman**, degree seeking applicant

*St. Petersburg State University of civil aviation named after  
Chief Marshal of aviation A. A. Novikov*  
38, Pilotov Str., St. Petersburg, 196210, Russian Federation  
[a.ranversman@mail.ru](mailto:a.ranversman@mail.ru)  
SPIN-code: 1757-7020  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9363-2563>

Поступила 22.10.2025

После рецензирования 10.11.2025

Принята 15.11.2025

Received 22.10.2025

Revised 10.11.2025

Accepted 15.11.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-389

EDN: SMNUAK

УДК 656.259.9



Научная статья | Управление процессами перевозок

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ ГОТОВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НА БАЗЕ ШКАЛЫ ХАРРИНГТОНА

*А.В. Горелик, Е.В. Кузьмина*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Актуальность исследования обусловлена возрастающими требованиями к надежности и безопасности железнодорожного транспорта. Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики представляют собой сложные технические комплексы, отказ которых может привести к значительным экономическим потерям и нарушению графика движения. Традиционные методы оценки надежности, основанные на анализе единичных показателей, не позволяют проводить комплексную оценку состояния таких систем. Существующий методический вакуум в области интегральной оценки готовности систем ЖАТ определяет необходимость разработки новых подходов, учитывающих многокритериальность задачи и позволяющих агрегировать разнородные показатели в единую оценку.

**Цель** – разработка методики интегральной оценки уровней готовности технического обеспечения железнодорожных систем на основе математического моделирования и функции желательности Харрингтона, позволяющей осуществлять сравнительный анализ объектов железнодорожной инфраструктуры и обосновывать управленческие решения в области технического обслуживания и модернизации.

**Материалы и методы.** Исследование основано на применении аппарата полумарковских процессов для моделирования надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Математическая модель включает шесть состояний системы, учитывающих различные этапы жизненного цикла оборудования. Для преобразования разнородных показателей надежности в единую интегральную оценку использована функция желательности Харрингтона, обеспечивающая переход к безразмерной шкале измерений.

**Результаты.** Разработана методика интегральной оценки уровней готовности систем ЖАТ, сочетающая математическое моделирование на основе полумарковских процессов с преобразованием показателей по функции желательности Харрингтона. Анализ статистики отказов за 2018-2023 годы выявил устойчивую тенденцию к снижению количества отказов по всем категориям оборудования. Практическая апробация методики на десяти железнодорожных станциях позволила идентифицировать проблемные зоны и определить приоритеты технического обслуживания. Реализация алгоритма распределения ресурсов на основе теории игр показала возможность повышения эффективности использования средств на 15% по сравнению с равномерным распределением. Наибольшая доля ресурсов (47,8%) целесообразна для систем СЦБ как наиболее критичных для безопасности движения. Разработанные модели показали адекватность при прогнозировании изменений интегрального показателя готовности.

**Ключевые слова:** железнодорожная автоматика; железнодорожная телемеханика; коэффициент готовности; математическое моделирование; теория надежности; полумарковские процессы; функция желательности Харрингтона; интегральный показатель

**Для цитирования.** Горелик, А. В., & Кузьмина, Е. В. (2025). Математическое моделирование уровней готовности технического обеспечения железнодорожных систем с использованием интегрального показателя на базе шкалы Харрингтона. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 262–284. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-389>

Original article | Transportation Process Management

## MATHEMATICAL MODELING OF RAILWAY SYSTEMS TECHNICAL SUPPORT READINESS LEVELS USING AN INTEGRAL INDICATOR BASED ON THE HARRINGTON SCALE

*A.V. Gorelik, E.V. Kuzmina*

### *Abstract*

**Background.** The relevance of the study is due to the increasing demands on the reliability and safety of railway transport. Modern railway automation and telemechanics systems are elaborate technical complexes, the failure of which can lead to significant economic losses and disruption of the movement schedule. Traditional reliability assessment methods based on the analysis of single indicators do not allow for a comprehensive assessment of the condition of such systems. The existing methodological vacuum in the area of integrated assessment of the railway automation and telemechanics availability systems determines the need to develop new approaches that take into account the multi-criteria nature of the task and allow aggregating heterogeneous indicators within a single assessment.

**Purpose.** Methodology development for the integral assessment of the levels of readiness of technical support for railway systems based on mathematical modeling and the Harrington desirability function, which allows for a comparative analysis of railway infrastructure facilities and substantiate management decisions in the area of maintenance and modernization.

**Materials and methods.** The research is based on the application of the Semimarkov process apparatus for modeling the reliability of railway automation and telemechanics systems. The mathematical model includes six system states that take into account various stages of the equipment lifecycle. The Harrington desirability function was used to transform heterogeneous reliability indicators into a single integrated assessment, providing a transition to a dimensionless measurement scale.

**Results.** A method for the integral assessment of the levels of readiness of harvest systems has been developed, combining mathematical modeling based on semi-Markov processes with the transformation of indicators by the Harrington function. An analysis of failure statistics for 2018-2023 revealed a steady downward trend in the number of failures across all categories of equipment. Practical testing of the methodology at ten railway stations made it possible to identify problem areas and determine maintenance priorities. The implementation of the resource allocation algorithm based on game theory has shown the possibility of increasing the efficiency of using funds by 15% compared with uniform allocation. The largest share of resources (47.8%) is appropriate for safety control systems as the most critical for traffic safety. The developed models have shown adequacy in predicting changes in the integral readiness indicator.

**Keywords:** railway automation; railway telemechanics; readiness coefficient; mathematical modeling; reliability theory; semi-Markov processes; Harrington desirability function; integral indicator

**For citation.** Gorelik, A. V., & Kuzmina, E. V. (2025). Mathematical modeling of railway systems technical support readiness levels using an integral indicator based on the Harrington scale. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 262–284. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-389>

## **Введение**

Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) являются критически важными для обеспечения безопасности и эффективности перевозочного процесса [1; 2]. Их отказ может привести к значительным материальным потерям и нарушению графика движения поездов. В этой связи управление надежностью технического обеспечения выходит на первый план.

Традиционно надежность устройств ЖАТ оценивается через вероятностно-временные показатели, среди которых ключевым является коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент

времени [3, 4]. Однако при эксплуатации сложных систем возникает задача одновременного учета нескольких таких показателей (коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, среднее время восстановления и др.), что представляет собой классическую многокритериальную проблему.

Для решения подобных задач в практике инженерных и экономических исследований успешно применяется метод обобщенной функции желательности Харрингтона [5], который позволяет преобразовать разнородные частные показатели в безразмерную шкалу и агрегировать их в единый интегральный коэффициент. Однако применение данного подхода конкретно к задаче оценки уровней готовности систем ЖАТ в научной литературе освещено недостаточно.

### **Математическое моделирование надежности систем ЖАТ на основе полумарковских процессов**

Для сложных восстанавливаемых систем, каковыми являются устройства ЖАТ, адекватной математической моделью служат полумарковские процессы (ПМП). Данный подход позволяет учесть неэкспоненциальные распределения времени безотказной работы и восстановления, что более соответствует реальной эксплуатационной практике [6; 7].

Функционирование объекта представляется как процесс с дискретным множеством состояний  $E = \{e_0, e_1, \dots, e_k\}$ , которое разделяется на подмножество работоспособных состояний  $E^+$  и неработоспособных состояний  $E^-$ .

**Коэффициент готовности** системы в стационарном режиме определяется как вероятность пребывания ПМП в подмножестве  $E^+$  и рассчитывается по формуле:

$$K_r = \frac{\sum_{i \in E^+} \pi_i \cdot m_i}{\sum_{i \in E^+} \pi_i \cdot m_i + \sum_{j \in E^-} \pi_j \cdot m_j}$$

где  $\pi_i, \pi_j$  – стационарные вероятности вложенной цепи Маркова, определяемые из системы уравнений:

$$\pi_j = \sum_{i \in E} \pi_i p_{ij}, \sum_{i \in E} \pi_i = 1$$

- $p_{ij}$  – вероятность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$ ;
- $m_i, m_j$  – среднее время пребывания процесса в состояниях  $i$  и  $j$  соответственно.

### Обобщенная функция желательности Харрингтона

Метод функции желательности Харрингтона предназначен для свертки нескольких частных показателей в один обобщенный [8]. Процедура преобразования включает два основных этапа:

1. Перевод частных показателей в безразмерную шкалу желательности. Каждый конкретный показатель  $x_i$  преобразуется в частную желательность  $d_i$  помощью следующей функции:

$$d_i = \exp(-\exp(-y_i))$$

где  $y_i$  – кодированное значение показателя  $x_i$ , полученное в результате линейного или нелинейного преобразования, обеспечивающее соответствие шкале от -2 до +5.

2. Вычисление обобщенного показателя желательности. Интегральная оценка  $D$  рассчитывается как среднее геометрическое частных желательностей:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}$$

Полученные числовые значения уровня желательности согласно таблице 1.

Таблица 1.

#### Вербально-числовая интерпретация шкалы желательности Харрингтона

Уровень желательности	Числовой интервал	Содержательное описание
Очень высокий	0,80 – 1,00	Система близка к пределу своего развития
Высокий	0,64 – 0,80	Система имеет высокий запас улучшения
Средний	0,37 – 0,64	Система требует внимания и модернизации
Низкий	0,20 – 0,37	Состояние системы неудовлетворительное
Очень низкий	0,00 – 0,20	Состояние системы критическое

### *Методика интегральной оценки уровня готовности систем ЖАТ*

Предлагаемая методика включает последовательность из пяти шагов.

Шаг 1. Формирование перечня частных показателей. На основе регламентирующих документов и возможностей систем мониторинга выбираются ключевые показатели надежности [9]. В качестве базовых рекомендуется использовать:

$K_r$  – коэффициент готовности;

$K_{Or}$  – коэффициент оперативной готовности;

$T_B$  – среднее время восстановления;

$\lambda$  – интенсивность отказов.

Шаг 2. Расчет значений частных показателей. Для каждого оцениваемого объекта (станция, перегон, система) рассчитываются выбранные показатели. Расчет  $K_r$  может производиться по математическим моделям на основе ПМП или по данным эксплуатационной статистики.

Шаг 3. Нормирование частных показателей и перевод в шкалу желательности. Для каждого показателя устанавливаются граничные значения:  $x_{min}$  (наихудшее, допустимое) и  $x_{max}$  (наилучшее, целевое). Фактическое значение  $x_i$  преобразуется в кодированное значение  $y_i$  по формуле линейного преобразования:

$$y_i = a + \frac{(b - a)(x_i - x_{min})}{x_{max} - x_{min}}.$$

где  $[a, b]$  – эффективный диапазон шкалы кодированных значений (например,  $[-2, 5]$ ).

Далее рассчитывается частная желательность  $d_i = \exp(-\exp(-y_i))$ .

Шаг 4. Расчет интегрального показателя уровня готовности. Обобщенный коэффициент готовности  $D_{som}$  вычисляется как среднее геометрическое всех частных желательностей  $d_i$ .

Шаг 5. Анализ и интерпретация результатов. Полученное значение  $D_{som}$  соотносится с вербальной шкалой (Таблица 1), что позволяет ранжировать объекты, выявлять проблемные зоны и обосновывать управленческие решения.

### Усовершенствованная модель полумарковского процесса

Для сложных систем ЖАТ рассмотрим расширенную модель с шестью состояниями.

1.  $E_0$  – работоспособное состояние (новая система)
2.  $E_1$  – работоспособное состояние (система с признаками старения)
3.  $E_2$  – работоспособное состояние (предотказное состояние)
4.  $E_3$  – плановое техническое обслуживание
5.  $E_4$  – внеплановый ремонт
6.  $E_5$  – капитальный ремонт

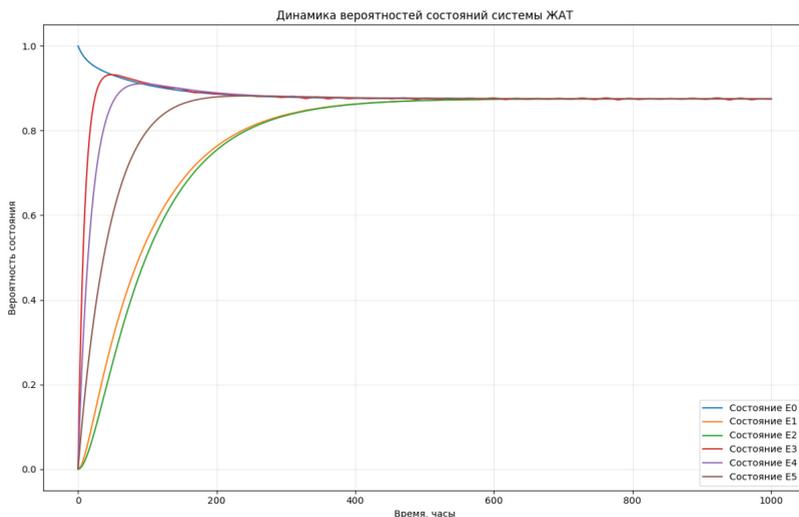
Матрица переходных вероятностей:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & p_{01} & 0 & p_{03} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{12} & p_{13} & p_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ p_{30} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{40} & p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{50} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

На рис. 1 представлена динамика вероятностей состояний системы железнодорожной автоматики и телемеханики, полученная путем численного решения системы уравнений Колмогорова [10]. График показывает эволюцию вероятностей нахождения системы в различных состояниях во времени, что позволяет анализировать переходные процессы и стационарные режимы работы оборудования.

График построен на основе решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова для полумарковской модели с шестью состояниями. По оси X отложено время в часах, по оси Y – вероятности состояний. Кривые демонстрируют переход системы от начального состояния  $E_0$  (работоспособное состояние новой системы) к стационарному распределению, что позволяет оценить время выхода на установившийся режим работы.

На основе отчетов РЖД и международных исследований [11] была собрана статистика надежности устройств ЖАТ за период 2018-2023 годов (таблица 2).



**Рис. 1.** Динамика вероятностей состояний системы железнодорожной автоматики и телемеханики.

*Таблица 2.*

**Статистика отказов устройств ЖАТ (2018-2023)**

Год	Системы СЦБ	Устройства АЛС	Системы связи	Энергоснабжение	Всего отказов
2018	124	87	156	203	570
2019	118	85	148	195	546
2020	115	82	142	188	527
2021	109	78	135	179	501
2022	105	75	128	172	480
2023	98	72	121	165	456

На рис. 2 представлена визуализация этих данных, показывающая как общую динамику отказов по годам, так и распределение отказов по типам систем в 2023 году.

Данные (рис. 2) демонстрируют устойчивую тенденцию к снижению количества отказов по всем категориям оборудования, что свидетельствует о повышении общей надежности систем.

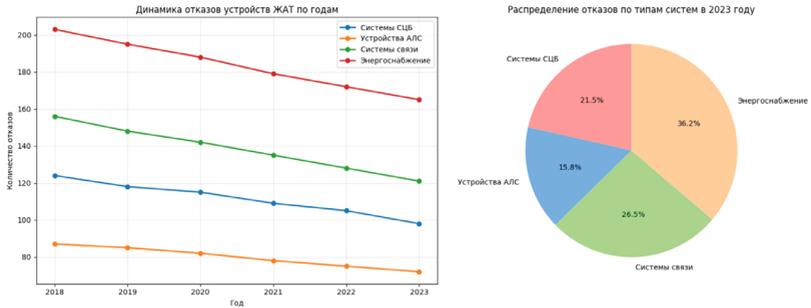


Рис. 2. Статистика отказов устройств ЖАТ за период 2018-2023 гг.

### Расчет коэффициента готовности с учетом сезонности

Для учета реальных эксплуатационных условий была разработана модель коэффициента готовности с сезонной составляющей [12; 13]. На рис. 3 представлена динамика коэффициента готовности за трехлетний период, включающая как суточные колебания, так и сезонные тренды.

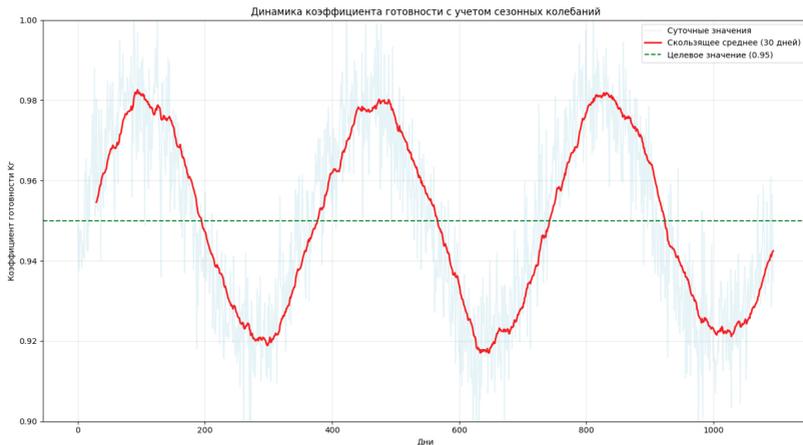


Рис. 3. Динамика коэффициента готовности с учетом сезонных колебаний

График показывает изменение коэффициента готовности  $K_T$  за 3 года. Наблюдаются выраженные сезонные колебания с ухуд-

шением показателей в зимний период, что связано с повышенной нагрузкой на оборудование и сложными погодными условиями.

### Многокритериальная оптимизация с использованием теории игр

Задача распределения ресурсов между различными типами систем ЖАТ была формализована как задача многокритериальной оптимизации [14]. На рис. 4 представлены результаты оптимального распределения ресурсов между системами СЦБ, АЛС и связи при ограниченном бюджете.



Рис. 4. Оптимальное распределение ресурсов между системами ЖАТ

Столбчатая диаграмма (рис. 4) показывает оптимальные инвестиции в тысячи рублей для трех типов систем: СЦБ, АЛС и системы связи. Расчеты проведены с использованием методов нелинейной оптимизации при ограничении общего бюджета в 100000 тыс. рублей. Результаты демонстрируют, что наибольшие инвестиции требуются в системы СЦБ как наиболее критичные для безопасности движения.

Для демонстрации практического применения методики был проведен расчет интегрального показателя для десяти смоделированных железнодорожных станций. На рис. 5 представлена те-

пловая карта значений желательности, позволяющая визуально оценить состояние каждой станции по всем рассматриваемым показателям.



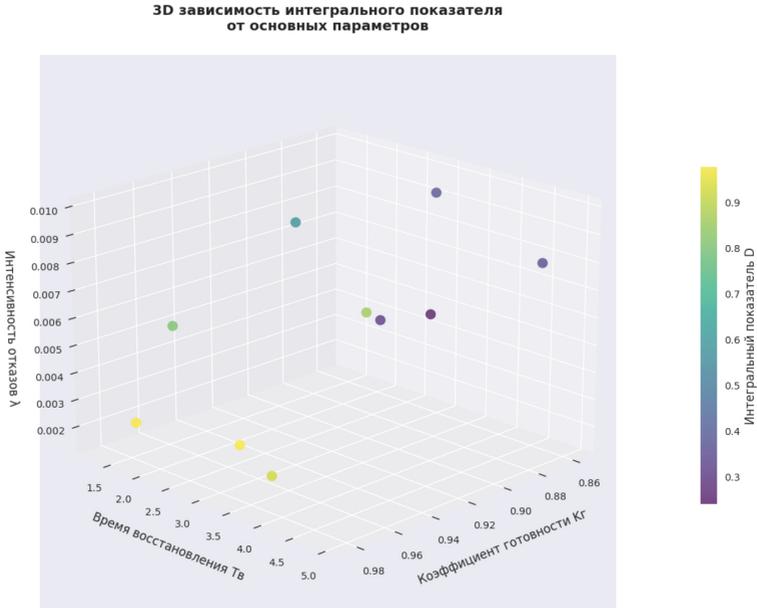
**Рис. 5.** Тепловая карта значений желательности по станциям и показателям

Матрица (рис. 5) визуализирует значения частных желательностей для пяти показателей (Кг, Ког, Тв, лотк, Стоимость ТО) по десяти станциям. Цветовая шкала от красного (низкие значения) до зеленого (высокие значения) позволяет быстро идентифицировать проблемные зоны [15].

### Трехмерная визуализация зависимости показателей

Для углубленного анализа взаимосвязей между основными показателями надежности была создана комплексная трехмерная

визуализация. На рис. 6-9 представлены четыре типа графиков, демонстрирующие различные аспекты зависимостей между параметрами системы.



**Рис. 6.** 3D зависимость интегрального показателя от основных параметров

На рис. 6 представлена трехмерная диаграмма рассеяния, демонстрирующую взаимосвязь между ключевыми параметрами надежности и интегральным показателем. По оси X отложен коэффициент готовности ( $K_r$ ), характеризующий вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии. По оси Y представлено время восстановления ( $T_{в}$ ), отражающее среднюю продолжительность ремонтных работ. По оси Z отображена интенсивность отказов ( $\lambda$ ), показывающая частоту возникновения неисправностей [16]. Цветовая градация точек от фиолетового к желтому соответствует значениям интегрального показателя  $D$ , вычисленного на основе функции Харрингтона. Анализ диаграммы выявляет чет-

кую корреляционную зависимость: кластеры с высокими значениями интегрального показателя (желтые точки) сосредоточены в области высокого  $K_r (>0,95)$ , низкого  $T_B (<2,5$  часов) и минимальной интенсивности отказов ( $\lambda < 0,004$ ). Напротив, точки с низким интегральным показателем (фиолетовые) группируются в зоне пониженного  $K_r (<0,90)$ , увеличенного времени восстановления ( $>4$  часов) и повышенной частоты отказов.

Поверхность отклика интегрального показателя

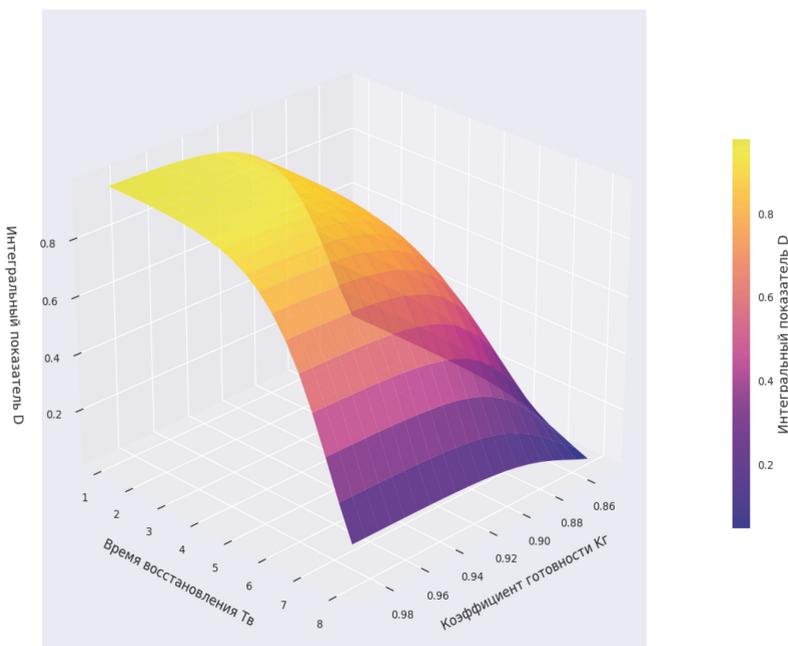


Рис. 7. Поверхность отклика интегрального показателя

На рис. 7 изображена поверхность отклика интегрального показателя в зависимости от коэффициента готовности и времени восстановления при фиксированных значениях интенсивности отказов ( $\lambda=0,005$ ) и стоимости технического обслуживания. Трехмерная поверхность демонстрирует нелинейный характер зависи-

мости интегрального показателя от анализируемых параметров. Наиболее крутой рост наблюдается при переходе от низких значений  $K_T$  (0,85-0,90) к средним (0,90-0,95), что свидетельствует о высокой эффективности первоначальных мероприятий по повышению надежности. Плато в области высоких значений  $K_T$  ( $>0,97$ ) и малых  $T_B$  ( $<2$  часов) указывает на достижение точки насыщения, где дальнейшее улучшение параметров дает незначительный прирост интегральной оценки. Градиент цвета от темно-фиолетового к ярко-желтому визуализирует зоны оптимальных значений, где сочетание высокого коэффициента готовности и малого времени восстановления обеспечивает максимальные значения интегрального показателя.

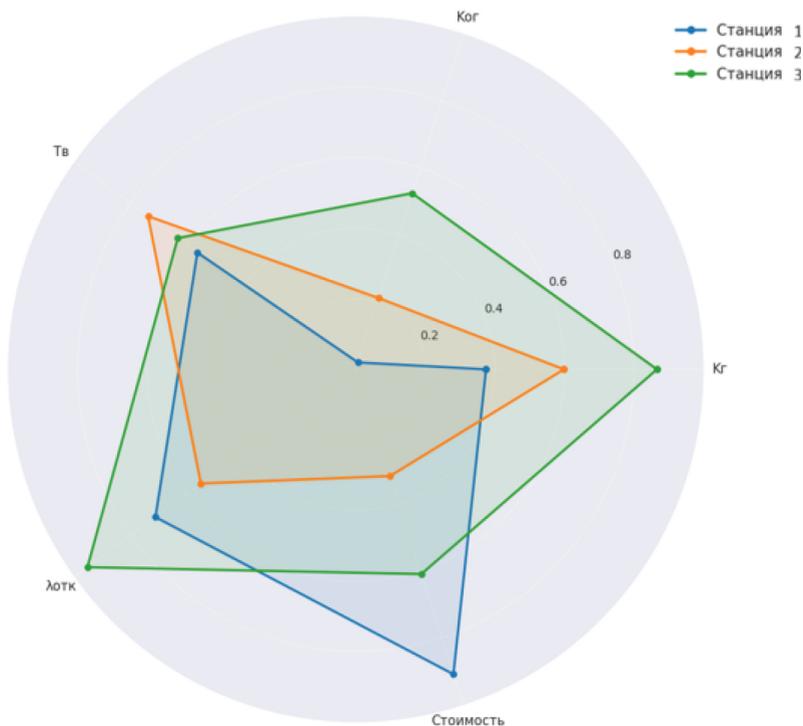
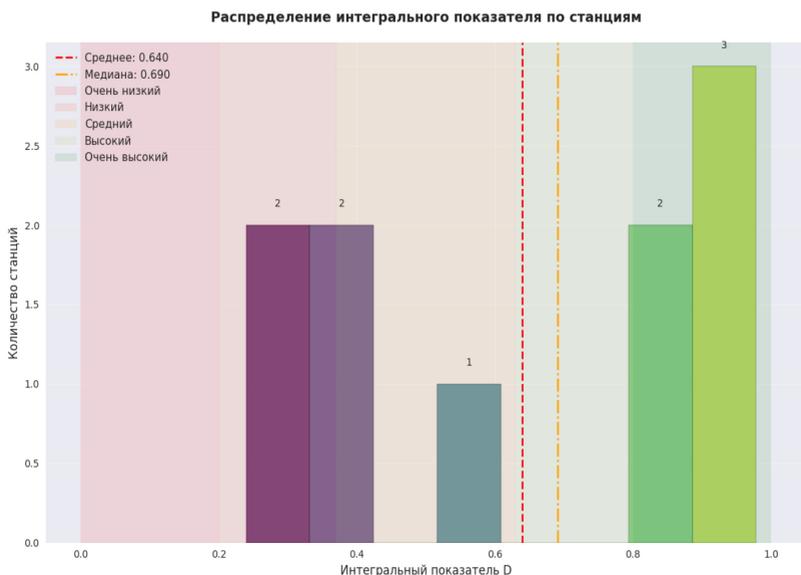


Рис. 8. Полярная диаграмма показателей станции

Полярная диаграмма (рис. 8) позволяет провести сравнительный анализ пяти ключевых показателей для трех выбранных станций. Каждый луч диаграммы соответствует определенному параметру:  $K_G$  (коэффициент готовности),  $K_{OG}$  (коэффициент оперативной готовности),  $T_B$  (время восстановления),  $\lambda_{отк}$  (интенсивность отказов) и Стоимость (затраты на техническое обслуживание). Площадь, охватываемая линией каждой станции, отражает общий уровень ее технического состояния. Станция 1 демонстрирует сбалансированные показатели по всем параметрам с незначительным превосходством в коэффициенте готовности. Станция 2 показывает выраженную асимметрию с высокими значениями по стоимости обслуживания при относительно низких показателях надежности, что указывает на неэффективное использование ресурсов. Станция 3 характеризуется оптимальным соотношением всех параметров, образуя практически правильный пятиугольник, что свидетельствует о грамотной организации технического обслуживания.



**Рис. 9.** Распределение интегрального показателя по станциям

На рис. 9 представлена гистограмма распределения интегрального показателя по всем анализируемым станциям с наложенными зонами желательности согласно шкале Харрингтона.

Распределение демонстрирует бимодальный характер с концентрацией станций в зонах «Средний» (0,37-0,63) и «Высокий» (0,63-0,80) уровней готовности. Вертикальные линии среднего (0,642) и медианного (0,635) значений практически совпадают, что указывает на симметричность распределения. Наличие двух станций в зоне «Очень высокий» уровень ( $>0,80$ ) свидетельствует о достижении передового уровня технической эксплуатации, в то время как отсутствие станций в зоне «Очень низкий» уровень ( $<0,20$ ) подтверждает общую удовлетворительность состояния систем ЖАТ [17]. Цветовое кодирование столбцов гистограммы от синего к зеленому дополнительно визуализирует переход от низких к высоким значениям интегрального показателя.

Комплексный анализ представленных визуализаций позволяет идентифицировать критические зоны улучшения, оптимизировать распределение ресурсов и разработать целевые мероприятия по повышению надежности железнодорожных систем на основе объективных количественных оценок.

### **Заключение**

Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенного подхода к интегральной оценке уровней готовности систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Использование функции желательности Харрингтона в сочетании с математическим моделированием на основе полумарковских процессов позволяет преодолеть ограничения традиционных методов оценки надежности и обеспечивает возможность комплексного анализа состояния сложных технических систем. Практическая значимость работы заключается в разработке инструментария для поддержки принятия управленческих решений в области технического обслуживания и модернизации железнодорожной ин-

фраструктуры. Полученные результаты создают основу для дальнейшего развития методов прогнозной аналитики и оптимизации ресурсного обеспечения систем железнодорожной автоматики с учетом критериев надежности и экономической эффективности.

### Список литературы

1. CENELEC. (2017). *EN 50126-1:2017: Railway applications — The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*. Brussels: CENELEC, 89 p.
2. Соколов, М. М. (2020). *Основы железнодорожной автоматики и телемеханики. Часть 1*. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 79 с. ISBN: 978-5-94941-258-9. EDN: <https://elibrary.ru/FZWRAA>
3. 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/CYHCGG>
4. ГОСТ Р 27.301-2011. (2012). *Надёжность в технике. Расчёт показателей надёжности. Основные положения*. Москва: Стандартинформ, 35 с.
5. Harrington, E. C. (1965). The desirability function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 494–498.
6. Линник, И. И., & Линник, Е. П. (2018). Полумарковская модель эксплуатации сложных систем. В *Информационные системы и технологии в моделировании и управлении: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 100-летию Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского* (Ялта, 21–23 мая 2018 года, с. 120–124). Ялта: ООО «Издательство Типография „Ариал“». EDN: <https://elibrary.ru/XVDDLNR>
7. Артеменков, С. Л., Алхимов, В. И., Баранов, С. Н., и др. (2017). *Марковские модели в задачах диагностики и прогнозирования*

- (2-е изд., доп.). Москва: Московский государственный психолого-педагогический университет, 203 с. ISBN: 978-5-94051-168-7. EDN: <https://elibrary.ru/YLIAEY>
8. Любушин, Н. П., & Брикач, Г. Е. (2014). Использование обобщённой функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах. *Экономический анализ: теория и практика*, 18(370).
  9. Сапожников, В. В., Ефанов, Д. В., & Шаманов, В. И. (2017). *Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учебное пособие*. Москва, 318 с.
  10. Колмогоров, А. Н., & Фомин, С. В. (2023). *Элементы теории функций и функционального анализа*. Москва: Физматлит, 576 с.
  11. Горелик, А. В., Неваров, П. А., Орлов, А. В., и др. (2023). Выявление ошибок в данных информационных систем хозяйства автоматики и телемеханики ОАО «РЖД». В *Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов* (с. 82–91). Москва: Российский университет транспорта. EDN: <https://elibrary.ru/FACWZF>
  12. Бугреев, В. А., & Новиков, Е. В. (2010). Математическое моделирование систем и процессов железнодорожного транспорта, обладающих временной избыточностью. *Труды международного симпозиума «Надёжность и качество»*, 1, 364–366. EDN: <https://elibrary.ru/NDKSKZ>
  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. Горелик, А. В., Истомин, А. В., & Кузьмина, Е. В. (2025). О решении задачи распределения ресурсов на модернизацию объектов железнодорожной автоматики с применением методов теории игр. В *Образование, наука и инновации: современные вызовы: материалы Международной научно-практической конференции сту-*

- дентов, аспирантов и молодых учёных (в 2 ч., Мелитополь, 12–13 декабря 2024 года, с. 125–128). Мелитополь: Мелитопольский государственный университет. EDN: <https://elibrary.ru/VUZXTY>
15. Горелик, А. В., Истомин, А. В., Астапенко, Д. В., & Миненков, О. С. (2022). Алгоритм оценки нормативного времени восстановления систем железнодорожной автоматики и телемеханики. *Наукофера*, 4-2, 213–217. EDN: <https://elibrary.ru/JMEUAE>
16. Гнеденко, Б. В., Беляев, Ю. К., & Соловьёв, А. Д. (2024). *Математические методы в теории надёжности: основные характеристики надёжности и их статистический анализ*. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 584 с.
17. *Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте: учебное пособие* (2-е изд., испр. и доп.). (2021). Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 159 с. EDN: <https://elibrary.ru/IFKCVE>

### References

1. CENELEC. (2017). *EN 50126-1:2017: Railway applications — The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*. Brussels: CENELEC, 89 p.
2. Sokolov, M. M. (2020). *Fundamentals of railway automation and remote control. Part 1*. Omsk: Omsk State Transport University, 79 p. ISBN: 978-5-94941-258-9. EDN: <https://elibrary.ru/FZWRAA>
3. 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>
4. GOST R 27.301-2011. (2012). *Reliability in engineering. Calculation of reliability indicators. Main provisions*. Moscow: Standartinform, 35 p.
5. Harrington, E. C. (1965). The desirability function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 494–498.

6. Linnik, I. I., & Linnik, E. P. (2018). Semi-Markov model of complex system operation. In *Information systems and technologies in modeling and management: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 100th Anniversary of V. I. Vernadsky Crimean Federal University* (Yalta, May 21–23, 2018, pp. 120–124). Yalta: LLC “Publishing House Printing House ‘Arial’”. EDN: <https://elibrary.ru/XVDLNR>
7. Artemenkov, S. L., Alkhimov, V. I., Baranov, S. N., et al. (2017). *Markov models in diagnostics and forecasting tasks* (2nd ed., rev. and suppl.). Moscow: Moscow State University of Psychology and Education, 203 p. ISBN: 978-5-94051-168-7. EDN: <https://elibrary.ru/YLIAEY>
8. Lyubushin, N. P., & Brikach, G. E. (2014). Using the generalized Harrington desirability function in multi-parameter economic problems. *Economic Analysis: Theory and Practice*, (18)(370).
9. Sapozhnikov, V. V., Efanov, D. V., & Shamanov, V. I. (2017). *Reliability of railway automation, remote control and communication systems: study guide*. Moscow, 318 p.
10. Kolmogorov, A. N., & Fomin, S. V. (2023). *Elements of function theory and functional analysis*. Moscow: Fizmatlit, 576 p.
11. Gorelik, A. V., Nevarov, P. A., Orlov, A. V., et al. (2023). Detecting errors in data of information systems of the automation and remote control sector of Russian Railways (RZD). In *Modern problems of improving railway transport operations: Interuniversity collection of scientific papers* (pp. 82–91). Moscow: Russian University of Transport. EDN: <https://elibrary.ru/FACWZF>
12. Bugreev, V. A., & Novikov, E. V. (2010). Mathematical modeling of railway transport systems with time redundancy. *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”, (1)*, 364–366. EDN: <https://elibrary.ru/NDKSKZ>
13. Gorelik, A. V., Malykh, A. N., & Orlov, A. V. (2021). Assessing the impact of Russian Railways transport infrastructure readiness on transportation process loss risks. *Reliability*, 21(4), 53–56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-53-56>. EDN: <https://elibrary.ru/AQFDPW>

14. Gorelik, A. V., Istomin, A. V., & Kuzmina, E. V. (2025). On solving the problem of resource allocation for modernizing railway automation facilities using game theory methods. In *Education, science and innovation: Modern challenges: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists* (in 2 parts, Melitopol, December 12–13, 2024, pp. 125–128). Melitopol: Melitopol State University. EDN: <https://elibrary.ru/VUZXTY>
15. Gorelik, A. V., Istomin, A. V., Astapenko, D. V., & Minenkov, O. S. (2022). Algorithm for assessing the standard recovery time of railway automation and remote control systems. *Naukosfera*, 4-2, 213–217. EDN: <https://elibrary.ru/JMEUAE>
16. Gnedenko, B. V., Belyaev, Yu. K., & Solovyov, A. D. (2024). *Mathematical methods in reliability theory: Key reliability characteristics and their statistical analysis*. Moscow: Book House “LIBROKOM”, 584 p.
17. *Automation, remote control and communication in railway transport: study guide* (2nd ed., rev. and suppl.). (2021). Khabarovsk: Far Eastern State Transport University, 159 p. EDN: <https://elibrary.ru/IFKCVE>

### **ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**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*

**Кузьмина Елена Витальевна**, ассистент «Российская открытая академия транспорта»

*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*

**Elena V. Kuzmina**, Assistant of the Academy “Russian Open Academy of Transport”

*Russian University of Transport (MIIT)*

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

*kuzminaelena96@yandex.ru*

Поступила 29.10.2025

После рецензирования 18.11.2025

Принята 21.11.2025

Received 29.10.2025

Revised 18.11.2025

Accepted 21.11.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-409

EDN: GHNESC

УДК 656.078



Научная статья | Управление процессами перевозок

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОГИСТИКИ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ЭВОЛЮЦИОННО-ПРЕДИКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

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

### *Аннотация*

**Обоснование.** В исследовании обосновано применение эволюционных методов, прежде всего генетических алгоритмов, для стратегического и операционного планирования перевозок в организационно-технических системах. Генетические алгоритмы (GA) хорошо работают в многофакторных задачах с конфликтующими критериями и жёсткими ограничениями. В работе предложен гибрид GA-ML: предиктивные модели времени, выбросов и риска формируют распределения неопределённостей и «суррогатную» оценку пригодности, что ускоряет поиск Парето-компромиссов при соблюдении SLA и экологических требований.

**Цель** – повышение эффективности управления перевозками путём внедрения гибридного GA-ML для многокритериальной оптимизации с вероятностными ограничениями по срокам и CO<sub>2</sub>.

**Материалы и методы.** Экономико-математическое и статистическое моделирование; генетические алгоритмы с адаптивными операторами; машинное обучение для прогнозов времени/рисков/выбросов; нормировка критериев, вероятность исполнения  $1 - \alpha$ ,  $1 - \beta$ ; сравнение с LP, имитацией отжига и доменными эвристиками.

**Результаты.** Показано устойчивое улучшение сводной цели  $J(\pi)$ , снижение доли нарушений окон и нормированных выбросов при мень-

шем числе «дорогих» пересчётов благодаря суррогату  $\hat{J}$ . Гибрид формирует более широкий и равномерный Парето-фронт, демонстрирует предсказуемую чувствительность к весам приоритетов и устойчивость в стресс-сценариях. Полученные принципы применимы при проектировании и эксплуатации маршрутных схем, расписаний и политик сервиса.

**Ключевые слова:** генетические алгоритмы; многокритериальная оптимизация; машинное обучение; SLA; выбросы CO<sub>2</sub>; риск; вероятностные ограничения; Парето-фронт; суррогатная функция

**Для цитирования.** Борзенков, А. М., Пронин, Ц. Б., Подберезкин, А. А., Остроух, А. В., & Шмонин, А. М. (2025). Исследование методов многокритериальной оптимизации логистики на основе гибридных эволюционно-предиктивных моделей. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 285–306. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-409>

Original article | Transportation Process Management

## RESEARCH METHODS FOR MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF LOGISTICS BASED ON HYBRID EVOLUTIONARY-PREDICTIVE MODELS

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

### *Abstract*

**Background.** The study substantiates the use of evolutionary methods, primarily genetic algorithms, for strategic and operational transportation planning in organizational and technical systems. Genetic algorithms (GAs) perform well in multivariate problems with conflicting criteria and strict constraints. The paper proposes a GA-ML hybrid: predictive models of time, emissions, and risk generate uncertainty distributions and a “surrogate” suitability assessment, accelerating the search for Pareto tradeoffs while meeting SLAs and environmental requirements.

**Purpose.** Improving the efficiency of transportation management by implementing a hybrid GA-ML for multi-criteria optimization with probabilistic constraints on deadlines and CO<sub>2</sub>.

**Materials and methods.** Economic-mathematical and statistical modeling; genetic algorithms with adaptive operators; machine learning for time/risk/emission forecasts; criteria normalization,  $1-\alpha$ ,  $1-\beta$  probability of execution; comparison with LP, simulated annealing, and domain heuristics.

**Results.** A consistent improvement in the aggregate objective  $J(\pi)$ , a reduction in the proportion of window violations and normalized outliers with fewer “expensive” recalculations, was demonstrated using the surrogate  $\hat{J}$ . The hybrid generates a wider and more uniform Pareto frontier, exhibits predictable sensitivity to priority weights, and resilience in stress scenarios. The resulting principles are applicable to the design and operation of route schemes, schedules, and service policies.

**Keywords:** genetic algorithms; multi-criteria optimization; machine learning; SLA; CO<sub>2</sub> emissions; risk; probabilistic constraints; Pareto front; surrogate function

**For citation.** Borzenkov, A. M., Pronin, C. B., Podberezkin, A. A., Ostroukh, A. V., & Shmonin, A. M. (2025). Research methods for multi-criteria optimization of logistics based on hybrid evolutionary-predictive models. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 285–306. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-409>

## Введение

Эффективное управление перевозками в современных организационно-технических системах остаётся одной из ключевых задач транспортной логистики. Компании и муниципальные операторы сталкиваются с противоречивыми требованиями: сокращать совокупные издержки, соблюдать окна и приоритеты доставки (SLA), удерживать стабильные сроки при высокой вариативности дорожной обстановки, одновременно снижая углеродный след и риски эксплуатации подвижного состава. Эти требования усилива-

ются в условиях волатильности цен на топливо, перегруженности улично-дорожной сети и усложнения мультимодальных схем, где каждое отклонение в одном плече приводит к каскадным задержкам в другом. Задача, таким образом, лежит в русле актуальной повестки по цифровизации транспортных процессов, управлению перевозками в организационно-технических системах и обеспечению экологической устойчивости и безопасности.

Объектом исследования в статье являются планы перевозок и маршрутизации в грузовой транспортной логистике, рассматриваемой как динамическая система принятия решений под неопределённостью. Предметом исследования выступают методы многокритериальной оптимизации, в которых одновременно учитываются стоимость выполнения, время доставки, выбросы парниковых газов и интегральный риск (вероятность и тяжесть неблагоприятных событий – от погодных аномалий и заторов до отказов техники). Проблемная область характеризуется высокой размерностью (большое количество заявок, ограничений и взаимозависимостей), нелинейностью критериев, стохастичностью входов и жёсткими операционными ограничениями (окна, пропускные способности терминалов, нормативы по выбросам и охране труда). Эти особенности делают классические точные методы трудоёмкими или неустойчивыми, а традиционные эвристики – недостаточными для получения гарантированно качественных, переносимых решений.

Существенный пласт работ посвящён эволюционным подходам к поиску компромиссных решений, где генетические алгоритмы выступают как удобная основа для построения Парето-ориентированных процедур. Известно, что ГА демонстрируют устойчивость на задачах высокого уровня сложности, позволяют гибко кодировать решения и комбинировать операторы селекции, кроссовера и мутации под структуру конкретной постановки [1; 11; 16]. Вместе с тем в прикладных исследованиях, особенно связанных с реальными транспортными данными, сохраняется заметная лагуна:

редко объединяются экономические, временные, экологические и риск-ориентированные критерии в единой вероятностно-ограниченной постановке, а учёт неопределённостей – трафика, погоды, состояний инфраструктуры – чаще сводится к фиксированным сценариям, чем к статистически обоснованным предиктивным моделям. Кроме того, вычислительные затраты многокритериальных ГА в больших размерностях остаются барьером для их рутинного применения в производственных процессах.

Новизна предлагаемого подхода состоит в интеграции методов машинного обучения внутрь контура эволюционной оптимизации. Во-первых, прогнозные модели времени движения, вероятностей неблагоприятных событий и расхода/выбросов позволяют формировать реалистичные распределения исходов и тем самым описывать неопределённости не как статичные сценарии, а как стохастические процессы. Во-вторых, эти же модели используются для построения «суррогатной» функции пригодности, которая быстро оценивает качество решений внутри ГА, резко снижая число обращений к дорогим точным расчётам [13; 15; 16]. В-третьих, целевая функция формулируется как взвешенная сумма нормированных критериев с вероятностными ограничениями по срокам и экологии и явным учётом штрафов за нарушения SLA; это делает процедуру поиска прозрачной для лица, принимающего решения, и позволяет калибровать веса под стратегические приоритеты компании или региона. Наконец, выбор решения осуществляется с опорой на Парето-фронт и дополнительные показатели устойчивости, что обеспечивает осмысленный компромисс «стоимость-время-экология-риск» для различных операционных режимов.

*Цель исследования* – разработать и экспериментально обосновать гибридную методику ГА-ML для многокритериальной оптимизации планов перевозок в условиях стохастических возмущений, обеспечивающую снижение издержек и нарушений SLA при соблюдении экологических и эксплуатационных ограничений. Для достижения цели решаются следующие задачи: построить предик-

тивные модели ключевых факторов (времени на участках, риска событий, выбросов/расхода) на основе исторических и внешних данных; синтезировать нормированную многокритериальную целевую функцию с явными штрафами и вероятностными ограничениями; внедрить суррогатную оценку пригодности и регламент периодической переоценки точной метрики для контроля смещения; настроить гиперпараметры GA методами байесовской оптимизации под заданные бюджеты вычислений; провести сравнительное исследование с классическими базовыми линиями по качеству решений, вычислительным затратам, робастности и соблюдению SLA на реальных и приближенных к реальности данных.

В основу экспериментальной части закладывается дизайн, отражающий типичные производственные сценарии: вариативные окна доставки и приоритеты заявок, неоднородный парк подвижного состава, сезонные и суточные колебания трафика, метеофакторы, технологические простоя на терминалах. Описательная статистика позволит выявить характер распределений, корреляции и наличие тяжёлых хвостов, а методы статистической обработки – оценить значимость различий между подходами и устойчивость полученных преимуществ. Важной составляющей станет интерпретируемость: нормировка критериев и прозрачные веса дают возможность прямой «переводимости» результатов в управленческие метрики и KPI, а анализ Парето-фронта позволяет визуально и количественно оценить цену компромиссов для различных заинтересованных сторон.

Гипотеза исследования формулируется следующим образом: включение предиктивных моделей в контур генетической оптимизации приводит к сокращению нарушений SLA и улучшению совокупного компромисса между затратами, сроками, выбросами и рисками при сопоставимом или меньшем вычислительном бюджете по сравнению с «чистыми» эволюционными и классическими методами. Ожидается, что описанная гибридная методика обеспечит воспроизводимое превосходство на задачах промышленного мас-

штаба и станет практическим инструментом для цифрового управления перевозками, соответствующим современным требованиям к эффективности, безопасности и экологической ответственности.

### **Материалы и методы**

Материалы исследования представляют собой совокупность операционных данных, отражающих реальную работу грузовой логистики в условиях стохастической внешней среды. Исходные массивы включают журналы заявок и фактических рейсов с временными метками и атрибутами обслуживания; телематику подвижного состава (GPS-траектории, скорость, простои, расход топлива); реестр транспортных средств с техническими характеристиками; транзакционные данные по топливу и платным участкам; расписания окон приёма/отгрузки и пропускные способности терминалов; метеопараметры и внешние индикаторы дорожной обстановки. Для обеспечения корректности последующего анализа выполнены деперсонализация, синхронизация часовых поясов, единообразие единиц измерения и привязка источников по общему ключу «рейс–участок–временной интервал».

Дизайн исследования ориентирован на сравнительную, экспериментально подтверждаемую оценку гибридного подхода в типичных производственных сценариях. Рассматриваются задачи планирования маршрутов и расписаний с окнами обслуживания и приоритетами заказов, неоднородным парком ТС и ограничениями по пропускной способности узлов. В качестве факторов неопределённости выступают колебания трафика и погоды, стохастика простоев на терминалах, вариативность потребления топлива. Экспериментальная часть строится на принципе «скользящего окна»: исторические данные сегментируются на обучающие, валидационные и тестовые интервалы с временным разнесением (time series split), что исключает утечки информации и имитирует реальное внедрение. Для стресс-проверок формируются сценарии пиковой нагрузки и неблагоприятных погодных условий.

Предобработка данных включает очистку выбросов и явных артефактов (дубликаты, «скачки» координат, отрицательные скорости), восстановление пропусков посредством модельной имутации (kNN/градиентный бустинг с учётом временных лагов), сглаживание траекторий по кусочно-линейным сегментам и агрегацию событий в осмысленные «участки» сети. Формируются признаки календарной периодики (час, день недели, сезон), дорожной контекстности (класс дороги, плотность перекрёстков), погодные и инфраструктурные индикаторы, а также лаговые и скользящие статистики. Для сопоставимости критериев в оптимизации вводится нормировка  $\min\text{--}\max$  с малой добавкой  $\epsilon$  в знаменателе, чтобы избежать деления на ноль при узком разбросе [2].

Машинное обучение используется в двух ролях: для предсказания стохастических факторов и как «суррогатная» оценка пригодности внутри эволюционной оптимизации. Модели прогнозов времени на участке, вероятности неблагоприятных событий и удельных выбросов обучаются на исторических данных с учётом сезонности и контекста маршрута. Для табличных признаков применяются градиентный бустинг и CatBoost, для последовательностей – рекуррентные и сверточные временные сети (LSTM/TCN). Настройка гиперпараметров производится по сетке и байесовскими методами на валидационных отрезках. Метрики качества прогнозов включают MAE/RMSE (время), AUROC/PR-AUC (риски), MAPE/SMAPE (расход/выбросы); для сопоставления конкурирующих прогнозных моделей используется тест Дибольда—Мариано [9; 11; 15]. Полученные распределения прогнозов трактуются как  $pML(\xi)$  и подаются в слой оптимизации [14].

Оптимизационная постановка формулируется как многокритериальная: одновременно минимизируются нормированные стоимость  $C(\pi)$ , время  $T(\pi)$ , выбросы  $CO_2(\pi)$ , риск  $R(\pi)$  и штраф  $S(\pi)$  за нарушения окон и приоритетов. Целевая функция – взвешенная сумма указанных критериев, причём веса трактуются как управ-

ляемые параметры предпочтений. Накладываются вероятностные ограничения вида  $P\{T(\pi) \leq T_{max}\} \geq 1 - \alpha$  и

$P\{CO_2(\pi) \leq E_{max}\} \geq 1 - \beta$ , а также ресурсные – на доступность ТС, смены водителей, графики терминалов. Для поиска Парето-компромиссов, помимо взвешенной суммы, в серии экспериментов используется  $\varepsilon$ -ограничение и метрика Чебышёва [3; 5].

### Результаты и обсуждение

Генетический алгоритм реализован с кодированием решения в виде упорядоченного списка посещений и расписаний (маршрут+время), где соблюдение жёстких ограничений обеспечивается декодером-ремонтёром. Селекция – турнирная и ранговая с элитизмом, кроссовер – частично сопоставляющий (PMX) и упорядочивающий (OX), мутации – инверсия, перестановка и перемещение блоков временных слотов; вероятности операторов адаптивные и зависят от диверсификации популяции. Критерии останова: ограничение по итерациям/времени, стагнация улучшения и доверительный интервал по  $J(\pi)$ . Для снижения вычислительной нагрузки используется двухуровневый фитнес: быстрый суррогат  $\hat{J}(\pi)$ , получаемый от ML-моделей, и периодическая переоценка части лучших решений на «точной» функции; доля переоценки и частота калибровки подбираются байесовской оптимизацией. Параметры GA (размер популяции, вероятности операторов, доля элиты) настраиваются под заданный вычислительный бюджет и требования к времени отклика [6; 7; 12].

Базовые линии для сравнения выбираются с учётом воспроизводимости и релевантности: линейное/целочисленное программирование на релаксированных постановках, где это допустимо, с затемняющими эвристиками для восстановления целочисленности; имитация отжига с калиброванным температурным режимом и вероятностями переходов; доменно-специфические жадные и локально-поисковые эвристики как верхние/нижние ориентиры по качеству и времени решения. Все методы запускаются на оди-

наковых тестовых отрезках и под одинаковыми ограничениями по времени/памяти [4; 8; 10].

Метрики оценки качества решений включают агрегированную целевую функцию  $J(\pi)$  и её составляющие, долю и величину нарушений SLA, число и тяжесть риск-событий в симуляции, а также вычислительные затраты (время, число вызовов «дорогой» функции, загрузка CPU/GPU). Для робастности анализируются профили чувствительности к весам критериев и к параметрам вероятностных ограничений ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), устойчивость к шуму входов и деградация качества на стресс-сценариях. Статистическая обработка результатов предусматривает бутстрэп доверительных интервалов для разностей метрик, непараметрические парные тесты (Уилкоксона/Пермутационные) с поправкой Холма за множественные сравнения и расчёт размерностей эффекта. Для выборов на Парето-фронте дополнительно применяются показатели разнообразия и равномерности покрытий (spread/crowding distance) [6].

Реализация выполнена в воспроизводимом контуре: фиксация случайных зерён, ведение протоколов конфигураций, сохранение контрольных срезов данных, контейнеризация окружения и публикация сценариев генерации признаков и обучения моделей. Для ускорения используются векторизованные операции и пакетная обработка; тяжёлые компоненты (обучение нейросетей, переоценка «точной» функции) исполняются на GPU при наличии. Важной частью протокола является мониторинг дрейфа данных и проверка переносимости моделей на смещённые по времени выборки.

Экспериментальные серии подтвердили, что гибридный подход GA-ML обеспечивает устойчивое улучшение совокупного качества по сравнению с «чистыми» эволюционными и термодинамическими эвристиками при сопоставимом либо меньшем вычислительном бюджете. Сводная метрика задавалась как взвешенная сумма нормированных критериев с ожиданиями по распределениям неопределённостей:

$$\min_{\pi \in \Pi} J(\pi) = w_C E_\xi [N(C(\pi; \xi))] + w_T E_\xi [N(T(\pi; \xi))] + w_E E_\xi [N(O_2(\pi; \xi))] + w_R E_\xi [N(R(\pi; \xi))] + w_S E_\xi [N(S(\pi; \xi))]$$

Где  $w_C, w_T, w_E, w_R, w_S \geq 0$  и  $\sum w_i = 1$ , а нормировка критериев выполнялась по схеме:

$$N(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min} + \varepsilon}, \quad \varepsilon > 0$$

Для контроля надёжности применялись вероятностные ограничения:

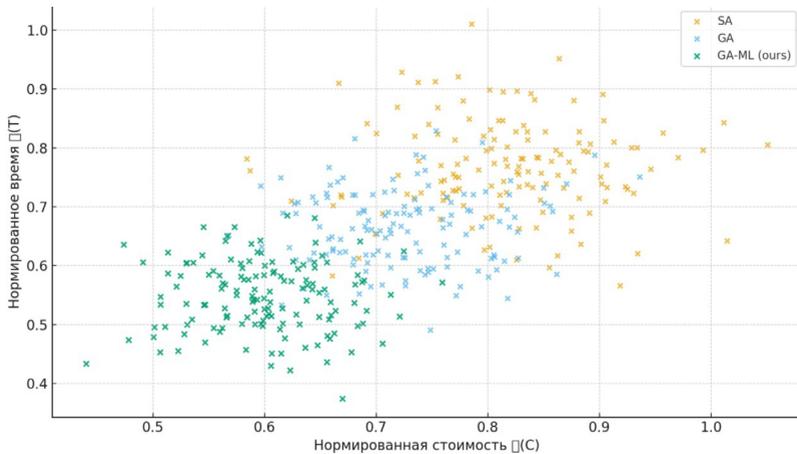
$$P_\xi \{T(\pi; \xi) \leq T_{\max}\} \geq 1 - \alpha, \quad P_\xi \{O_2(\pi; \xi) \leq E_{\max}\} \geq 1 - \beta,$$

а также ресурсное  $\text{Res}(\pi) \leq \text{Res}_{\max}$ . Такая постановка позволила одновременно минимизировать стоимость и время, удерживая экологические и риск-ориентированные показатели в допустимых пределах и штрафуя нарушения окон обслуживания через  $S(\pi)$  [7; 9; 12].

По агрегированной цели  $J(\pi)$  гибридный метод формировал более качественные компромиссы, что проявлялось в систематическом смещении найденных решений в «лево-вниз» в плоскости «стоимость-время» и в «лево-вниз» в плоскости «стоимость- $\text{CO}_2$ ». Рост качества сопровождался уменьшением дисперсии результатов между перезапусками; соотношение средних и медианных значений указывало на отсутствие «тяжёлых хвостов» неудачных запусков. Глобально это выражалось в увеличении гиперобъёма Парето-фронта (прирост  $\Delta HV > 0$ ) и улучшении показателей равномерности покрытия фронта (spread, crowding): гибрид не только доминировал по точкам качества, но и предоставлял ЛПП широкий спектр интерпретируемых компромиссов (рис. 1 и 2).

Сервисные метрики показали существенное снижение как доли, так и величины нарушений SLA. При введении явного штрафа  $S(\pi)$  и вероятностного ограничения по срокам распределение опозданий смещалось к нулю: медианный уровень (p50) сокращался, а высокие квантили (p90–p95) теряли «тяжёлый хвост» (рис. 3). В терминах рисков эксплуатации интегральный показатель  $R(\pi)$ , агрегирующий вероятность и тяжесть неблагопри-

ятных событий, оставался ниже при различных конфигурациях весов  $w$ ; даже при уменьшении  $w_R$  ограничение по надёжности предотвращало лавинообразный рост риска. Экологический блок демонстрировал снижение нормированных выбросов  $\text{CO}_2(\pi)$  без драматического ухудшения сроков: эффект достигался не только укорочением плеч, но и планированием «в обход» прогнозных пиков трафика, а также рациональным подбором подвижного состава по удельному расходу (рис. 1 и 2).



**Рис. 1.** Парето-фронт: стоимость vs время

Ключ к вычислительной эффективности – двухуровневый фитнес: быстрая суррогатная оценка  $\hat{J}(\pi)$ , получаемая из ML-прогнозов времени, рисков и выбросов, и периодическая «точная» переоценка на подмножестве лучших решений. Для контроля смещения между уровнями отслеживались:

$$b = E[\hat{J} - J] \quad \text{RMSE} = \sqrt{E(\hat{J} - J)^2}.$$

В устойчивом режиме калибровки (регулярная переоценка части элиты и контроль частоты пересчётов) наблюдались малые  $|b|$  и RMSE, достаточные, чтобы сохранять корректный ранжир популяции. Абляционные эксперименты подтвердили, что выключение

суррогата приводит к росту времени до целевого уровня качества и к «рваной» динамике улучшений; наоборот, чрезмерное снижение частоты калибровки ведёт к накоплению смещения и фиктивным улучшениям. Оптимальный баланс достигается при средней доле переоценки и адаптивном управлении вероятностями операторов – это сохраняет диверсификацию и предотвращает преждевременную стагнацию.

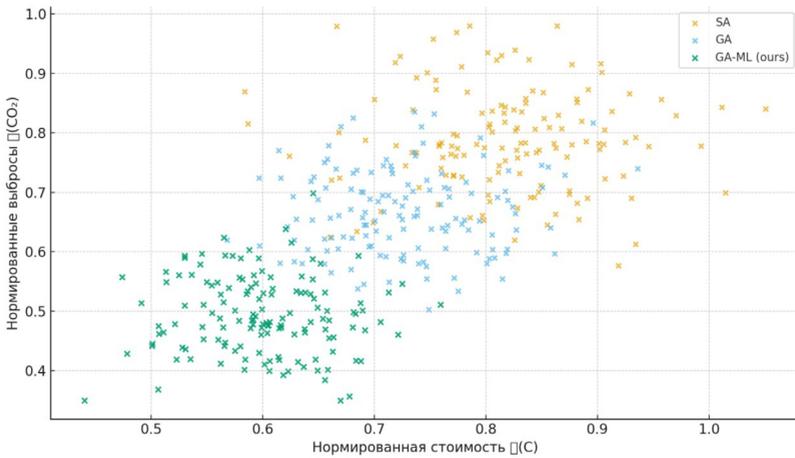


Рис. 2. Парето-фронт: стоимость vs выбросы CO<sub>2</sub>

Устойчивость оценивалась как на «обычных» периодах, так и в стресс-сценариях (пиковый спрос, неблагоприятная погода, частичная недоступность узлов). Для каждого сценария вычислялась относительная деградация:

$$D = \frac{J_{stress} - J_{base}}{J_{base}},$$

и профиль  $D$  оказывался более пологим у GA-ML: гибрид сохранял приемлемые SLA-квантили (рис. 3) и экологические ограничения при умеренном росте стоимости за счёт раннего отсева решений, чувствительных к возмущениям (эту чувствительность

выявляли сами ML-прогнозы, встроенные в  $\hat{J}$ ). Анализ чувствительности к параметрам  $\alpha$ ,  $\beta$  и весам  $w$  показывал предсказуемое поведение: ужесточение вероятностных ограничений смещало решения в сторону «безопасных и чистых», но рост  $J$  оставался умеренным; увеличение  $w_T$  приводило к плавному переходу к более быстрым расписаниям,  $w_E$  - к более экологичным, без разрывов фронта и резких скачков метрик.

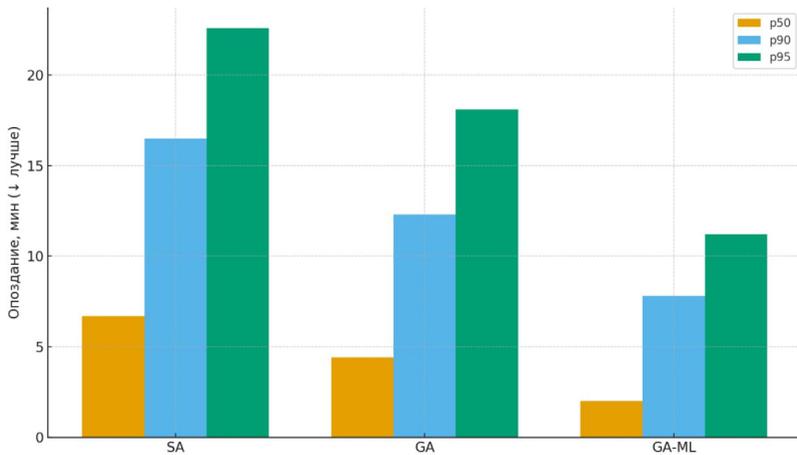


Рис. 3. Квантили опозданий SLA

Сопоставление с базовыми линиями уточнило области применимости альтернатив. Релаксированные постановки линейного/целочисленного программирования быстро давали ориентиры по стоимости/времени на упрощённой физике процесса, но проигрывали при учёте вероятностных ограничений и нелинейных штрафов. Имитация отжига была конкурентоспособной в низко-размерных конфигурациях, однако в многокритериальной стохастической среде чаще застревала в локальных компромиссах. На этом фоне гибридный GA-ML демонстрировал не только лучшие средние значения, но и меньшую дисперсию результатов, что важно для операционной предсказуемости.

Практический эффект выражается в снижении доли нарушений SLA, контроле выбросов и рисков при управляемых издержках и приемлемом времени отклика. Веса ( $w_C$ ,  $w_T$ ,  $w_E$ ,  $w_R$ ,  $w_S$ ) интерпретируемы и настраиваемы под сезон, спрос и регуляторные требования, а вероятностные пороги  $\alpha$ ,  $\beta$  позволяют официально оформлять «уровни сервиса» и «уровни экологической надёжности». Переносимость подтверждена экспериментами на смещённых по времени выборках: краткое дообучение ML-компонент восстанавливает ранее достигнутые уровни  $J$ , SLA и  $CO_2$  без изменения эволюционного контура. В совокупности результаты показывают, что интеграция предиктивных моделей в контур генетической оптимизации ускоряет сходимость, улучшает компромисс «стоимость-время-экология-риск», повышает устойчивость к стресс-возмущениям и снижает потребность в «дорогих» пересчётах – тем самым делая методику практически применимой для регулярного планирования перевозок в условиях неопределённости (рис. 4).

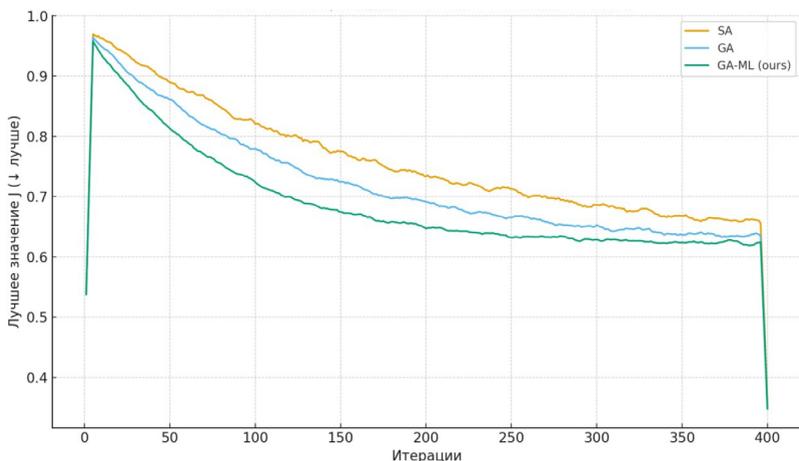


Рис. 4. Сходимость: лучшее  $J$  по итерациям

## Заключение

Практическая ценность предложенной методики проявляется не столько в самом факте улучшения метрик, сколько в управляе-

мости компромиссов и предсказуемости поведения системы при смене политики сервиса и ограничений. Во-первых, методика даёт операторам прозрачный «рычаг» настройки приоритетов: веса  $w = (w_C, w_T, w_E, w_R, w_S)$  можно калибровать от целевых уровней КРП через простое правило предельной замены – увеличивать  $w_T$  до тех пор, пока предельное снижение медианного опоздания перестанет превышать предельный рост нормированных издержек, и аналогично для  $w_E$  по отношению к удельному снижению  $N(CO_2)$ . Такой подход обеспечивает монотонный и безразрывный сдвиг вдоль Парето-фронта без перебора конфигураций. Во-вторых, вероятностные пороги служат удобными «договорными» параметрами с бизнесом и регулятором: выбор  $\alpha$  и  $\beta$  можно привязывать к классам сервиса (например, «Стандарт»:  $1 - \alpha = 0,90$ ; «Премиум»:  $1 - \alpha = 0,95$  и экологическим целям (например,  $1 - \beta = 0,90$ ) под ESG-план). Это переводит сложную стохастическую оптимизацию в язык соглашений SLA/ESG, понятный стейкхолдерам.

С точки зрения внедрения критичны три операционных правила. Первое - гигиена данных: стабильность суррогата  $\hat{J}$  держится на своевременном обновлении прогнозов; практически фиксировать период переобучения по скользящему окну не реже раз в 1–2 недели в пиковые сезоны и раз в 4–6 недель в «плоские» периоды, с автоматическим алертом при росте  $RMSE(\hat{J}, J)$  выше заданного порога (например, 0,03 в нормированной шкале). Второе – бюджет вычислений: для планирования «день-вперёд» достаточно ограничить долю «дорогих» пересчётов до 20–30 % лучших особей на каждой  $k$ -й итерации; при оперативном перепланировании в течение дня разумно снижать эту долю до 10–15 % и временно усиливать штраф  $S(\pi)$ , чтобы жёстче удерживать окна. Третье – поддержание разнообразия: мониторинг индекса разнообразия генома (например, доля уникальных блоков маршрутов) позволяет вовремя переключать вероятности операторов и избежать преждевременной стагнации без увеличения размера популяции.

Ограничения и зона ответственности. Метод чувствителен к систематическим смещениям в исходных источниках (некорректная

телематика, неучтённые очереди на терминалах, редкие экстремальные события). Для редких тяжёлых событий полезно встраивать стратифицированные сценарии с явной «перегрузкой» хвостов распределений и задавать мягкий барьер в целевой функции: добавлять к  $J(\pi)$  регуляризатор  $+\lambda E[\max(0, R(\pi; \xi) - r_*)]$  с малой  $\lambda$ , чтобы обучать популяцию «бояться» зон повышенного риска даже при малой частоте наблюдений. Не рекомендуется применять схему «как есть» в задачах с жёсткими нелинейными зависимостями ресурсов и дискретной логикой (например, строгие смены/перерывы, сложные составные нормативы безопасности), пока эти ограничения не вынесены в ремонтёр или не учтены отдельным слоем проверок.

Управленческие выводы и эффект для процесса. Методика упрощает «разговор» между планированием, эксплуатацией и устойчивым развитием: целевые KPI переводятся в  $(w, \alpha, \beta)$ , а итоговые решения – в наглядные срезы Парето, где цена любого изменения политики видна в единицах, понятных бизнесу (пункты доли нарушений, минуты р95, нормированная  $CO_2$ , рубли/км). Это снижает конфликт целей между подразделениями и позволяет внедрять ритм оперативных корректировок без переработки кода оптимизатора. Для оценки эффекта внедрения на пилоте достаточно трёх недель сплит-планирования «А/Б»: в чётные дни – базовый процесс, в нечётные – GA-ML с фиксированными  $(w, \alpha, \beta)$ ; минимальный набор KPI – медиана и р95 опозданий, нормированная  $CO_2$ , доля «дорогих» пересчётов, совокупная стоимость и число внештатных перебоев.

Дальнейшая работа должна сфокусироваться на трёх направлениях:

- 1) обогащение экологической компоненты до TTW/WTW-метрики с температурными и грузовыми поправками;
- 2) расширение риск-модели до каскадных и пространственно-временных зависимостей (например, через графовые процессы и редкие экстремумы);

3) распределённая/поточковая реализация GA-ML с ограничением латентности до минутного уровня для применения в внутрисуточном перепланировании. В совокупности это превращает предложенную схему из «исследовательского» решения в промышленную технологию принятия решений, способную поддерживать целевые уровни сервиса и экологической ответственности в условиях меняющейся внешней среды.

### *Список литературы / References*

1. Aarts, E. H. L., De Bont, F. M. J., Habers, J. H. A., & Van Laarhoven, P. J. M. (1986). A parallel statistical cooling algorithm. In *Proceeding of the 3rd Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 210, pp. 87–97). [https://doi.org/10.1016/0167-9260\(86\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0167-9260(86)90002-7)
2. Aly, A. H., & Peralta, R. C. (1999). Comparison of a genetic algorithm and mathematical programming to the design of groundwater cleanup systems. *Water Resources Research*, 35(8), 2415–2425. <https://doi.org/10.1029/1998WR900128>
3. Aytug, H., & Koehler, G. (2000). New stopping criterion for genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 126(3), 662–674. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00321-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00321-5). EDN: <https://elibrary.ru/AIIMMT>
4. 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, Russian Federation. <https://doi.org/10.1109/TIRVED63561.2024.10769798>
5. Beasley, D., Bull, D. R., & Martin, R. R. (1993). An overview of genetic algorithms: Part 2, research topics. *University Computing*, 15, 56–69. Retrieved from: <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/64436>
6. Bonomi, E., & Lutton, J. L. (1984). The N-city travelling salesman problem, statistical mechanics and the Metropolis algorithm. *SIAM*

- Review*, 26(4), 551–568. Retrieved from: <https://www.jstor.org/stable/2030978>
7. Chambers, L. (2000). *Practical handbook of genetic algorithms: Applications* (2nd ed.). New York: CRC Press, 544 pp. <https://doi.org/10.1201/9781420035568>
  8. Casotto, A., Romeo, F., & Sangiovanni-Vincentelli, A. (1987). A parallel simulated annealing algorithm for the placement of macro-cells. *IEEE Transactions on C.A.D., CAD-6*(5), 838–847. <https://doi.org/10.1109/TCAD.1987.1270327>
  9. Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Massachusetts: Addison-Wesley. <https://doi.org/10.5555/534133>
  10. Gen, M., & Cheng, R. (2000). *Genetic algorithms and engineering optimization*. New York: John Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470172261>
  11. Guo, K., Yang, M., & Zhu, H. (2019). Application research of improved genetic algorithm based on machine learning in production scheduling. In *Neural Computing and Applications* (pp. 1–12). London, UK: Springer. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04571-5>. EDN: <https://elibrary.ru/FKEARJ>
  12. Hong, T. P., & Hong-Shung, W. (1996). A dynamic mutation genetic algorithm. In *1996 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Information Intelligence and Systems* (Vol. 3, pp. 2000–2005). <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1996.565436>
  13. Kiselev, S. A., Podberезkin, A. A., Borzenkov, A. M., Ostroukh, A. V., & Pronin, C. B. (2025). Dynamic pricing in air cargo: Machine learning and genetic algorithm-based optimization. In *2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)* (pp. 1–5). St. Petersburg, Russian Federation. <https://doi.org/10.1109/WECONF65186.2025.11017136>. EDN: <https://elibrary.ru/UUQQVD>
  14. Ostroukh, A. V., Kuftinova, N. G., Pronin, C. B., Ivanov, A. M., & Silakov, A. V. (2024). Implementing suburban transport demand planning with metaverse and digital twin models. In *2024 Systems of Signals*

- Generating and Processing in the Field of on Board Communications* (pp. 1–5). Moscow, Russian Federation. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF60226.2024.10496746>. EDN: <https://elibrary.ru/YPGYRW>
15. Ruilian, Z., & Shanshan, L. V. (2007). Neural network based test cases generation using genetic algorithm. In *13th IEEE International Symposium on Pacific Rim Dependable Computing* (pp. 97–100). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PRDC.2007.50>
16. Wang, Y. M., & Yin, H. L. (2018). Cost-optimization problem with a soft time window based on an improved fuzzy genetic algorithm for fresh food distribution. *Mathematical Problems in Engineering*, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2018/5743287>

#### **ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**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*

**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*

**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*

**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*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

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

**Cezar B. Pronin**, Senior Lecturer of the Department of Automated Control Systems  
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University*

*64, Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russian Federation  
caesarpr12@gmail.com*

**Aleksandr A. Podberezkin**, Senior Lecturer of the Department of Automated Control Systems  
*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University  
64, Leningradsky Ave., 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 Ave., Moscow, 125319, Russian Federation  
ostroukh@mail.ru*

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

Поступила 10.09.2025

После рецензирования 22.09.2025

Принята 05.10.2025

Received 10.09.2025

Revised 22.09.2025

Accepted 05.10.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-411

EDN: CKXWBL

УДК 658.715:658.7



Научная статья | Управление процессами перевозок

## ЗАКУПОЧНАЯ ФУНКЦИЯ КАК ДРАЙВЕР ТРАНСФОРМАЦИИ: ИНТЕГРАТИВНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ПОСТАВЩИКОВ НА ПРИНЦИПАХ LEAN И КРИ

*А.Н. Коверзнев, Е.Р. Шарпова*

### *Аннотация*

**Обоснование.** Глобальные цепи поставок демонстрируют высокую уязвимость на фоне геополитических конфликтов и пандемических сбоев, что обусловило стратегический переход к регионализации и импортозамещению. Однако успех этих стратегий ограничен недостаточной зрелостью локальных поставщиков. В этих условиях критически возрастает роль закупочной функции, которая должна перейти от операционного снабжения к стратегическому развитию партнеров для формирования локальной надежности и устойчивости.

**Цель** – переосмысление моделей развития поставщиков и демонстрации того, как закупочная функция может стать драйвером трансформации. Предлагается интегративный подход, адаптированный для применения в условиях ограниченных ресурсов, характерных для рынков с высокой монополизацией.

**Материалы и методы.** Теоретическую базу исследования составляют ключевые труды по стратегическому управлению поставками (Р. Мончка, Д. Краузе) и принципы бережливого производства (Lean) (Дж. Вомак, Д. Джонс). Была разработана кон-центрально-прикладная методология, основанная на цикле PDCA и аналитических инструментах Lean, таких как 5 Why и Диаграмма Исикавы, для диагности-

ки и устранения первопричин низкой эффективности. Методология апробирована на практических кейсах локализации.

**Результаты.** Разработанная Интегративная Модель подтверждает, что Lean является основой для повышения зрелости процессов. Установлено, что KPI (Качество, OTD, TCO) должны выступать не просто метриками, а инструментом трансформации поведения поставщика, будучи интегрированы в контрактные механизмы. В результате, закупочная функция трансформируется в Стратегического Интегратора и Архитектора Партнерства, который инвестирует в рост поставщика, преодолевает сопротивление изменениям и формирует конкурентное преимущество, включая развитие в направлении ESG и инноваций.

**Ключевые слова:** развитие поставщиков; Lean; закупочная функция; управление цепочками поставок; стратегическое партнерство; KPI; PDCA-цикл; регионализация

**Для цитирования.** Коверзнев, А. Н., & Шарапова, Е. Р. (2025). Закупочная функция как драйвер трансформации: интегративная модель развития поставщиков на принципах Lean и KPI. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 307–329. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-511>

Original article | Transportation Process Management

## PROCUREMENT FUNCTION AS A DRIVER OF TRANSFORMATION: AN INTEGRATIVE MODEL FOR SUPPLIER DEVELOPMENT BASED ON LEAN AND KPI PRINCIPLES

*A.N. Koverznev, E.P. Sharapova*

### *Abstract*

**Background.** Global supply chains are demonstrating high vulnerability amidst geopolitical conflicts and pandemic disruptions, necessi-

tating a strategic shift towards regionalization and import substitution. However, the success of these strategies is often limited by the insufficient maturity of local suppliers. In this context, the role of the procurement function critically increases; it must transition from operational sourcing to the strategic development of partners to build local reliability and sustainability.

**Purpose.** The research objective is to reconceptualize supplier development models and demonstrate how the procurement function can become a driver of transformation. An integrative approach is proposed, which is adapted for use in conditions of limited resources, characteristic of markets with high monopolization.

**Materials and methods.** The theoretical foundation of the research is built upon key works in strategic supply management (R. Monczka, D. Krause) and the principles of Lean Manufacturing (J. Womack, D. Jones). A conceptual and applied methodology was developed, based on the PDCA cycle and Lean analytical tools such as 5 Why and the Ishikawa Diagram, for diagnosing and eliminating the root causes of low efficiency. The methodology was validated using practical localization case studies.

**Results.** The developed Integrative Model confirms that Lean serves as the fundamental basis for enhancing process maturity. It is established that KPIs (Quality, OTD, TCO) must function not merely as metrics, but as a tool for transforming supplier behavior, by being integrated into contractual mechanisms. Consequently, the procurement function is transformed into a Strategic Integrator and Architect of Partnership, which invests in supplier growth, overcomes resistance to change, and builds a competitive advantage, including development towards ESG and innovation.

**Keywords:** supplier development; Lean; procurement function; supply chain management; strategic partnership; KPI; PDCA cycle; nearshoring

**For citation.** Koverznev, A. N., & Sharapova, E. P. (2025). Procurement function as a driver of transformation: an integrative model for supplier development based on Lean and KPI principles. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 307–329. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-411>

## **Введение**

Глобальные цепочки поставок оказались уязвимыми в период, когда требовалась максимальная устойчивость: пандемия, геополитические конфликты и рост логистических затрат продемонстрировали ограниченность традиционных моделей. Крупные компании столкнулись с дефицитом ключевых компонентов, что привело к пересмотру стратегий в пользу регионализации и повышения локальной надежности [1].

В этих условиях импортозамещение и локализация становятся не тактическим, а стратегическим выбором, сокращая транспортные издержки, повышая оперативность и снижая внешние риски. Однако смена географии сама по себе недостаточна: локальные поставщики нередко имеют недостаточный уровень зрелости процессов и культуры качества.

Это усиливает роль закупочной функции, находящейся на стыке стратегии, производства и рынка. Закупщик способен инициировать развитие поставщика, формируя систему KPI<sup>1</sup>, закрепляя цели в договорах и обеспечивая непрерывные улучшения. Таким образом, он выступает интегратором и формирует устойчивую цепочку поставок на принципах стратегического партнёрства [2].

*Цель исследования* – переосмыслить модели развития поставщиков и показать, как закупочная функция может стать драйвером трансформации. Предлагается интегративный подход, учитывающий практики США, Европы и стран СНГ, ориентированный на применение в условиях ограниченных ресурсов, высокой монополизации и административных барьеров.

## **Материалы и методы**

Теоретическая база исследования опирается на фундаментальные концепции стратегического управления поставками (Р. Мончка, Р. Трент, Д. Краузе, Т. Хэндфилд) и принципы бережливого

<sup>1</sup> KPI (Key Performance Indicators) – это ключевые показатели эффективности, представляющие собой числовые метрики для оценки результативности и достижения поставленных целей

производства (Дж. Вомак, Д. Джонс). Представленная методология апробирована на практических примерах программ развития поставщиков, реализованных в условиях дефицита ресурсов и необходимости локализации производства.

Адресатом статьи являются специалисты, задействованные в функциях закупок и управлении цепочками поставок, операционного менеджмента и развития поставщиков. Материал предлагает адаптируемую методологию для формирования зрелого стратегического партнерства, что критически важно в условиях современного тренда на регионализацию и импортозамещение.

### **Результаты и обсуждение**

Разработанная модель подтверждает, что бережливое производство (Lean) является ключевой методологической основой для повышения зрелости поставщиков и устойчивости цепи поставок. Применение PDCA-цикла и инструментов вроде 5 Why и Ishikawa позволяет трансформировать непрозрачные процессы.

KPI должны служить инструментом трансформации, фокусируясь на небольшом, управляемом наборе показателей (Качество, OTD, TCO), встроенных в контрактные механизмы.

В результате, закупочная функция трансформируется в Стратегического Интегратора и Архитектора Партнерства, который не просто контролирует, но и инвестирует в рост поставщика, нейтрализует сопротивление и создает устойчивое конкурентное преимущество, включая развитие в направлении ESG и инноваций.

### **Обсуждение**

#### **Идеология Lean**

Идеология бережливого производства (Lean), возникшая в системе Toyota Production System (TPS)<sup>2</sup>, направлена на устранение

---

<sup>2</sup> TPS (Toyota Production System) – Производственная система Toyota, направленная на устранение потерь, достижение максимальной эффективности и качества за счет постоянного совершенствования процессов

потерь и повышение создаваемой ценности [3]. Со временем Lean вышел за рамки промышленности, став универсальной управленческой концепцией, применяемой в логистике, финансах и цепочках поставок [4].

Ключевой принцип Lean – формирование потока ценности (value creation) за счёт стандартизации, визуализации процессов и вовлечения персонала в постоянные улучшения.

В контексте закупок Lean рассматривается не только как производственный метод, но и как основа повышения зрелости поставщиков. Значительная часть проблем в поставках обусловлена недостаточной прозрачностью процессов и слабой культурой управления [5, 6]. Lean предлагает единую методологическую базу – PDCA-цикл<sup>3</sup>, визуальные инструменты и унифицированные стандарты, обеспечивая основу для устойчивого взаимодействия и долгосрочного партнёрства [7], включая дальнейшее развитие в направлении ESG<sup>4</sup> и инноваций [8].

### **Этапы внедрения инструментов бережливого производства в развитие поставщиков**

Внедрение инструментов бережливого производства требует поэтапного подхода, основанного на оценке зрелости поставщика. Адаптация методов без учета его стартового уровня нередко приводит к формальному внедрению без устойчивого результата [9; 10].

Шаг 1: Оценка готовности поставщика. Применяется оценки зрелости (Lean Assessment Matrix), позволяющая определить уровень стандартизации, прозрачность процессов, вовлечённость персонала и устойчивость достигнутых результатов. Это помогает классифицировать поставщика и выбрать формат дальнейшей работы.

---

<sup>3</sup> PDCA (Plan-Do-Check-Act) – Планирование-Выполнение-Проверка-Корректировка, это цикл управления, также известный как “цикл Деминга” или “цикл Шухарта-Деминга”, представляющий собой четырехэтапный метод непрерывного совершенствования процессов и качества

<sup>4</sup> ESG (Environmental, Social, and Governance) – экологическая, социальная и корпоративная ответственность

Шаг 2: Выбор пилотной зоны. Пилот выбирается по принципу “один участок – один процесс”, важный для цепочки поставок или имеющий наибольший потенциал улучшений. При этом избегают зон с высокой нестабильностью и отсутствием базовой системы управления.

Шаг 3: Формирование команды. В состав включаются представители закупок, производства, качества и логистики. Кросс-функциональный подход обеспечивает комплексный взгляд и снижает риск односторонних решений.

Шаг 4: Обучение и визуализация. Проводится обучение по базовым инструментам (например, 5S<sup>5</sup> или VSM<sup>6</sup>) и визуальная фиксация текущего состояния [11, 12]. Это создаёт общий язык и понимание между заказчиком и поставщиком.

Шаг 5: Формализация улучшений. На основе анализа составляется план с KPI, сроками и ответственными, что облегчает фиксацию договорённостей и контроль прогресса.

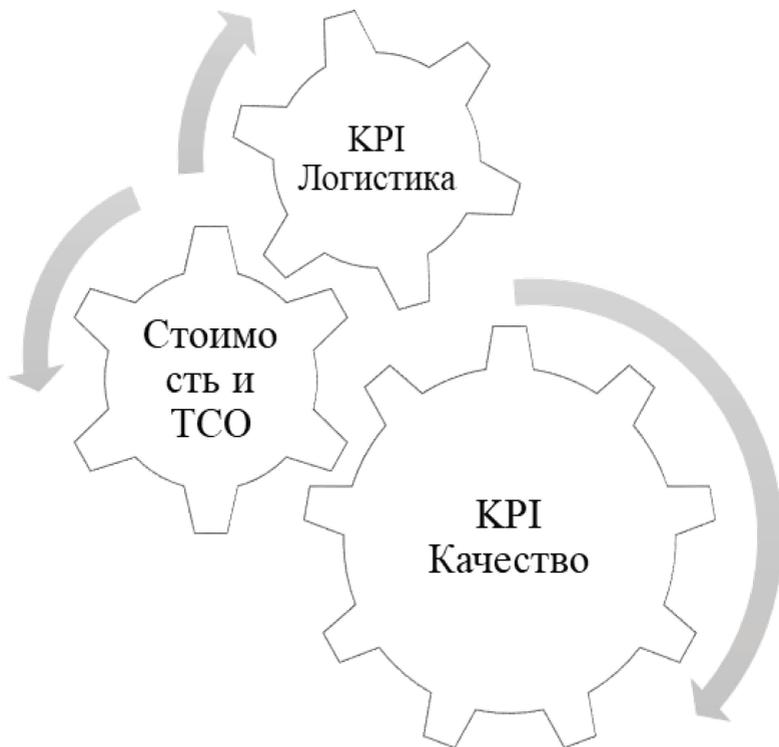
### **KPI в развитии поставщиков: от оценки до трансформации поведения**

KPI в системе развития поставщиков – это не просто показатели из таблицы, а инструмент трансформации (см. рисунок 1). Они задают направление изменений, структурируют взаимодействие и укрепляют доверие. KPI переводят стратегические цели в конкретные измеримые параметры, понятные обеим сторонам. Исследования показывают, что успешные программы опираются на небольшой, сфокусированный набор метрик, встроенный в карту оценки поставщика (Supplier Scorecard), регулярные обзоры и контрактные механизмы [7; 9]. Эффективный KPI соответствует четырём принципам: прозрачность расчёта,

<sup>5</sup> 5C (или 5S) – это японская система организации, основанная на пяти шагах: сортировка, соблюдение порядка, содержание в чистоте, стандартизация и совершенствование

<sup>6</sup> VSM (Value Stream Mapping) – карта потока создания ценности, визуальный инструмент из бережливого производства для анализа и улучшения процессов

управляемость результатом, ограниченный фокус (5-7 ключевых показателей) и объективность (никаких “мягких” формулировок без данных).



**Рис. 1.** КРІ в системе развития поставщиков  
Источник: составлено авторами

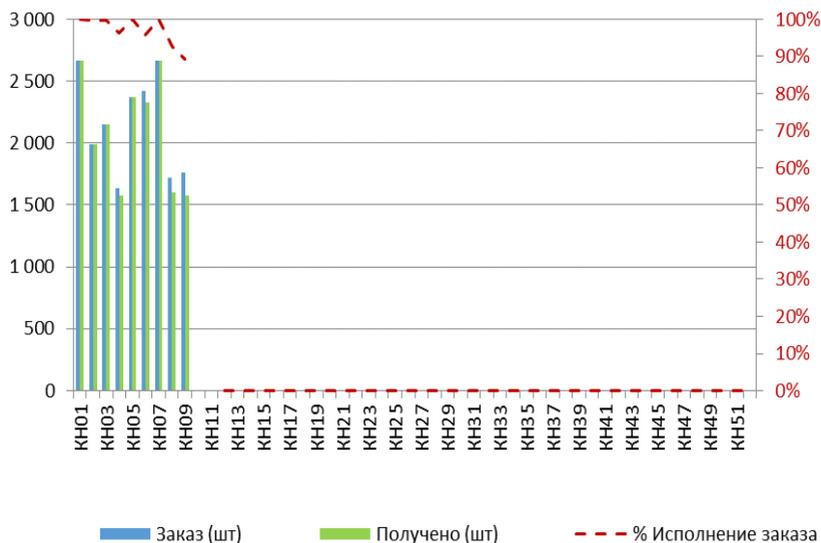
### **1. КРІ Качество**

Наиболее традиционная, но всё ещё критическая категория. Классические показатели уровень дефектов (PPM), доля возвратов, время реакции на рекламацию. Но важно не просто фиксировать цифры, а интегрировать их в цепочку анализа: причины, тренды, действия. В лучших практиках закупщики не только отслеживают PPM, но и проводят совместный анализ с поставщиком

по принципу 5 Why<sup>7</sup> или Ishikawa<sup>8</sup> [13], что ведёт к устойчивому снижению дефектности.

## 2. КРІ Логистика

Своевременность поставок (OTD)<sup>9</sup> – один из самых чувствительных показателей, особенно в условиях гибких производств. Здесь важно обеспечить прозрачную логику сбора данных, регулярную обратную связь и разбор причин сбоев. Хорошей практикой является ежемесячная автоматическая отправка отчёта поставщику с визуализацией динамики OTD и пояснением градации (например, зелёная зона –  $\geq 90\%$ , желтая –  $80\% \dots 90\%$ , красная –  $\leq 80\%$ ) (см. рисунок 2).



<sup>7</sup> Метод 5 Why (5 почему) – это техника анализа, которая помогает выявить первопричину проблемы путем последовательного задавания вопроса “Почему?”

<sup>8</sup> Ishikawa – это диаграмму Исикавы (также известную как диаграмма “рыбьей кости”), которая является инструментом для анализа причинно-следственных связей, помогает выявлять причины проблем, группируя их в категории

<sup>9</sup> OTD (On-Time Delivery) – своевременная доставка, то есть доставку заказа или товара к обещанной дате

2025	Заказ (шт.)	Получено (шт.)	% Исполнение заказа
КН01	2.668	2.668	100%
КН02	1.990	1.986	100%
КН03	2.152	2.148	100%
КН04	1.634	1.574	96%
КН05	2.369	2.369	100%
КН06	2.424	2.324	96%
КН07	2.664	2.664	100%
КН08	1.723	1.597	93%
КН09	1.762	1.573	89%
	>= 90%		
	между 80% и 90%		
	<= 80%		

**Рис. 2.** Пример KPI DOT  
Источник: составлено авторами

### 3. Стоимость и ТСО

Одним из важнейших элементов оценки поставщиков и управления их результативностью в рамках программ развития является показатель ежегодного снижения полной стоимости владения (YoY)<sup>10</sup>. Под ним понимают регулярное и измеряемое по годам сокращение совокупных затрат на владение и использование закупаемого ресурса. В отличие от разовых скидок и временных инициатив, ежегодное снижение ТСО – это устойчивый механизм оптимизации, встроенный в долгосрочные партнёрские отношения [14].

Показатель ТСО охватывает не только цену закупки, но и косвенные затраты: логистику, обслуживание, контроль качества, управление возвратами, запасами, а при необходимости и капитальные вложения (CAPEX)<sup>11</sup>, связанные с реализацией сотрудничества. Такой подход позволяет оценивать реальную экономи-

<sup>10</sup> YoY (Year-over-Year) – это показатель, обозначающий “год к году” и используемый для сравнения данных за определенный период текущего года с аналогичным периодом предыдущего года

<sup>11</sup> CAPEX (Capital Expenditure) – это капитальные затраты компании на приобретение, создание или модернизацию долгосрочных активов, таких как здания, оборудование и нематериальные активы

ческую выгоду сделки, уходя от поверхностной ориентации на минимальную цену.

Закрепление обязательств по ежегодному снижению ТСО стимулирует поставщика к проактивным действиям: внедрению новых материалов, оптимизации логистики и упаковки, участию в Lean-проектах и общей работе по снижению потерь (Lean-проекты или анализ экономической обоснованности конструкции). В результате поставщик становится не просто исполнителем заказа, а полноценным участником стратегии повышения эффективности цепочки поставок.

С научной точки зрения КРІ ежегодного снижения ТСО широко применяется в зрелых моделях закупочного управления. Он поддерживает трансформацию закупочной функции от транзакционной роли к стратегической, укрепляя её вклад в финансовые результаты компании и рентабельность [6; 7].

Методически такой КРІ должен фиксироваться в контракте в виде чётких обязательств, включающих формулу расчёта, годовые целевые значения и механизм контроля, желательно с привязкой к мотивации (например, бонусы за перевыполнение или продление договора при достижении целей). Включение показателя в карту оценки поставщика и его регулярный пересмотр на ежеквартальных бизнес-обзорах повышают прозрачность и воспринимаемую значимость.

Таким образом, показатель ежегодного снижения ТСО не только отражает текущую экономическую эффективность, но и создаёт основу для развития поставщика в сторону зрелого, инициативного и ориентированного на результат партнёра в рамках стратегических цепочек поставок.

### **Инновационный день и новые форматы партнёрства заказчика и поставщика**

В условиях усложнения цепочек поставок и усиления давления на издержки традиционные форматы взаимодействия заказчика и поставщика постепенно теряют результативность. Формальные

технические встречи уже не соответствуют целям стратегических закупок. Чтобы получить реальную синергию, компании переходят к новым моделям сотрудничества, в которых поставщик рассматривается как полноценный партнёр, участвующий в создании конечной ценности.

Одним из наиболее эффективных форматов становится “Инновационный день”. Это заранее организованное мероприятие, на котором стороны обсуждают рыночные тенденции, формируют совместные идеи и определяют направления дальнейшего взаимодействия. В отличие от обычных технических презентаций, здесь акцент переносится на стратегию: развитие продуктовой линейки, возможности упрощения спецификаций, снижение ТСО и ориентацию на потребности конечного клиента. В центре внимания – не свойства изделия как такового, а его вклад в конкурентоспособность всей цепочки создания ценности.

Для успешного проведения “Инновационного дня” требуется чёткая организация: фиксированная программа, индивидуальные слоты, участие кросс-функциональной команды заказчика и техническая поддержка. В зависимости от SCM<sup>12</sup> формат может быть очным или дистанционным. Поставщик заранее получает требования к содержанию презентации: анализ рынков, обновления продуктовой линейки, предложения по оптимизации и расчёт выгод для обеих сторон. Благодаря этому “Инновационный день” становится не разовым обсуждением, а частью системной работы по развитию партнёрства.

При этом развитие поставщика как источника улучшений не ограничивается единичной встречей. Современные компании всё активнее фиксируют вклад подрядчика в улучшения с помощью специальных KPI: количество предложенных инициатив, доля реализованных идей, экономический эффект (снижение затрат, брака, времени цикла). Эти данные фиксируются в цифровых реестрах и регулярно анализируются на специализированных встречах. На

<sup>12</sup> SCM (Supply Chain Management) – управление цепями поставок

практике используется и стимулирование: бонусы за экономически значимые улучшения, доступ к закрытым проектам, публичное признание. Нередко распределение экономии фиксируется формулой, заранее согласованной сторонами. Дополнительно развиваются цифровые платформы, позволяющие поставщикам не только вносить идеи, но и участвовать в их оценке, формируя экосистему постоянных улучшений.

Мировой опыт показывает, что зрелые компании уже интегрировали инновационную активность поставщика в систему закупок. Контракты могут включать обязательства по подаче улучшений или минимальное количество инициатив за период. Подходы, основанные на принципах открытых инноваций [15] и модели инициатив поставщика [16], доказали эффективность в формировании устойчивых и взаимовыгодных отношений.

В этой логике “Инновационный день” работает как стартовая точка: после него нередко запускаются проекты по пересмотру требований, оптимизации ТСО и внедрению новых технологий. При наличии потенциала инициатируются пилоты, а результаты мероприятий включаются в планы развития поставщика.

Таким образом, инновации становятся не побочным процессом, а направлением развития сотрудничества. Формализуя этот подход, компании получают не только экономические результаты и повышение качества, но и устойчивое конкурентное преимущество. “Инновационный день” превращается в управляемый инструмент стратегического развития и укрепления партнёрства, обеспечивая закупочной функции активную роль в трансформации всей цепочки создания ценности.

### **Роль закупщика как лидера развития**

Традиционно функция закупок воспринималась как инструмент достижения минимальной цены, ведения переговоров и контроля исполнения договорных условий. Однако в современных условиях, когда компании стремятся к устойчивым и взаимовы-

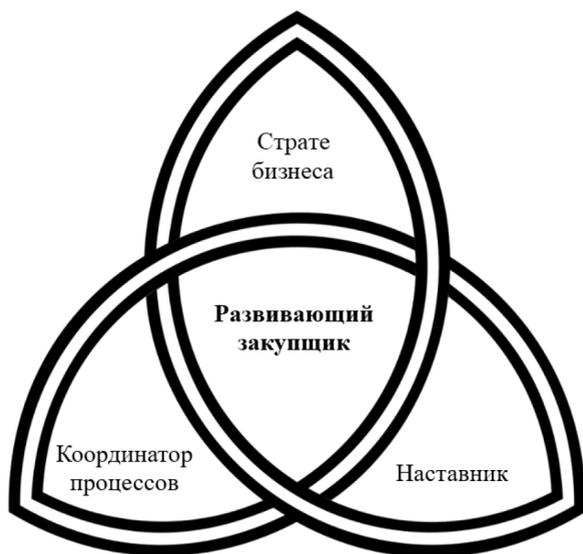
годным партнёрствам, эта роль требует переосмысления. В контексте развития поставщиков невозможно применять административный подход, навязанные сверху инициативы редко приводят к подлинным изменениям. Вместо этого необходимы партнёрство, доверие и объединение интересов. Именно в этом контексте появляется новая роль закупщика не как контролёра или надзирателя, а как ведущего изменений, наставника и архитектора системного взаимодействия.

Современный закупщик, работающий в программах развития поставщиков, действует на пересечении трёх ключевых сфер: бизнес-логики, организационных изменений и человеческой психологии. С одной стороны, он должен уметь переводить стратегические цели компании на понятный и достижимый для поставщика язык. С другой – он обязан понимать мотивацию, барьеры и страхи со стороны партнёра. Наконец, он играет ключевую роль в выстраивании рабочих процессов внутри своей организации, обеспечивая согласованность действий между отделами качества, логистики, разработки и другими функциями.

Эта тройная роль может быть представлена как пересечение трёх архетипов: стратег бизнеса, координатор процессов и наставник. Стратег формирует цели и приоритеты, соотнося инициативы развития поставщика с интересами компании. Координатор процессов обеспечивает согласованность и устойчивость действий, устраняет организационные разрывы и помогает проекту двигаться вперёд. Наставник выстраивает доверительные отношения, ведёт открытые и сложные диалоги, создаёт пространство для обратной связи и взаимного роста. В точке пересечения этих трёх ролей находится так называемый развивающий закупщик, новая модель профессионала, способного объединять бизнес-мышление с межличностной чуткостью и навыками организационного строительства (см. рисунок 3).

Закупщик не создаёт улучшения сам по себе, но становится триггером, то есть тем, кто запускает процессы развития, созда-

вая условия, при которых поставщик способен раскрыть свой потенциал. Для этого необходима не только техническая подготовка: знание методов анализа качества, управления производственными рисками и оценки зрелости процессов, но и развитые личностные качества: эмпатия, умение слушать, способность вести трудные переговоры, а также готовность признавать ошибки с обеих сторон. По сути, закупщик становится проводником изменений, а не носителем требований.



**Рис. 3.** Схема тройной роли развивающего закупщика  
Источник: составлено авторами

Фундаментом всей работы с поставщиком становится доверие. Причём доверие формируется не декларациями, а действиями: соблюдением сроков обратной связи, прозрачными критериями оценки, готовностью к совместным визитам на производственные площадки, последовательностью и честностью в коммуникации.

Поведенческая экономика давно показала, что устойчивое поведение в партнёрских отношениях обеспечивается не страхом

санкций, а ожиданием справедливого вознаграждения в будущем и уверенностью в надёжности второй стороны. Работы Fehr и Falk [16] подтверждают, что именно репутационные механизмы и доверие являются наиболее действенными стимулами к развитию и улучшению.

Однако работа закупщика не ограничивается только внешним взаимодействием. Внутри своей компании он становится организатором согласованных действий между функциями, выступая навигатором интересов и посредником между стратегическим и операционным уровнями. Он формирует обоснование для инвестиций в развитие поставщика, добивается поддержки со стороны руководства, аргументирует необходимость предоставления бонусов, приоритетов или других инструментов мотивации. Его задача не просто согласовать условия поставки, а убедить внутреннюю организацию в ценности долгосрочного подхода к развитию партнёров.

В условиях нестабильных рынков, жёсткой конкуренции и растущих требований со стороны клиентов зрелость закупочной функции всё чаще определяется не количеством сэкономленных евро или количеством закрытых договоров, а числом поставщиков, вышедших на качественно новый уровень. Программы развития поставщиков становятся не только инструментом операционного совершенствования, но и индикатором стратегического мышления и лидерского потенциала закупочной команды. Закупщик, способный развивать других, становится катализатором развития всей цепочки поставок.

Таким образом, современный закупщик – это не просто профессионал по переговорам. Это проводник трансформации, стратег и наставник. Его влияние выходит за пределы традиционной функции снабжения. Он не просто взаимодействует с поставщиком, он инвестирует в его рост. Не просто снижает затраты, а строит устойчивую экосистему. Не просто исполняет заказы, а создаёт новые точки роста. В этом и заключается суть зрелости, умение развивать других как главный признак собственной силы.

### **Барьеры развития поставщика: от скрытого сопротивления к культурной навигации**

Одним из наименее очевидных, но наиболее разрушительных факторов, мешающих развитию поставщика, является латентное сопротивление изменениям (см. таблицу 1). Именно скрытые формы сопротивления, когда сотрудники формально соглашаются с инициативами, но не предпринимают реальных шагов – наносят наибольший ущерб. Они подрывают доверие, тормозят внедрение улучшений и демотивируют вовлечённые команды [9; 17].

*Таблица 1.*

**Барьеры развития поставщика и пути решения**

<b>Барьеры развития поставщика</b>	<b>Пути решения</b>
CAVE-сопротивление	Вовлечение внутренних сторонников изменений и руководства, пилотные проекты, ограниченный масштаб, адаптированная риторика
Ресурсный дефицит на стороне поставщика	Адаптивный, ступенчатый подход, введение минимальных стандартов, шаблоны, чек-листы, совместные визиты на производство
Культурный	“Мост понимания”, привлечение внутренних лидеров, адаптация инструментов под местный контекст от формулировок до визуального оформления, обучение межкультурной коммуникации
Потеря фокуса и мотивации по ходу проекта	Дорожная карта, контрольные точки, визуализация достижения

Источник: составлено авторами

Это явление получило в литературе обозначение как эффект CAVE<sup>13</sup>. Однако в отличие от открытого конфликта, CAVE-сопротивление нельзя преодолеть силой. Оно требует стратегического, мягкого подхода. Наиболее эффективными методами здесь становятся выявление внутренних сторонников изменений на стороне поставщика, запуск пилотных проектов с ограниченным масштабом, но быстрой отдачей, демонстрация практической пользы (на-

<sup>13</sup> CAVE (Citizens Against Virtually Everything) – сотрудники, априори против всего нового

пример, снижение уровня брака, повышение стабильности поставок, экономия затрат), а также активное участие руководства обеих сторон. В случаях, когда поставщик занимает монопольное положение и чувствует себя “неуязвимым”, такие подходы становятся не просто желательными, а критически необходимыми.

Важно также адаптировать риторику и методику внедрения изменений под восприятие конкретной организации. Например, вместо терминов “бережливое производство” или “шесть сигм” может использоваться более нейтральное определение – “внутренние улучшения процессов”. Такая языковая настройка снижает тревожность и переводит разговор из плоскости внешнего давления в сферу взаимной выгоды [18; 19].

Таким образом, работа с глубинными поведенческими паттернами поставщика становится неотъемлемой частью успешного развития. Признание существования феномена скрытого сопротивления и системная работа по его нейтрализации есть необходимый шаг к устойчивому, партнёрскому и воспроизводимому взаимодействию.

Второй блок ограничений связан с объективными ресурсными дефицитами на стороне поставщика. Программа развития требует не только желания, но и ресурсов: наличия инженера по процессам, координатора производственной системы, опытного мастера. В реальности многие локальные поставщики, особенно в развивающихся регионах, не имеют таких кадров и не могут сразу обеспечить требуемый уровень вовлечённости. Это создаёт эффект “недостижимости” даже для базовых инициатив.

Выходом становится адаптивный, ступенчатый подход. Инициатива начинается с простейших инструментов: наведения порядка на рабочем месте, визуализации потока создания ценности, введения минимальных стандартов технического обслуживания. Эти методы обладают низким порогом входа и позволяют быстро получить видимый результат. Поддержка на старте в виде шаблонов, чек-листов, совместных визитов на производственные участ-

ки помогает преодолеть инерцию и создать ощущение движения. Разделение программы развития на фазу стабилизации и фазу роста позволяет снизить давление, выстроить реалистичный горизонт и заложить основу доверия [20].

Третий пласт барьеров – культурный. В некоторых странах, особенно в Восточной Азии и на постсоветском пространстве, устойчивыми остаются страх потери лица, ориентация на краткосрочные выгоды, недоверие к внешнему влиянию. Западные инструменты, такие как пошаговое улучшение процессов, оценка надёжности, статистический контроль качества, нередко воспринимаются как избыточные, непрактичные или неуместные. Это приводит к формальному согласию без реального внедрения.

Противодействовать этим культурным барьерам можно через построение “моста понимания” между сторонами. Хорошей практикой является привлечение уважаемых фигур на стороне поставщика, так называемых внутренних лидеров, которые обладают авторитетом и могут транслировать цели проекта на понятном языке. Также важно адаптировать все инструменты под местный контекст от формулировок до визуального оформления. Обучение закупщиков основам межкультурной коммуникации, знание ментальных и коммуникативных особенностей партнёра становятся ключевыми компетенциями, а не факультативом [21].

Четвёртым барьером выступает потеря фокуса и мотивации по ходу проекта. Программы развития поставщиков по своей природе долгосрочны. При отсутствии промежуточных результатов, чётко очерченных фаз и видимых индикаторов прогресса мотивация обеих сторон снижается. Поставщик теряет веру в результат, а закупщик начинает воспринимать инициативу как “затянувшийся процесс без конца”.

Здесь критически важно структурировать проект: сформировать дорожную карту, определить контрольные точки, визуализировать достижения. Использование карточек результатов, наглядных графиков, регулярных встреч и ритуалов признания

достижений помогает поддерживать энергию проекта. Публикация промежуточных успехов в корпоративных каналах, публичная благодарность и фиксация даже небольших шагов вперёд создают эффект движения и укрепляют вовлечённость.

Таким образом, эффективная реализация программы развития поставщика требует не административного нажима, а тонкой, выверенной работы. Закупщик в такой программе выступает не как носитель контроля, а как ведущий трансформации, стратег влияния и архитектор партнёрства. Его задача не бороться с сопротивлением, а перенаправлять его, превращая барьеры в точки роста. Только такой подход позволяет выстроить зрелую, масштабируемую и воспроизводимую модель взаимодействия с поставщиками.

### *Список литературы / References*

1. McKinsey & Company. (2020). *Annual report: Supply chain disruption and regionalization strategy* (pp. 2–3).
2. Krause, D. R., & Scannell, T. V. (2002). Supplier development practices: Product- and process-based projects. *Journal of Supply Chain Management*, 38(2), 36–53. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2002.tb00125.x>. EDN: <https://elibrary.ru/DVUKSP>
3. Ohno, T. (1988). *Toyota production system: Beyond large-scale production* (pp. 16–27). New York: Productivity Press. ISBN: 978-0-915299-14-0
4. Bicheno, J., & Holweg, M. (2009). *The Lean toolbox: The essential guide to lean transformation* (4th ed., pp. 112–117). Buckingham: PIC-SIE Books. ISBN: 978-0-9541244-5-8
5. Trent, R. J. (2007). *Strategic supply management: Creating the next source of competitive advantage*. Florida: J. Ross Publishing. ISBN: 978-1-932159-67-7
6. Monczka, R. M., Handfield, R. B., Giunipero, L. C., & Patterson, J. L. (2020). *Purchasing and supply chain management* (7th ed.). Boston: Cengage Learning. ISBN: 978-0-357-71089-0

7. Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation* (pp. 3–27). New York: Simon & Schuster. ISBN: 978-0-684-81035-5
8. Montabon, F., Pagell, M., Wu, Z., & Wasserman, M. E. (2016). Making sustainability sustainable. *Journal of Supply Chain Management*, 52(2), 11–27. <https://doi.org/10.1111/jscm.12103>
9. Krause, D. R., Handfield, R. B., & Scannell, T. V. (1998). An empirical investigation of supplier development: Reactive and strategic processes. *Journal of Operations Management*, 17(1), 39–58. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(98\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(98)00030-8)
10. Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2014). Lean manufacturing: Literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management*, 34(7), 876–940. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315>
11. Netland, T. H., & Ferdows, K. (2016). The S-curve effect of lean implementation: A context perspective. *International Journal of Operations & Production Management*, 36(11), 1435–1457. <https://doi.org/10.1111/poms.12539>
12. Rother, M., & Shook, J. (2003). *Learning to see: Value stream mapping to add value and eliminate muda*. Lean Enterprise Institute. ISBN: 978-0-9667843-0-5
13. Christopher, M. (2016). Total cost of ownership as a hidden source of sustainable savings. In *Logistics & supply chain management* (5th ed., pp. 123–128). Pearson Education. ISBN: 978-1-292-08379-7
14. Chesbrough, H. W. (2003). *Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology* (pp. 1–25). Boston: Harvard Business Press. <https://doi.org/10.1108/14601060410565074>
15. Capgemini Research Institute. (2022). *Supplier-led innovation: Unlocking value through ecosystem partnerships* (pp. 6–9). Paris.
16. Fehr, E., & Falk, A. (2002). Psychological foundations of incentives. *European Economic Review*, 46(4–5), 687–724. <https://doi.org/10.2139/ssrn.294287>

17. Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47(2), 263–291. <https://doi.org/10.2307/1914185>
18. Hirano, H. (1995). *5 pillars of the visual workplace: The sourcebook for 5S implementation* (pp. 8–23). Portland, OR: Productivity Press. ISBN: 978-1-56327-047-5
19. Bhasin, S. (2015). *Lean management beyond manufacturing: A holistic approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17410-5>
20. Jüttner, U., Peck, H., & Christopher, M. (2007). Supply chain risk management: Outlining an agenda for future research. *International Journal of Logistics Management*, 18(2), 197–210. <https://doi.org/10.1080/13675560310001627016>
21. Monczka, R. M., Handfield, R. B., Moncka, R. M., Scannell, T. B., Ragatz, G. L., & Frayer, D. J. (2000). *New product development: Strategies for supplier integration*. ASQC/Quality Press. ISBN: 978-0-357-71089-0

### ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Коверзнев Артем Николаевич**, глобальный категорийный менеджер по закупкам  
*BSH Hausgeräte GmbH*  
г. Мюнхен, Германия  
[artem.koverznev@gmail.com](mailto:artem.koverznev@gmail.com)

**Шарапова Екатерина Рамилевна**, начальник отдела закупок и ВЭД  
*ГК Прометей*  
пер. Басков, 36А, пом. 1Н, г. Санкт-Петербург, 191014, Российская Федерация  
[catherine.charapova@gmail.com](mailto:catherine.charapova@gmail.com)

### DATA ABOUT THE AUTHORS

**Artem N. Koverznev**, Global Category Manager GOM-PMEP  
*BSH Hausgeräte GmbH*

*Munich, Germany*

*artem.koverznev@gmail.com*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5911-4117>*

*LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/artem-koverznev-9107b7158>*

**Ekaterina R. Sharapova**, Supply Chain Manager

*Prometheus Group*

*36A, room 1N, lane Baskov, St. Petersburg, 191014, Russian Federation*

*catherine.charapova@gmail.com*

*SPIN-code: 5757-5254*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7476-5855>*

*ResearcherID: MCX-5878-2025*

*ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Ekaterina-Sharapova-4>*

*LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/catherine-sharapova/>*

Поступила 04.11.2025

После рецензирования 01.12.2025

Принята 12.12.2025

Received 04.11.2025

Revised 01.12.2025

Accepted 12.12.2025

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-406

EDN: QNYMJW

УДК 656.2



Научная статья | Логистические транспортные системы

## О РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СПОСОБА ТРАНСПОРТИРОВКИ КОНТЕЙНЕРНОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ

*М.А. Марченко, Г.И. Никифорова, Д.С. Халтурина*

### *Аннотация*

**Обоснование.** В статье произведён обзор текущего состояния рынка железнодорожных контейнерных перевозок. Представлены и проанализированы статистические данные по рынку контейнерных перевозок. Произведён обзор работ, направленных на совершенствование организации перевозки контейнерной продукции железнодорожным транспортом. Составлена укрупненная схема доставки контейнеров с использованием железнодорожного транспорта. Выявлены ключевые задачи, направленные на обеспечение надёжности доставки контейнерной продукции, систематизированы основные факторы, влияющие на скорость доставки контейнеров. Сформулировано математическое выражение времени доставки контейнера для условий прямого варианта перегрузки с одного вида транспорта на другой и с учетом переработки и хранения груза на терминале. Сформулирована задача оптимизации схемы доставки контейнеров в мультимодальной перевозке в условиях наличия нескольких вариантов контейнерных терминалов, их расположения. При этом по условию сформулированной задачи предусматривается одна переработка контейнеров на терминале. Предложена система поддержки принятия решения изменения способа транспортировки контейнерной продукции при

мультимодальных перевозках. Сделаны выводы о перспективах использования предложенной системы транспортно-логистическими компаниями.

**Цель** – определение вариантов обеспечения поточности и бесперебойности продвижения контейнеропотоков при мультимодальных перевозках.

**Метод и методология проведения работы.** В статье использовались анализ существующего положения в сфере контейнерных перевозок, математическое моделирование времени доставки контейнера, оптимизация схемы доставки контейнера на основе решения о перегрузке контейнера на каждом терминале, сформулирована система поддержки принятия решения в управлении доставкой.

**Результаты.** Определено состояние контейнерных перевозок с участием железнодорожного транспорта, выполнен анализ исследований в области контейнерных перевозок с использованием железнодорожного транспорта, выявлены направления обеспечения надёжности доставки контейнеров. Предложена система поддержки принятия решения при мультимодальных контейнерных перевозках.

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

**Ключевые слова:** контейнерные перевозки; схема доставки контейнера; контейнерный терминал; время доставки; время перегрузки

**Для цитирования.** Марченко, М. А., Никифорова, Г. И., & Халтуринская, Д. С. (2025). О разработке системы поддержки принятия решения изменения способа транспортировки контейнерной продукции при мультимодальных перевозках. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 330–348. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-406>

Original article | Logistic Transport Systems

## ON THE DEVELOPMENT OF A SUPPORT SYSTEM FOR DECISION-MAKING ON CHANGING THE WAY CONTAINER PRODUCTS ARE TRANSPORTED IN MULTIMODAL TRANSPORTATION

*M.A. Marchenko, G.Is. Nikiforova,  
D.S. Khalturinskaya*

### *Abstract*

**Background.** The article provides an overview of the current state of the railway container transportation market. Statistical data on the container transportation market is presented and analyzed. The article provides an overview of the work aimed at improving the organization of container transportation by rail. A generalized scheme of container delivery using rail transport is developed. The key objectives aimed at ensuring the reliability of container delivery are identified, and the main factors affecting the speed of container delivery are systematized. A mathematical expression of the delivery time of a container for the conditions of a direct option of transshipment from one mode of transport to another and taking into account the processing and storage of cargo at the terminal. Formulated the problem of optimizing the delivery scheme of containers in multimodal transportation in the conditions of the presence of several options of container terminals, their location. At the same time, according to the conditions of the formulated task, one processing of containers at the terminal is provided. A decision support system for changing the method of transportation of container products in multimodal transportation is proposed. Conclusions are drawn about the prospects of using the proposed system by transport and logistics companies.

The **purpose** is to identify options for ensuring the flow and uninterrupted movement of container flows during multimodal transportation.

**Methodology.** The article used an analysis of the current situation in the field of container transportation, mathematical modeling of container delivery time, optimization of the container delivery scheme based on the decision to overload the container at each terminal, and formulated a decision support system for delivery management.

**Results.** The state of container transportation involving rail transport is determined, the analysis of studies in the field of container transportation using rail transport is performed, the directions of ensuring the reliability of container delivery are identified. A decision support system for multimodal container transportation is proposed.

**Practical implications.** The results obtained can be used in the railway container transportation system, as well as by freight forwarding, operator, and transport and logistics companies.

**Keywords:** container transportation; container delivery scheme; container terminal; delivery time; reloading time

**For citation.** Marchenko, M. A., Nikiforova, G. I., & Khalturinskaya, D. S. (2025). On the development of a support system for decision-making on changing the way container products are transported in multimodal transportation. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 330–348. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-406>

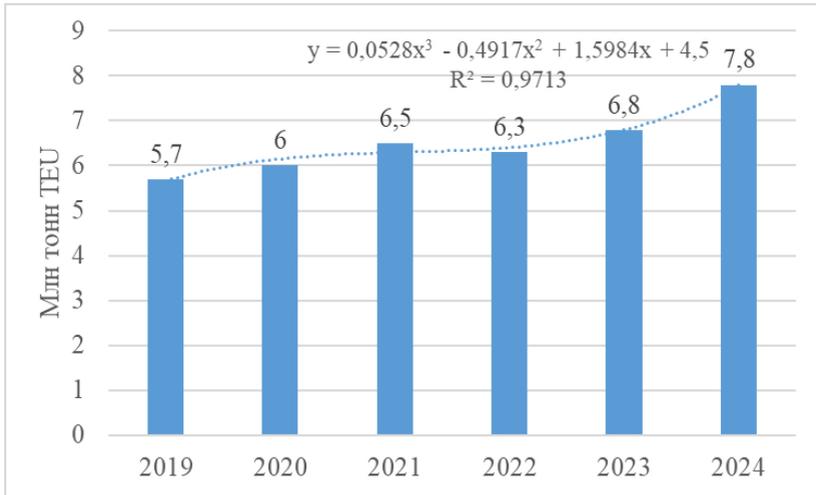
Ключевыми задачами Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года является обеспечение связанности территории государства и обеспечение транспортной доступности населения. Железнодорожный транспорт играет в этом большую роль в связи с большой протяжённостью маршрутов и относительно низкой себестоимостью перевозок [1].

Принципиально изменившаяся геополитическая ситуация послужила дополнительным стимулом для повышения эффективности работы транспортных компаний, поскольку условия санкционного давления делают актуальной задачу поиска альтернативных логистических каналов и сокращения себестоимости перевозок, при этом обеспечивая высокий уровень качества оказания транс-

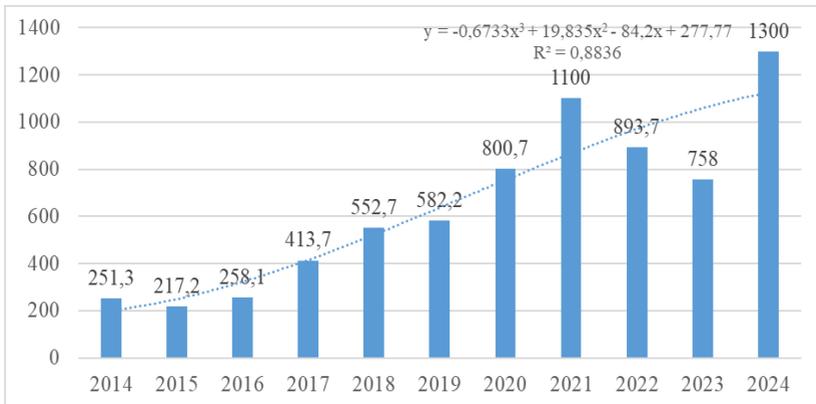
портных услуг [2-3]. Многие российские перевозчики начали свою деятельность на рынках стран Азиатско-тихоокеанского региона и Персидского залива. Одним из наиболее эффективных способов сохранения и усиления конкурентной позиции и инвестиционной привлекательности на новых транспортных рынках и обеспечения выполнения задач Транспортной стратегии является следование тренду глобальной контейнеризации грузопотоков, в освоении которого участвуют практически все виды транспорта (железнодорожный, автомобильный, морской, внутренний водный и авиационный).

Вопросы совершенствования организации перевозки контейнерной продукции железнодорожным транспортом рассматривались в работах Москвичёва О.В., Мамаева Э.А., Осьминина А.Т., Куренкова П.В., Рахмангулова А.Н., Рогулина Р.С., Маликова О.Б. Покровской О.Д., Коровяковского Е.К [4-19]. Авторами освещены актуальные проблемы предметной области и предложены методы оптимизации перевозочного процесса на основе теории обработки больших данных, линейного программирования, численного и динамического моделирования, технологии машинного обучения. Изучение научных трудов показало, что в настоящее время уделяется большое внимание вопросам организации движения контейнерных поездов, определению оптимального местоположения контейнерных терминалов, оптимизации технологических операций и внедрению цифровых систем. Однако недостаточно внимания уделяется вопросам организации доставки контейнеров при мультимодальных перевозках (взаимодействии нескольких видов транспорта).

*Целью исследования* является поиск вариантов обеспечения точности и бесперебойности продвижения контейнеропотоков при мультимодальных перевозках. В рамках статьи исследование ограничено железнодорожным и автомобильным видами транспорта, на которые приходится наибольший контейнеропоток, что подтверждают статистические данные (рисунок 1, 2).



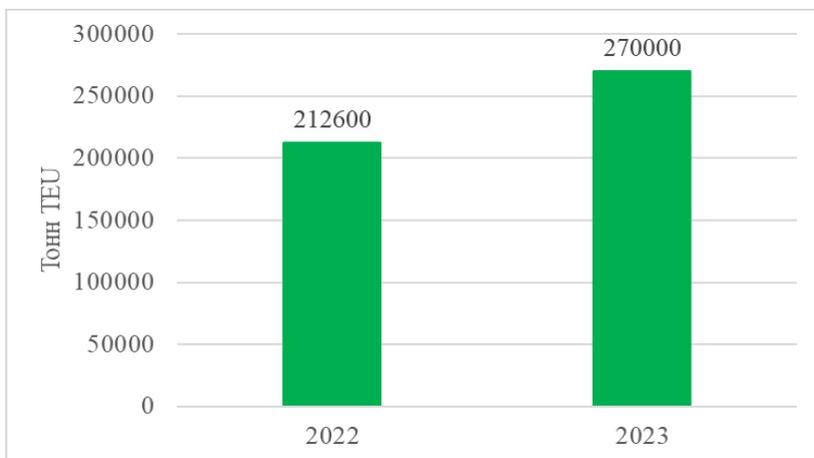
**Рис. 1.** Динамика изменения контейнеропотока по сети ОАО «РЖД» за 2019-2024 годы [20]



**Рис. 2.** Динамика изменения объемов транзитных контейнерных перевозок железнодорожным транспортом по территории Российской Федерации [20]

На примере компании АО «Евросиб – транспортные системы», осуществляющей оказание услуг по организации ускоренных перевозок грузов в контейнерных поездах по расписанию, door-to-door перевозки грузов в рамках мультимодальных перевозок и

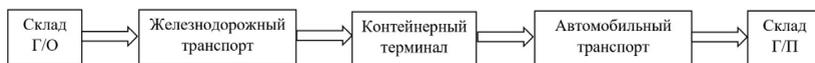
имеющей в собственности два контейнерных терминала (в Орехово-Зуево (Московская область) перерабатывающей способностью в 75 000 TEU и в Новосибирске перерабатывающей способностью в 180 000 TEU) чётко прослеживается тенденция на увеличение контейнеризации перевозимых грузов (рисунок 3) по основным направлениям перевозок между Москвой, Санкт-Петербургом и регионами Сибирского и Дальневосточного федеральных округов (Новосибирском, Красноярском и Владивостоком) [21].



**Рис. 3.** Динамика изменения объёмов железнодорожных контейнерных перевозок АО «Евросиб – транспортные системы» [21]

Статистические данные демонстрируют тенденцию увеличения объёмов контейнерных перевозок: с 2019 по 2025 год объём перевозок на сети ОАО «РЖД» вырос на 37%, а объём контейнерных перевозок АО «Евросиб – транспортные системы» увеличился на 27%. Подобные увеличения контейнеропотока приводят к росту нагрузки на транспортно-логистические объекты, особенно в восточных регионах страны, что приводит к повышенной нагрузке на железнодорожную инфраструктуру [22]. Данные обстоятельства провоцируют риск задержки доставки контейнеров [19], что является подтверждением актуальности статьи.

В рамках работы рассмотрен наиболее простой способ доставки контейнера от склада грузоотправителя к складу грузополучателя – железнодорожным и автомобильным транспортом (рисунок 4). Рассмотрена перевозка контейнера при его транспортировке от склада грузоотправителя ускоренным контейнерным поездом до перегрузочного терминала, дальнейшей перегрузке на автомобильный транспорт и последующей доставке непосредственно до склада грузополучателя.



**Рис. 4.** Укрупнённая схема доставки контейнера

В такой схеме на скорость доставки, помимо маршрутной скорости транспортных средств, влияют следующие факторы:

- время на переработку контейнеров на терминале и оформление документов;
- время на доставку контейнера от склада грузоотправителя до места формирования контейнерного поезда (при отсутствии у предприятия собственных путей необщего пользования);
- плотность железнодорожной и автомобильной сетей в регионах расположения складов и терминалов.

В общем виде математическая модель времени доставки контейнера от склада грузоотправителя до склада грузополучателя при условии перегрузки контейнера из поезда в автомобиль по прямому варианту для схемы на рисунке 4 выглядит следующим образом:

$$t_{д}^{\Pi} = t_{\text{погр}}^{\text{КП}} + t_{д}^{\text{КП}} + t_{\text{техн}}^{\text{T}} + t_{д}^{\text{авт}} + t_{\text{выгр}}^{\text{авт}}, \quad (1)$$

где  $t_{д}^{\Pi}$  – полное время доставки контейнера по рассматриваемой схеме;

$t_{\text{погр}}^{\text{КП}}$  – время погрузки контейнера в поезд;

$t_{д}^{\text{КП}}$  – время доставки контейнера поездом;

$t_{д}^{\text{авт}}$  – время доставки контейнера автомобилем;

$t_{\text{выгр}}^{\text{авт}}$  – время выгрузки контейнера из автомобиля;

$t_{\text{техн}}^T$  – время на технологические операции по обработке контейнеропотока на терминале. Определяется согласно формуле (2):

$$t_{\text{техн}}^T = 2 \cdot t_{\text{пг}} + t_{\text{пер}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{пг}}$  – время на грузовые работы по выгрузке/погрузке контейнера из вагона/на автомобиль;

$t_{\text{пер}}$  – время переработки и хранения контейнера на терминале.

Стоит отметить, что прямой вариант перегрузки при всех его кажущихся преимуществах за счет исключения временной и денежной составляющей на переработку контейнера на терминале и увеличения объема грузовых работ, имеет и недостатки. Основным является непроизводительный простой транспортных средств в ожидании подачи вагонов или автомобилей с контейнерами.

На основе обработки статистических данных возможно осуществление прогноза о прибытии контейнера на конкретный терминал, а также в конечный пункт назначения – склад грузополучателя, что позволяет повысить достоверность принятого решения о целесообразности смены вида транспорта. В помощь численной реализации этой задачи предлагается привлечь математический аппарат, известный как метод построения доверительных интервалов.

Сущность данного метода заключается в предоставлении возможности с заданной вероятностью определить верхнюю и нижнюю временные границы математического ожидания для каждого элемента (1). Далее, на основании полученных данных и известной информации о времени контейнера в пути получение прогноза об оставшемся времени в пути и сроках прибытия контейнера на склад грузополучателя выполняется в одно арифметическое действие. Вычисление значения доверительного интервала удобно производить с применением пакета прикладных программ STATGRAFIC [23].

Задача оптимизации схемы доставки контейнера при осуществлении мультимодальной перевозки заключается в принятии решения о перегрузке контейнера из контейнерного поезда в автомобиль при наличии нескольких вариантов контейнерных терминалов, их взаимного расположения и удалённости относительно

пунктов отправления и назначения (рисунок 5). В рамках задачи рассматривается перегрузка один раз за всю продолжительность доставки контейнера.

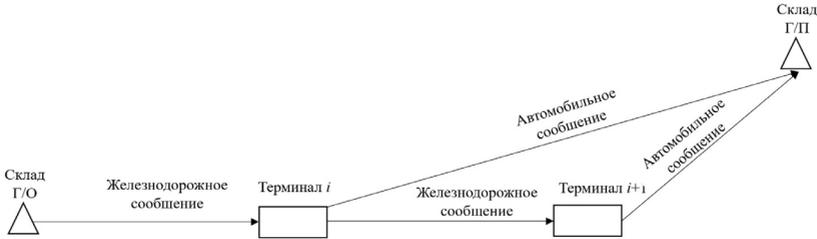


Рис. 5. Схема транспортно-логистической инфраструктуры контейнерных перевозок

Решение о перегрузке контейнера на каждом терминале проверяется согласно условию (2):

$$t_{пг\ i} + t_{д\ i}^{авт} < t_{д\ i+1}^{кп} + t_{обр\ i+1} + t_{д\ i+1}^{авт}, \quad (3)$$

где  $t_{техн\ i}^T$  – время на технологические операции при перегрузке контейнера из поезда в автомобиль на терминале  $i$ ;

$t_{д\ i}^{авт}$  – время доставки контейнера автомобилем с терминала  $i$  до склада грузополучателя;

$t_{д\ i+1}^{кп}$  – время доставки контейнера поездом до терминала  $i + 1$ ;

$t_{техн\ i+1}^T$  – время на технологические операции при перегрузке контейнера из поезда в автомобиль на терминале  $i + 1$ ;

$t_{д\ i+1}^{авт}$  – время доставки контейнера автомобилем с терминала  $i + 1$  до склада грузополучателя (может быть равным нулю при следовании контейнерного поезда непосредственно в конечный пункт выгрузки – складу грузополучателя).

На основе математической модели предложена система поддержки принятия решений на основе двухкритериального дерева принятия решений, которая позволит сократить время доставки контейнера при взаимодействии железнодорожного и автомобильного видов транспорта. Выполнение условия (3), когда осуществляется перегрузка на терминале, имеет условное обозначение ●, а невыполнение, когда перегрузка на терминале не осуществляется, обозначается О. При

этом учитывается количество контейнеров, которые может принять каждый терминал, тип контейнеров, необходимое техническое оснащение для их перегрузки, а также наличие транспорта.

При усложнении схемы доставки, когда возникает необходимость несколько раз осуществлять изменение вида транспорта, математическая модель выглядит следующим образом (3):

$$t_d^{\Pi} = \sum_{i=1}^n (t_d^{КП} + t_{пг} + t_d^{АВТ}) + t_{погр} + t_{выгр} \quad (3)$$

При такой постановке задачи выбор вида транспорта осуществляется на каждом  $i$ -ом терминале, а перегрузка контейнера осуществлена как из контейнерного поезда в автомобиль, так и из автомобиля в контейнерный поезд. Алгоритм системы представлен на рисунке 6.

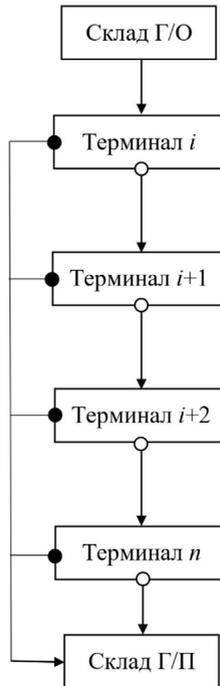


Рис. 6. Алгоритм системы поддержки принятия решения

Предложенная система поддержки принятия решения позволит сократить время доставки контейнерной продукции за счёт оптимизации способа выбора терминала осуществления перегрузки контейнера согласно схеме доставки. В дальнейшем предполагается автоматизация производимых вычислений и разработка программного обеспечения, способного функционировать как отдельная программа или при интеграции в программные комплексы транспортно-логистических компаний.

В статье произведён анализ динамики рынка железнодорожных контейнерных перевозок. Произведён обзор работ, направленных на совершенствование организации перевозки контейнерной продукции железнодорожным транспортом, в результате которого выявлены ключевые задачи, направленные на обеспечение надёжности доставки контейнерной продукции. Предложена система поддержки принятия решения изменения способа транспортировки контейнерной продукции при мультимодальных перевозках. Алгоритм системы в дальнейшем предполагается перевести в программный код и использовать в качестве цифрового сервиса. Система пригодна для использования в крупных и средних транспортно-логистических компаниях. Её функционал будет способствовать решению ключевых задач обеспечения поточности и бесперебойности продвижения контейнеропотоков при мультимодальных перевозках.

### *Список литературы*

1. Правительство Российской Федерации. (2021). *Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года* (утв. распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р). Москва, 282 с.
2. Дежков, М. А., Никонюк, А. А., Филипченко, С. А., [и др.]. (2025). Реализация логистических решений по повышению эффективности железных дорог Российской Федерации. *Логистика*, 1(218), 10–14. EDN: <https://elibrary.ru/BQCEKL>
3. Агафонов, П. Э. (2025). Предложения по перераспределению трафика железнодорожных грузоперевозок для повышения транс-

- портной пропускной способности ОАО «РЖД». *Логистика*, 1(218), 16–21. EDN: <https://elibrary.ru/TBRWEP>
4. Пацев, Ю. П., & Москвичев, О. В. (2024). Двухкритериальный подход к выбору оптимального варианта контрейлерных перевозок. *Наука и образование транспорту*, 1, 120–122. EDN: <https://elibrary.ru/UTTYAL>
  5. Москвичев, О. В., Москвичева, Е. Е., & Васильев, Д. В. (2025). Развитие логистики перевозки грузов контейнерными поездами: новые аспекты, требования, решения. *Транспорт Урала*, 1(84), 60–65. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2025-1-60-65>. EDN: <https://elibrary.ru/WFPLQL>
  6. Москвичев, О. В., & Васильев, Д. В. (2021). Экономико-математическая модель установления организационно-технологических требований к организации маршрутных контейнерных перевозок. В *Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвящённой 125-летию университета* (Москва, 22 октября 2021 года, с. 509–520). Москва: Российский университет транспорта. <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.68>. EDN: <https://elibrary.ru/GTMUSI>
  7. Мамаев, Э. А., & Бабешко, А. И. (2025). Логистическая оптимизация как фактор повышения конкурентоспособности транспортного предприятия. В *Управление социально-экономическим развитием регионов: проблемы и пути их решения: сборник научных статей 15-й Международной научно-практической конференции* (в 2-х томах, Курск, 27 июня 2025 года, с. 314–319). Курск: ЗАО «Университетская книга». EDN: <https://elibrary.ru/TTMWKH>
  8. Осьминин, А. Т. (2021). О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте. В *Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ»* (Щербинка, 26–27 августа 2021 года, с. 139–147). Щербинка: АО «ВНИИЖТ». EDN: <https://elibrary.ru/ZCYKSP>

9. Осьминин, А. Т. (2020). Реинжиниринг модели управления перевозками. *РЖД-Партнер*, 1–2, 46–49.
10. Карышев, М. Ю., Куренков, П. В., & Филипченко, Н. С. (2025). Логистика контроля динамики загрузки железнодорожной инфраструктуры. В *Логистика — Евразийский мост: материалы XX Международной научно-практической конференции* (Красноярск, 28–31 мая 2025 года, с. 138–144). Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/QHСНОВ>
11. Куренков, П. В., Волов, В. Т., Герасимова, Е. А., Казеев, Р. Д., & Туркменов, И. О. (2023). Российская логистика под санкциями и антисанкционная логистика. *Социально-экономический и гуманитарный журнал*, 3, 117–120.
12. Куренков, П. В., Герасимова, Е. А., Мизиев, М. М., & Черкасова, Д. О. (2024). Вопросы организации мультимодальных перевозок грузов. В *Прогрессивные технологии в эксплуатации наземных транспортно-технологических комплексов и логистических транспортных систем: сборник трудов международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, посвящённой 110-летию юбилею со дня рождения профессора Каракулева А. В.* (Казань, с. 211–217).
13. Рахмангулов, А. Н., Копылова, О. А., & Аутов, Е. К. (2012). Выбор мест для логистических мощностей. *Мир транспорта*, 10(1(39)), 84–91. EDN: <https://elibrary.ru/OWZIWX>
14. Рахмангулов, А. Н., Корнилов, С. Н., & Кольга, А. Д. (2014). Обеспечение своевременности грузовых перевозок в транспортно-логистических системах. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*, 115–121.
15. Рогулин, Р. С. (2023). Использование методов анализа данных и машинного обучения для прогнозирования и планирования спроса при управлении цепочками поставок. *Теоретическая экономика*, 8, 35–53.

16. Маликов, О. Б. (2015). *Складская и транспортная логистика в цепях поставок: учебное пособие. Стандарт третьего поколения*. Санкт-Петербург: Питер, 400 с.
17. Pokrovskaya, O., Fedorenko, R., & Khramtsova, E. (2020). Modeling of a system for organization of traffic via a terminal network. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1116, 1162–1175. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3\\_114](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_114). EDN: <https://elibrary.ru/VCDUKG>
18. Покровская, О. Д., Меликов, М. И., & Касьянов, И. В. (2023). Система управления экспортными грузопотоками на базе логистических принципов и информационных технологий. *Вестник транспорта*, 3, 18–26. EDN: <https://elibrary.ru/HYPCNP>
19. Коровяковский, Е. К. (2013). Проблемы развития системы логистических центров на железнодорожном транспорте. *Логистические системы в глобальной экономике*, 1-3, 121–125.
20. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). (2025). *Транспорт в России: статистический сборник*. Москва. Получено с <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (дата обращения: 12.11.2025)
21. АО «Евросиб – транспортные системы». (2025). *Официальный сайт*. Получено с <https://eurosib.biz/ru/> (дата обращения: 12.11.2025)
22. Елисеев, С. Ю. (2006). *Построение и оптимизация функционирования международных транспортно-логистических систем*. Москва: ВИНТИ РАН, 242 с.
23. Васильев, Ю. И., & Вепринская, Т. А. (2023). Принцип построения дерева принятия решений при планировании работы фидерной составляющей контейнерной линии. *Транспортное дело России*, 6(169), 345–348.

### References

1. Government of the Russian Federation. (2021). *Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up*

- to 2035 (Approved by Government Order No. 3363-r dated November 27, 2021). Moscow, 282 p.
2. Dekhkov, M. A., Nikonuk, A. A., Filipchenko, S. A., et al. (2025). Implementing logistics solutions to improve the efficiency of Russian railways. *Logistics, I*(218), 10–14. EDN: <https://elibrary.ru/BQCEKL>
  3. Agafonov, P. E. (2025). Proposals for redistributing rail freight traffic to increase transport capacity of Russian Railways (JSC RZD). *Logistics, I*(218), 16–21. EDN: <https://elibrary.ru/TBRWEP>
  4. Patsev, Yu. P., & Moskvichev, O. V. (2024). A two-criteria approach to selecting the optimal option for piggyback transportation. *Science and Education for Transport, (1)*, 120–122. EDN: <https://elibrary.ru/UTTYAL>
  5. Moskvichev, O. V., Moskvicheva, E. E., & Vasiliev, D. V. (2025). Development of cargo transportation logistics by container trains: new aspects, requirements, and solutions. *Transport of the Urals, 1*(84), 60–65. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2025-1-60-65>. EDN: <https://elibrary.ru/WFPLQL>
  6. Moskvichev, O. V., & Vasiliev, D. V. (2021). Economic-mathematical model for establishing organizational and technological requirements for organizing block container transportation. In *Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov — the founder of transport science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 125th anniversary of the university* (Moscow, October 22, 2021, pp. 509–520). Moscow: Russian University of Transport. <https://doi.org/10.47581/2022/Obratcov.68>. EDN: <https://elibrary.ru/GTMUSI>
  7. Mamaev, E. A., & Babeshko, A. I. (2025). Logistics optimization as a factor in increasing the competitiveness of a transport enterprise. In *Managing the socio-economic development of regions: problems and solutions: Collection of scientific articles from the 15th International Scientific and Practical Conference* (in 2 vols., Kursk, June 27, 2025, pp. 314–319). Kursk: ZAO “University Book”. EDN: <https://elibrary.ru/TTMWKH>
  8. Osminin, A. T. (2021). On developing an intelligent system for managing transportation processes in railway transport. In *Science 1520 VNIIZhT: Look*

- beyond the horizon: Collection of materials from the Scientific and Practical Conference of JSC VNIIZhT* (Shcherbinka, August 26–27, 2021, pp. 139–147). Shcherbinka: JSC VNIIZhT. EDN: <https://elibrary.ru/ZCYKSP>
9. Osminin, A. T. (2020). Reengineering the transportation management model. *RZD Partner*, (1–2), 46–49.
  10. Karyshev, M. Yu., Kurenkov, P. V., & Filipchenko, N. S. (2025). Logistics of monitoring railway infrastructure loading dynamics. In *Logistics — Eurasian Bridge: Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference* (Krasnoyarsk, May 28–31, 2025, pp. 138–144). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/QHCHOB>
  11. Kurenkov, P. V., Volov, V. T., Gerasimova, E. A., Kazeev, R. D., & Turkmenov, I. O. (2023). Russian logistics under sanctions and anti-sanction logistics. *Socio-Economic and Humanitarian Journal*, (3), 117–120.
  12. Kurenkov, P. V., Gerasimova, E. A., Miziev, M. M., & Cherkasova, D. O. (2024). Issues of organizing multimodal cargo transportation. In *Progressive technologies in operating ground transport and technological complexes and logistics transport systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists dedicated to the 110th anniversary of Professor A. V. Karakulev* (Kazan, pp. 211–217).
  13. Rakhmangulov, A. N., Kopylova, O. A., & Autov, E. K. (2012). Selecting locations for logistics facilities. *World of Transport*, 10(1(39)), 84–91. EDN: <https://elibrary.ru/OWZIWX>
  14. Rakhmangulov, A. N., Kornilov, S. N., & Kolga, A. D. (2014). Ensuring timely freight transportation in transport and logistics systems. *Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 115–121.
  15. Rogulin, R. S. (2023). Using data analysis and machine learning methods for demand forecasting and planning in supply chain management. *Theoretical Economics*, (8), 35–53.
  16. Malikov, O. B. (2015). *Warehouse and transport logistics in supply chains: Study guide. Third-generation standard*. Saint Petersburg: Piter, 400 p.

17. Pokrovskaya, O., Fedorenko, R., & Khramtsova, E. (2020). Modeling of a system for organization of traffic via a terminal network. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1116, 1162–1175. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3\\_114](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_114). EDN: <https://elibrary.ru/VCDUKG>
18. Pokrovskaya, O. D., Melikov, M. I., & Kasyanov, I. V. (2023). A system for managing export cargo flows based on logistics principles and information technologies. *Bulletin of Transport*, (3), 18–26. EDN: <https://elibrary.ru/HYPCHP>
19. Korovyakovsky, E. K. (2013). Problems of developing a logistics center system in railway transport. *Logistic Systems in the Global Economy*, 1–3, 121–125.
20. Federal State Statistics Service (Rosstat). (2025). *Transport in Russia: Statistical collection*. Moscow. Retrieved from: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (Accessed: November 12, 2025)
21. JSC “Eurosib — Transport Systems”. (2025). *Official website*. Retrieved from: <https://eurosib.biz/ru/> (Accessed: November 12, 2025)
22. Eliseev, S. Yu. (2006). *Building and optimizing the functioning of international transport and logistics systems*. Moscow: VINITI RAS, 242 p.
23. Vasiliev, Yu. I., & Veprinskaya, T. A. (2023). The principle of constructing a decision tree when planning the operation of the feeder component of a container line. *Transport Business of Russia*, 6(169), 345–348.

## ДААННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Марченко Максим Александрович**, техник кафедры «Управление эксплуатационной работой»

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I*

*пр. Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация*

*maks.marchenko1998@mail.ru*

**Никифорова Гузель Ислямовна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой»

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
пр. Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация  
guzel.spb@mail.ru*

**Халтуринская Дарья Сергеевна**, специалист по налоговой и первичной документации  
*АО «Евросиб СПб-транспортные системы»  
ул. Мичуринская, 4, г. Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация  
dhalturinskaa@gmail.com*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Maksim A. Marchenko**, Technician, Department of Operational Management  
*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation  
maks.marchenko1998@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3191-3665>*

**Guzel Is. Nikiforova**, PhD, Associate Professor, Associate Professor, Department of Operational Management  
*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation  
guzel.spb@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4908-3225>*

**Daria S. Khalturinskaya**, Tax and Primary Documentation Specialist  
*JSC Eurosib SPb-Transport Systems  
4, Michurinskaya Str., St. Petersburg, 197046, Russian Federation  
dhalturinskaa@gmail.com*

Поступила 17.11.2025  
После рецензирования 11.12.2025  
Принята 15.12.2025

Received 17.11.2025  
Revised 11.12.2025  
Accepted 15.12.2025

## 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 английском 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

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕДУЩЕГО КОЛЕСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА ЕГО ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА <i>Ю.П. Корнюшин, М.В. Сидоров</i> .....	7
ФОРМИРОВАНИЕ ЛОЯЛЬНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ MOBILITY AS A SERVICE В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ <i>Т.В. Коновалова, С.Л. Надирян, А.В. Гонтарук, В.И. Рассоха</i> .....	27
МОДЕЛИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ <i>В.А. Надежкин, С.А. Надежкина</i> .....	48
РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ИНТЕГРАЦИЕЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ <i>А.А. Андреев</i> .....	65
ВИДЫ БЕСПИЛОТНЫХ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИИ <i>М.Х. Низамутдинов, О.В. Иванова, Д.М. Шамсутдинов, Р.И. Набиев, Ю.М. Махмутов, А.В. Алексеев</i> .....	80
АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ <i>А.А. Акулов, Д.С. Талдыкин, А.В. Гришкина, Н.М. Ганжа</i> .....	105

---

АНАЛИЗ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ И МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕГУЛЯТОРНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС <i>М.Ю. Карелина, А.В. Подгорный, А.В. Гришкина, Н.М. Ганжа</i> .....	129
ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГОРОДОВ ЮФО <i>Т.В. Коновалова, С.Л. Надирян, А.В. Гонтарук</i> .....	150
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТЕЙНЕРПОТОКА МЕЖДУ КОНТЕЙНЕРНЫМИ ПОЕЗДАМИ ПОСТОЯННОГО ФОРМИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОПУТНЫХ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ <i>С.П. Вакуленко, А.М. Насыбуллин, Л.Р. Айсина</i> .....	164
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ <i>Цзисяо Цзян</i> .....	181
РОЛИКОВЫЙ ПРОТИВОТАРАННЫЙ БАРЬЕР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕЕЗДА <i>А.М. Насыбуллин, П.В. Лутцева, А.Р. Цурикова</i> .....	201
СОСТОЯНИЕ СИНГУЛЯРНОСТИ БЕЗОПАСНОСТИ: ПЕРЕХОД К РЕФЛЕКСИВНОЙ СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ <i>А.Е. Ранверсман</i> .....	221

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ  
ГОТОВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НА БАЗЕ ШКАЛЫ  
ХАРРИНГТОНА

*А.В. Горелик, Е.В. Кузьмина* ..... 262

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ  
ОПТИМИЗАЦИИ ЛОГИСТИКИ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ  
ЭВОЛЮЦИОННО-ПРЕДИКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

*А.М. Борзенков, Ц.Б. Пронин, А.А. Подберезкин,  
А.В. Остроух, А.М. Шмонин* ..... 285

ЗАКУПОЧНАЯ ФУНКЦИЯ КАК ДРАЙВЕР  
ТРАНСФОРМАЦИИ: ИНТЕГРАТИВНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ  
ПОСТАВЩИКОВ НА ПРИНЦИПАХ LEAN И KPI

*А.Н. Коверзнев, Е.Р. Шаранова* ..... 307

О РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ  
РЕШЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СПОСОБА ТРАНСПОРТИРОВКИ  
КОНТЕЙНЕРНОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ  
ПЕРЕВОЗКАХ

*М.А. Марченко, Г.И. Никифорова, Д.С. Халтуринская* ..... 330

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ** ..... 349

## CONTENTS

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGY MODULE DRIVE WHEEL PARAMETERS ON ITS DYNAMIC PROPERTIES <i>Yu.P. Korniyushin, M.V. Sidorov</i> .....	7
BUILDING USER LOYALTY IN THE CONTEXT OF THE INTRODUCTION OF THE MOBILITY AS A SERVICE CONCEPT IN THE KRASNODAR TERRITORY <i>T.V. Konovalova, S.L. Nadiryayn, V. I. Rassokha, A.V. Gontaruk</i> .....	27
STATISTICAL ESTIMATION MODELS FOR RAIL LINE RELIABILITY INDICATORS <i>V.A. Nadezhkin, S.A. Nadezhkina</i> .....	48
DEVELOPMENT OF ADAPTIVE INTERACTIVE DECISION SUPPORT SYSTEMS WITH MULTICRITERIAL ANALYSIS AND MACHINE LEARNING INTEGRATION <i>A.A. Andreev</i> .....	65
TYPES OF UNMANNED GROUND VEHICLES AND THEIR CLASSIFICATIONS <i>M.Kh. Nizamutdinov, O.V. Ivanova, D.M. Shamsutdinov, R.I. Nabiev, Yu.M. Makhmutov, A.V. Alekseev</i> .....	80
ANALYSIS OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK ARCHITECTURES FOR MACHINE VISION SYSTEMS <i>A.A. Akulov, D.S. Taldykin, A.V. Grishkina, N.M. Ganzha</i> .....	105

ASSESSING REGULATORY-TECHNICAL READINESS AND A TRANSFORMATION MODEL FOR INTEGRATING ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS INTO THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX <i>M.Yu. Karelina, A.V. Podgorny, A.V. Grishkina, N.M. Ganzha</i> .....	129
THE IMPACT OF DIGITALIZATION ON PASSENGER TRANSPORT EFFICIENCY: A COMPARATIVE ANALYSIS OF CITIES IN THE SOUTHERN FEDERAL DISTRICT <i>T.V. Konovalova, S.L. Nadiryay, A.V. Gontaruk</i> .....	150
DISTRIBUTION OF CONTAINER FLOW AMONG FIXED-FORMATION CONTAINER TRAINS WITH CONSIDERATION OF IMPLEMENTING FREIGHT OPERATIONS <i>S.P. Vakulenko, A.M. Nasybullin, L.R. Aysina</i> .....	164
RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF DIFFERENT NEURAL NETWORK MODELS IN TRAFFIC FLOW PREDICTION <i>Jixiao Jiang</i> .....	181
ROLLER-TYPE ANTI-RAM BARRIER FOR RAILWAY CROSSING <i>A.M. Nasybullin, P.V. Lutseva, A. R. Tsurikova</i> .....	201
THE STATE OF SECURITY SINGULARITY: TRANSITION TOWARD A REFLEXIVE SYSTEM OF TRANSPORT SECURITY <i>A.E. Ranversman</i> .....	221
MATHEMATICAL MODELING OF RAILWAY SYSTEMS TECHNICAL SUPPORT READINESS LEVELS USING AN INTEGRAL INDICATOR BASED ON THE HARRINGTON SCALE <i>A.V. Gorelik, E.V. Kuzmina</i> .....	262

---

RESEARCH METHODS FOR MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF LOGISTICS BASED ON HYBRID EVOLUTIONARY-PREDICTIVE MODELS <i>A.M. Borzenkov, C.B. Pronin, A.A. Podberezkin, A.V. Ostroukh, A.M. Shmonin</i> .....	285
PROCUREMENT FUNCTION AS A DRIVER OF TRANSFORMATION: AN INTEGRATIVE MODEL FOR SUPPLIER DEVELOPMENT BASED ON LEAN AND KPI PRINCIPLES <i>A.N. Koverznev, E.P. Sharapova</i> .....	307
ON THE DEVELOPMENT OF A SUPPORT SYSTEM FOR DECISION-MAKING ON CHANGING THE WAY CONTAINER PRODUCTS ARE TRANSPORTED IN MULTIMODAL TRANSPORTATION <i>M.A. Marchenko, G.Is. Nikiforova, D.S. Khalturinskaya</i> .....	330
<b>RULES FOR AUTHORS</b> .....	349

*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/>