ISSN 3034-6681

АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА»

ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА

№2
2026

Научный журнал

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Эксплуатация автомобильного транспорта

Логистические транспортные системы

Выходит 4 раза в год
Издается с января 2004 г.

Майкоп
Донецк
2026

ВЕСТНИК
Донецкой академии транспорта

2026 **Научный журнал**

№2

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала
И.П. Энглези, д-р техн. наук, доц., Донецкая академия транспорта (ДАТ), г. Донецк

И.В. Балабин, д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ), г. Москва
А.Н. Блохин, канд. техн. наук, доц., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Н. Новгород
Е.Е. Витвицкий, д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск
В.М. Власов, д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва
Н.В. Володарец, канд. техн. наук, доц., заместитель главного редактора, ДАТ, г. Донецк
В.А. Глинский, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова (СПбГУГА), г. Санкт-Петербург
С.А. Горожанкин, д-р техн. наук, проф., Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета), г. Макеевка
М.В. Грязнов, д-р техн. наук, проф., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск
В.В. Данилов, д-р техн. наук, проф., Донецкий государственный университет (ДонГУ), г. Донецк
К.Б. Евсеев, д-р техн. наук, доц., МГТУ, г. Москва
Д.Б. Ефименко, д-р техн. наук, проф., МАДИ, г. Москва
С.А. Зори, д-р техн. наук, доц., Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), г. Донецк
Д.В. Капский, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
А.Б. Карташов, канд. техн. наук, МГТУ, г. Москва
В.Э. Клявин, д-р техн. наук, доц., заместитель главного редактора, ДАТ, г. Донецк
О.Н. Ларин, д-р техн. наук, проф., Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
К.Н. Маренич, д-р техн. наук, проф., ДонНТУ, г. Донецк
Л.Б. Миротин, д-р техн. наук, проф., МАДИ, г. Москва
Н.И. Мищенко, д-р техн. наук, проф., Автомобильно-дорожный институт (филиал Донецкого национального технического университета), г. Горловка
Д.Л. Мойся, канд. техн. наук, ДАТ, г. Донецк
Ю.И. Палагин, д-р техн. наук, проф., СПбГУГА, г. Санкт-Петербург
Н.В. Паламарчук, д-р техн. наук, проф., Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДОНИЖТ), г. Донецк
А.Н. Полетайкин, канд. техн. наук, доц., Кубанский государственный университет, г. Краснодар
Ю.В. Прилепский, канд. техн. наук, доц., ответственный секретарь, ДАТ, г. Донецк
В.М. Приходько, член-корреспондент Российской академии наук, д-р техн. наук, проф., МАДИ, г. Москва
И.Н. Пугачев, д-р техн. наук, доц., Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
В.И. Сарбаев, д-р техн. наук, проф., Московский политехнический университет, г. Москва
А.В. Сацюк, канд. техн. наук, ДОНИЖТ, г. Донецк
В.В. Сильянов, д-р техн. наук, проф., МАДИ, г. Москва
А.И. Солодкий, д-р экон. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург
Н.А. Филиппова, д-р техн. наук, доц., МАДИ, г. Москва
М.Н. Чепцов, д-р техн. наук, проф., ДОНИЖТ, г. Донецк

https://journal.dat-dn.ru

За достоверность фактов, цифр, точность имен и фамилий несут ответственность авторы статей.
Материалы номера печатаются на языке оригинала.

Учредитель:	Адрес учредителя и редакции:
АНОО ВО «Донецкая академия транспорта»	283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7, тел. +7 (949) 3076242; e-mail: rector@dat-dn.ru
Издатель:	Адрес издателя:
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»	385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191
АНОО ВО «Донецкая академия транспорта»	283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7

Издание публикуется с 2004 г.:
2004-2009 гг. – Вестник Донецкого института автомобильного транспорта
с 2010-2024 гг. – Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта
с 2025 г. – Вестник Донецкой академии транспорта

© АНОО ВО «Донецкая академия транспорта», 2026

VESTNIK
Doneckoj Akademii Transporta

2026 **Scientific Journal**

№2

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief
I.P. Englezi, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Donetsk Academy of Transport (DAT), Donetsk

I.V. Balabin, Professor, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow
A.N. Blokhin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod
E.E. Vitvitskiy, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Siberian State Automobile and Road University, Omsk
V.M. Vlasov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow
N.V. Volodarets, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, deputy editor-in-chief, DAT, Donetsk
V.A. Glinsky, Candidate of Engineering Sciences, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov (SPbGUGA), Saint Petersburg
S.A. Gorozhankin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (a branch of the National Research Moscow State University of Civil Engineering), Makeevka
M.V. Gryaznov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk
V.V. Danilov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Donetsk State University (DonGU), Donetsk
K. B. Evseev, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, BMSTU, Moscow
D.B. Efimenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, MADI, Moscow
S.A. Zori, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Donetsk National Technical University (DonNTU), Donetsk
D.V. Kapski, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
A.B. Kartashov, Candidate of Engineering Sciences, BMSTU, Moscow
V.E. Klyavin, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, deputy editor-in-chief, DAT, Donetsk
O.N. Larin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Russian University of Transport (MIIT), Moscow
K.N. Marenich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, DonNTU, Donetsk
L.B. Mirotin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, MADI, Moscow
N.I. Mishchenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Automobile and Road Institute (a branch of the Donetsk National Technical University), Gorlovka
D.L. Moisia, Candidate of Engineering Sciences, DAT, Donetsk
Y.I. Palagin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, SPbGUGA, Saint Petersburg
N.V. Palamarchuk, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Donetsk Institute of Railway Transport (DRTI), Donetsk
A.N. Poletaikin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kuban State University, Krasnodar
Y.V. Prilepsky, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, executive secretary, DAT, Donetsk
V.M. Prikhodko, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor, MADI, Moscow
I.N. Pugachev, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Pacific State University, Khabarovsk
V.I. Sarbaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow
A.V. Satsiuk, Candidate of Engineering Sciences, DRTI, Donetsk
V.V. Silyanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, MADI, Moscow
A.I. Solodkiy, Doctor of Economic Sciences, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg
N.A. Filippova, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, MADI, Moscow
M.N. Cheptsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, DRTI, Donetsk

https://journal.dat-dn.ru

The authors of the articles are responsible for the accuracy of facts, figures, and names.
The materials of the issue are printed in the original language.

The founder:	Address of the founder and editorial office:
Donetsk Academy of Transport	7, Dzerzhinsky ave., Donetsk city, Donetsk city district, Donetsk People's Republic, 283086; tel. +7 (949) 3076242; e-mail: rector@dat-dn.ru
Publisher:	Publisher's address:
Maikop State Technological University	191, Pervomayskaya str., Maykop, Republic of Adygea, 385000
Donetsk Academy of Transport	7, Dzerzhinsky ave., Donetsk city, Donetsk city district, Donetsk People's Republic, 283086

The publication has been published since 2004:

2004-2009	– Bulletin of the Donetsk Institute of Road Transport
2010-2024	– Bulletin of the Donetsk Academy of Road Transport
since 2025	– Bulletin of the Donetsk Academy of Transport

© Donetsk Academy of Transport, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

Доронин В.В. Анализ методов автоматического определения диаметра деревьев на высоте груди по данным UAV-LiDAR при частичной видимости древесных стволов 8

Колюпанова И.Ю., Шумаева Е.А., Ляшенко Ю.А., Савкова Е.О. Методика разработки системы поддержки принятия решений для определения и улучшения позиций в многокритериальных рейтингах 24

Маренич К.Н., Володарец Н.В., Ткачёв С.А., Маренич А.С. Контекстно-семантический траекторный алгоритм выявления аномальных ситуаций в транспортном потоке по данным видеонаблюдения 34

Сацюк А.В., Малахова В.В., Лесовой Э.В. Анализ современных микрокомпьютеров в контексте применения беспилотных авиационных систем 52

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

Асцатуров Ю.Г., Галушкин Д.Н., Ременцов А.В., Мойся Д.Л. Совершенствование конструкции устройства для экспресс-диагностики технического состояния моторных масел 69

Корытов М.С., Щербаков В.С., Кашапова И.Е. Сравнительный анализ двух моделей виброзащитной системы сиденья наземной машины 80

Савенко Э.С., Попов Д.В., Матвиенко С.А. Методология расчета параметров циклов нагружения элементов трансмиссии подъемных машин 91

Трунаев А.М. Дифференцированная модель оценки риска на переезде с учетом типа отказа устройств СЦБ и скорости движения поезда 104

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТРАНЫ, ЕЕ РЕГИОНОВ И ГОРОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ

Вейискулыева Г., Куликов А.В. Перспективы развития мультимодальных транспортно-логистических терминалов Туркменистана во взаимодействии с Россией 119

Завалищин Д.С., Хазимуллин А.Д. Динамическая оптимизация мультимодальных перевозок 143

Кретова А.В., Володарец Н.В., Сидоренко К.И. Инфраструктура транспортной системы Донецкой Народной Республики: современное состояние и перспективы развития 163

Романенко А.И., Чуйкова О.Ю., Гришкова Д.Ю. О решении проблемы многовариантности сочетаний грузов при перевозке горношахтного оборудования в полувагонах 175

Рунец Р.С. Методика оценки скоростей транспортного потока с использованием стационарных детекторов, навигационных сервисов и результатов натурных исследований 190

Степаненко А.С., Сафонова А.В. Оценка функционирования региональных авиатранспортных систем Российской Федерации 209

Цзян Ц., Феофилова А.А. Эффективность моделей прогнозирования характеристик транспортных потоков на дорогах с различной пропускной способностью 222

Цепаев Р.Е., Гришкова Д.Ю. Методология оперативного управления парком тепловозов на путях необщего пользования металлургических предприятий 233

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Маврин В.Г., Зайнутдинова А.Р. Оценка конкурентоспособности специализированного автотранспортного средства для транспортировки отходов 247

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Глинский В.А. Классификация синхромодальных сетей при структуризации метаэвристик в задачах маршрутизации транспорта 257

Коржова А.В., Мозалевский Д.В. Анализ фактического спроса на машино-места в современной жилой застройке 272

Требования к оформлению статей для публикации в научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 285

Условия и порядок публикации статей в научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 287

Краткая информация о научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта» 288

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSING, STATISTICS

Doronin V. V. Analysis of methods for automatic estimation of tree diameter at breast height (DBH) from UAV-LiDAR data under partial stem occlusion 8

Koliupanova I.Y., Shumaeva E.A., Lyashenko J.A., Savkova E.O. A method for developing a decision support system for determining and improving positions in multicriterial rankings 24

Marenich K. N., Volodarets N. V., Tkachov S. A., Marenich A. S. Context-semantic trajectory algorithm for detecting anomalous situations in traffic flow using video surveillance data 34

Satsiuk A.V., Malakhova V.V., Lesovoy E.V. Analysis of modern microcomputers in the context of the application of unmanned aircraft systems 52

GROUND TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL FACILITIES AND COMPLEXES

Astsaturov Yu.G., Galushkin D.N., Rementsov A.V., Moisia D.L. Improvement of the design of the device for express diagnostics of the technical condition of motor oils..... 69

Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Kashapova I.E. Comparative analysis of two models of a ground vehicle seat vibration protection system 80

Savenko E.S., Popov D. V., Matvienko S.A. Linear equations of transmission dynamics in lifting machines 91

Trunaev A.M. A differentiated model for rail crossing risk assessment, considering the type of signalling, interlocking, and blocking device failure and train speed..... 104

TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF THE COUNTRY, ITS REGIONS AND CITIES, ORGANIZATION OF PRODUCTION IN TRANSPORT

Veiskulyeva G., Kulikov A.V. Prospects for the development of multimodal transport and logistics terminals of Turkmenistan in cooperation with Russia 119

Zavalishchin D.S., Khazimullin A.D. Dynamic optimization of multimodal transportation..... 143

Kretova A.V., Volodarets N.V., Sidorenko K.I. Infrastructure of the Donetsk People's Republic transport system: current state and development prospects..... 163

Romanenko A.I., Chuikova O.Y., Grishkova D.Y. On solving the problem of multiple cargo combinations when transporting mining equipment in gondola cars 175

Runets R. S. A method for estimating traffic flow speeds using stationary detectors, navigation services and results of field studies 190

Stepanenko A.S., Safonova A.V. Assessment of the effectiveness of Russia's regional air transport systems 209

Jiang J., Feofilova A.A. Comparative analysis of the efficiency of traffic flow prediction models on roads with different capacity 222

Tsepaev R.E., Grishkova D.Y. Methodology for operational management of a diesel locomotive fleet on non-public railway tracks of metallurgical enterprises 233

OPERATION OF MOTOR TRANSPORT

Mavrin V. G., Zainutdinova A. R. Evaluation of the competitiveness of a specialized waste transport vehicle 247

LOGISTIC TRANSPORT SYSTEMS

Glinskiy V.A. Classification of synchromodal networks in the structuring of metaheuristics in transport routing problems 257

Korzova A.V., Mozalevsky D. V. Analysis of actual demand for parking spaces in modern residential development..... 272

Requirements for the design of articles for publication in the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"..... 285

Conditions and procedure for the publication of articles in the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"..... 287

Brief information about the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"... 288

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 630*5:004.8

Доронин В.В.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРА ДЕРЕВЬЕВ НА ВЫСОТЕ ГРУДИ ПО ДАННЫМ UAV-LIDAR ПРИ ЧАСТИЧНОЙ ВИДИМОСТИ ДРЕВЕСНЫХ СТВОЛОВ

Аннотация. *В работе предложен гибридный алгоритм автоматической оценки диаметра ствола на высоте груди (DBH) по данным UAV-LiDAR высокой плотности, полученным в зимний период в бореальных лесах Архангельской области. Алгоритм сочетает геометрическую аппроксимацию стволов и регрессионную модель Random Forest на основе метрик кроны для случаев частичной или отсутствующей видимости нижней части стволов. Предложенный подход обеспечивает 100% охват всех деревьев на участке без необходимости полевых измерений на исследуемом объекте. Валидация проведена путем сравнения с референтными значениями, полученными ручной разметкой в CloudCompare. Надежность разметки подтверждена верификацией на независимом наборе данных FOR-instance (NIBIO). Гибридный метод демонстрирует высокую точность для сосен при использовании геометрической аппроксимации и приемлемую – для елей при аллометрическом предсказании, со средним абсолютным отклонением 3,46 см. По сравнению с ручной обработкой время анализа сокращается на 70-85%. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного алгоритма в условиях ограниченной видимости стволов и перспективность UAV-LiDAR для автоматизированной лесной таксации в северных регионах. Разработанный алгоритм может быть применен для мониторинга придорожных лесных массивов, оценки рисков падения деревьев на транспортные магистрали, а также для инвентаризации древостоя в зонах строительства и реконструкции автомобильных дорог.*

Ключевые слова: *UAV-LiDAR, диаметр ствола, DBH, облака точек, геометрическая аппроксимация, Random Forest, лесная таксация, мониторинг безопасности дорог, придорожные леса, транспортная инфраструктура.*

Постановка задачи

Развитие технологий дистанционного зондирования Земли радикально трансформировало методы лесной инвентаризации, позволив перейти от трудоемких наземных измерений к автоматизированным подходам на основе лазерного сканирования с беспилотных летательных аппаратов (UAV-LiDAR). Особый интерес представляет диаметр ствола на высоте груди (Diameter at Breast Height, DBH), измеряемый на высоте 1,3 м от поверхности земли. Данный параметр является фундаментальным и наиболее широко используемым в лесной таксации, так как служит основной независимой

переменной в аллометрических уравнениях для оценки объема ствола, биомассы и запасов углерода [1, 2, 3, 4]. В настоящем исследовании использовались данные высокой плотности, полученные с помощью сенсора DJI Zenmuse L2. Данный сенсор способен регистрировать до пяти эхо-сигналов, что обеспечивает детальную съемку даже в условиях плотного лесного полога [5].

Несмотря на преимущества UAV-LiDAR для задач лесной таксации, такие как мобильность и возможность охвата больших территорий, все еще остаются недостаточно проработанными моменты, связанные с неполной видимостью стволов из-за листвы, подлеска или геометрии сканирования. Таким образом, облака точек теряют часть информации (имеют фрагментарную структуру). Это не позволяет качественным образом выделить необходимые точки в нижних частях древостоя и рассчитать диаметр.

В плане обеспечения безопасности и устойчивости транспортной инфраструктуры автоматическая оценка параметров древостоя также является важным прикладным аспектом. Требуется регулярный контроль состояния придорожных насаждений для предотвращения падения деревьев на проезжую часть, а также для планирования санитарных рубок в зонах отвода дорог. Данные о диаметрах стволов (DBH) необходимы для оценки биомассы, объема древесины и оценки компенсационной стоимости при строительстве и реконструкции транспортных объектов. Разработанные методы дистанционного зондирования позволяют проводить такую оценку автоматизированно (оперативно и с минимальными трудозатратами), что особенно актуально для протяженных линейных объектов.

Анализ последних исследований

Был проведен анализ современных исследований в данном направлении за последние 5 лет. Рассматривались работы, преимущественно связанные со съемкой с беспилотных летательных аппаратов. Подходы базируются на различном качестве исходных данных, что является определяющим фактором в выборе применяемого метода. В таблице 1 приведено сравнение существующих методов на основе изученных материалов.

Таблица 1

Современные методы определения диаметра ствола

Метод	Принцип работы	Точность	Данные
MACFi (Morphology Aware circle Fit) и методы Monte Carlo [6]	Подгоняет окружности к срезам ствола через случайные пробы и отсев шума, затем корректирует все оценки, опираясь на то, что ствол меняется постепенно и плавно по высоте.	Ошибка менее - 3,34 см.	Дрон снимал под кронами (между стволами), после чего из фото создавалось облако точек (метод Structure from Motion). Зашумленные данные.

Продолжение таблицы 1

Метод	Принцип работы	Точность	Данные
Методы прямой подгонки окружности к стволу (ARC, RANSAC, IRIS, LScircle) [7]	Подгонка окружности к срезу ствола.	RMSE от 3,11 см до 7,38 см, bias от -3,45 см до 1,37 см в зависимости от метода.	Съемка с высокоплотного вертолетного LiDAR (helicopter airborne laser scanning, HALS), примерно 800 точек на квадратный метр, после объединения данных нескольких пролетов. Выполнялся перекрестный пролет, чтобы минимизировать эффект затенения стволов. Точность оценивалась в сравнении с данными полевых измерений.
Методы с использованием модели сбега ствола (Taper + ARC, RANSAC, IRIS, LScircle) [7]	Моделирует сужение ствола вверх, экстраполируя DBH по видимым верхним сегментам при неполных данных на уровне груди.	RMSE от 2,78см до 7,51 см, bias от -3,93 см до 2,68 см в зависимости от метода.	
Методы, основанные на статистическом вычислении диаметра ствола (PREV, PREV corrected) [7]	Диаметр предсказывается исходя из характеристик кроны и высоты дерева.	RMSE от 1,91 см до 7,90 см, bias от 0,33 см до 7,68 см в зависимости от метода.	
Random Forest [8]	Машинное обучение выявляет корреляции между параметрами кроны (высота, объем) и DBH без прямого анализа ствола.	Обучение, включающее данные полевых измерений локального участка: R^2 0,713, RMSE 1,991 см; Обучение без проведения полевых измерений локального участка: R^2 0,631, RMSE 3,09 см.	20 участков плантации, на которой произрастает сосна Радиата (Pinus Radiata). Съемка выполнялась над кронами деревьев.
Multiscale Cylindrical Detection и Multiscale Ring Fitting [3]	Наклонное сканирование (50–65°) позволило повысить плотность точек на стволах деревьев. Метод выделяет точки ствола на срезе в диапазоне 0,5-2 метра, подбирает окружность, устойчивую к разреженным и неполным данным.	Реальные полевые данные: R^2 0,708, RMSE 2,1 см, Симулированные «идеальные» данные: R^2 0,882, RMSE 1,6 см.	Съемка выполнялась над кронами плантации тополя.

Окончание таблицы 1

Метод	Принцип работы	Точность	Данные
TreeDBH (Deep Learning) [9]	Нейронная сеть дополняет недостающие фрагменты ствола на основе обученных шаблонов.	Исходные данные без обработки: RMSE 3,64 см (407 диаметров не определены); SeedFormer (улучшенная версия с достраиванием стволов): RMSE 4,73 см (105 диаметров не определены); GT (референсные данные): 1,22 см (51 диаметр не определен).	Высокая и средняя плотность облаков точек.

Таким образом, наилучшая оценка точности DBH достигается методами прямой геометрической подгонки окружностей к точкам ствола при условии достаточной плотности и видимости данных на уровне 1,3 м. Модели, использующие регрессионные зависимости оказываются менее точны, однако гарантируют практически полный охват деревьев даже при отсутствии или сильной разреженности стволовых точек. При этом эффективность таких моделей существенно зависит от качества предварительной сегментации и объёма локальной калибровки на полевых данных. Нейросетевые методы дополнения облака точек позволяют значительно повысить полноту и локальную точность измерений за счёт восстановления недостающих данных. В отличие от статистических моделей, такие методы позволят учесть индивидуальные особенности стволов, что важно при частичной видимости и разреженности данных.

Приведенные исследования в значительной степени продвинулись в решении подобного типа задач, но все еще можно выделить аспекты, которые проработаны недостаточно. В их число входят вопросы, связанные с адаптацией алгоритмов к зимним условиям съемки. В основном, авторы предпочитают проводить исследования на летних данных. Также стоит отметить, что в работах рассматриваются зачастую лесные плантации, где нет большой плотности в произрастании деревьев. Сегментировать деревья в таких условиях гораздо проще, так как между ними есть достаточное пространство, вследствие чего и качество исходных данных, и итоговые расчетные показатели оказываются значительно выше, чем это оказалось бы на практике в условиях естественных лесов [3,6,7,8,9]. Применение таких методов связано также и с необходимостью обширной полевой калибровки, что ограничивает их использование на данных, где полевые измерения отсутствуют. Кроме того, авторы не пытаются достичь полного охвата древостоя на участке. Какие-то отдельные деревья просто не учитываются в исследованиях, так как исходные данные не позволяют произвести оценку предложенными методами.

Работа над улучшением выявленных недостатков будет актуальной для естественных лесов северных регионов. Плотный лесной полог и наличие снежного

покрова на лесных участках не всегда позволяют получить данные достаточного уровня качества даже на профессиональные UAV-LiDAR решения.

В рамках данного исследования проведена работа по решению подобных проблем. Предложенное решение – это гибридный алгоритм, ориентированный на естественные зимние леса Архангельской области. Гибридность предлагаемого алгоритма заключается в комбинации наиболее достоверных методов для достижения полного охвата деревьев на исследуемом участке.

Цель работы

Целью исследования является повышение достоверности данных измерений диаметров стволов на уровне груди за счет разработки и валидации гибридного алгоритма оценки, адаптированного к условиям частичной видимости стволов, с возможностью применения для мониторинга придорожных лесов и обеспечения безопасности транспортной инфраструктуры. Данный алгоритм должен обеспечивать полный охват деревьев на исследуемом участке без необходимости проведения полевых измерений для его калибровки. Количественная оценка точности алгоритма производится на основе референтных измерений. Исходные данные – это облака точек с UAV-LiDAR, полученные в зимний период в естественных лесах Архангельской области.

Основная часть

Повышение достоверности данных о диаметрах стволов начинается с обработки исходных данных для последующего использования алгоритмами. В качестве исходных данных выступает участок зимнего леса Архангельской области размером 2438 м^2, представленный на рисунке 1.

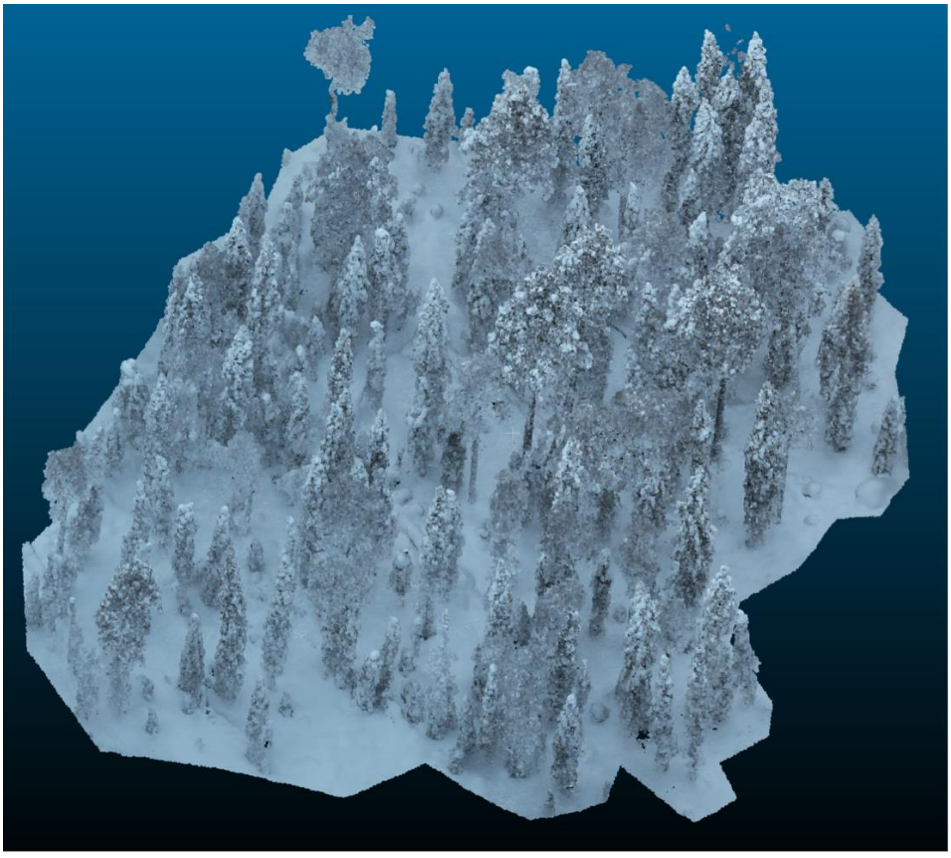


Рис. 1. Участок зимнего леса Архангельской области для исследования. Изображение автора

Снег может искажать отражения LiDAR импульсов. Чтобы этого избежать, необходимо провести нормализацию высот. Для этого точки облака корректируются относительно цифровой модели рельефа. Такая модель предварительно строится по самым низким точкам облака, которые соответствуют поверхности земли. В итоге, влияние неровностей земной поверхности, снежного покрова и других сезонных изменений рельефа исключаются.

Далее нормализованное облако делится на сегменты, соответствующие отдельным деревьям [10, 11]. Наиболее важным для последующих расчетов станет удаление шума в сегментированных единицах данных. Подвергаются удалению точки крон других деревьев, соседних ветвей, подлеска, а также случайный шум, вызванный снегом и атмосферными помехами. Благодаря такой предобработке алгоритм сможет намного лучше сконцентрироваться на геометрии целевого ствола, что существенно снижает искажения и повышает точность расчетов. Сегментированное дерево до и после удаления шумовых данных представлено на рисунке 2.

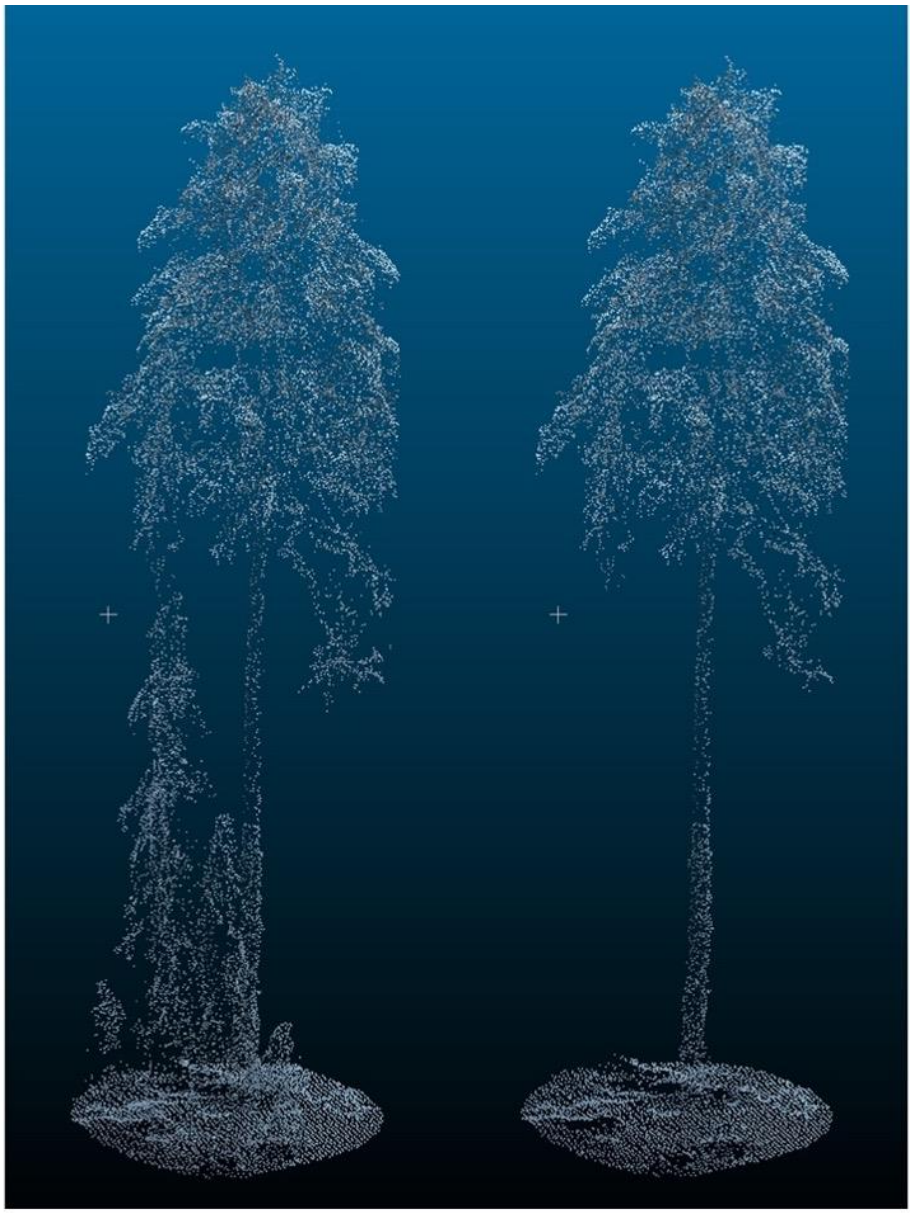


Рис. 2. Фильтрация от шумов. До обработки (слева) и после (справа). Изображение автора

Снежный покров, густой подлесок и перекрывающие ветви соседних деревьев могут привести к тому, что в данных образуются пустоты. Даже в очищенных от шума может не хватать части кроны, ствола. В таком случае применение какого-либо одного метода не даст результата. Необходима их комбинация. Для случаев, когда на стволе достаточно точек для вписывания окружности, будет использоваться модифицированный вариант метода геометрической аппроксимации. Если стволовых точек недостаточно или они отсутствуют вовсе – будет применен аллометрический метод с обучением модели на основе Random Forest. Таким образом, модифицировав под особенности исходных данных комбинацию наиболее подходящих методов, будет разработан гибридный алгоритм. Данный алгоритм должен обеспечить оптимальный баланс между точностью измерений и максимальной полнотой охвата данных.

Ключевой особенностью части алгоритма, связанной с реализацией геометрического метода, является возможность адаптивного выбора высоты, на которой производить аппроксимацию ствола. Например, если на уровне груди (1,3 м) данных недостаточно (малое количество точек в срезе), то анализ смещается на высоты 2-3 м или даже до 4-5 м в крайних случаях. В обязательном порядке учитывается сбег дерева, наклон и форма ствола. На рисунке 3 представлена визуализация геометрической аппроксимации на примере вписанных в ствол цилиндров.

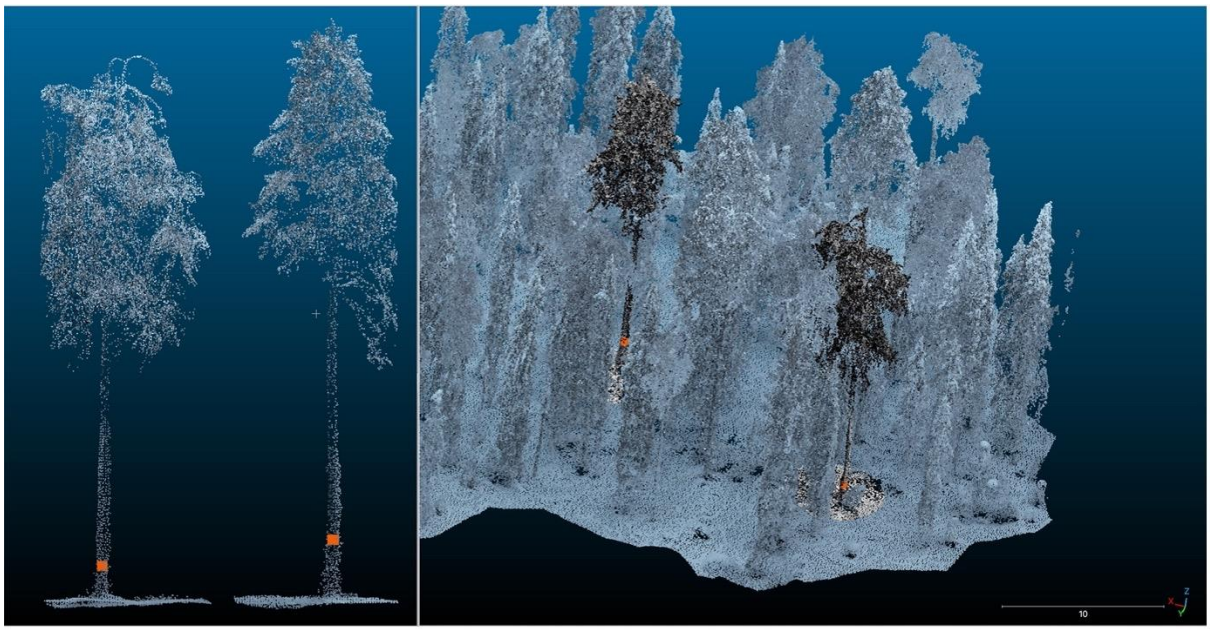


Рис. 3. Визуализация вписанного цилиндра в облако точек на различных высотах. Изображение автора

Реализация части алгоритма с использованием модели Random Forest производилась на выборке деревьев из аналогичного зимнего участка, полученного в тех же условиях, что и исходный. Исходный участок не использовался в обучении модели, что обеспечило независимость валидации. В качестве предикторов использовались характеристики кроны и общие параметры дерева, такие как высота, ширина кроны, площадь проекции кроны и видовая принадлежность. Выбор данных предикторов обусловлен устойчивой нелинейной зависимостью DBH от высоты дерева и метрик кроны [8]. Видовая принадлежность выбрана как категориальный фактор, так как сосна и ель различаются по форме, сбегу ствола, аллометрическим соотношениям (высота, диаметр, ширина кроны). Такой подход позволил экстраполировать DBH на деревья с неполной видимостью стволов, где геометрическая подгонка невозможна или

ненадежна. Визуализация аллометрических цилиндров, построенных по предсказаниям модели Random Forest для случаев с недостаточной видимостью ствола, приведена на рисунке 4.

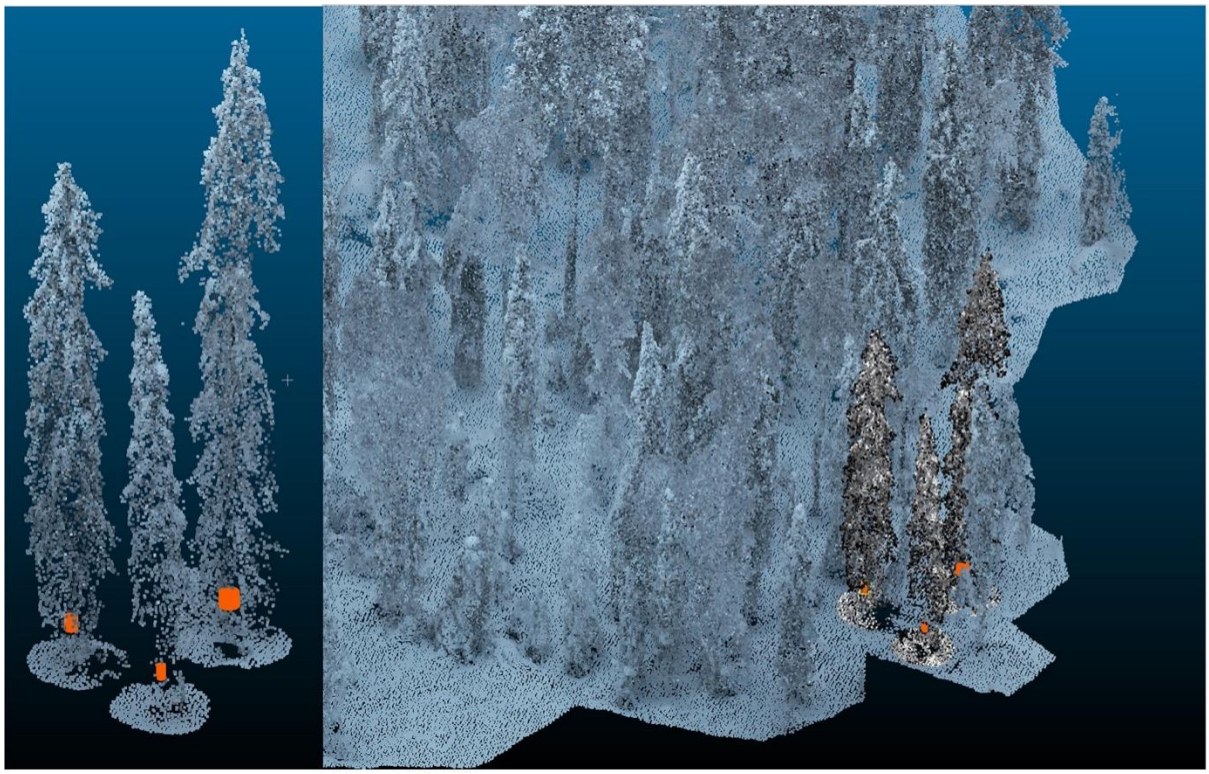


Рис. 4. Визуализация аллометрических цилиндров (по предсказаниям модели Random Forest) для случаев с недостаточной видимостью стволов. Изображение автора

Полная логика принятия решения о выборе метода расчета диаметра ствола на высоте груди (Random Forest или геометрическая аппроксимация) в зависимости от наличия стволовых точек в виде блок-схемы процесса приведена на рисунке 5.

Валидация гибридного метода проводилась с использованием референтных данных, полученных путем ручной разметки в CloudCompare. Ручная разметка включала выделение точек ствола на уровне 1,3 м с последующей цилиндрической аппроксимацией и расчётом DBH. При недостатке точек на этой высоте анализ проводился на вышележащих сегментах (до 4–5 м) с учётом сбега ствола. Для полностью скрытых стволов использовались аллометрические оценки по высоте и параметрам кроны.

Анализ выполнен на датасете зимнего участка леса, состоящего из 124 выделенных деревьев, из которых 70% составляют ели и 30% сосны. Корректность формирования групп деревьев верифицирована визуально-диагностическим методом.

Для оценки погрешности ручной разметки алгоритм был дополнительно проверен на выборке из набора данных NIBIO FOR-instance [12], значения DBH которых определено с помощью специализированных мерных лент и электронных высотомеров. Выборка для верификации включала 50 сосен (*Pinus sylvestris*) и 50 елей (*Picea abies*), отобранных случайным образом из участков со сходными морфологическими характеристиками. Ручная разметка проводилась по той же методике, что и на основном наборе данных.

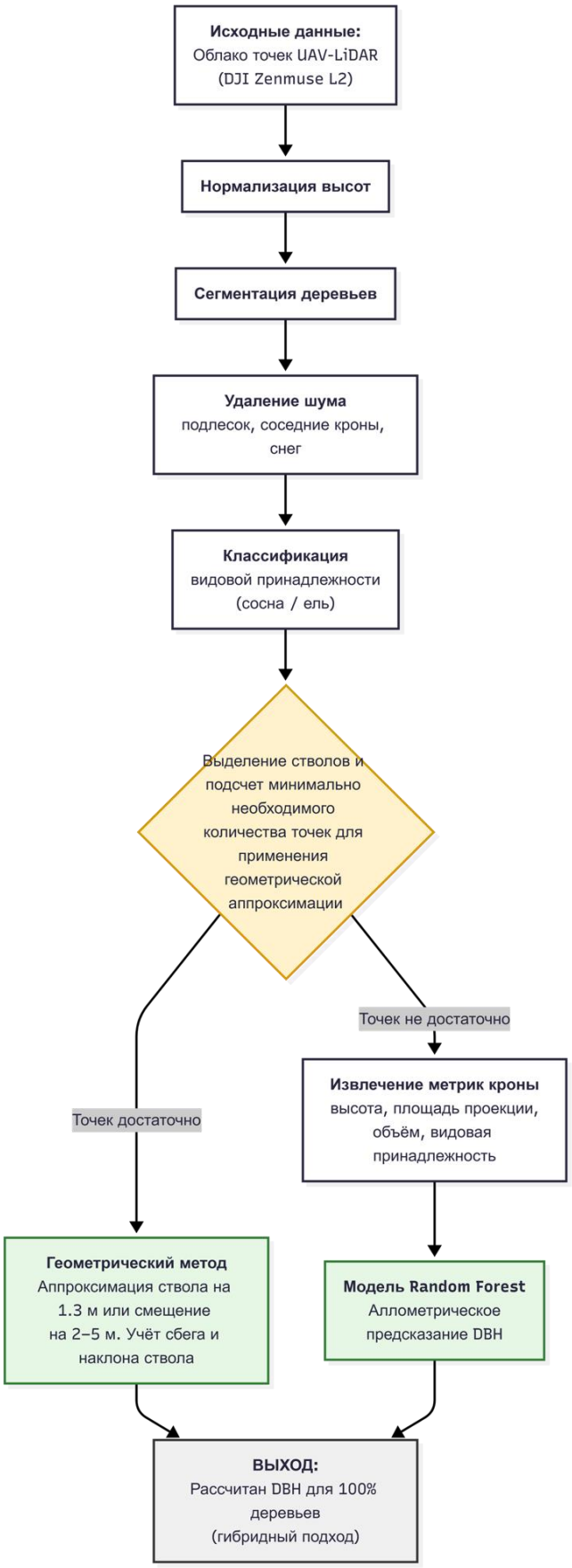


Рис. 5. Блок-схема процесса обработки исходного облака точек для расчета DBH на исследуемом участке

Сравнение ручных оценок с полевыми референсными значениями показало высокую воспроизводимость. Абсолютные ошибки находятся в диапазоне 0,5–2,0 см (среднее абсолютное отклонение — 1,12 см, RMSE = 1,38 см, bias = +0,31 см). Распределение ошибок близко к нормальному, без систематического смещения по видам деревьев. Максимальные отклонения (до 2 см) наблюдаются исключительно на деревьях с выраженным наклоном ствола или наличием ветвей в зоне измерения, что полностью согласуется с ограничениями полевых и LiDAR-измерений.

Таким образом, верификация подтвердила, что погрешность ручной разметки, использованной в качестве референса на основном датасете (124 дерева Архангельской области), не превышает 2 см и не вносит значимого вклада в общую неопределённость гибридного алгоритма, обеспечивая надёжность сравнения автоматических и референтных значений DBH.

Для геометрического метода сравнение полученных автоматических измерений показало высокую точность, в особенности для сосен, где стволы в подавляющем большинстве случаев были видны и позволяли надежную цилиндрическую подгонку. Модель Random Forest применялась преимущественно для ели, поскольку у данного вида в большинстве случаев выделение ствола геометрическими методами оказывалось невозможным или недостаточно надежным из-за плотной кроны и низкой видимости нижней части дерева. Количественные показатели точности для обоих методов обобщены в таблице 2.

Таблица 2

Количественные показатели точности

Метрика	Геометрический метод	Модель Random Forest
RMSE, м	0,0116	0,0573
Bias, м	+0,0085	-0,0294
R^2	0,9880	0,6194
Число деревьев решений (n_estimators)	-	100
Максимальная глубина (max_depth)	-	Не ограничивалась
Использованные предикторы	-	Высота, ширина кроны, площадь проекции кроны, видовая принадлежность

Точность геометрического метода получилась очень высокая: RMSE 1,16 см, R^2 0,988. Точки находятся очень близко к линии соответствия, разброс практически невидим. Это подтверждает надежность геометрической аппроксимации при хорошей видимости стволов. Медиана ошибки близка к нулю, систематическое завышение в среднем +0,85 см. Абсолютные ошибки в большинстве случаев не превышают ± 2 см. Это демонстрирует высокую точность и низкую вариабельность метода для вида сосна. Диаграмма размаха распределения ошибок, а также диаграмма рассеяния представлены на рисунке 6.

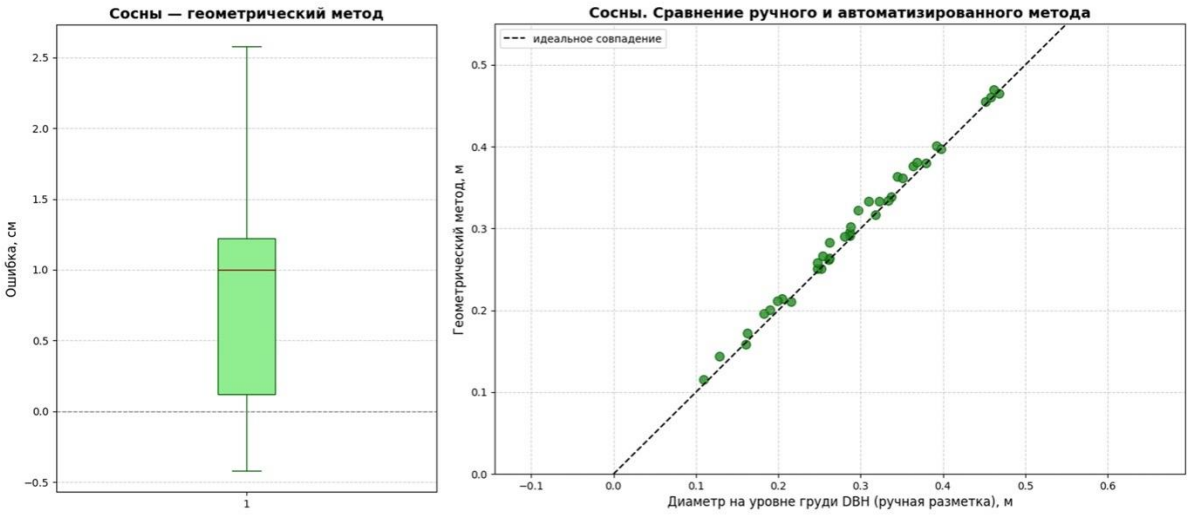


Рис. 6. Сравнение ручных измерений и предсказаний геометрического метода для диаметра стволов сосен на высоте груди. Распределение ошибок (слева), диаграмма рассеяния (справа)

Точность модели Random Forest – умеренная (приемлемая для задач предварительной таксации и мониторинга придорожных лесов): RMSE 5,73 см, R^2 0,6194. По сравнению с геометрическим методом разброс точек становится заметным, наблюдается смещение в нижнюю часть. Медиана ошибки -3 см, а систематическая ошибка (bias -2,94 см), что отражается в умеренном занижении диаметров стволов елей. Это достаточно типичный результат для данного метода, особенно с учетом фактора, что стволы елей были скрыты и в большинстве случаев практически не различимы.

При практическом применении внесение постоянного корректирующего коэффициента нецелесообразно, так как систематическая ошибка не является строго постоянной и зависит от морфологических особенностей и условий произрастания древостоя. Без дополнительной валидации на независимых участках такая коррекция может привести к переоценке диаметров части других деревьев. Разброс ошибок значительный, что связано с существенными различиями в форме кроны, особенно вследствие пересечения крон в плотном лесном пологе. Диаграмма размаха распределения ошибок, а также диаграмма рассеяния для вида ель представлены на рисунке 7.

Природа выбросов преимущественно связана с:

- практически полным отсутствием видимости нижней части ствола под плотной кроной ели (минимальное или нулевое количество точек LiDAR на уровне 1,3 м и выше), из-за чего геометрическая аппроксимация невозможна и предсказание DBH полностью опирается на аллометрические метрики кроны в Random Forest;
- вариабельностью формы кроны у елей (асимметрия, вытянутость, наличие локальных просветов в пологе, неоднородность проекции кроны), что снижает информативность предикторов ширины и площади проекции кроны в условиях зимней съёмки (снег на ветвях искажает проекцию кроны и уменьшает плотность точек в нижней трети);
- наличием пересечений крон у близкорастущих елей, когда алгоритм сегментации не может корректно разделить индивидуальные деревья без искажения границ кроны одного или нескольких деревьев. Наличие пересечений приводит к недооценке или переоценке метрик кроны, что в свою очередь снижает точность предикторов в модели

Random Forest и усиливает разброс ошибок DBH, особенно в условиях, где деревья произрастают достаточно плотно друг к другу;

- присутствием угнетенных деревьев в пологе. Для таких деревьев связь между высотой, размером кроны и DBH ослаблена, вследствие конкуренции за свет и ресурсы, что приводит к недооценке диаметра.

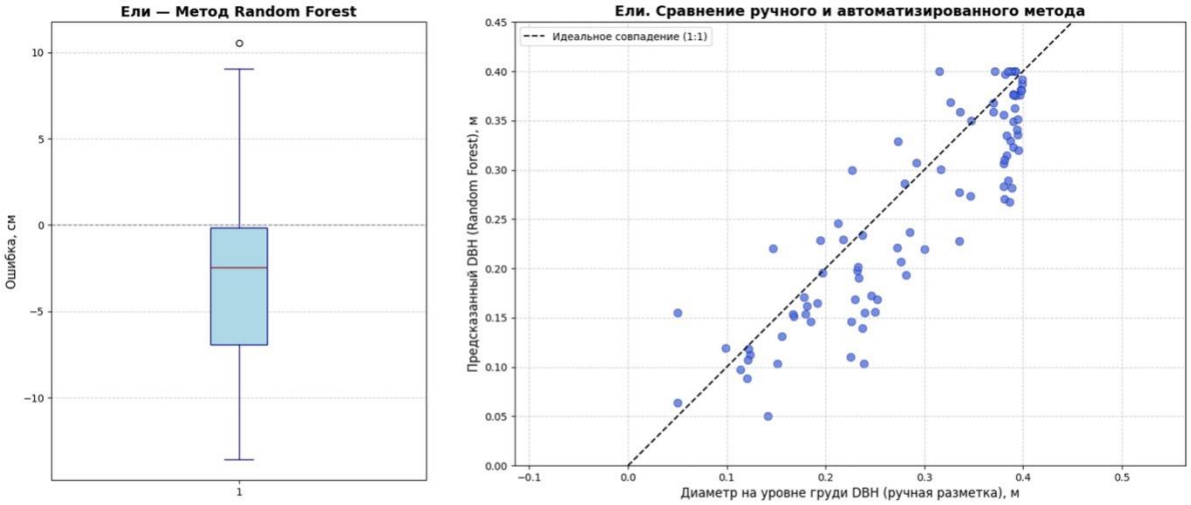


Рис. 7. Сравнение ручных измерений и предсказаний модели Random Forest для диаметра стволов елей на высоте груди: распределение ошибок (слева), диаграмма рассеяния (справа)

Ограничения метода для елей включают:

- зависимость от качества сегментации кроны (ошибки в выделении отдельных деревьев сказываются на метриках кроны и усиливают разброс предсказаний);

- недостаточное количество стволовых точек или их отсутствие (невозможность применения геометрической аппроксимации, получение только аллометрических предсказаний);

- влияние снежного покрова (ухудшение метрик вследствие снижения количества возвратов от стволов деревьев).

Данные ограничения практически не выражены для сосен, для которых стволы в подавляющем большинстве случаев хорошо различимы, что позволяет с высокой степенью надежности применять аппроксимацию цилиндрами.

Подводя итог, разработанный гибридный алгоритм позволяет обеспечить 100% охват сегментированных деревьев в выборке. Для вида сосна достигнута высокая точность за счет применения геометрического метода для видимых стволов. Для вида ель достигнута приемлемая точность, что позволяет провести предварительную оценку лесного массива. Среднее абсолютное отклонение по набору данных составило 3,46 см (4,53 см для елей и 0,95 см для сосен). Если сравнивать с исключительно ручной обработкой в CloudCompare, время анализа сокращается на 70-85%. Перспективами для дальнейших исследований станут увеличение выборки, тестирование на других сезонах с корректировкой алгоритма, получение замеров DBH на участке в Архангельской области.

Выводы

Разработанный гибридный алгоритм автоматической оценки DBH демонстрирует высокую эффективность в условиях частичной видимости стволов. Оценка основывается на наборе данных высокой плотности, полученных с помощью UAV-LiDAR на

территории Архангельской области в зимний период. Интеграция методов геометрической аппроксимации цилиндров и регрессионной модели Random Forest обеспечивает баланс между точностью и полнотой охвата. Для вида сосна достигнута высокая корреляция с референтными данными ($R^2 > 0,98$). Для вида ель достигнута приемлемая точность при полном охвате деревьев на исследуемом участке. Среднее абсолютное отклонение составило 3,46 см, что подтверждает надежность подхода для автоматизации процессов лесной таксации.

Научная новизна работы заключается в разработке и валидации оригинального гибридного алгоритма для автоматической оценки DBH на основе данных UAV-LiDAR высокой плотности. Алгоритм адаптирован к условиям естественных лесов Архангельской области в зимний период и устойчив при недостаточной или отсутствующей видимости стволов вследствие наличия снежного покрова или плотного лесного полога. В отличие от большинства методов, ориентированных на работу с летними наборами исходных данных, данный метод обеспечивает полный охват деревьев на исследуемом участке. Наличие полевых калибровочных данных не требуется. Это позволяет осуществлять эффективную работу в сезонно-ограниченных условиях естественных северных лесов.

Теоретическое значение работы состоит в успешной адаптации метода для условий сезонных ограничений и фрагментарного представления данных. Это расширяет возможности дистанционного зондирования в лесном хозяйстве.

Практическая значимость заключается в сокращении времени обработки исходных облаков точек на 70-85% для получения информации о DBH по сравнению с обработкой в специализированном программном обеспечении в ручном режиме специалистом. Это способствует минимизации трудозатрат, повышению объективности инвентаризации, оценке биомассы и запасов углерода. Для транспортной отрасли особое значение имеет возможность применения разработанного алгоритма в задачах автоматизированного мониторинга состояния деревьев в придорожных полосах, оценки рисков падения на дорожное полотно, а также для инвентаризации древостоя при проектировании, строительстве и реконструкции дорог. Сокращение времени обработки данных на 70-85% способствует повышению оперативности и объективности управленческих решений в области содержания и развития транспортной инфраструктуры.

Ограничения исследования включают:

- малый размер выборки, что снижает статистическую мощность и обобщаемость результатов на другие участки;
- отсутствие прямых полевых измерений DBH на основном участке (референтные значения получены с помощью ручной разметки в CloudCompare с верификацией на выборке NIBIO FOR-instance), что не позволяет полностью исключить влияние погрешности ручной разметки и ограничивает калибровку аллометрической модели;
- недостаточную или отсутствующую видимость стволов у большинства елей из-за плотного полога и снегового покрова, что делает геометрическую аппроксимацию невозможной и вынуждает полагаться исключительно на аллометрические предсказания с умеренной точностью;
- зависимость от качества сегментации индивидуальных деревьев (ошибки из-за пересечения крон и неоднородности проекции кроны);
- сезонная специфика данных (отсутствие тестов на других сезонах года, кроме зимнего).

Цель исследования – повышение достоверности данных измерений диаметров стволов на уровне груди за счет разработки и валидации гибридного алгоритма оценки, адаптированного к условиям частичной видимости стволов, с возможностью применения для мониторинга придорожных лесов и обеспечения безопасности

транспортной инфраструктуры – полностью достигнута. Перспективы дальнейших исследований включают расширение выборки на другие сезоны и территории, интеграцию нейросетевых методов для восстановления недостающих фрагментов стволов в облаке точек, а также валидацию с полевыми измерениями для повышения точности аллометрических моделей.

Список литературы

1. A Comparative Analysis of UAV LiDAR and Mobile Laser Scanning for Tree Height and DBH Estimation in a Structurally Complex, Mixed-Species Natural Forest / L. Mîzgaciu, G. M. Tudoran, A. E. Ciocan [et al.] // Forests. – 2025. – Vol. 16, No. 9, P. 1481. – DOI: 10.3390/f16091481. – EDN: LIKBXK.

2. Estimating individual tree DBH and biomass of durable Eucalyptus using UAV LiDAR / N. Ye, E. Mason, C. Xu [et al.] // Ecological Informatics. – 2025. – Vol. 89, P. 103169. – DOI: 10.1016/j.ecoinf.2025.103169. – EDN: EZLTUT.

3. Exploring the potential of UAV LiDAR data for trunk point extraction and direct DBH measurement / B. Feng, Sh. Nie, Ch. Wang [et al.] // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, No. 12, P. 2753. – DOI: 10.3390/rs14122753. – EDN: STIRCS.

4. Umemi, K. A model for predicting mean diameter at breast height from mean tree height and stand density / K. Umemi, A. Inoue // Journal of Forest Research. – 2024. Vol. 29, Iss. 3, P. 186-195. – DOI: 10.1080/13416979.2024.2311946.

5. High-Precision Aerial LiDAR System Zenmuse L2 Powerful Range, Elevated Precision / [Электронный ресурс] // DJI Enterprise: [сайт]. — URL: https://enterprise.dji.com/zenmuse-l2 (дата обращения: 15.02.2026).

6. Tree stem diameter estimation using inexpensive UAV photogrammetric data and Monte Carlo methods / B. García-Pascual, C. Martín-Cortés, X. Zhou [et al.] // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – 2025. — Vol. X-2/W2. — P. 49-56. – DOI: 10.5194/isprs-annals-X-2-W2-2025-49-2025. – EDN: RUKIZE.

7. Assessing methods to measure stem diameter at breast height with high pulse density helicopter laser scanning / M. J. Sumnall, I. Raigosa-Garcia, D. R. Carter [et al.] // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17, No. 2, P. 229. – DOI: 10.3390/rs17020229. – EDN: EYDJWT.

8. Predicting tree-level diameter and volume for radiata pine using UAV LiDAR-derived metrics across a national trial series in New Zealand / M. S. Watt, S. Jayathunga, M. Mohan [et al.] // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17, No. 8, P. 1456. – DOI: 10.3390/rs17081456. – EDN: OYOKLG.

9. Su, Yu. TreeDBH: dual enhancement strategies for tree point cloud completion in medium–low density UAV data / Yu. Su, Zh. Chen, X. Xue // Forests. – 2025. – Vol. 16, No. 4, P. 667. – DOI: 10.3390/f16040667. – EDN: QDHRXR.

10. Xu, J. Improving Chinese fir plantations DBH inversion accuracy using ensemble learning models based on UAV-LiDAR / J. Xu, Y. Zhao, X. Li [et al.] // IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing. – 2025. – Vol. 18. P. 10846-10863. – DOI: 10.1109/jstars.2025.3560704. – EDN: KBZHGD.

11. Estimation of forest stand volume in coniferous plantation from individual tree segmentation aspect using UAV-LiDAR / X. Zhou, K. Ma, H. Sun // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No. 15, P. 2736. – DOI: 10.3390/rs16152736. – EDN: VCGYLU.

12. FOR-instance: a UAV laser scanning benchmark dataset for semantic and instance segmentation of individual trees / S. Puliti, G. Pearse, P. Surový [et al.] // arXiv preprint arXiv:2309.01279. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2309.01279.

References

1. Mîzgaciu, L., Tudoran, G. M., Ciocan, A. E., et al. (2025). A Comparative Analysis of UAV LiDAR and Mobile Laser Scanning for Tree Height and DBH Estimation in a Structurally Complex, Mixed-Species Natural Forest. Forests, 16(9), 1481. https://doi.org/10.3390/f16091481

2. Ye, N., Mason, E., Xu, C., et al. (2025). Estimating individual tree DBH and biomass of durable Eucalyptus using UAV LiDAR. Ecological Informatics, 89, 103169. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103169

3. Feng, B., Nie, Sh., Wang, Ch., et al. Exploring the potential of UAV LiDAR data for trunk point extraction and direct DBH measurement. Remote Sensing, 14(12), 2753. https://doi.org/10.3390/rs14122753

4. Umemi, K., Inoue, A. A model for predicting mean diameter at breast height from mean tree height and stand density. Journal of Forest Research, 29(3), 186-195. https://doi.org/10.1080/13416979.2024.2311946.

5. High-Precision Aerial LiDAR System Zenmuse L2 Powerful Range, Elevated Precision / [Electronic resource] // DJI Enterprise: [site]. - URL: https://enterprise.dji.com/zenmuse-l2 (date of access: 15.02.2026).

6. García-Pascual, B., Martín-Cortés, C., Zhou, X., et al. (2025). Tree stem diameter estimation using inexpensive UAV photogrammetric data and Monte Carlo methods. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, X-2/W2, 49-56. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-2-W2-2025-49-2025

7. Sumnall, M. J., Raigosa-Garcia, I., Carter, D. R., et al. (2025). Assessing methods to measure stem diameter at breast height with high pulse density helicopter laser scanning. Remote Sensing, 17(2), 229. https://doi.org/10.3390/rs17020229

8. Watt, M. S., Jayathunga, S., Mohan, M., et al. (2025). Predicting tree-level diameter and volume for radiata pine using UAV LiDAR-derived metrics across a national trial series in New Zealand. Remote Sensing, 17(8), 1456. https://doi.org/10.3390/rs17081456

9. Su, Yu., Chen, Zh., Xue, X. TreeDBH: dual enhancement strategies for tree point cloud completion in medium–low density UAV data. Forests, 16(4), 667. https://doi.org/10.3390/f16040667

10. Xu, J., Zhao, Y., Li, X., et al. Improving Chinese fir plantations DBH inversion accuracy using ensemble learning models based on UAV-LiDAR. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 18, 10846-10863. https://doi.org/10.1109/jstars.2025.3560704

11. Zhou, X., Ma, K., Sun H. (2024). Estimation of forest stand volume in coniferous plantation from individual tree segmentation aspect using UAV-LiDAR. Remote Sensing, 16(15), 2736. https://doi.org/10.3390/rs16152736

12. Puliti, S., Pearse, G., Surový, P., et al. (2023). FOR-instance: a UAV laser scanning benchmark dataset for semantic and instance segmentation of individual trees. arXiv preprint arXiv:2309.01279. https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.01279

Doronin V. V.

ANALYSIS OF METHODS FOR AUTOMATIC ESTIMATION OF TREE DIAMETER AT BREAST HEIGHT (DBH) FROM UAV-LIDAR DATA UNDER PARTIAL STEM OCCLUSION

Abstract. *This study presents a hybrid algorithm for the automatic estimation of diameter at breast height (DBH) from high-density UAV-LiDAR data acquired during the winter period in the boreal forests of the Arkhangelsk Region. The algorithm combines geometric stem approximation with a Random Forest regression model based on crown metrics for cases of lower-stem occlusion. The proposed approach ensures 100% coverage of all trees on the plot without requiring field measurements. Validation was performed by comparison with reference values obtained through manual annotation in CloudCompare. The reliability of the annotation was confirmed by verification on an independent FOR-instance (NIBIO) dataset. The hybrid method demonstrates high accuracy for pines using geometric approximation. Acceptable accuracy is achieved for spruces using allometric prediction. The mean absolute error of the hybrid method is 3.46 cm. The analysis time is reduced by 70–85% compared to manual methods. The results confirm the effectiveness of the proposed algorithm under stem occlusion and position UAV-LiDAR as an important tool for automated forest inventory in northern regions. The developed algorithm can monitor roadside forest stands, assess the risk of trees falling onto transportation corridors, and inventory forest stands in zones of road construction and reconstruction.*

Keywords: *UAV-LiDAR, stem diameter, DBH, point clouds, geometric approximation, Random Forest, forest inventory, road safety monitoring, roadside forests, transport infrastructure.*

Сведения об авторе:

Доронин Виталий Владленович
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск,
аспирант,
e-mail: doronin.v888@yandex.ru

Information about the author:

Doronin Vitaly Vladlenovich
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk,
Postgraduate Student,
e-mail: doronin.v888@yandex.ru

УДК 004.8

Колюпанова И.Ю., Шумаева Е.А., Ляшенко Ю.А., Савкова Е.О.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И УЛУЧШЕНИЯ ПОЗИЦИЙ В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ РЕЙТИНГАХ

Аннотация. *Представлена методика разработки системы поддержки принятия решений для определения и улучшения позиций в многокритериальных рейтингах. Существующие аналитические решения либо ограничиваются прогнозированием без интерпретации результатов, либо предлагают общие рекомендации, не учитывающие специфику конкретного университета, его возможности и ресурсные ограничения. Целью данного исследования является разработка программной системы поддержки принятия решений, которая обеспечивает прогнозирование рейтинговых позиций университета и формирует интерпретируемые персонализированные рекомендации по их улучшению. Предлагаемый в статье подход основан на ансамблевом методе машинного обучения XGBoost, настроенном на работу с 42 показателями рейтинга RAEX, и SHAP-анализе, который позволяет количественно оценить вклад каждого фактора в итоговый рейтинг.*

Ключевые слова: *машинное обучение, XGBoost, рекомендательная система, прогнозирование, образовательная аналитика.*

Введение

В настоящее время оценка деятельности образовательных учреждений высшего образования представляет собой сложный многоуровневый процесс, основанный на анализе десятков различных показателей. Ведущие рейтинговые агентства, такие как RAEX [1], QS World University Rankings [2] и Times Higher Education [3], используют комплексные методики, учитывающие академическую репутацию, научные достижения, международное сотрудничество и многие другие аспекты работы вузов. Однако сам по себе рейтинг, показывающий текущее положение организации, не отвечает на ключевой вопрос: какие конкретные шаги необходимо предпринять для улучшения позиций.

Задача осложняется тем, что, во-первых, современные алгоритмы машинного обучения, демонстрирующие высокую точность прогнозирования, часто работают по принципу «черного ящика». Пользователь получает результат, но не понимает логику его формирования. Во-вторых, существующие аналитические системы обычно предлагают общие рекомендации, не учитывающие специфику конкретной организации, ее ресурсные возможности и текущее состояние по различным показателям. В-третьих, многокритериальность образовательных рейтингов требует сложной оптимизации, поскольку улучшение одних показателей может негативно сказаться на других из-за ограниченности ресурсов.

Важность решения обозначенной проблемы подтверждается ее тесной связью с актуальными научными направлениями в области искусственного интеллекта, анализа данных и поддержки принятия решений. С практической точки зрения, разработка эффективных инструментов для улучшения рейтинговых позиций напрямую влияет на

конкурентоспособность образовательных организаций и качество предоставляемых ими услуг.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в области применения машинного обучения для образовательной аналитики. Ключевой метод, который мы использовали — SHAP - метод, предложенный С.М. Лундбергом и С. Ли в 2017 году [4]. Этот подход, основанный на теории кооперативных игр, позволяет количественно оценить вклад каждого признака в итоговый прогноз модели, обеспечивая необходимую интерпретируемость. Важный вклад в развитие методов машинного обучения для задач ранжирования внесли Т. Чен и С. Гестрин, разработавшие алгоритм XGBoost [5]. А в работах С. Ромеро и С. Вентура [6] прослеживается растущий интерес научного сообщества к применению методов интеллектуального анализа образовательных данных.

Однако анализ существующих разработок выявил существенные пробелы:

– Отсутствие интеграции прогнозирования и генерации рекомендаций в единую систему.

– Ограниченные возможности учета ресурсных ограничений при формировании рекомендаций.

– Недостаточная адаптация методов искусственного интеллекта для практических задач управления образованием.

Цель и задачи исследования

Основной целью исследования является создание программной системы, обеспечивающей генерацию интерпретируемых рекомендаций для улучшения позиций образовательных организаций в многокритериальных рейтингах. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать архитектуру системы, интегрирующую модули прогнозирования, анализа и рекомендаций.
2. Реализовать механизм интерпретации влияния факторов на рейтинговые позиции.
3. Создать алгоритм генерации персонализированных рекомендаций с учетом ресурсных ограничений.
4. Разработать пользовательский интерфейс для взаимодействия с системой.
5. Провести тестирование системы на реальных данных образовательных рейтингов.

Решение этих задач позволит создать научно обоснованный и практико-ориентированный инструмент, способный существенно повысить эффективность управления образовательными организациями в условиях растущей конкуренции.

Разработка системы

Система разработана на основе модульной архитектуры, что позволяет гибко настраивать её компоненты и легко масштабировать функциональность. Каждый модуль выполняет чётко определённые задачи, но при этом все они работают согласованно, образуя единый механизм для решения сложной задачи прогнозирования и оптимизации рейтингов образовательных организаций.

Модуль конфигурации функционирует как централизованный репозиторий параметров и справочных данных, обеспечивающий целостность и согласованность функционирования системы. Модуль выполняет хранение и управление структурой входных данных, включая строгий порядок 42 признаков, их весовые коэффициенты из методики RAEX, а также допустимые диапазоны значений для валидации, а также

модуль выступает системообразующим элементом, обеспечивающим синхронизацию работы всех компонентов архитектуры.

В модуле обучения моделей реализованы процедуры создания, тренировки и верификации прогностических алгоритмов машинного обучения. В рамках данного модуля производится загрузка исторических данных, их предварительная обработка. В модуле осуществляется построение и оптимизация моделей на основе различных подходов: ансамблей решающих деревьев (метод градиентного бустинга XGBoost [7]) и нейронных сетей специализированной архитектуры. После завершения процесса обучения в модуле выполняется комплексная оценка качества моделей на независимых тестовых выборках с использованием метрик точности и устойчивости [8]. По результатам оценки производится выбор оптимальной (по минимальной MAE на валидационной выборке) модели для последующего развертывания. Таким образом, в данном модуле формируется аналитическое ядро системы, способное выявлять сложные закономерности в многомерных пространствах данных.

В модуле прогнозирования сосредоточены вычислительные процедуры для оценки рейтинговых позиций образовательных организаций и формирования стратегических рекомендаций, реализованы алгоритмы расчета прогностических оценок на основе предварительно обработанных данных. На основе загруженной обученной модели осуществляется расчет прогностических оценок, которые затем преобразуются в итоговые рейтинговые позиции с применением специализированных математических функций.

В модуле рекомендаций реализованы аналитические механизмы для генерации целевых рекомендаций по оптимизации ключевых показателей на основе SHAP и ограничений.

В модуле обработки данных реализованы процедуры нормализации и стандартизации разнородных входных параметров, преобразование рангов в баллы и обратно [9]. При обучении этот модуль обрабатывает исторические данные перед передачей в модуль обучения моделей; а при прогнозировании — пользовательские данные перед расчетом рейтинга.

В модуле пользовательского интерфейса реализованы интерфейсные компоненты для интерактивного взаимодействия с системой конечных пользователей [10]. В данном модуле предоставляются инструменты для ввода данных об образовательных организациях как в ручном режиме через структурированные формы, так и в автоматизированном – посредством загрузки CSV-файлов с предопределенной структурой.

На рисунке 1 представлена схема взаимодействия модулей в системе при обучении моделей.

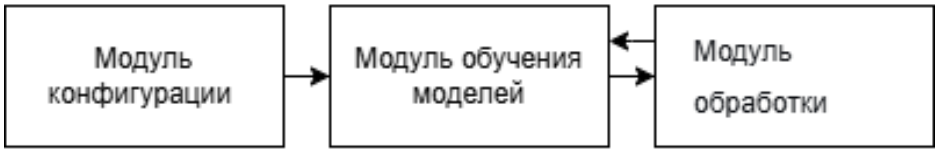


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей в системе при обучении моделей

На рисунке 2 представлена схема взаимодействия модулей в системе при прогнозировании и генерации рекомендаций.

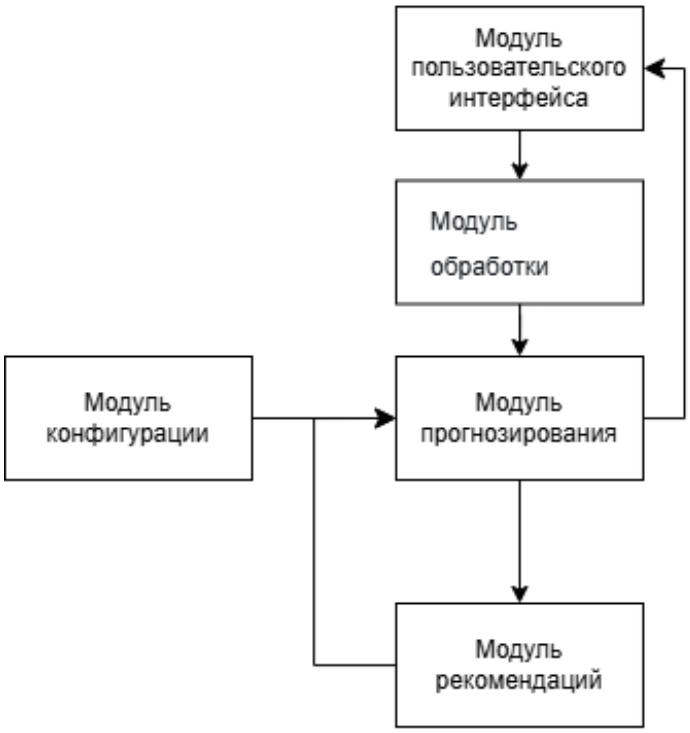


Рис. 2. Схема взаимодействия модулей в системе при прогнозировании и генерации рекомендаций

Разработанная модульная архитектура обеспечивает четкое разделение функциональных задач системы при сохранении целостности процесса обработки данных. В отличие от существующих решений, где прогнозирование и генерация рекомендаций часто реализуются как изолированные компоненты, предложенная архитектура интегрирует эти функции в единый конвейер. Модуль конфигурации выступает системообразующим элементом, который обеспечивает согласованность работы всех компонентов. Такая организация позволяет не только гибко настраивать систему под различные рейтинговые методики, но и масштабировать функциональность без изменения общей структуры.

Математический аппарат

В основу предложенной методики положено формализованное представление рейтинговой позиции как функции множества взаимосвязанных признаков. Если обозначить рейтинговую позицию как R, а различные показатели деятельности организации как x_1, x_2, ..., x_n, то их взаимосвязь можно выразить формулой 1.

$$R = F\left(w_1 \cdot f_1(x_1), w_2 \cdot f_2(x_2), \dots, w_n \cdot f_n(x_n)\right) + \varepsilon \quad (1)$$

Здесь $f_i(x_i)$ — функции нормализации, которые приводят разные показатели к одному знаменателю. В системе используется минимаксная нормализация:

$$f_i(x_i) = (x_i - min_i)/(max_i - min_i), \quad (2)$$

где min_i и max_i берутся из обучающей выборки.

Веса w_i — из методики RAEX. А ε — это не ошибка модели, а технический шум: факторы, которые мы принципиально не можем предсказать. В расчётах ε считается нормально распределённой случайной величиной с нулевым средним, а её дисперсия оценивается по остаткам на валидации, что позволяет строить не только точечный прогноз, но и доверительные интервалы.

Для генерации рекомендаций по улучшению рейтинговой позиции используется модифицированный градиентный подход [11]. Изменение рейтинга ΔR в результате улучшения показателей рассчитывается как сумма произведений чувствительности рейтинга к изменению каждого показателя на величину этого изменения с учетом коэффициента реализуемости:

$$\Delta R = \sum((\delta \mathrm{R}/\delta \mathrm{x}_i) \cdot \Delta x_i \cdot \rho_i), \quad (3)$$

где $\delta R/\delta x_i$ представляет собой чувствительность рейтинга к изменению i-го показателя, которая определяется методами SHAP-анализа. Значение Δx_i обозначает рекомендуемое изменение показателя, а ρ_i – коэффициент реализуемости, который показывает, насколько вообще реально улучшить этот показатель в конкретном вузе. Он собирается из трёх частей:

- базовая экспертная оценка ρ_i^{base} (например, поднять средний балл ЕГЭ сложно и долго, а докупить оборудование — быстро);
- бюджетное ограничение ρ_i^{budget} (если мероприятие не влезает в бюджет, эта часть обнуляется);
- техническая возможность ρ_i^{tech} (есть ли люди, техника, компетенции).

Итоговый коэффициент — произведение всех трёх: $\rho_i = \rho_i^{base} \times \rho_i^{budget} \times \rho_i^{tech}$. Субъективность экспертной оценки при этом компенсируется тем, что пользователь может менять бюджетную компоненту вручную и прогонять вероятные сценарии для перевода субъективных мнений в настраиваемые ограничения.

Алгоритм прогнозирования рейтингов

В основе системы прогнозирования лежит оптимизированный алгоритм XGBoost, специально настроенный для работы с образовательными рейтингами. Модель использует 1500 деревьев решений с ограниченной глубиной до 8 уровней, что позволяет выявлять сложные зависимости между показателями, избегая переобучения [12]. Скорость обучения установлена на уровне 0,05 секунды для обеспечения плавной и стабильной сходимости алгоритма. Для повышения устойчивости модели применяется субдискретизация данных – каждая итерация использует 70% случайно выбранных примеров и 70% признаков. Регуляризационные коэффициенты α и λ установлены на уровне 1,0 для контроля сложности модели и предотвращения переобучения.

Обучение модели проводилось на данных рейтинга RAEX за трехлетний период 2022 – 2024 года. Валидация модели выполнялась методом стратифицированного разделения, где 80% данных использовалось для обучения, а 20% – для тестирования, что обеспечило репрезентативность обеих выборок.

Алгоритм генерации рекомендаций

Процесс формирования рекомендаций построен как последовательная многоэтапная процедура, обеспечивающая системный подход к улучшению рейтинговых позиций. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.

На первом этапе система проводит комплексный анализ текущего состояния образовательной организации. Вычисляется текущая рейтинговая позиция на основе актуальных показателей, идентифицируются области с наибольшим отставанием от целевых значений. Анализ включает сравнение с вузами-конкурентами, занимающими желаемые позиции в рейтинге.

Второй этап посвящен приоритизации потенциальных улучшений. Для этого используется комбинированная метрика, учитывающая два ключевых фактора: объективную важность показателя (рассчитанную через SHAP-значения [13]) и субъективную реализуемость улучшений. Такой подход позволяет отбирать не только наиболее влиятельные, но и практически достижимые направления развития.

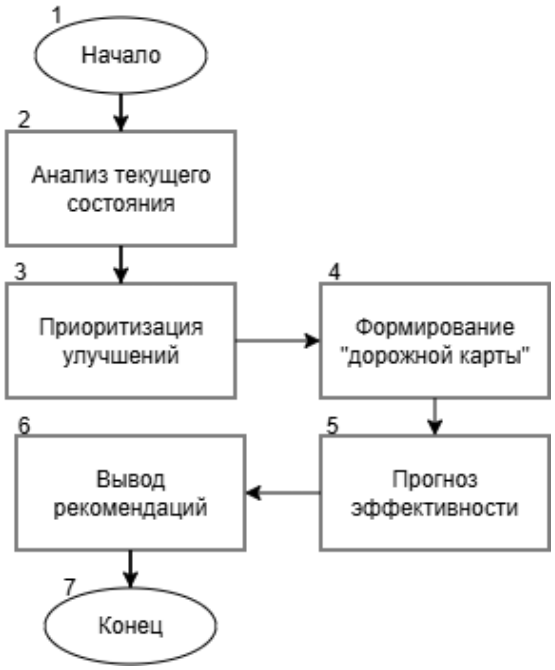


Рис. 3. Блок-схема алгоритма генерации рекомендаций

На этапе формирования дорожной карты система создает последовательный план действий с временными оценками. Рекомендации группируются по тематическим блокам – академические показатели, научная деятельность, международное сотрудничество и распределяются по временным интервалам с учетом логической последовательности и ресурсных требований.

Завершающий этап включает прогнозирование эффективности предлагаемых мер. Система рассчитывает ожидаемое изменение рейтинговой позиции по формуле, учитывающей важность каждого показателя, планируемую величину его улучшения и коэффициент реализуемости, что позволяет оценить совокупный эффект от реализации всего комплекса рекомендаций и скорректировать план при необходимости.

Такой многоэтапный подход обеспечивает формирование сбалансированных и реалистичных рекомендаций, учитывающих как потенциал улучшения, так и практические ограничения образовательных организаций.

Результаты разработки системы принятия решений

Система прошла всестороннее тестирование на данных 196 российских вузов из рейтинга RAEX [1]. Оценка эффективности проводилась по нескольким ключевым показателям. Система продемонстрировала высокую точность прогнозирования: алгоритм XGBoost показал результат MAE = 57,7 и R^2 = 0,902, что свидетельствует о надежности предсказаний. Нейросетевая модель также показала хорошие результаты (MAE = 62,3, R^2 = 0,885), но немного уступила XGBoost в точности.

Рекомендательная система доказала свою практическую ценность, обеспечивая среднее улучшение позиций на 15,3 места (дробное получилось потому, что это среднее по группе: один вуз поднялся на 12 мест, другой на 18, третий на 16 — среднее 15,3). В отдельных случаях вузы могли подняться на 32 позиции после выполнения предложенных рекомендаций. Система успешно помогала достигать целевых позиций в 78,4% случаев, при этом время формирования персонализированных рекомендаций не превышало 28 секунд.

Производительность системы оптимизирована для практического использования. Весь процесс – от прогнозирования до выдачи рекомендаций занимает не более 30 секунд. Прогноз позиции выполняется за 3,2 секунды, анализ данных занимает 8,5 секунд, а генерация рекомендаций – 16,1 секунды. Такая скорость работы обеспечивает комфортное взаимодействие пользователей с системой.

Интерфейс, находящийся на стадии тестирования, обеспечивает наглядное отображение всех ключевых показателей, включая текущие и прогнозируемые позиции вуза, детализированные рекомендации по улучшению и ожидаемые результаты от их реализации.

Практическая значимость работы заключается в возможности перехода от интуитивного управления к научно обоснованному планированию развития вуза. Система не просто предсказывает рейтинг, а показывает: какие именно показатели тянут вниз, насколько их реально улучшить с учётом бюджета, и что будет, если выбрать другую стратегию. Это заменяет интуитивные решения количественными расчётами. Методика легко перенастраивается на другие рейтинги — RAEX, QS, THE — без переписывания кода и может быть адаптирована для других многокритериальных систем оценки.

Выводы

Таким образом, разработанная система доказала свою эффективность, обеспечивая высокую точность прогнозирования рейтингов и генерацию действенных рекомендаций. Вместо интуитивных решений вуз получает количественные расчёты, возможность сценарного анализа и персонализированную дорожную карту улучшений. Практическая значимость исследования подтверждается успешным внедрением методики, которая позволяет перейти к проактивному управлению академической конкурентоспособностью образовательных организаций.

Список литературы

1. Рейтинговое агентство RAEX [Электронный ресурс]. — URL: https://raex-rr.com/ (дата обращения: 12.12.2025).

2. QS World University Rankings [Электронный ресурс]. — URL: https://www.topuniversities.com/world-university-rankings (дата обращения: 12.12.2025).

3. Times Higher Education World University Rankings [Электронный ресурс]. — URL: https://www.timeshighereducation.com/ (дата обращения: 12.12.2025).

4. Lundberg S.M., Lee S.-I. A unified approach to interpreting model predictions // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2017. — Vol. 30. — P. 4765-4774. — DOI: 10.48550/arXiv.1705.07874.

5. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — New York: ACM, 2016. — P. 785-794. — DOI: 10.1145/2939672.2939785.

6. Romero C., Ventura S. Educational data mining and learning analytics: An updated survey // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. — 2020. — Vol. 10, No. 3. — P. e1355. — DOI: 10.1002/widm.1355.

7. Oukhouya H., Kadiri H., El Himdi K., Guerbaz R. Comparing machine learning methods: A case study in educational data mining // Statistics, Optimization and Information Computing. — 2023. — Vol. 12, No. 1. — P. 200-209. — DOI: 10.19139/soic-2310-5070-1822.

8. Серикова Ю.И. Прогнозирование успеваемости студентов на основе методов машинного обучения // Молодежь в науке: новые аргументы: сборник научных работ VII

Международного молодежного конкурса. — Липецк: Научное партнерство «Аргумент», 2017. — Т. I. — С. 88-98.

9. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Нормализация данных в задачах машинного обучения // Информатика. — 2021. — Т. 18, № 3. — С. 83-96. — DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96.

10. Раскин Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем. — Москва: Мир, 2020. — С. 256

11. Цыганов А.В., Цыганова Ю.В. Градиентные методы оптимизации в задачах машинного обучения // Компьютерные исследования и моделирование. — 2025. — Т. 17, № 5. — С. 761-782. — DOI: 10.20537/2076-7633-2025-17-5-761-782.

12. Черноморец Н.А. Применение ансамблевых методов машинного обучения для анализа образовательных данных // Фундаментальные научно-практические исследования: актуальные тенденции и инновации: сборник научных трудов по материалам XLII Международной научно-практической конференции. — Анапа: Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов, 2023. — С. 94-98.

13. Чуева А.А., Ким З.В., Назаров Д.В., Бирюков М.А. Интерпретация результатов машинного обучения на основе SHAP-анализа // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции. — Ижевск: УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2025. — С. 154-160.

References

1. Reitingovoe agentstvo RAEX [RAEX Rating Agency]. URL: https://raex-rr.com/ (accessed: 12.12.2025). (In Russian).

2. QS World University Rankings. URL: https://www.topuniversities.com/world-university-rankings (accessed: 12.12.2025).

3. Times Higher Education World University Rankings. URL: https://www.timeshighereducation.com/ (accessed: 12.12.2025).

4. Lundberg S.M., Lee S.-I. A unified approach to interpreting model predictions // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2017. — Vol. 30. — P. 4765-4774. — DOI: 10.48550/arXiv.1705.07874.

5. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — New York: ACM, 2016. — P. 785-794. — DOI: 10.1145/2939672.2939785.

6. Romero C., Ventura S. Educational data mining and learning analytics: An updated survey // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. — 2020. — Vol. 10, No. 3. — P. e1355. — DOI: 10.1002/widm.1355.

7. Oukhouya H., Kadiri H., El Himdi K., Guerbaz R. Comparing machine learning methods: A case study in educational data mining // Statistics, Optimization and Information Computing. — 2023. — Vol. 12, No. 1. — P. 200-209. — DOI: 10.19139/soic-2310-5070-1822.

8. Serikova Yu.I. Prognozirovanie uspevaemosti studentov na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Predicting student academic performance based on machine learning methods]. In: Molodezh' v nauke: novye argumenty: sbornik nauchnykh rabot VII Mezhdunarodnogo molodezhnogo konkursa [Youth in Science: New Arguments: Collection of Scientific Papers of the VII International Youth Competition]. — Lipetsk: Nauchnoe partnerstvo "Argument", 2017. — Vol. I. — P. 88-98. (In Russian).

9. Starovoitov V.V., Golub Yu.I. Normalizatsiya dannykh v zadachakh mashinnogo obucheniya [Data normalization in machine learning problems] // Informatika [Informatics]. —

2021. — Vol. 18, No. 3. — P. 83-96. — DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96. (In Russian).

10. Raskin D. Interfeys: novye napravleniya v proektirovanii komp'yuternykh sistem [Interface: New Directions in Computer Systems Design]. — Moscow: Mir, 2020. — 256 p. (In Russian).

11. Tsyganov A.V., Tsyganova Yu.V. Gradientnye metody optimizatsii v zadachakh mashinnogo obucheniya [Gradient optimization methods in machine learning problems] // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie [Computer Research and Modeling]. — 2025. — Vol. 17, No. 5. — P. 761-782. — DOI: 10.20537/2076-7633-2025-17-5-761-782. (In Russian).

12. Chernomorets N.A. Primenenie ansamblevykh metodov mashinnogo obucheniya dlya analiza obrazovatel'nykh dannykh [Application of ensemble machine learning methods for educational data analysis]. In: Fundamental'nye nauchno-prakticheskie issledovaniya: aktual'nye tendentsii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov po materialam XLII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Fundamental Scientific and Practical Research: Current Trends and Innovations: Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the XLII International Scientific and Practical Conference]. — Anapa: Nauchno-issledovatel'skiy tsentr ekonomicheskikh i sotsial'nykh protsessov, 2023. — P. 94-98. (In Russian).

13. Chueva A.A., Kim Z.V., Nazarov D.V., Biryukov M.A. Interpretatsiya rezul'tatov mashinnogo obucheniya na osnove SHAP-analiza [Interpretation of machine learning results based on SHAP analysis]. In: Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii: sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Information Technologies in Science, Industry and Education: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. — Izhevsk: UIR IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2025. — P. 154-160. (In Russian).

Koliupanova I.Y., Shumaeva E.A., Lyashenko J.A., Savkova E.O.

A METHOD FOR DEVELOPING A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR DETERMINING AND IMPROVING POSITIONS IN MULTICRITERIAL RANKINGS

Abstract. *A method for developing a decision support system for determining and improving positions in multi-criteria ratings. Modern educational ratings are complex multi-criteria systems, but their final values do not provide an answer to the question of how an organization can improve its position. Existing analytical solutions either limit themselves to forecasting without interpreting the results, or offer general recommendations that do not take into account the specific characteristics of a particular university and its resource constraints. The purpose of this study is to develop a software decision support system that provides forecasting of rating positions and generates interpretable personalized recommendations for improving them. The proposed approach is based on the XGBoost ensemble machine learning method, which is configured to work with 42 RAEX rating indicators, and SHAP analysis, which allows for the quantification of each factor's contribution to the final rating.*

Keywords: *machine learning, XGBoost, recommendation system, forecasting, educational analytics.*

Сведения об авторах:

Колюпанова Ирина Юрьевна
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк,
директор научно-технической библиотеки ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
E-mail: babkaira@mail.ru

Шумаева Елена Александровна
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк,
директор ИПО ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
кандидат государственного управления, доцент

Ляшенко Юлия Алексеевна
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк,
магистрант кафедры автоматизированных систем и технологий, факультета информационных систем и технологий

Савкова Елена Осиповна
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк,
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем и технологий, факультета информационных систем и технологий.

Information about the authors:

Koliupanova Irina Yurievna
Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.
director of the Scientific and Technical Library,
E-mail: babkaira@mail.ru

Shumaeva Elena Aleksandrovna
Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk,
Director of the Institute of Postgraduate Education,
Candidate of Sciences in Public Administration, Associate Professor.

Lyashenko Julia Alekseevna
Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk,
Master's Student, Department of Automated Systems and Technologies, Faculty of Information Systems and Technologies.

Savkova Elena Osipovna
Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk,
Associate Professor, Department of Automated Systems and Technologies, Faculty of Information Systems and Technologies,
Candidate of Technical Sciences.

УДК 004.93:656.1

Маренич К.Н., Володарец Н.В., Ткачёв С.А., Маренич А.С.

КОНТЕКСТНО-СЕМАНТИЧЕСКИЙ ТРАЕКТОРНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ В ТРАНСПОРТНОМ ПОТОКЕ ПО ДАННЫМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Аннотация. *В статье предложен контекстно-семантический траекторный алгоритм выявления аномальных ситуаций в транспортном потоке по данным видеонаблюдения. Актуальность работы связана с необходимостью автоматизированного анализа дорожной обстановки в интеллектуальных транспортных системах и снижением зависимости мониторинга от ручного наблюдения. В отличие от подходов, ориентированных только на распознавание ДТП по кадрам или на отдельную оценку скорости, алгоритм объединяет локальную модель нормального движения, семантическую карту дорожного участка, траекторные признаки и показатели конфликтности. Предложены интегральный индекс аномальности, процедура временного подтверждения события и правила защищённого обновления модели нормы. Дополнительно формализованы структура семантической карты, уточнённый расчёт TTC с проверкой конфликтных траекторий, а также показатели PET, DRAC и минимальной прогнозируемой дистанции. Результаты предварительной имитационной апробации показывают возможность применения алгоритма для раннего выявления потенциально опасных ситуаций.*

Ключевые слова: *интеллектуальная транспортная система, компьютерное зрение, видеопоток, траектория, аномальная ситуация, семантическая карта, TTC.*

Постановка задачи

Развитие интеллектуальных транспортных систем связано с переходом от пассивного наблюдения за дорожной обстановкой к автоматизированному анализу видеопотоков, траекторий и поведения участников движения. Камеры дорожного наблюдения позволяют получать данные без установки дополнительных датчиков на транспортные средства, а развитие компьютерного зрения делает такие данные пригодными для оперативного анализа параметров движения [1-4]. Вопросы повышения безопасности дорожного движения за счёт интеллектуального обмена данными между участниками транспортной системы также рассматриваются в работах по технологиям V2V, V2P и V2X [5].

Для практического мониторинга безопасности дорожного движения важны не только уже произошедшие ДТП, но и предаварийные или потенциально опасные ситуации: резкое торможение, остановка в конфликтной зоне, движение против разрешённого направления, опасное сближение транспортных средств, отклонение от типового коридора движения. Такие ситуации не всегда имеют ярко выраженный визуальный признак на отдельном кадре, поэтому их целесообразно анализировать по динамике траекторий во времени.

Научно-прикладная задача работы заключается в разработке воспроизводимого алгоритма, который объединяет результаты детекции и трекинга объектов, локальную статистическую норму движения, семантическое описание дорожного участка и показатели конфликтности. Такой алгоритм должен быть интерпретируемым, пригодным для настройки на конкретный перекрёсток или участок дороги и устойчивым к единичным ошибкам детекции.

Анализ последних исследований

Современные исследования в области дорожной видеоаналитики можно условно разделить на несколько направлений. Первое направление связано с детекцией и трекингом транспортных средств [6-16]. Оно обеспечивает получение координат, идентификаторов и траекторий объектов и является базой для последующего анализа транспортной ситуации. В работах [15, 16] предложены модификации YOLO и методы устойчивого трекинга, адаптируемые к условиям ограниченной видимости. Второе направление связано с оценкой параметров движения, прежде всего скорости и направления транспортных средств по видеоданным [17-19].

Третье направление составляют статистические модели нормального движения, в которых аномалией считается существенное отклонение от типичного поведения в данной зоне [20–22]. Их преимущество заключается в интерпретируемости, но недостаток состоит в риске загрязнения модели нормы аномальными траекториями при неконтролируемом онлайн-обновлении.

Отдельную группу составляют показатели конфликтности, например TTC, PET и DRAC [23-26]. Они позволяют оценивать риск взаимодействия объектов до столкновения, но при упрощённом применении могут давать ложные срабатывания: объекты могут сближаться по расстоянию, но не находиться на конфликтующих траекториях. Поэтому такие показатели целесообразно применять совместно с анализом конфликтных зон и прогнозируемых траекторий.

Критическое сопоставление известных подходов показывает, что каждый из них решает только часть задачи. Поэтому в данной работе предлагается не отдельный классификатор ДТП, а алгоритм комплексной оценки аномальности транспортной ситуации, в котором кинематические, семантические и конфликтные признаки объединяются в единую процедуру принятия решения. Результаты критического сопоставления подходов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Критическое сопоставление подходов и элементов предлагаемого алгоритма

Подход	Преимущество	Недостаток	Что добавлено в КСТА
Детекция и трекинг объектов	Позволяет получить траектории и идентификаторы объектов	Не определяет, является ли поведение опасным	Треки используются как вход для расчёта локального отклонения, риска и типа события
Оценка скорости по видео	Даёт измеримые параметры движения	Требует калибровки; скорость не всегда означает опасность	Скорость анализируется относительно локальной нормы конкретной зоны
Локальная модель нормального движения	Позволяет выявлять отклонения без полной разметки ДТП	Может загрязняться аномальными треками	Введены условия защищённого обновления модели только нормальными треками
Классификация ДТП по кадрам	Подходит для фиксации визуально выраженных аварий	Часто обнаруживает событие после его наступления; требует датасета	Алгоритм ориентирован на траекторные предвестники и потенциально опасные ситуации
TTC и показатели конфликтности	Позволяют оценить риск до столкновения	Упрощённый TTC не учитывает габариты и конфликтную геометрию	TTC применяется только после проверки конфликтных траекторий; дополнительно используются PET, DRAC и d_{min}
Глубокие VAD-модели	Могут учитывать сложные пространственно-временные признаки	Сложны для объяснения и требуют вычислительных ресурсов	Индекс аномальности остаётся интерпретируемым и может работать как надстройка над любым детектором/трекером

Альтернативой глубоким VAD-моделям служат гибридные подходы, сочетающие детекцию и адаптивный трекинг [27, 28], а также методы интеллектуального анализа видеоданных для оценки рисков на дорожной сети [29].

Цель работы

Цель работы — разработать контекстно-семантический траекторный алгоритм выявления аномальных ситуаций в транспортном потоке на основе совместного анализа траекторных, кинематических, семантических и конфликтных признаков, получаемых из видеопотока дорожного наблюдения.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: провести критическое сопоставление существующих подходов к выявлению транспортных аномалий; определить авторский состав признаков и структуру интегрального индекса аномальности; разработать правила построения и обновления локальной модели нормального движения; уточнить расчёт TTC с учётом прогнозируемых траекторий и конфликтных зон; формализовать алгоритм в виде IDEF0-диаграмм, математических зависимостей и псевдокода; выполнить предварительную проверку логики алгоритма на наборе траекторных сценариев.

Научная новизна работы заключается в структуре комплексного индекса аномальности и схеме принятия решения, которые объединяют локальное отклонение от нормы, нарушение семантических правил участка, конфликтный риск и временное подтверждение события. В отличие от решений, ориентированных только на распознавание аварии или отдельное измерение скорости, предлагаемый алгоритм направлен на выявление потенциально опасных ситуаций по динамике движения объектов во времени.

Основная часть

Предлагаемый контекстно-семантический траекторный алгоритм выявления транспортных аномалий (КСТА) предназначен для обработки видеопотока с камеры дорожного наблюдения и формирования тревожного события только при наличии устойчивого сочетания признаков аномальности. Входными данными алгоритма являются видеопоток, данные калибровки или матрица гомографии, семантическая карта участка, параметры локальной модели нормы и набор пороговых параметров [1, 4, 17-19]. Выходом алгоритма являются подтверждённые события с указанием типа события, объекта, времени, зоны, значения индекса аномальности и признаков, вызвавших срабатывание. На схеме алгоритма используются обозначения: M — семантическая карта участка; B — локальная модель нормы; R — модуль оценки риска. Общая структура алгоритма представлена на рисунке 1.

На рисунке 1 показана общая логика алгоритма КСТА. Последовательная обработка включает получение и калибровку видеоданных, детекцию и трекинг объектов, переход к координатам дорожной плоскости, расчёт признаков движения, оценку индекса аномальности и временное подтверждение события. В отличие от линейной схемы «детекция — тревога», алгоритм использует три функциональных компонента: семантическую карту, локальную модель нормы и модуль риска.

Семантическая карта M задаётся в координатах дорожной плоскости после гомографического преобразования [17-19]. Она может создаваться вручную экспертом по одному опорному кадру, полуавтоматически на основе разметки дорожной инфраструктуры или импортироваться из цифрового описания участка. Состав основных элементов семантической карты приведён в таблице 2.



Рис. 1. Общая структура контекстно-семантического траекторного алгоритма

Таблица 2

Структура семантической карты дорожного участка

Элемент карты	Представление	Назначение в алгоритме
Полосы движения	Полигоны $lane_z$ с допустимым направлением φ_z	Определение зоны объекта и проверки движения против потока
Стоп-линии	Ломаные линии $stop_z$	Фиксация остановки перед регулируемым пересечением
Пешеходные переходы	Полигоны $crosswalk_z$	Определение зон повышенного риска и нарушений
Запрещённые области	Полигоны $forbidden_z$	Формирование семантического штрафа $Z_i(t)$
Конфликтные зоны	Полигоны $conflict_c$	Проверка пересечения прогнозируемых траекторий и расчёт PET
Зоны допустимой остановки	Полигоны $stop_{allowedz}$	Исключение ложных тревог при нормальной остановке

Семантическая карта в алгоритме используется не как иллюстративный слой, а как формальное описание дорожного участка. С её помощью проверяются принадлежность объекта допустимой зоне, соответствие направления движения разрешённому направлению, нахождение в конфликтной области, пересечение стоп-линии и длительность остановки в зонах, где остановка запрещена или допустима [1, 2, 4].

Функциональная модель алгоритма представлена в нотации IDEF0. Контекстная диаграмма A-0 показывает главную функцию системы, её входы, выходы, управляющие воздействия и механизмы реализации (рисунок 2). Входами выступают видеопоток, калибровочные точки и описание участка. Управляющими воздействиями являются ПДД и логика движения, пороговые параметры и критерии безопасности. Выходами являются тревожное событие, тип и уровень риска, а также журнал траекторий.



Рис. 2. Контекстная диаграмма IDEF0 A-0

Декомпозиция A0 раскрывает внутреннюю последовательность функций: подготовка видеоданных, обнаружение и сопоставление объектов, построение траекторий и признаков, оценка индекса аномальности и подтверждение события (рисунок 3). При этом внешние входы, управления, выходы и механизмы контекстной диаграммы A-0 сохранены и распределены между функциональными блоками A0.

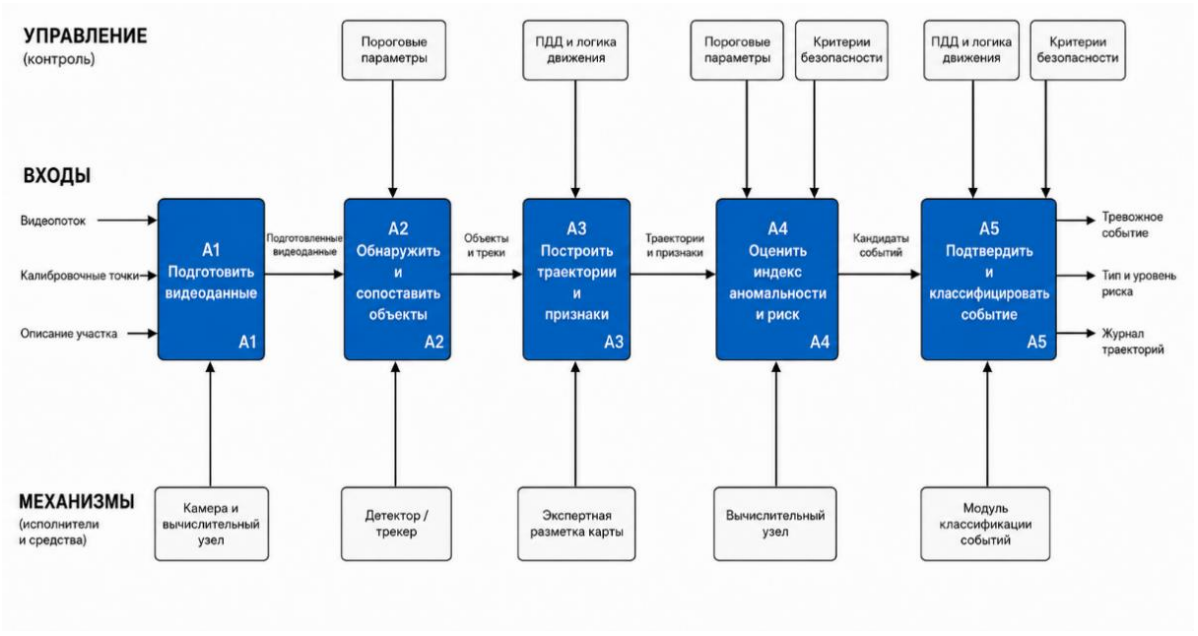


Рис. 3. Декомпозиция IDEF0 A0 для алгоритма КСТА

Пусть в момент времени t для объекта i известны координаты опорной точки pi(t) в изображении, идентификатор трека idi и оценка доверия детектора ci(t). Опорной точкой может быть центр нижней стороны ограничивающей рамки, так как эта точка лучше соответствует положению объекта на дорожной плоскости.

Для перехода от координат изображения к метрическим координатам дорожной плоскости предварительно выполняется калибровка камеры. В рамках данной работы используется плоская модель дорожного участка, при которой положение объекта на дороге определяется через матрицу гомографии H. Матрица H может быть получена по набору опорных точек, для которых известны координаты на изображении и соответствующие координаты на дорожной плоскости. В качестве таких точек могут использоваться углы пешеходного перехода, края стоп-линий, элементы дорожной разметки или заранее измеренные характерные точки участка. Для расчёта гомографии необходимо не менее четырёх пар соответствующих точек. После определения H координаты опорной точки объекта на изображении преобразуются в координаты дорожной плоскости, что позволяет рассчитывать расстояния, скорость, ускорение и показатели конфликтности в метрической системе координат.

Переход от координат изображения к координатам дорожной плоскости выполняется через матрицу гомографии H:

$$P_i(t) = \text{norm}\left(H \cdot \ p_i(t)\right) \tag{1}$$

где $P_i(t) = \left(x_i(t), y_i(t)\right)$ — координаты объекта на дорожной плоскости; $\text{norm}()$ — нормировка однородных координат.

Скорость, ускорение и направление движения вычисляются по последовательности координат:

$$v_i(t) = \frac{\left\| P_i(t) - P_i(t-\Delta t) \right\|}{\Delta t} \tag{2}$$

$$a_i(t) = \frac{\left| v_i(t) - v_i(t-\Delta t) \right|}{\Delta t} \tag{3}$$

$$\theta_i(t) = \text{atan}\,2\left(y_i(t) - y_i(t-\Delta t), x_i(t) - x_i(t-\Delta t)\right) \tag{4}$$

Для каждой семантической зоны z и допустимого направления q хранится локальная модель нормы [18-20] $\mathcal{B}_{z,q}$. Она включает среднюю скорость $\mu_{v,z,q}$, среднее направление $\mu_{\theta,z,q}$, дисперсии $\sigma^2_{v,z,q}$ и $\sigma^2_{\theta,z,q}$, а также счётчик нормальных наблюдений. Нормированное локальное отклонение объекта от модели нормы определяется выражением:

$$L_i(t) = \sqrt{z_v^2 + \lambda_\theta \cdot \ z_\theta^2} \tag{5}$$

$$z_v = \frac{\left| v_i(t) - \mu_{v,zq} \right|}{\sigma_{v,zq} + \varepsilon}, \quad z_\theta = \frac{\text{ang}\left(\theta_i(t), \mu_{\theta,zq}\right)}{\sigma_{\theta,zq} + \varepsilon} \tag{6}$$

где $\text{ang}()$ — минимальная угловая разность с учётом цикличности угла; ε — малое число для исключения деления на ноль; λ_θ — коэффициент значимости направления.

Модель нормы не должна обновляться каждым новым треком, поскольку в этом случае аномальное поведение постепенно станет частью нормы. Поэтому обновление выполняется только при выполнении условий нормальности:

$$U_i(t) = \begin{cases} 1, & c_i(t) \geq c_{\min}, age_i \geq n_{\min}, I_i(t) < T_{\text{norm}}, C_i(t) = 0, Z_i(t) = 0, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{7}$$

Если $U_i(t) = 1$, то параметры скорости обновляются по экспоненциальному правилу:

$$\mu_{v,zq}(t) = (1-\alpha)\mu_{v,zq}(t-1) + \alpha v_i(t) \tag{8}$$

$$\sigma^2_{v,zq}(t) = (1-\alpha)\sigma^2_{v,zq}(t-1) + \alpha\left[\, v_i(t) - \mu_{v,zq}(t)\right]^2 \quad (9)$$

Аналогично обновляются параметры направления, но с использованием круговой разности углов. Коэффициент α задаёт скорость адаптации модели. Аналогичные адаптивные механизмы используются в системах мультимодального трекинга с динамической оптимизацией [27]. Если используется окно W кадров нормального движения, рекомендуется $\alpha = \frac{2}{W+1}$

Чтобы объединить признаки разной природы, используется кусочно-линейная функция нормализации:

$$N(x;a,b) = \begin{cases} 0, & x \le a, \\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a < x < b, \\ 1, & x \ge b. \end{cases} \quad (10)$$

Весовые коэффициенты могут задаваться тремя способами: на основе предварительной настройки при отсутствии размеченной выборки; подбором по сетке с максимизацией F1-меры; или по результатам ранжирования признаков на валидационной выборке.

Назначение основных параметров алгоритма приведено в таблице 3.

$$T_a = Q_p\left(I_i(t) | \text{ normal}\right), \quad p \in [0{,}95; 0{,}99] \quad (11)$$

В задачах мониторинга безопасности целесообразно выбирать p ближе к 0,95, если важнее не пропустить опасность, и ближе к 0,99, если критично уменьшить число ложных тревог.

Отклонение от типового коридора движения определяется расстоянием от текущей точки объекта до ближайшего допустимого коридора C_k для данной зоны:

$$D_i(t) = \frac{\min\limits_k \operatorname{dist}\left(P_i(t), C_k\right)}{\sigma_{C,k} + \varepsilon} \quad (12)$$

Таблица 3

Назначение основных параметров алгоритма

Параметр	Смысл	Способ задания
α	Скорость адаптации локальной модели нормы	$\alpha = \frac{2}{W+1}$ или подбор по нормальной выборке
K, L	Правило временного подтверждения: K срабатываний из L кадров	Зависит от FPS; например, K=3, L=5 при 10 FPS
T_{crit}	Критическое время до столкновения	По требованиям безопасности участка или по результатам предварительной настройки
v_{min}	Скорость, ниже которой объект считается остановившимся	0,3–0,5 м/с для дорожной плоскости
$\tau_{lim,z}$	Допустимая длительность остановки в зоне z	По типу зоны: стоп-линия, полоса, конфликтная область
T_a	Порог индекса аномальности	Квантиль нормальных наблюдений или оптимизация по F1
d_{safe}	Безопасная дистанция между объектами	Учёт габаритов и минимального зазора
c_{min}	Минимальное доверие детектора	По качеству используемой модели обнаружения

Признак резкого изменения скорости задаётся через модуль ускорения:

$$A_i(t) = \left|a_i(t)\right| \quad (13)$$

Семантический штраф $Z_i(t)$ принимает значения от 0 до 1 и формируется на основе карты: нахождение в запрещённой области, движение против разрешённого направления, пересечение недопустимой зоны или остановка в зоне, где остановка запрещена.

Признак длительной остановки задаётся с учётом типа зоны:

$$S_i(t) = N\left(\tau_{\text{stop},i}(t); \tau_{\text{lim},z}, \tau_{\text{lim},z} + \delta_\tau\right) \tag{14}$$

Для корректной оценки риска взаимодействия объектов сначала проверяется конфликтность прогнозируемых траекторий.

В данной работе для краткосрочного прогнозирования траектории используется модель постоянной скорости [4, 23-26]. Она предполагает, что на небольшом горизонте прогнозирования объект сохраняет текущее направление и скорость движения. Такой подход выбран как простой и интерпретируемый вариант, достаточный для предварительной проверки логики алгоритма. Горизонт прогнозирования задаётся параметром Tp и определяет интервал времени, на котором оцениваются возможное сближение объектов, пересечение конфликтных зон и минимальная прогнозируемая дистанция. В рамках имитационной апробации используется краткосрочный прогноз на несколько секунд, что соответствует задаче раннего выявления потенциально опасных ситуаций.

Для каждого объекта строится краткосрочный прогноз движения:

$$P_i(t+\tau) = P_i(t) + V_i(t)\tau, \quad \tau \in [0, T_p], \tag{15}$$

где τ — время внутри горизонта краткосрочного прогноза;

T_p — длительность горизонта прогнозирования;

$V_i(t)$ — вектор скорости объекта i в момент времени t

Следует отметить, что в дальнейшем модель постоянной скорости может быть заменена более сложной моделью прогноза, например моделью постоянного ускорения или обучаемой моделью траекторного предсказания при наличии достаточного объёма размеченных данных.

Два различных объекта *i* и *j* рассматриваются как потенциально конфликтующие, если их прогнозируемые траектории на заданном горизонте прогнозирования пересекают одну конфликтную зону либо если минимальная прогнозируемая дистанция между ними становится меньше безопасной дистанции с учётом габаритов объектов. Сравнение объекта с самим собой не выполняется, поэтому случай $j=i$ исключается. Минимальная прогнозируемая дистанция определяется по траекториям объектов на интервале краткосрочного прогноза и используется как один из признаков возможного опасного сближения:

$$d_{\min,ij}(t) = \min_{\tau \in [0,T_p]} \left\| P_i(t+\tau) - P_j(t+\tau) \right\|, \quad j \neq i, \tag{16}$$

Время до потенциального столкновения рассчитывается только для конфликтующих объектов. Пусть $r_{ij}(t) = P_j(t) - P_i(t), \quad u_{ij}(t) = V_j(t) - V_i(t)$ тогда:

$$\tau^* = -\frac{r_{ij}(t) \cdot u_{ij}(t)}{\left\| u_{ij}(t) \right\|^2 + \varepsilon} \tag{17}$$

$$TTC_{ij}(t) = \begin{cases} \tau^*, & 0 < \tau^* \le T_p, \, d_{\min,ij} \le d_{\text{safe}}, \\ \infty, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{18}$$

Для повышения строгости вместе с TTC используются два дополнительных показателя. PET отражает разность времени входа объектов в одну конфликтную зону, а DRAC характеризует требуемое замедление для предотвращения столкновения [23-26]:

$$PET_{ij} = \left| t_i^C - t_j^C \right|, \tag{19}$$

$$DRAC_{ij} = \frac{v_{\text{closing}}^2}{2\left(d_{ij} - d_{\text{safe}}\right) + \varepsilon} \tag{20}$$

Итоговый конфликтный риск для пары объектов *i* и *j* определяется как максимум нормированных частных рисков, связанных с опасным сближением, временем до столкновения, постинтервальным временем и требуемым замедлением:

$$C_{ij}(t) = \max \begin{Bmatrix} N(T_{\text{crit}} - TTC_{ij}(t), 0, T_{\text{crit}}), \\ N(PET_{\text{crit}} - PET_{ij}(t), 0, PET_{\text{crit}}), \\ N(DRAC_{ij}(t), D_a, D_b), \\ N(d_{\text{safe}} - d_{\min,ij}(t), 0, d_{\text{safe}}) \end{Bmatrix}, \quad i \neq j \tag{21}$$

Величина $C_{ij}(t)$ характеризует конфликтный риск не отдельного объекта, а пары объектов *i* и *j*. Такой риск показывает, насколько опасным является прогнозируемое взаимодействие двух участников движения на заданном горизонте прогноза.

Для последующего расчёта интегрального индекса аномальности необходимо перейти от парного риска Cij(t) к агрегированному конфликтному риску отдельного объекта $C_i(t)$.

$$C_i(t) = \max_{j \neq i} C_{ij}(t) \tag{22}$$

Для каждого объекта i агрегированный конфликтный риск $C_i(t)$ определяется как максимальное значение парного риска по всем другим объектам j. Самостоятельно с собой объект не конфликтует, поэтому случай j=i исключается.

Интегральный индекс аномальности объекта i в момент времени t задаётся выражением:

$$I_i(t) = \min\left(1,\, w_L N(L_i(t)) + w_D N(D_i(t)) + w_A N(A_i(t)) + w_Z Z_i(t) + w_C C_i(t) + w_S S_i(t)\right) \tag{23}$$

Потенциальное срабатывание формируется, если $I_i(t) \geq T_a$. Однако тревожное событие создаётся только после временного подтверждения:

$$E_i(t) = \begin{cases} 1, & \sum_{r=0}^{L-1} \mathbf{1}\left[I_i(t-r) \geq T_a\right] \geq K, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{24}$$

Правило *K* из *L* кадров снижает вероятность ложной тревоги из-за одиночного сбоя детекции, кратковременной потери трека или шумного измерения координат. Тип события определяется по наибольшему частному вкладу в индекс. Если одновременно срабатывает несколько признаков, приоритет отдаётся конфликтному риску, затем семантическому нарушению и только затем кинематическим отклонениям. Типология аномальных ситуаций и признаки алгоритма приведены в таблице 4, а последовательность вычислительных действий представлена в таблице 5.

Поскольку полноценная проверка алгоритма требует набора реальных видеофрагментов с ручной разметкой событий, в данной статье выполнена предварительная имитационная апробация на траекторных сценариях.

Траекторные фрагменты для предварительной имитационной апробации сформированы синтетически на основе параметрического описания движения объектов на дорожном участке.

Таблица 4

Типология аномальных ситуаций и признаки алгоритма

Тип события	Основные признаки	Дополнительные теги
Опасное сближение	$C_i(t)$, TTC, PET, DRAC, d_{min}	Резкое торможение, конфликтная зона
Движение против направления	$Z_i(t)$, угловое отклонение z_θ	Локальное отклонение, отклонение от коридора
Остановка в недопустимой зоне	$S_i(t)$, $Z_i(t)$, τ_{stop}	Конфликтная зона, низкая скорость
Резкое торможение/ускорение	$A_i(t)$, изменение $v_i(t)$	Опасное сближение, нарушение дистанции
Отклонение от типовой траектории	$D_i(t)$, $L_i(t)$	Смена полосы, пересечение запрещённой области
Нетипичное движение без явного нарушения	$L_i(t)$ при отсутствии $Z_i(t)$	Требует экспертной проверки

Таблица 5

Псевдокод контекстно-семантического траекторного алгоритма

Блок	Содержание операции
Входные данные	Видеопоток V; матрица гомографии H; семантическая карта M; начальная локальная модель нормы B; параметры $\Theta=\{\alpha,K,L,T_a,T_{norm},T_{crit},PET_{crit},ds_{afe},c_{min}\}$.
Выходные данные	Список событий E={тип события, объект, время начала, зона, значение индекса I, основные признаки}.
Шаг 1	Получить кадр, выполнить детекцию объектов и отфильтровать детекции с доверительным значением ниже c_{min}.
Шаг 2	Связать детекции с существующими треками. При кратковременной потере объекта сохранить трек до N_{miss} кадров, но не формировать новое событие без подтверждения.
Шаг 3	Преобразовать координаты опорной точки объекта в координаты дорожной плоскости, рассчитать скорость, ускорение и направление движения.
Шаг 4	Определить семантическую зону, допустимое направление, принадлежность к запрещённым областям, конфликтным зонам и зонам допустимой остановки.
Шаг 5	Рассчитать локальное отклонение от модели нормы, отклонение от коридора, семантический штраф и риск остановки. Для всех пар различных объектов i и j рассчитать парные конфликтные риски $C_{ij}(t)$ по формуле (21). Затем для каждого объекта i определить агрегированный конфликтный риск $C_i(t)$ как максимальное значение $C_{ij}(t)$ по всем $j\neq i$ в соответствии с формулой (22).
Шаг 6	Вычислить интегральный индекс аномальности $I_i(t)$. Если индекс превышает порог T_a в K из L последних кадров, сформировать подтверждённое событие.
Шаг 7	Определить основной тип события по максимальному нормированному вкладу признака. Приоритет имеют конфликтные события, затем семантические нарушения, затем кинематические отклонения.
Шаг 8	Обновить модель нормы только при выполнении условий нормальности: достаточная длина трека, высокое доверие детекции, $I_i(t)<T_{norm}$, отсутствие конфликтного риска и семантического нарушения.

Для каждого сценария задавались начальная точка, направление движения, средняя скорость, изменение скорости и принадлежность к определённой семантической зоне. Нормальные сценарии описывали движение в допустимых полосах и направлениях, а аномальные сценарии моделировали движение против разрешённого направления, остановку в конфликтной зоне, резкое торможение, опасное сближение и отклонение от типового коридора. Для имитации погрешностей измерения к координатам траекторий добавлялся гауссовский шум с σ = 0,1 м. Таким образом, контрольный набор использовался для предварительной проверки логики алгоритма и не заменяет последующую валидацию на реальных видеозаписях дорожного движения с ручной разметкой событий.

Сформирован контрольный набор из 72 траекторных фрагментов, включающий нормальное движение и основные типы аномалий. Состав контрольного набора приведён в таблице 6.

Таблица 6

Состав контрольного набора траекторных сценариев

Класс сценария	Количество фрагментов	Назначение проверки
Нормальное движение	45	Оценка ложных срабатываний
Движение против направления	6	Проверка углового и семантического признака
Остановка в конфликтной зоне	5	Проверка признака $S_i(t)$ и карты зон
Резкое торможение	5	Проверка ускорения и временного подтверждения
Опасное сближение	6	Проверка TTC, PET, DRAC и d_{min}
Отклонение от коридора	5	Проверка признака $D_i(t)$

Для эксперимента использованы параметры: $T_p = 3$ с, $T_{\text{crit}} = 2$ с, $PET_{\text{crit}} = 1.5$ с, $d_{\text{safe}} = 2.0$, K=3, $L = 5$, $T_a = 0.65$, $T_{\text{norm}} = 0.35$, $c_{\min} = 0.35$. Весовые коэффициенты: $w_L = 0.18$, $w_D = 0.15$, $w_A = 0.15$, $w_Z = 0.20$, $w_C = 0.22$ $w_S = 0.10$.

Весовые коэффициенты рассматриваются как параметры предварительной настройки алгоритма. Их значения выбраны с учётом смысловой значимости признаков для выявления аномальных ситуаций и логики предварительной имитационной апробации. Наибольший вес присвоен конфликтному риску, поскольку он непосредственно отражает опасное взаимодействие между участниками движения и является одним из наиболее информативных предвестников ДТП. Повышенная значимость также задана семантическому штрафу, так как движение против разрешённого направления, нахождение в запрещённой области или остановка в конфликтной зоне напрямую связаны с нарушением нормальной логики движения на участке. Наименьший вес присвоен признаку длительной остановки, поскольку остановка может быть нормативной в допустимых зонах и не всегда является самостоятельным признаком опасности. Остальные веса распределены между локальным отклонением от нормы, отклонением от типового коридора и резким изменением скорости с учётом их вклада в выявление аномальных сценариев. При накоплении размеченных видеоданных значения весовых коэффициентов могут быть уточнены автоматически по критериям Precision, Recall и F1-меры.

Результаты предварительной имитационной апробации представлены в таблице 7, а детализация результатов по типам аномальных ситуаций дана в таблице 8.

Таблица 7

Результаты предварительной имитационной апробации

Показатель	Значение
Истинно положительные срабатывания (TP)	24
Ложно положительные срабатывания (FP)	3
Ложно отрицательные случаи (FN)	3
Истинно отрицательные случаи (TN)	42
Precision	0,89
Recall	0,89
F1-мера	0,89
Средняя задержка обнаружения	1,08 с
Точность определения основного типа среди обнаруженных аномалий	87,5 %

Таблица 8

Результаты по типам аномальных ситуаций

Тип аномалии	Всего	Обнаружено	Средняя задержка
Движение против направления	6	6	0,8 с
Остановка в конфликтной зоне	5	4	2,1 с
Резкое торможение	5	4	0,7 с
Опасное сближение	6	6	1,2 с
Отклонение от коридора	5	4	0,6 с

Дополнительно выполнена предварительная оценка вычислительных затрат алгоритма. На синтетической траектории с 15 одновременно наблюдаемыми объектами среднее время расчёта признаков, парных конфликтных рисков и интегрального индекса для одного кадра без учёта этапов детекции и трекинга составило менее 5 мс на CPU 2,5 ГГц. Это показывает возможность применения алгоритма в режиме онлайн-мониторинга при частоте обработки 10–25 кадров/с. При этом полное время работы системы в реальных условиях будет зависеть от выбранной модели детекции, метода трекинга, разрешения видеопотока и аппаратной платформы.

Основная причина ложных срабатываний связана с траекториями, проходящими вблизи границ конфликтной зоны при добавленном координатном шуме. Пропуски аномалий возникали в сценариях медленно развивающейся остановки, когда индекс аномальности достигал порога позже заданного интервала наблюдения. Полученные результаты следует рассматривать как предварительные: для завершённой экспериментальной проверки необходимо использовать реальные видеозаписи с ручной разметкой событий и сопоставлением с альтернативными методами.

Следует подчеркнуть, что выполненная имитационная апробация не является полноценной экспериментальной валидацией алгоритма на реальных видеоданных. Её назначение состоит в предварительной проверке внутренней логики расчёта признаков, конфликтного риска, интегрального индекса аномальности и правила временного подтверждения события. Ограничением данного этапа является использование синтетически сформированных траекторных сценариев, в которых не учитывается весь спектр факторов реального видеонаблюдения: ошибки детекции, пропуски объектов, перекрытия, изменение освещённости, погодные условия и особенности перспективы камеры. Частично эти проблемы могут быть решены за счёт специализированных методов детекции малоразмерных объектов [28] и прецизионного управления на основе визуального трекинга [30], однако их адаптация к дорожной обстановке требует отдельной верификации. Поэтому для окончательной оценки качества алгоритма необходима проверка на реальных видеозаписях дорожного движения с ручной разметкой аномальных и нормальных событий, а также сравнение с альтернативными методами обнаружения транспортных аномалий [20-22].

Предложенный алгоритм является интерпретируемым: каждое тревожное событие может быть объяснено набором признаков и значений индекса. Это отличает его от полностью нейросетевых методов, где итоговое решение часто не имеет прозрачной связи с геометрией дорожного участка. К преимуществам КСТА относятся учёт локальной нормы движения, использование семантической карты, временное подтверждение событий, защита модели нормы от загрязнения аномальными треками и возможность настройки параметров под конкретный участок улично-дорожной сети.

Выводы

1. Разработан контекстно-семантический траекторный алгоритм выявления аномальных ситуаций в транспортном потоке по данным видеонаблюдения. Алгоритм объединяет детекцию и трекинг объектов, локальную модель нормального движения, семантическую карту участка и показатели конфликтности.

2. Научная новизна заключается в структуре интегрального индекса аномальности и правилах принятия решения, позволяющих выявлять не только уже произошедшие ДТП, но и потенциально опасные ситуации по динамике движения объектов.

3. Уточнён расчёт TTC: показатель используется только при наличии конфликтной геометрии прогнозируемых траекторий, а также дополняется показателями PET, DRAC и минимальной прогнозируемой дистанции.

4. Предложены правила защищённого обновления локальной модели нормы, при которых статистика зоны обновляется только нормальными треками с достаточным доверием детекции и без признаков конфликтного или семантического нарушения.

5. Предварительная имитационная апробация подтвердила работоспособность внутренней логики алгоритма, включая расчёт траекторных признаков, конфликтного риска, интегрального индекса аномальности и правила временного подтверждения события. Полученные результаты следует рассматривать как предварительные, поскольку контрольный набор был сформирован на основе синтетических траекторных сценариев. Для окончательной оценки качества алгоритма необходимо выполнить проверку на реальных видеоданных дорожного движения с ручной разметкой нормальных и аномальных событий, а также провести сравнение с существующими методами обнаружения транспортных аномалий.

Список литературы

1. Zhou, W. Vision Technologies with Applications in Traffic Surveillance Systems: A Holistic Survey / W. Zhou, L. Yang, L. Zhao [et al.] // ACM Computing Surveys. — 2025. — DOI: 10.1145/3760525.

2. Хусаинов, Р. М. Интеллектуальная система анализа транспортных потоков в автоматизированных системах управления дорожным движением / Р. М. Хусаинов, Н. Г. Талипов, А. С. Катасёв, Д. В. Шалаева // Программные продукты и системы. — 2024. — Т. 37, № 1. — С. 69–76. — DOI: 10.15827/0236-235X.142.069-076.

3. Shepelev, V. Identification of distinguishing characteristics of intersections based on statistical analysis and data from video cameras / V. Shepelev, S. Aliukov, A. Glushkov, S. Shabiev // Journal of Big Data. — 2020. — Vol. 7. — Article 46. — DOI: 10.1186/s40537-020-00324-7.

4. Ventura, R. Using computer vision and street-level videos for pedestrian-vehicle tracking and behaviour analysis / R. Ventura, S. Roussou, A. Ziakopoulos, B. Barabino, G. Yannis // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. — 2025. — Vol. 30. — Article 101366. — DOI: 10.1016/j.trip.2025.101366.

5. Ткачев, С. А. Сравнительный анализ технологий V2V, V2P и V2X для улучшения безопасности дорожного движения / С. А. Ткачев, Н. В. Володарец // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. — 2024. — № 4. — С. 35–39. — EDN BDDOYQ.

6. Matias, J. Computer Vision Methods for Vehicle Detection and Tracking: A Systematic Review and Meta-Analysis / J. Matias, F. C. Pinto, P. Couto // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, No. 22. — Article 12288. — DOI: 10.3390/app152212288.

7. Zhao, Y. DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection / Y. Zhao, W. Lv, S. Xu [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2024. — P. 16965–16974.

8. Wang, C.-Y. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information / C.-Y. Wang, I.-H. Yeh, H.-Y. M. Liao // European Conference on Computer Vision. — 2024. — P. 1–21. — DOI: 10.1007/978-3-031-72751-1_1.

9. Wang, A. YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection / A. Wang, H. Chen, L. Liu [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems 37. — 2024. — P. 107984–108011.

10. Bewley, A. Simple Online and Realtime Tracking / A. Bewley, Z. Ge, L. Ott, F. Ramos, B. Upcroft // IEEE International Conference on Image Processing. — 2016. — P. 3464–3468. — DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533003.

11. Wojke, N. Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric / N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus // IEEE International Conference on Image Processing. — 2017. — P. 3645–3649. — DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296962.

12. Zhang, Y. ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box / Y. Zhang, P. Sun, Y. Jiang [et al.] // European Conference on Computer Vision. — 2022. — P. 1–21. — DOI: 10.1007/978-3-031-20047-2_1.

13. Cao, J. Observation-Centric SORT: Rethinking SORT for Robust Multi-Object Tracking / J. Cao, J. Pang, X. Weng, R. Khirodkar, K. Kitani // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2023. — P. 9686–9696.

14. Du, Y. StrongSORT: Make DeepSORT Great Again / Y. Du, Z. Zhao, Y. Song [et al.] // IEEE Transactions on Multimedia. — 2023. — Vol. 25. — P. 8725–8737. — DOI: 10.1109/TMM.2023.3240881.

15. Сацюк А.В., Володарец Н.В. Модификация модели YOLO для гибридной системы детекции и трекинга в БПЛА с автоматическим наведением // Информационно-управляющие системы. – 2025. – № 4. – С. 36–44. – DOI: 10.31799/1684-8853-2025-4-36-44.

16. Володарец Н.В., Сацюк А.В. Устойчивый трекинг и коррекция траектории беспилотных летательных аппаратов в условиях ограниченной видимости с использованием мультисенсорных данных // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, № 3. – С. 1320–1330. – DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330.

17. Fernández Llorca, D. Vision-based vehicle speed estimation: A survey / D. Fernández Llorca, A. Hernández Martínez, I. García Daza // IET Intelligent Transport Systems. — 2021. — Vol. 15. — P. 987–1005. — DOI: 10.1049/itr2.12079.

18. Dubská, M. Automatic Camera Calibration for Traffic Understanding / M. Dubská, J. Sochor, A. Herout // British Machine Vision Conference. — 2014.

19. Sochor, J. Traffic surveillance camera calibration by 3D model bounding box alignment for accurate vehicle speed measurement / J. Sochor, R. Juránek, A. Herout // Computer Vision and Image Understanding. — 2017. — Vol. 161. — P. 87–98. — DOI: 10.1016/j.cviu.2017.05.015.

20. Khan, S. W. Anomaly Detection in Traffic Surveillance Videos Using Deep Learning / S. W. Khan, Q. Hafeez, M. I. Khalid [et al.] // Sensors. — 2022. — Vol. 22, No. 17. — Article 6563. — DOI: 10.3390/s22176563.

21. Patrikar, D. R. Anomaly detection using edge computing in video surveillance system: review / D. R. Patrikar, M. R. Parate // International Journal of Multimedia Information Retrieval. — 2022. — Vol. 11. — P. 85–110.

22. Zheng, Y. Video-Based Traffic Anomaly Detection with Vision-Language Models: A Survey / Y. Zheng, W. Zhou, S. Nastic, C. Wang // IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. — 2025.

23. Hasain, N. M. Traffic safety evaluation using surrogate safety measures in the context of Indian mixed traffic: A critical review / N. M. Hasain, M. A. Ahmed // IATSS Research. — 2025. — Vol. 49, No. 2. — P. 201–219. — DOI: 10.1016/j.iatssr.2025.04.004.

24. Sarkar, D. R. A review of surrogate safety measures on road safety at unsignalized intersections in developing countries / D. R. Sarkar, K. R. Rao, N. Chatterjee // Accident Analysis & Prevention. — 2024. — Vol. 195. — Article 107380. — DOI: 10.1016/j.aap.2023.107380.

25. Tang, S. A New Surrogate Safety Measure Considering Temporal–Spatial Proximity and Severity of Traffic Conflicts / S. Tang [et al.] // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14, No. 7. — Article 2711. — DOI: 10.3390/app14072711.

26. Nikolaou, D. A Review of Surrogate Safety Measures Uses in Historical Crash Record Investigations / D. Nikolaou, A. Ziakopoulos, G. Yannis // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 9. — Article 7580. — DOI: 10.3390/su15097580.

27. Володарец Н.В., Сацюк А.В. Адаптивная мультимодальная система трекинга БПЛА с динамической оптимизацией на основе стохастического параметрического

управления // Информационно-управляющие системы. – 2026. – № 2(141). – С. 72–79. – DOI: 10.31799/1684-8853-2026-2-72-79.

28. Володарец Н.В., Сацюк А.В. Детекция малоразмерных объектов для автономных систем дальнего обнаружения и наведения на основе двухканального радиометрического и пространственного анализа // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2026. – Т. 27, № 3. – С. 156–167. – DOI: 10.17587/mau.27.156-167.

29. Володарец Н.В., Шевченко С.В. Проактивная диагностика рисков на нерегулируемых пешеходных переходах на основе интеллектуального анализа видеоданных // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2026. – № 1. – С. 8–18. – EDN RVSFIY.

30. Володарец Н.В., Сацюк А.В. Прецизионное управление рулями беспилотного летательного аппарата самолетного типа на основе визуального трекинга для автономного наведения // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2026. – № 1. – С. 122–136. – DOI: 10.14357/20718594260109.

References

1. Zhou, W., Yang, L., Zhao, L. et al. (2025), "Vision Technologies with Applications in Traffic Surveillance Systems: A Holistic Survey", *ACM Computing Surveys*. DOI: 10.1145/3760525.

2. Khusainov, R.M., Talipov, N.G., Katasev, A.S. and Shalaeva, D.V. (2024), "Intellektual'naya sistema analiza transportnykh potokov v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya dorozhnym dvizheniem" [Intelligent traffic flow analysis system in automated traffic management systems], *Programmnye produkty i sistemy*, vol. 37, no. 1, pp. 69–76. DOI: 10.15827/0236-235X.142.069-076. (in Russian)

3. Shepelev, V., Aliukov, S., Glushkov, A. and Shabiev, S. (2020), "Identification of distinguishing characteristics of intersections based on statistical analysis and data from video cameras", *Journal of Big Data*, vol. 7, Article 46. DOI: 10.1186/s40537-020-00324-7.

4. Ventura, R., Roussou, S., Ziakopoulos, A., Barabino, B. and Yannis, G. (2025), "Using computer vision and street-level videos for pedestrian-vehicle tracking and behaviour analysis", *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 30, Article 101366. DOI: 10.1016/j.trip.2025.101366.

5. Tkachev, S.A. and Volodarets, N.V. (2024), "Sravnitel'nyy analiz tekhnologiy V2V, V2P i V2X dlya uluchsheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya" [Comparative analysis of V2V, V2P and V2X technologies to improve road safety], *Vestnik Donetskoy akademii avtomobil'nogo transporta*, no. 4, pp. 35–39. EDN: BDDOYQ. (in Russian)

6. Matias, J., Pinto, F.C. and Couto, P. (2025), "Computer Vision Methods for Vehicle Detection and Tracking: A Systematic Review and Meta-Analysis", *Applied Sciences*, vol. 15, no. 22, Article 12288. DOI: 10.3390/app152212288.

7. Zhao, Y., Lv, W., Xu, S. et al. (2024), "DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection", *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 16965–16974.

8. Wang, C.-Y., Yeh, I.-H. and Liao, H.-Y.M. (2024), "YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information", *European Conference on Computer Vision*, pp. 1–21. DOI: 10.1007/978-3-031-72751-1_1.

9. Wang, A., Chen, H., Liu, L. et al. (2024), "YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection", *Advances in Neural Information Processing Systems 37*, pp. 107984–108011.

10. Bewley, A., Ge, Z., Ott, L., Ramos, F. and Upcroft, B. (2016), "Simple Online and Realtime Tracking", *IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 3464–3468. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533003.

11. Wojke, N., Bewley, A. and Paulus, D. (2017), "Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric", *IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 3645–3649. DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296962.

12. Zhang, Y., Sun, P., Jiang, Y. et al. (2022), "ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box", *European Conference on Computer Vision*, pp. 1–21. DOI: 10.1007/978-3-031-20047-2_1.

13. Cao, J., Pang, J., Weng, X., Khirodkar, R. and Kitani, K. (2023), "Observation-Centric SORT: Rethinking SORT for Robust Multi-Object Tracking", *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 9686–9696.

14. Du, Y., Zhao, Z., Song, Y. et al. (2023), "StrongSORT: Make DeepSORT Great Again", *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 25, pp. 8725–8737. DOI: 10.1109/TMM.2023.3240881.

15. Satsyuk, A.V. and Volodarets, N.V. (2025), "Modifikatsiya modeli YOLO dlya gibridnoy sistemy detektsii i trekinga v BPLA s avtomaticheskim navedeniem" [Modification of the YOLO model for a hybrid detection and tracking system in UAVs with automatic guidance], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, no. 4, pp. 36–44. DOI: 10.31799/1684-8853-2025-4-36-44. EDN: YKQVJU. (in Russian)

16. Volodarets, N.V. and Satsyuk, A.V. (2025), "Ustoychivyy treking i korrektsiya traektorii bespilotnykh letatel'nykh apparatov v usloviyakh ogranichennoy vidimosti s ispol'zovaniem mul'tisensornykh dannykh" [Robust tracking and trajectory correction of unmanned aerial vehicles in low-visibility conditions using multisensor data], *Sustainable Development of Mountain Territories*, vol. 17, no. 3, pp. 1320–1330. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330. (in Russian)

17. Fernández Llorca, D., Hernández Martínez, A. and García Daza, I. (2021), "Vision-based vehicle speed estimation: A survey", *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 15, pp. 987–1005. DOI: 10.1049/itr2.12079.

18. Dubská, M., Sochor, J. and Herout, A. (2014), "Automatic Camera Calibration for Traffic Understanding", *British Machine Vision Conference*.

19. Sochor, J., Juránek, R. and Herout, A. (2017), "Traffic surveillance camera calibration by 3D model bounding box alignment for accurate vehicle speed measurement", *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 161, pp. 87–98. DOI: 10.1016/j.cviu.2017.05.015.

20. Khan, S.W., Hafeez, Q., Khalid, M.I. et al. (2022), "Anomaly Detection in Traffic Surveillance Videos Using Deep Learning", *Sensors*, vol. 22, no. 17, Article 6563. DOI: 10.3390/s22176563.

21. Patrikar, D.R. and Parate, M.R. (2022), "Anomaly detection using edge computing in video surveillance system: review", *International Journal of Multimedia Information Retrieval*, vol. 11, pp. 85–110.

22. Zheng, Y., Zhou, W., Nastic, S. and Wang, C. (2025), "Video-Based Traffic Anomaly Detection with Vision-Language Models: A Survey", *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*.

23. Hasain, N.M. and Ahmed, M.A. (2025), "Traffic safety evaluation using surrogate safety measures in the context of Indian mixed traffic: A critical review", *IATSS Research*, vol. 49, no. 2, pp. 201–219. DOI: 10.1016/j.iatssr.2025.04.004.

24. Sarkar, D.R., Rao, K.R. and Chatterjee, N. (2024), "A review of surrogate safety measures on road safety at unsignalized intersections in developing countries", *Accident Analysis & Prevention*, vol. 195, Article 107380. DOI: 10.1016/j.aap.2023.107380.

25. Tang, S. et al. (2024), "A New Surrogate Safety Measure Considering Temporal–Spatial Proximity and Severity of Traffic Conflicts", *Applied Sciences*, vol. 14, no. 7, Article 2711. DOI: 10.3390/app14072711.

26. Nikolaou, D., Ziakopoulos, A. and Yannis, G. (2023), "A Review of Surrogate Safety Measures Uses in Historical Crash Record Investigations", *Sustainability*, vol. 15, no. 9, Article 7580. DOI: 10.3390/su15097580.

27. Volodarets, N.V. and Satsyuk, A.V. (2026), "Adaptivnaya mul'timodal'naya sistema trekinga BPLA s dinamicheskoy optimizatsiey na osnove stokhasticheskogo parametricheskogo upravleniya" [Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric control], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, no. 2(141), pp. 72–79. DOI: 10.31799/1684-8853-2026-2-72-79. (in Russian)

28. Volodarets, N.V. and Satsyuk, A.V. (2026), "Detektsiya malorazmernykh ob"ektov dlya avtonomnykh sistem dal'nego obnaruzheniya i navedeniya na osnove dvukhkanal'nogo radiometricheskogo i prostranstvennogo analiza" [Detection of small-sized objects for autonomous long-range detection and guidance systems based on two-channel radiometric and spatial analysis], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, vol. 27, no. 3, pp. 156–167. DOI: 10.17587/mau.27.156-167. (in Russian)

29. Volodarets, N.V. and Shevchenko, S.V. (2026), "Proaktivnaya diagnostika riskov na nereguliruemykh peshekhodnykh perekhodakh na osnove intellektual'nogo analiza videodannykh" [Proactive risk diagnostics at uncontrolled pedestrian crossings based on intelligent video data analysis], *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, no. 1, pp. 8–18. EDN: RVSFIY. (in Russian)

30. Volodarets, N.V. and Satsyuk, A.V. (2026), "Pretsizionnoe upravlenie rulyami bespilotnogo letatel'nogo apparata samoletnogo tipa na osnove vizual'nogo trekinga dlya avtonomnogo navedeniya" [Precision control of the rudders of a fixed-wing unmanned aerial vehicle based on visual tracking for autonomous guidance], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy*, no. 1, pp. 122–136. DOI: 10.14357/20718594260109. (in Russian)

Marenich K. N., Volodarets N. V., Tkachov S. A., Marenich A. S.

CONTEXT-SEMANTIC TRAJECTORY ALGORITHM FOR DETECTING ANOMALOUS SITUATIONS IN TRAFFIC FLOW USING VIDEO SURVEILLANCE DATA

Abstract. *The article proposes a context-semantic trajectory algorithm for detecting anomalous situations in traffic flow using video surveillance data. The algorithm combines object detection and tracking, a local model of normal movement, a semantic map of a road section and conflict-risk indicators. Unlike frame-based accident recognition methods, the proposed approach is aimed at identifying potentially dangerous pre-accident situations by analysing object trajectories over time. The paper formalizes an integrated anomaly index, a temporal event confirmation rule, conditions for protected updating of the normal movement model, and an improved TTC calculation with conflict trajectory verification. Additional indicators such as PET, DRAC and minimum predicted distance are used to increase the reliability of risk assessment. A preliminary simulation experiment on trajectory scenarios demonstrates the operability of the proposed decision logic and identifies directions for further testing on real traffic videos.*

Keywords*: intelligent transportation system, computer vision, video stream, trajectory, anomalous situation, semantic map, TTC.*

Сведения об авторах:

Маренич Константин Николаевич
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный технический университет»,
Заведующий кафедрой «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: marenich_58@mail.ru

Володарец Никита Витальевич
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк,
проректор по научной работе и инновационному развитию,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: volodarets.nikita@yandex.ru

Ткачёв Сергей Анатольевич
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк,
аспирант,
e-mail: tkachov.dist@gmail.com

Маренич Андрей Сергеевич
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк,
аспирант,
e-mail: mar_and5@mail.ru

Information about the authors:

Marenich Konstantin Nikolaevich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University",
Head of the Department of Mining Electrical Engineering and Automation named after R.M. Leibov,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: marenich_58@mail.ru

Volodarets Nikita Vitalevich
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport", Donetsk,
Vice-Rector for Research and Innovative Development,
PhD in Engineering, Associate Professor,
e-mail: volodarets.nikita@yandex.ru

Tkachev Sergey Anatolyevich
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport", Donetsk,
Postgraduate Student,
e-mail: tkachov.dist@gmail.com

Marenich Andrey Sergeyevich
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport", Donetsk,
Postgraduate Student,
e-mail: mar_and5@mail.ru

УДК 004.38:629.7.05

Сацюк А.В., Малахова В.В., Лесовой Э.В.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МИКРОКОМПЬЮТЕРОВ В КОНТЕКСТЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. *В работе проведён анализ современных микрокомпьютеров, применяемых в качестве бортовых вычислительных модулей беспилотных авиационных систем (БАС). Рассмотрены ключевые критерии выбора платформ: энергопотребление, массогабаритные характеристики, производительность, наличие интерфейсов и стоимость. Проведён сравнительный анализ шести популярных моделей (NanoPi M4, NanoPi R6S, Raspberry Pi 5, Orange Pi 5, Jetson Nano, Jetson Orin NX) с точки зрения их применимости в задачах компьютерного зрения. Экспериментально исследована производительность платформ при решении задачи детекции и трекинга объектов с использованием модели YOLOv8n и CSRT-трекера. Разработана интегральная методика оценки эффективности, учитывающая частоту обработки кадров, качество детекции и стабильность сопровождения. Определены рациональные области применения различных типов микрокомпьютеров с учётом требований к автономности, вычислительной эффективности, массогабаритным и ценовым ограничениям.*

Ключевые слова: *микрокомпьютеры; беспилотные авиационные системы; энергопотребление; компьютерное зрение; автономные системы.*

Постановка задачи

В настоящее время беспилотные авиационные системы находят широкое применение в различных отраслях, включая транспортную инфраструктуру, мониторинг окружающей среды, сельское хозяйство и системы безопасности. В частности, в железнодорожной отрасли беспилотные авиационные системы (БАС) используются для диагностики путевой инфраструктуры, контроля состояния контактной сети и повышения безопасности движения. Выполнение этих функций обеспечивается за счет искусственного интеллекта (ИИ). Для реализации алгоритма ИИ используется бортовой вычислительный модуль – микрокомпьютер (МК). Он обеспечивает обработку данных сенсоров, выполнение алгоритмов управления, а также реализацию задач компьютерного зрения.

Однако выбор вычислительной платформы представляет собой сложную инженерную задачу, связанную с необходимостью обеспечения баланса между вычислительной производительностью и энергетической эффективностью. Особенно критичным это является для систем, функционирующих в режиме реального времени.

Анализ последних исследований

Анализу областей применения беспилотных летательных аппаратов посвящены работы Федосеевой Н.А. и Загвоздкина М.В. [1], в которых систематизированы перспективные направления использования БАС в гражданских сферах. Неверова А.Р.

[2] рассматривает применение дронов в кадастровой деятельности, землеустройстве и градостроительстве, подчёркивая важность бортовой обработки данных для оперативного принятия решений. Вопросы мониторинга железнодорожной инфраструктуры с использованием беспилотных систем детально проработаны в трудах Долинского К.Ю. с соавторами [3], а также Сацюка А.В. и Воробьева А.А. [4], где акцентируется необходимость разработки специализированных бортовых вычислителей для задач диагностики контактной сети и путевого хозяйства.

Технологии искусственного интеллекта и компьютерного зрения применительно к обработке биологических и технических объектов анализируются в работе Панарина Р.Н. и др. [5], где показана эффективность нейросетевых подходов для автоматизации распознавания. Сацюком А.В. с соавторами [6] предложен алгоритм корреляционного поиска объектов в видеопотоке реального времени, что составляет основу для разработки систем сопровождения на борту БПЛА. Вопросы оптимизации распределения вычислительных ресурсов для приложений реального времени рассматриваются Забелиным Р.Т. и Левшицем В.Э. [7], а аспекты энергоснабжения и контроля аккумуляторных батарей — Косорлуковым И.А. с коллегами [8]. Бобылев Ф.А. и Маркелов М.К. [9] демонстрируют пример создания полётного контроллера на базе STM32, что подчёркивает многообразие аппаратных решений. Ковалев В.А. и соавторы [10] описывают бортовой микромодуль распознавания изображений, а Сацюк А.В. с Нижником В.Н. [11] разрабатывают системы дефектоскопии на основе компьютерного зрения. Глубинные проблемы обучения нейросетей — затухающие градиенты и деградация нейронов — исследованы Сацюком А.В. и Лесовым Э.В. [12], что важно для понимания ограничений при инференсе на маломощных платформах.

Таким образом, существующие исследования фокусируются либо на прикладных аспектах применения БАС, либо на алгоритмических и аппаратных решениях в отрыве друг от друга. Комплексный анализ микрокомпьютеров как бортовых вычислителей с позиций интегральной оценки производительности, энергоэффективности и стоимости в литературе представлен недостаточно, что определяет актуальность настоящей работы.

Цель работы

Целью работы является анализ основных технических характеристик современных микрокомпьютеров, которые применяются для работы в режиме реального времени в беспилотных авиационных системах.

Для достижения цели поставленной задачи необходимо проанализировать критерии выбора вычислительных платформ для БАС и провести сравнительный анализ наиболее предпочтительных вычислительных модулей для выполнения различных полетных заданий.

Основная часть

Выбор вычислительной платформы для БАС определяется рядом технических параметров: электропитание и энергопотребление; массогабаритные показатели; производительность микрокомпьютера; наличие необходимых интерфейсов связи; стоимость.

Электропитание и энергопотребление обеспечивают устойчивость работы микрокомпьютера. Здесь важно, чтобы это устройство МК было согласовано со всеми электрическими параметрами (напряжение и мощность) питающего узла, БАС. Так при заниженном напряжении микрокомпьютер может работать нестабильно, что приведет к аварии БПЛА из–за несвоевременного перезапуска. А при высоком потреблении тока микрокомпьютером в значительной степени снижается ресурс батареи [8–9], что приведет к сокращению дальности полёта. Следовательно, для микрокомпьютера,

используемого в автономных авиационных системах важным критерием является наличие необходимого уровня напряжения и необходимой мощности потребления.

Не менее важным параметром является массогабаритный показатель МК. Стоит понимать, что дополнительные габариты микрокомпьютера лишают полезного пространства [9] и увеличивают вес БПЛА. В общем случае это снижает функциональность и подъёмные характеристики машины. Также стоит учитывать, что некоторые БАС не способны разместить на борту громоздкие микроконтроллеры. Так, например, Jetson Orin NX со своим формфактором 110 × 80 мм и весом 140г. может подойти не для каждого типа БПЛА. В тоже же время Raspberry Pi Zero со своими весогабаритными параметрами (65 × 30 мм и весом 13 г.) применяется практически в любых беспилотных решениях, где не требуется больших вычислительных ресурсов.

Еще одним важным критерием является производительность микрокомпьютера, которая определяет вычислительную способность дрона. А, как следствие, определяет стоимость самого микрокомпьютера. В зависимости от задач БПЛА производительность может меняться. Например, для задач съёмки местности не требуются ресурсы реального времени, поэтому высокая производительность не требуется. Здесь можно применить недорогой МК Raspberry 4B стоимостью 9 тыс.руб. (на момент начала 2026 года). А в случае инспекции железнодорожной инфраструктуры, где требуется в реальном времени применять детекцию, анализ и отслеживание, стоит применять более мощные микрокомпьютеры, например Jetson Orin NX стоимостью 190 тыс.руб. (на момент 2026г).

Для полноценной работы встраиваемых систем необходимым требованием является наличие определённых интерфейсов. Современные микрокомпьютеры оборудованы множеством интерфейсов. С одной стороны, избыток интерфейсов приводит к дополнительным затратам на приобретение и увеличение габаритов, с другой стороны, нехватка того или иного интерфейса ограничивает функциональность машины. Поэтому наличие того или иного интерфейса должно обуславливаться его необходимостью в определённой задаче. Кроме того, для автономного выполнения поставленных задач в БПЛА требуется не менее 2 UART [8]. Также стоит отметить, что в системах компьютерного зрения для обмена данными между полетным контроллером, вычислителем и датчиками необходимы такие интерфейсы как: интерфейс CSI для приема данных с MiPi камеры в режиме реального времени и также наличие интерфейсов I^2C, SPI, CAN для различных датчиков типа тепловизор, лидар. К примеру, если задача БПЛА является анализ лесной местности на предмет возгораний, то наличие таких датчиков, как тепловизор, лидар, является необходимым. Для их согласования с МК может потребоваться наличие двух UART, двух SPI или I^2C, в зависимости от применяемых датчиков.

Еще одним примером может быть БПЛА, выполняющий полётные задания с использованием стереозрения. Для этого требуется наличие на вычислителе двух интерфейсов CSI для поддержания двух камер. К таким МК может относиться Jetson, Raspberry Pi 5.

Важным критерием выбора вычислительного модуля является его стоимость. Так, например, если функции БАС сводятся к простому наблюдению и записи видеофайла, то не имеет смысла рассматривать дорогие варианты от NVIDIA. И наоборот, когда задачи БАС состоят в сложном бортовом анализе данных, поступающих от разных датчиков и при этом задействованы сложные нейросетевые системы, то вычислитель, который способен производить эти операции одновременно будет стоить дорого. На сегодняшний день стоимость таких вычислителей составляет от 2 тыс.руб. до 1 млн.руб. Такой разброс стоимости заставляет разработчиков учитывать этот критерий в пользу баланса функции и бюджета.

Таким образом, выбор МК для БАС требует компромисса между вычислительной мощностью, энергоэффективностью и стоимостью.

Ниже рассмотрены наиболее популярные варианты микрокомпьютеров, которые могут выполнять роль бортового вычислителя автономного летательного аппарата. Данные актуальны на май 2026 года.

1. NanoPi M4 представляет собой компактную одноплатную вычислительную платформу на базе Rockchip RK3399. Она оснащена шестиядерным процессором с архитектурой big.LITTLE (2 × Cortex-A72 и 4 × Cortex-A53) и графическим ускорителем Mali-T864 (рисунок 1). В отличие от более современных платформ серии RK3588, он не имеет встроенного нейронного процессора (NPU), вследствие чего его производительность в задачах искусственного интеллекта составляет менее 1GELOPSa.

Энергопотребление платы составляет 8–15 Вт, габариты устройства — около 85 × 56 мм, масса — порядка 40 г, стоимость — 8–12 т.руб. NanoPi M4 может применяться для базовой обработки изображений и видеопотока, а также для реализации простых алгоритмов компьютерного зрения на борту БПЛА [10]. Благодаря низкому энергопотреблению и компактным размерам плата подходит для установки на малые беспилотные авиационные системы.

NanoPi M4 оснащён следующими интерфейсами:

- 1 × Gigabit Ethernet;
- 4 × USB 3.0 и USB Type-C;
- 1 × HDMI 2.0;
- 1 × GPIO (до 4 × UART, 3 × I2C, 2 × SPI);
- 1 × PCIe x2;
- 1 × MIPI-CSI;
- 1 × microSD/eMMC.

С учетом описанных характеристик NanoPi M4 имеет популярный форм-фактор, аналогичный Raspberry Pi 4 и Orange Pi, что обеспечивает совместимость с большим количеством периферийных устройств и программных решений. Платформа поддерживает подключение камер через интерфейс MIPI-CSI, что делает пригодной для автономных беспилотных систем.

Вычислительная мощность RK3399 ограничивает применение современных нейросетевых алгоритмов компьютерного зрения в реальном времени. Отсутствие встроенного NPU существенно снижает эффективность выполнения задач искусственного интеллекта и обработки нейронных сетей по сравнению с платформами на базе RK3588 и RK3568.

Тем не менее данный вычислитель до сих пор встречается в бортовых системах БПЛА.



Рис. 1. Внешний вид NanoPi M4

2. NanoPi R6S представляет собой компактную высокопроизводительную платформу на базе Rockchip RK3588S. Она оснащена восьмиядерным процессором (4 × Cortex-A76 и 4 × Cortex-A55) и встроенным NPU производительностью до 6 TOPS (рисунок 2).

Энергопотребление платы составляет 10–18 Вт, габариты устройства — около 85 × 56 мм, масса — порядка 30–35 г, стоимость — около 18 тыс. руб. Платформа может использоваться для задач компьютерного зрения, анализа изображений и нейросетевой обработки видеопотока на борту БПЛА. Благодаря встроенному NPU NanoPi R6S поддерживает выполнение облегчённых моделей искусственного интеллекта в режиме, близком к реальному времени. Малое энергопотребление и сравнительно низкая стоимость обеспечивают возможность применения платы в составе малых беспилотных авиационных систем.

NanoPi R6S оснащён следующими интерфейсами:

- 2 × 2.5 Gigabit Ethernet;
- 1 × USB 3.0 и 1 × USB Type-C;
- 1 × HDMI 2.1;
- GPIO, (до 3 × UART, 1 × I2C, 1 × SPI);
- 1 × PCIe 3.0;
- 1 × microSD/eMMC.

С учетом описанных характеристик NanoPi R6S имеет распространённый форм-фактор, аналогичный Orange Pi 5 и Raspberry Pi 5, что обеспечивает совместимость с различными периферийными устройствами и корпусами. Производительность платформы достаточна для реализации ряда алгоритмов компьютерного зрения и базового нейросетевого интерфейса в режиме реального времени.

Основным недостатком NanoPi R6S при применении в автономных беспилотных системах является отсутствие интерфейса MIPI-CSI для прямого подключения высокоскоростных камер. По этой причине платформа в большей степени ориентирована на сетевые и серверные задачи, а также обработку данных, поступающих через USB-интерфейсы или Ethernet.



Рис. 2. Внешний вид NanoPi R6S

3. Raspberry Pi 5 представляет собой современный одноплатный компьютер, построенный на базе четырёхъядерного процессора ARM Cortex-A76 с частотой до 2,4 ГГц. По сравнению с Raspberry Pi 4 производительность системы увеличилась примерно в 2–3 раза, что позволяет использовать плату не только для телеметрии и мониторинга, но и для выполнения базовых алгоритмов компьютерного зрения (рисунок 3).

Плата выпускается в конфигурациях с 4 и 8 ГБ оперативной памяти LPDDR4X, поддерживает камеры MIPI CSI и обладает развитой экосистемой Linux, ROS и OpenCV. Энергопотребление составляет около 7–12 Вт, масса — около 46 г, габариты — 85 × 56 мм, стоимость — порядка 10–15 тыс. руб.

Raspberry Pi 5 не имеет встроенного NPU, поэтому производительность в задачах искусственного интеллекта составляет менее 1 TOPS и ограничивается возможностями CPU/GPU. Однако плата способна выполнять алгоритмы компьютерного зрения и запуск нейросетевых моделей с использованием внешних ускорителей (MAILO AI). Это позволяет достичь производительности нейросетевых задач до 26 TOPS.

Raspberry Pi 5 оснащён следующими интерфейсами:

- 2 × USB 3.0 и 2 × USB 2.0;
- 1 × Gigabit Ethernet;
- 1 × Wi-Fi 802.11ac и Bluetooth 5.0/BLE;
- 2 × MIPI CSI/DSI;
- 1 × GPIO 40 pin, (до 5 × UART, 6 × I2C, 6 × SPI через GPIO);
- 2 × microHDMI.

Главными преимуществами Raspberry Pi 5 являются низкая стоимость, малая масса, высокая распространённость и хорошая программная поддержка. Недостатком платформы является ограниченная производительность при выполнении задач искусственного интеллекта и нейросетевой обработки данных при отсутствии модуля нейропроцессора.

С учетом описанных характеристик Raspberry Pi 5 обладает популярным и широко распространённым форм-фактором, что обеспечивает совместимость с большим количеством периферийных устройств и облегчает интеграцию в существующие аппаратные решения. Благодаря низкому энергопотреблению, малой массе и развитой программной экосистеме Raspberry Pi 5 может эффективно применяться в составе малых беспилотных авиационных систем для задач телеметрии, видеомониторинга и первичной обработки данных на борту.



Рис. 3. Внешний вид Raspberry Pi 5

4. Orange Pi 5 является высокопроизводительной альтернативой Raspberry Pi и построен на базе процессора Rockchip RK3588S. Плата содержит восемь вычислительных ядер (4 × Cortex-A76 и 4 × Cortex-A55) и встроенный NPU производительностью до 6 TOPS (рисунок 4).

Плата выпускается в конфигурациях до 32 ГБ оперативной памяти LPDDR4/LPDDR5 и имеет размеры около 100 × 62 мм. Масса устройства составляет порядка 50–70 г, энергопотребление находится в диапазоне 8–15 Вт, а стоимость — около 12–20 тыс. руб.

Orange Pi 5 обладает значительно более высокой производительностью по сравнению с Raspberry Pi 5 и при этом сохраняет сравнительно небольшую массу и умеренное энергопотребление. Наличие встроенного NPU позволяет выполнять задачи нейросетевого интерфейса и реализовывать алгоритмы компьютерного зрения в режиме реального времени.

Orange Pi 5 оснащён следующими интерфейсами:
- 2 × USB 3.0 и 2 × USB 2.0;
- 1 × Gigabit Ethernet;
- Wi-Fi и Bluetooth (через внешний модуль или отдельные версии платы);
- 1 × HDMI 2.1;
- 1 × MIPI CSI;
- 1 × GPIO 40 pin (до 7 × UART, 5 × I2C, 3 × SPI);
- 1 × PCIe 3.0.

Orange Pi 5 является одним из наиболее сбалансированных вариантов для БАС, поскольку сочетает высокую вычислительную производительность, умеренное энергопотребление и приемлемую стоимость.

С учетом описанных характеристик Orange Pi 5 обладает распространённым форм-фактором, совместимым с рядом популярных одноплатных компьютеров, что упрощает его интеграцию в существующие аппаратные платформы. Высокая вычислительная производительность устройства позволяет реализовывать алгоритмы компьютерного зрения и выполнять обработку видеопотока в режиме реального времени, включая запуск облегчённых нейросетевых моделей. Благодаря сочетанию умеренного энергопотребления, компактных размеров и сравнительно невысокой стоимости Orange Pi 5 является эффективным решением для применения в составе беспилотных авиационных систем.



Рис. 4. Внешний вид Orange Pi 5

5. NVIDIA Jetson Nano представляет собой специализированную платформу для задач искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Она оснащена графическим процессором Maxwell с 128 CUDA-ядрами и поддерживает CUDA, TensorRT и другие средства ускорения нейросетевых вычислений (рисунок 5).

Платформа построена на четырёхъядерном процессоре ARM Cortex-A57 и комплектуется 4 ГБ оперативной памяти LPDDR4. Габариты платы составляют около 100 × 80 мм, масса — примерно 140 г, энергопотребление находится в диапазоне 5–10 Вт, а стоимость — порядка 20–25 тыс. руб.

Jetson Nano обеспечивает вычислительную производительность около 0,5 TOPS (с применением CUDA – технологии 472 GFLOPS FP16), что позволяет использовать платформу для базовых задач компьютерного зрения, распознавания объектов и автономной навигации.

NVIDIA Jetson Nano оснащён следующими интерфейсами:
- 4 × USB 3.0;
- 1 × Gigabit Ethernet;
- 1 × HDMI и 1 × DisplayPort;

- 1 × MIPI CSI-2;
- 1 × GPIO 40 pin (до 3 × UART, 2 × I2C, 2 × SPI);
- 1 × microSD.

Несмотря на относительно невысокую по современным меркам производительность, Jetson Nano остаётся востребованной платформой благодаря развитой экосистеме CUDA и хорошей поддержке AI-инструментов NVIDIA.

Jetson Nano подходит для средних БПЛА, которым требуется запуск нейросетевых алгоритмов при отсутствии жёстких ограничений по массе и вычислительным ресурсам.

С учетом описанных характеристик NVIDIA Jetson Nano представляет собой специализированную edge-AI платформу, ориентированную на задачи компьютерного зрения и базового нейросетевого инференса. Использование GPU архитектуры Maxwell с поддержкой CUDA и TensorRT обеспечивает аппаратное ускорение операций глубокого обучения и позволяет реализовывать алгоритмы распознавания объектов в режиме, близком к реальному времени.



Рис. 5. Внешний вид NVIDIA Jetson Nano

6. NVIDIA Jetson Orin NX относится к наиболее производительным edge-AI платформам. Она оснащена 6 или 8 ядерным процессором Arm Cortex-A78AE (в зависимости от модификации), а также графическим процессором архитектуры Ampere с Tensor Cores и обеспечивает вычислительную производительность до 157 TOPS в зависимости от модификации (рисунок 6).

Платформа способна запускать сложные модели компьютерного зрения и нейросетевые алгоритмы в режиме реального времени. Энергопотребление находится в диапазоне 10–25 Вт, масса модуля составляет около 100 г, габариты — около 100 × 80 мм, а стоимость достигает 150–190 тыс. руб.

Jetson Orin NX оснащён современным набором интерфейсов:

- PCIe Gen4;
- USB 3.2;
- 1 × Gigabit Ethernet;
- MIPI CSI-2;
- GPIO (до 4 × UART, 4 × I2C, 2 × SPI);
- 1 × DisplayPort.

Jetson Orin NX значительно превосходит большинство одноплатных платформ по производительности, однако высокая стоимость и повышенное энергопотребление ограничивают её применение в малых БПЛА.

Jetson Orin NX является эффективным решением для тяжёлых автономных беспилотных систем, выполняющих сложные задачи искусственного интеллекта, многопоточную обработку видео и навигацию в реальном времени.

С учетом описанных характеристик Jetson Orin NX от NVIDIA относится к высокопроизводительным edge-AI платформам, ориентированным на выполнение вычислительно сложных задач компьютерного зрения и глубокого обучения. Наличие GPU архитектуры Ampere и Tensor Cores обеспечивает возможность обработки нейросетевых моделей в режиме реального времени и параллельной обработки нескольких видеопотоков.



Рис. 6. Внешний вид NVIDIA Jetson Orin NX

Для наглядного сравнения рассмотренных вычислительных платформ в таблицу 1 приведены их основные характеристики, включая производительность, энергопотребление, массу, стоимость и область применения в составе беспилотных авиационных систем.

Таблица 1

Сравнение технических характеристик микрокомпьютеров для беспилотных авиационных систем

Плата	TOPS	Энергопотребление (Вт)	Масса (г)	Стоимость (т. руб.)	SPI	UART	I^2C	CSI
NanoPi M4	0,001	8–15	40	10	1	2	2	1
NanoPi R6S	6	10–18	90	22	1	2	2	0
Raspberry Pi 5	2.4(26)	7–12	46	12	1	4	2	2
Orange Pi 5	6	8–15	50–70	18	1	4	2	1
Jetson Nano	0,47	5–10	140	25	1	3	2	2
Jetson Orin NX	157	15–25	100	190	1	3	2	2

Практическая часть

Для эмпирического подтверждения теоретических выкладок и оценки применимости рассмотренных микрокомпьютеров в задачах автономной навигации и компьютерного зрения в условиях, приближённых к реальным, было проведено экспериментальное исследование. Для проведения испытаний была разработана специализированная программная утилита, симулирующая ключевые этапы бортовой обработки данных. При разработке экспериментального программного обеспечения использовались подходы к обнаружению и сопровождению объектов в видеопотоке, предложенные в работе [10].

Разработанная программа автоматизирует процесс оценки производительности, выполняя следующие функции:

1. Детекция объекта – используется модель YOLOv8n (nano-версия), предварительно обученная на датасете COCO. Особенности функционирования глубоких сверточных нейронных сетей, включая влияние затухающих градиентов и

деградации нейронов на качество обучения интерфейса, подробно рассмотрены в работе [11]. Выбор облегчённой модели обусловлен необходимостью обеспечения работоспособности на широком спектре платформ, включая маломощные. На каждом кадре, где отсутствует активный трекер, модель выполняет поиск целевого объекта — автомобиля – с порогом уверенности 0.5. Успешное обнаружение необходимо для инициализации или переинициализации процесса слежения.

2. Сопровождение объекта – после обнаружения запускается алгоритм CSRT (Channel and Spatial Reliability Tracker), известный своей устойчивостью к частичным перекрытиям и изменениям ракурса, а также значительной вычислительной нагрузкой. Трекер сопровождает объект в последующих кадрах до момента потери, после чего требуется повторная детекция.

3. Сбор метрик производительности – программа фиксирует: среднее количество обрабатываемых кадров в секунду (FPS), общее число успешных детектирований, стабильность трекера (доля кадров с удержанием цели), количество переинициализаций, а также вычисляет комплексную оценку по формуле:

Итоговая оценка рассчитывается как

$$P = 0,5 \cdot \frac{FPS}{FPS_{real}} + 0,3 \cdot \frac{D}{K} + 0,2 \cdot C ,$$

где FPS – средняя частота обработки кадров;

D – число успешных детекций целевого объекта моделью YOLO;

K – общее число обработанных кадров (K = 2000);

C – доля кадров, на которых трекер CSRT успешно сопровождал объект (стабильность).

Целевое значение FPS_{real} = 24 кадров/с выбрано как минимально необходимое для обеспечения устойчивого визуального контроля в реальном времени, при котором оператор или система управления успевает адекватно реагировать на изменения обстановки.

Весовые коэффициенты (0.5, 0.3, 0.2) отражают приоритетность критериев.

Так весовой коэффициент 0.5 (50% для FPS) – наибольший вес присвоен частоте кадров, поскольку этот параметр является первичным и определяет саму возможность работы системы в реальном времени. Если платформа не обеспечивает достаточного FPS, качество детекции и стабильность трекера теряют практический смысл.

Весовой коэффициент 0.3 (30% для детекции) – качество обнаружения объектов определяет надёжность инициализации и переинициализации трекера, но его влияние на итоговую эффективность ниже, чем FPS.

Весовой коэффициент 0.2 (20% для стабильности трекера) – минимальный вес присвоен стабильности сопровождения, поскольку при высоком FPS и хорошей детекции этот показатель автоматически стремится к максимуму, что подтверждается результатами эксперимента.

В качестве тестового материала использовался видеофрагмент высокого разрешения (1280×720 пикселей) с частотой 30 кадров в секунду. Сюжет видеоряда был выбран намеренно сложным для алгоритмов компьютерного зрения: автомобиль совершает быстрые перемещения, подвергается частичным перекрытиям, интенсивно изменяет ориентацию в пространстве, выполняет развороты, динамически приближается и удаляется от точки обзора (рисунок 7). Такой сценарий максимально приближен к условиям эксплуатации БПЛА в динамичной городской среде.



Рис. 7. Визуализация каждого 50-го кадра выходного видеоряда

Для всех тестируемых платформ были обеспечены унифицированные условия:

- модель: YOLOv8n (pretrained на COCO);
- трекер: CSRT;
- разрешение обработки: 1280×720 пикселей;
- программная среда: Linux, Python 3.14, библиотеки ultralytics, opencv-python, numpy;
- для платформ NVIDIA использовался CUDA Toolkit 12.x;
- обработка ограничена 2000 кадрами для каждой платформы.

Эксперимент проводился путём последовательного запуска утилиты на каждом из рассмотренных вычислительных модулей.

Результаты эксперимента

В ходе экспериментального исследования были получены результаты для каждой из рассматриваемых платформ. Для обеспечения сопоставимости данных тестирование проводилось в идентичных условиях: использовалась одна и та же модель YOLOv8n, один видеофайл, одинаковое количество кадров (K = 2000) и единая программная среда. В таблице 2 представлены усреднённые показатели, зафиксированные в процессе выполнения тестовой программы на каждом микрокомпьютере.

Таблица 2

Экспериментальные результаты оценки эффективности микрокомпьютеров

Микрокомпьютер	Ускорение	Средний FPS	Успешных детекций YOLO (из 2000)	Частота детекции, %	Потерь трекера CSRT	Стабильность трекера, %	Переинициализаций	Комплексная оценка (0–5)
NanoPi M4	–	4.10	1733	86.7	0	100.0	1733	2.73
NanoPi R6S	NPU	13.4	1865	93.3	0	100.0	1865	3.79
Raspberry Pi 5	–	12.1	1875	93.8	0	100.0	1875	3.67
Orange Pi 5	NPU	16.2	1910	95.5	0	100.0	1910	4.12
Jetson Nano	–	10.2	1870	93.5	0	100.0	1870	3.47
Jetson Nano	CUDA	21.8	1965	98.3	0	100.0	1965	4.74
Jetson Orin NX	–	16.9	1920	96.0	0	100.0	1920	4.20
Jetson Orin NX	CUDA	30.0	1985	99.3	0	100.0	1985	5.0

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать ряд важных наблюдений о влиянии аппаратной архитектуры и программной оптимизации на производительность систем компьютерного зрения в составе БАС.

Наиболее показательным результатом эксперимента является сравнение производительности платформ Jetson Nano и Jetson Orin NX в двух режимах: без ускорения (исполнение на CPU) и с использованием CUDA (GPU-ускорение).

Для Jetson Nano активация CUDA позволяет увеличить FPS с 10.2 до 21.8 – прирост в 2.14 раза. Частота успешной детекции возрастает с 93.5% до 98.3%, что обусловлено обработкой большего числа кадров и, как следствие, более частой возможностью «поймать» объект в благоприятном ракурсе. Комплексная оценка повышается с 3.5 до 4.7 балла. При этом значение 21.8 FPS приближается к целевому (24 FPS), достигая 90.8% от желаемого уровня, что подтверждает достаточность платформы для большинства задач реального времени.

Для Jetson Orin NX эффект от CUDA также значителен: FPS возрастает с 16.9 до 30.0 (прирост в 1.78 раза), частота детекции – с 96.0% до 99.3%, а комплексная оценка – с 4.2 до 5.0 баллов. Значение 30 FPS превышает целевое значение 24 кадр/с на 25%, что гарантирует обработку каждого кадра видеопоследовательности с запасом, обеспечивая максимальную надёжность системы.

Платформы с встроенным NPU (NanoPi R6S, Orange Pi 5) демонстрируют следующие результаты.

Orange Pi 5 с NPU показывает 16.2 FPS (67.5% от целевого 24 FPS), что является лучшим показателем среди не-CUDA платформ. Комплексная оценка 4.1 балла подтверждает его эффективность для сбалансированных решений.

NanoPi R6S (13.4 FPS) показывает результат, близкий к Raspberry Pi 5 (12.1 FPS) и Jetson Nano без CUDA (10.2 FPS). При этом оценка 3.8 балла помещает его в категорию «хорошо», пригодную для базовых задач компьютерного зрения.

Среди платформ, работающих без специализированных ускорителей, наблюдается следующая иерархия.

Jetson Orin NX (16.9 FPS, оценка 4.2) и Orange Pi 5 (16.2 FPS, оценка 4.1) – лидируют, что объясняется высокой производительностью их процессорных ядер. Обе платформы достигают ~70% от целевого FPS, что достаточно для многих практических сценариев.

NanoPi R6S (13.4 FPS, оценка 3.8) и Raspberry Pi 5 (12.1 FPS, оценка 3.7) занимают среднюю позицию, обеспечивая ~50–56% от целевой частоты. Эти платформы могут применяться для задач с нестрогими требованиями к реальному времени.

Jetson Nano без CUDA (10.2 FPS, оценка 3.5) показывает, что без активации GPU платформа уступает более современным CPU-решениям. Это подчёркивает необходимость использования CUDA для раскрытия потенциала данной платформы.

NanoPi M4 (4.10 FPS, оценка 2.7) – аутсайдер, достигающий лишь 17% от целевого FPS, что делает его непригодным для задач компьютерного зрения в реальном времени.

На всех платформах, за исключением NanoPi M4, стабильность трекера CSRT достигла 100%, что свидетельствует о достаточной производительности для надёжного сопровождения объекта при использовании облегчённой модели YOLOv8n. Ключевым фактором, определяющим пригодность платформы для реального времени, является достижение целевой частоты 24 FPS, обеспечивающей своевременное обнаружение и переинициализацию. Среди протестированных платформ этому критерию в полной мере соответствуют только решения NVIDIA с CUDA (Jetson Orin NX – 30 FPS, Jetson Nano – 21.8 FPS, близкое к целевому).

Выводы

В результате проведённого исследования был выполнен анализ современных микрокомпьютеров, применяемых в качестве бортовых вычислительных модулей беспилотных авиационных систем. Рассмотрены ключевые критерии выбора платформы, включая производительность, энергопотребление, массогабаритные характеристики, наличие интерфейсов и стоимость. Показано, что выбор оптимального микрокомпьютера представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, в которой невозможно достичь максимальных значений по всем параметрам одновременно.

На основе сравнительного анализа шести популярных платформ (NanoPi M4, NanoPi R6S, Raspberry Pi 5, Orange Pi 5, Jetson Nano и Jetson Orin NX) выявлены их сильные и слабые стороны с учётом различных сценариев применения. Экспериментальное исследование с использованием модели YOLOv8n и CSRT-трекера на видеопоследовательности со сложными динамическими сценариями подтвердило, что наивысшую производительность обеспечивают платформы NVIDIA с активацией CUDA: Jetson Orin NX достигает 30.0 FPS (оценка 5.0), а Jetson Nano — 21.8 FPS (оценка 4.7). Однако их стоимость (до 190 тыс. руб.) и масса (100–140 г) ограничивают применение преимущественно тяжёлыми БПЛА с высокой грузоподъёмностью.

Для компактных и малых беспилотных систем более предпочтительными являются лёгкие и недорогие платформы. Raspberry Pi 5 (46 г, 12 тыс. руб.) и Orange Pi 5 (50–70 г, 20 тыс. руб.) обеспечивают 12–16 FPS, что достаточно для базовых задач видеомониторинга и телеметрии. Особого внимания заслуживает Orange Pi 5, сочетающий массу менее 70 г, стоимость около 20 тыс. руб. и производительность 16.2 FPS за счёт встроенного NPU мощностью 6 TOPS.

Платформы NanoPi R6S (90 г, 22 тыс. руб., 13.4 FPS) и Jetson Nano без CUDA (140 г, 25 тыс. руб., 10.2 FPS) занимают промежуточное положение, однако их применение требует тщательного анализа целесообразности: в первом случае масса выше, чем у Raspberry Pi 5, при сопоставимой производительности; во втором – без активации CUDA платформа значительно уступает более доступным аналогам.

Установлено, что при выборе вычислительного модуля для БАС необходимо учитывать не только пиковую производительность, но и совокупность эксплуатационных ограничений: энергопотребление определяет продолжительность полёта, масса и габариты влияют на аэродинамику и полезную нагрузку, а стоимость

является критическим фактором для серийных решений. Наиболее сбалансированными вариантами признаны Jetson Nano (CUDA) для задач реального времени и Orange Pi 5 для бюджетных проектов.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании бортовых систем обработки данных для БАС различного назначения, а предложенная методика комплексной оценки производительности – для объективного сравнения вычислительных платформ в аналогичных задачах.

Список литературы

1. Федосеева Наталья Алексеевна, Загвоздкин Матвей Викторович Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. №9 (22). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-oblasti-primeneniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov (дата обращения: 04.05.2026).

2. Неверова Алина Романовна Использование беспилотных летательных аппаратов в кадастре, землеустройстве и градостроительстве // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-kadastre-zemleustroystve-i-gradostroitelstve (дата обращения: 05.05.2026).

3. Долинский К. Ю., Лыков А. А., Соколов В. А., Соколов В. Б., Осадчий Г. В. Система удаленного мониторинга состояния железнодорожной контактной сети // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2010. №5 (30). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/cistema-udalennogo-monitoringa-sostoyaniya-zheleznodorozhnoy-kontaktnoy-seti (дата обращения: 05.05.2026).

4. Сацюк, А. В. Особенности разработки беспилотных летательных аппаратов для отрасли железнодорожного транспорта / А. В. Сацюк, А. А. Воробьев // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2023. – № 68. – С. 13-21. – EDN GSWIPU.

5. Панарин Роман Николаевич, Соловьев Андрей Александрович, Хворова Любовь Анатольевна ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ И РАСПОЗНАВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ // Известия АлтГУ. 2022. №1 (123). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologiy-iskusstvennogo-intellekta-i-kompyuternogo-zreniya-pri-reshenii-zadach-avtomatizatsii-obrabotki-i (дата обращения: 05.05.2026).

6. Сацюк, А. В. Разработка алгоритма поиска заданного объекта в видеопотоке реального времени на основе метода корреляционного поиска / А. В. Сацюк, Е. Г. Воевода, Р. Я. Каминский // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2025. – № 1(76). – С. 15-23. – EDN VKNJZZ.

7. Забелин Р. Т., Левшиц В. Э. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СИСТЕМАХ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ // Professional Bulletin: Information Technology and Security. 2025. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-raspredeleniya-resursov-v-sistemah-periferiynyh-vychisleniy-dlya-prilozheniy-realnogo-vremeni (дата обращения: 05.05.2026).

8. Косорлуков, И. А. Аспекты разработки комплекса анализа состояния и определения остаточного ресурса аккумуляторных батарей на основе контролируемых параметров / И. А. Косорлуков, В. Н. Козловский, А. В. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 1. – С. 174-183. – DOI 10.24412/2071-6168-2026-1-174-175. – EDN UQQETS.

9. Бобылев Фёдор Алексеевич, Маркелов Максим Константинович ПРИМЕР СОЗДАНИЯ ПОЛЕТНОГО КОНТРОЛЛЕРА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА БАЗЕ МК STM32 // Вестник ПензГУ. 2023. №3 (43). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primer-sozdaniya-poletnogo-kontrollera-bespilotnogo-letatelnogo-apparata-na-baze-mk-stm32 (дата обращения: 06.05.2026).

10. Ковалев В. А., Калиновский А. А., Дмитрук А. А. Бортовой микромодуль распознавания целевых классов изображений в системах мониторинга: методы и алгоритмы // Доклады БГУИР. 2015. №7 (93). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/bortovoy-mikromodul-raspoznavaniya-tselevyh-klassov-izobrazheniy-v-sistemah-monitoringa-metody-i-algoritmy (дата обращения: 12.05.2026).

11. Сацюк, А. В. Разработка системы обнаружения дефектов дорожного полотна на основе компьютерного зрения / А. В. Сацюк, В. Н. Нижник // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2025. – № 3(78). – С. 23-34. – EDN TJNKBA.

12. Сацюк, А. В. Анализ проблем затухающих градиентов и умирающих нейронов в глубоких сверточных нейронных сетях / А. В. Сацюк, Э. В. Лесовой // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2026. – № 1. – С. 48-57. – EDN SHMFIZ.

References

1. Fedoseeva Natalia Alekseevna, Zagozdkin Matvey Viktorovich Promising areas of application of unmanned aerial vehicles // Scientific Journal. 2017. No.9 (22). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-oblasti-primeneniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov (date of request: 05/04/2026).

2. Neverova Alina Romanovna The use of unmanned aerial vehicles in cadastre, land management and urban planning // Interexpo Geo-Siberia. 2017. No. 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-kadastre-zemleustroystve-i-gradostroitelstve (date of request: 05.05.2026).

3. Dolinsky K. Yu., Lykov A. A., Sokolov V. A., Sokolov V. B., Osadchy G. V. Remote monitoring system of the railway contact network // Transport of the Russian Federation. A journal about science, practice, and economics. 2010. No.5 (30). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/cistema-udalennogo-monitoringa-sostoyaniya-zheleznodorozhnoy-kontaktnoy-seti (date of request: 05.05.2026).

4. Satsiuk, A.V. Features of the development of unmanned aerial vehicles for the railway transport industry / A.V. Satsiuk, A. A. Vorobyov // Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport. – 2023. – No. 68. – pp. 13-21. – EDN GSWIPU.

5. Panarin Roman Nikolaevich, Solovyov Andrey Alexandrovich, Khvorova Lyubov Anatolyevna APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND COMPUTER VISION TECHNOLOGIES IN SOLVING AUTOMATION PROBLEMS OF PROCESSING AND RECOGNITION OF BIOLOGICAL OBJECTS // Izvestiya AltGU. 2022. №1 (123). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologiy-iskusstvennogo-intellekta-i-kompyuternogo-zreniya-pri-reshenii-zadach-avtomatizatsii-obrabotki-i (date of request: 05.05.2026).

6. Satsiuk, A.V. Development of an algorithm for searching for a given object in a real-time video stream based on the correlation search method / A.V. Satsiuk, E. G. Voevoda, R. Ya. Kaminsky // Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport. – 2025. – № 1(76). – Pp. 15-23. – EDN VKNJZZ.

7. Zabelin R. T., Levshits V. E. OPTIMIZATION OF RESOURCE ALLOCATION IN PERIPHERAL COMPUTING SYSTEMS FOR REAL-TIME APPLICATIONS // Professional Bulletin: Information Technology and Security. 2025. No. 1. URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-raspredeleniya-resursov-v-sistemah-periferiynyh-vychisleniy-dlya-prilozheniy-realnogo-vremeni (date of request: 05.05.2026).

8. Kosorlukov, I. A. Aspects of the development of a complex for analyzing the condition and determining the residual life of batteries based on controlled parameters / I. A. Kosorlukov, V. N. Kozlovsky, A.V. Starikov // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2026. – No. 1. – pp. 174-183. – DOI 10.24412/2071-6168-2026-1-174-175. – EDN UQQETS.

9. Bobylev Fedor Alekseevich, Markelov Maxim Konstantinovich AN EXAMPLE OF CREATING A FLIGHT CONTROLLER FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BASED ON MK STM32 // Bulletin of Penza State University. 2023. №3 (43). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primer-sozdaniya-poletnogo-kontrollera-bespilotnogo-letatelnogo-apparata-na-baze-mk-stm32 (date of request: 05/06/2026).

10. Kovalev V. A., Kalinovskiy A. A., Dmitruk A. A. On-board micromodule for recognizing target classes of images in monitoring systems: methods and algorithms // Reports of the BSUIR. 2015. No. 7 (93). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/bortovoy-mikromodul-raspoznavaniya-tselevyh-klassov-izobrazheniy-v-sistemah-monitoringa-metody-i-algoritmy (date of access: 05/12/2026).

11. Satsiuk, A.V. Development of a system for detecting defects in the roadway based on computer vision / A.V. Satsiuk, V. N. Nizhnik // Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport. – 2025. – № 3(78). – Pp. 23-34. – EDN TJNKBA.

12. Satsiuk, A.V. Analysis of the problems of decaying gradients and dying neurons in deep convolutional neural networks / A.V. Satsiuk, E. V. Lesovoy // Bulletin of the Donetsk Academy of Transport. – 2026. – No. 1. – pp. 48-57. – EDN SHMFIZ.

Satsiuk A.V., Malakhova V.V., Lesovoy E.V.

ANALYSIS OF MODERN MICROCOMPUTERS IN THE CONTEXT OF THE APPLICATION OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

Abstract. *The paper analyzes modern microcomputers used as on-board computing modules of unmanned aircraft systems (UAS). The key criteria for choosing platforms are considered: energy consumption, weight and size characteristics, performance, availability of interfaces and cost. A comparative analysis of six popular models (NanoPi M4, NanoPi R6S, Raspberry Pi 5, Orange Pi 5, Jetson Nano, Jetson Orin NX) was carried out in terms of their applicability in computer vision tasks. The performance of platforms in solving the problem of object detection and tracking using the YOLOv8n model and CSRT tracker has been experimentally investigated. An integrated efficiency assessment methodology has been developed that takes into account frame processing frequency, detection quality, and tracking stability. Rational applications of various types of microcomputers have been identified, taking into account the requirements for autonomy, computational efficiency, weight, size and price constraints.*

Keywords*: microcomputers; unmanned aircraft systems; energy consumption; computer vision; autonomous systems.*

Сведения об авторах:

Сацюк Александр Владимирович
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (ДОНИЖТ),
Донецк, Россия
Заведующий научно-исследовательской лабораторией искусственного интеллекта
Кандидат технических наук
e-mail: alexandrsatsuk@gmail.com

Малахова Виктория Владимировна
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
Луганск, Россия
Доцент кафедры прикладной математики
Кандидат технических наук
e-mail: malakhova_viktoriya84@mail.ru

Лесовой Эдуард Васильевич Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (ДОНИЖТ),
Донецк, Россия
аспирант «Управление процессами перевозок»
e-mail: ed.lesovoi2014@yandex.ru

Information about the authors:

Alexander Vladimirovich Satsiuk
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Donetsk Institute of Railway Transport”,
Donetsk, Russia
Head of the Artificial Intelligence Research Laboratory
Candidate of Technical Sciences (Ph.D. in Engineering)
e-mail: alexandrsatsuk@gmail.com

Malakhova Victoria Vladimirovna
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladimir Dahl Lugansk State University" Lugansk, Russia
Associate Professor of the Department of Applied Mathematics
Candidate of Technical Sciences
e-mail: malakhova_viktoriya84@mail.ru

Lesovoy Eduard Vasilyevich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Donetsk Institute of Railway Transport",
Donetsk, Russia
graduate student "Transportation Process Management"
e-mail: ed.lesovoi2014@yandex.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.892 : 621.89.017

Асцатуров Ю.Г., Галушкин Д.Н., Ременцов А.В., Мойся Д.Л.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Аннотация. *В статье рассматривается актуальная проблема перехода от регламентного обслуживания двигателей внутреннего сгорания к стратегии замены смазочных материалов по их фактическому техническому состоянию. Обоснована необходимость оперативного мониторинга физико-химических показателей моторных масел, подвергающихся интенсивной термоокислительной деструкции и загрязнению продуктами износа. Предложена модернизированная конструкция портативного устройства для экспресс-диагностики, сочетающая в себе фотометрический и ёмкостный методы анализа. Особое внимание уделено минимизации погрешностей, вызванных разностью температур эталонной и исследуемой сред, путем интеграции в измерительную схему NTC-термисторов. Описан алгоритм работы прибора, базирующийся на дифференциальном принципе измерения и программной обработке сигналов микроконтроллером, что позволяет с высокой точностью идентифицировать критическое обводнение или накопление шламовых отложений.*

Ключевые слова: *Моторное масло, экспресс-диагностика, фотометрический метод, ёмкостный метод, диэлектрическая проницаемость, оптическая плотность, датчик температуры, техническое состояние ДВС.*

Постановка задачи

Современные моторные масла для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) должны строго соответствовать регламентированным критериям, установленным государственными стандартами, техническими условиями и сертификатами соответствия. Однако в процессе разработки и лабораторной апробации пакетов присадок к базовым основам практически невозможно учесть совокупность деструктивных факторов реальной эксплуатации. К ним относятся экстремальные термические нагрузки и агрессивные среды, которые катализируют процессы старения смазочного материала и существенно ухудшают трибологические условия в парах трения ДВС.

К числу ключевых деградационных факторов следует отнести обводнение (в том числе попадание низкозамерзающих охлаждающих жидкостей), разжижение масла топливом, интенсивную термоокислительную деструкцию, а также накопление продуктов механического износа и шламовых отложений.

Зачастую критическое состояние смазочной среды наступает раньше регламентного срока из-за несвоевременного сервисного обслуживания. Это

обусловлено отсутствием у автовладельцев доступного инструментария для оперативного мониторинга физико-химических показателей масла, который позволил бы обоснованно принять решение о необходимости его замены. В современной практике технического обслуживания замена смазочного материала преимущественно осуществляется по фиксированному пробегу (как правило, для легковых автомобилей 10 000 км), что далеко не всегда коррелирует с фактическим остаточным ресурсом и работоспособностью масла.

С целью увеличения ресурса и оптимизации работы узлов ДВС целесообразно перейти к стратегии замены масла по его фактическому состоянию. Данный подход предполагает мониторинг контролируемых параметров до достижения ими предельно допустимых значений, зафиксированных в технической документации.

Анализ последних исследований

В настоящее время для оценки качества моторного масла в процессе эксплуатации разработаны различные устройства и способы [1-11].

С точки зрения эффективности и экономической целесообразности экспресс-диагностики, наиболее информативными, по нашему мнению, являются два показателя: концентрация механических примесей (продуктов износа) и наличие влаги или антифриза.

Известна конструкция устройства для комбинированной диагностики моторных масел [12], в котором реализованы следующие методы оценки технического состояния моторных масел: ёмкостный метод и фотометрический метод.

Емкостный метод позволяет детектировать присутствие влаги путем измерения относительной диэлектрической проницаемости среды. Метод обладает высокой чувствительностью, позволяя фиксировать содержание воды на уровне менее 0,01 %.

Фотометрический метод применяется для оценки загрязненности масла твердыми частицами. Принцип основан на регистрации степени абсорбции (ослабления) светового потока при прохождении через слой жидкости. Рост концентрации примесей закономерно снижает оптическую прозрачность среды.

Комплексная реализация данных аналитических методов возможна в формате портативного диагностического устройства, интегрируемого в канал масляного щупа непосредственно после прекращения работы силового агрегата. Однако данное устройство не учитывает разность температуры эталонного и исследуемого масел.

Цель работы

Целью работы является повышение точности оценки эксплуатационных свойств моторных масел в условиях оперативного мониторинга за счет разработки и внедрения конструктивных решений, обеспечивающих компенсацию температурного фактора в процессе измерения диэлектрических и оптических параметров среды.

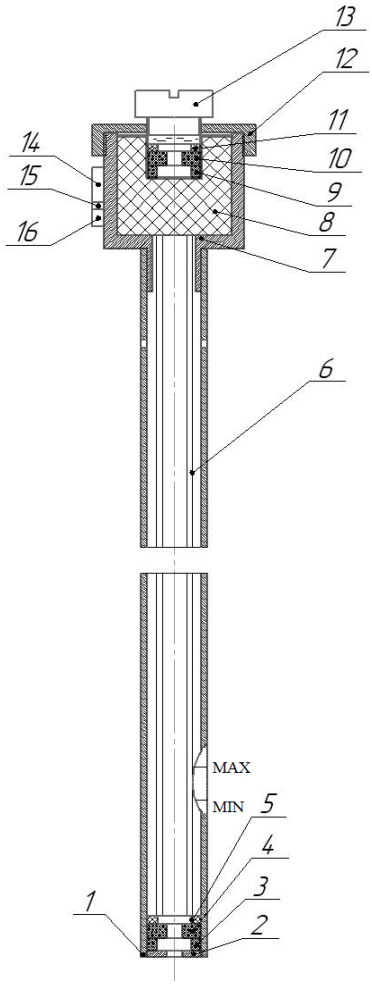
Основная часть

В конструкцию устройства для комбинированной диагностики моторных масел [12] с целью повышения точности был внесен ряд изменений.

Конструктивные особенности модернизированного устройства представлены на рисунке 1.

Корпус устройства 1 выполняется из нержавеющей стали. В нижней части зонда, над защитной крышкой 2, смонтированы фотоэлектрический преобразователь 3, представляющий собой оптронную пару (светодиодный излучатель и фототранзистор), дифференциальный емкостный датчик 4 и датчик температуры 5. При погружении зонда его рабочая полость заполняется исследуемым маслом.

В верхней зоне прибора располагается эргономичная насадка 7 (измерительная головка), корпус которой неразъёмно соединен с зондом. Информационный обмен между сенсорами и модулем обработки сигналов производится через систему соединительных проводов 6.

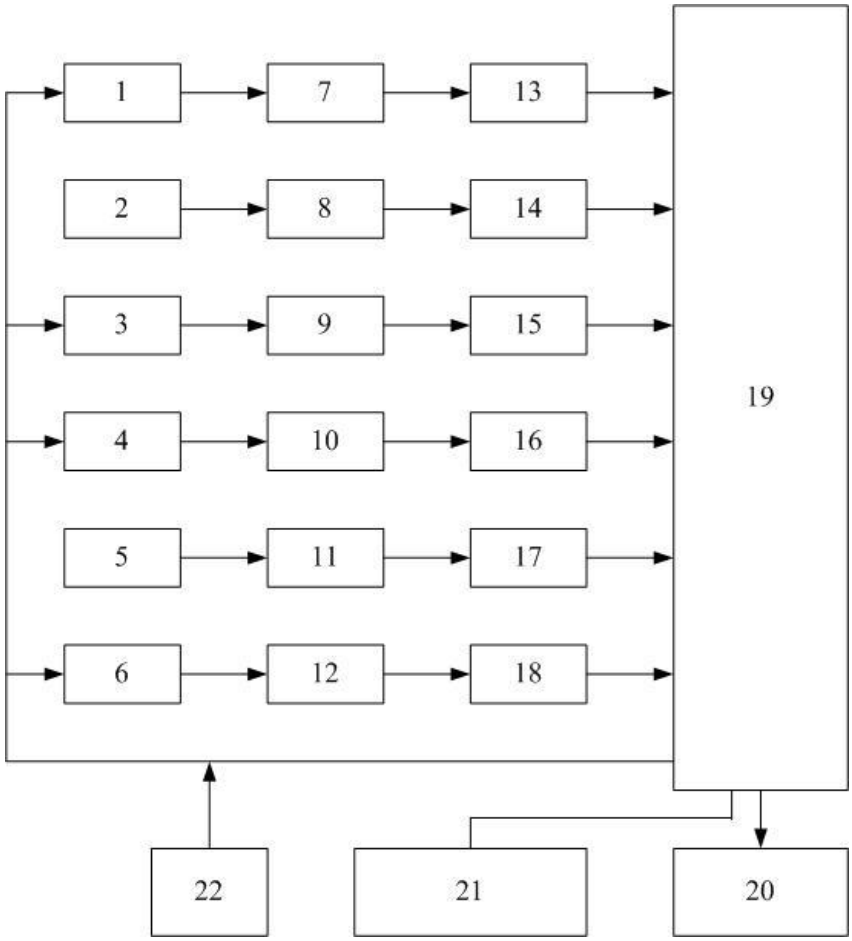


1 – корпус зонда; 2 – защитная крышка; 3 – оптический датчик исследуемого масла (ОДИ); 4 –ёмкостной датчик исследуемого масла (ЕДИ); 5 – датчик температуры исследуемого масла (ТДИ); 6 – соединительные провода; 7 –корпус измерительной головки; 8 – измерительный блок измерительной головки; 9 – оптический датчик эталонного масла (ОДЭ); 10 – ёмкостной датчик эталонного масла (ЕДЭ); 11 – датчик температуры эталонного масла (ТДЭ); 12 – крышка; 13 – винт для заливки эталонного масла; 14 – цифровой дисплей; 15 – источник беспроводной связи; 16 – батарея питания.

Рис. 1. Конструктивная схема устройства для диагностики моторных масел:

Внутренняя полость прибора объединяет в себе вычислительный блок 8 и изолированный резервуар, куда через технологическое отверстие с винтом 13 заливается свежее масло той же марки (эталон). Данная среда выступает в роли контрольного образца для сравнения. Внутри этой камеры смонтированы фотоэлектрический узел 9 (состоящий из светодиода и фототранзистора), дифференциальный датчик ёмкостного типа 10 и термистор 11 для контроля температуры. Устройство реализует дифференциальный принцип измерения: анализируется не абсолютная емкость, а ее отклонение относительно параметров свежего масла. По достижении относительного изменения емкости более чем на 10 % эксплуатация масла признается недопустимой.

Структурная схема измерительного блока представлена на рисунке 2.



1 – оптический датчик исследуемого масла (ОДИ); 2 – ёмкостной датчик исследуемого масла (ЕДИ); 3 – датчик температуры исследуемого масла (ТДИ); 4 – оптический датчик эталонного масла (ОДИ); 5 – ёмкостной датчик эталонного масла (ЕДЭ); 6 – датчик температуры эталонного масла (ТДЭ); 7, 8, 9, 10, 11, 12 – соответственно У1, У2, У3, У4, У5, У6 – усилители сигналов датчиков; 13, 14, 15, 16, 17, 18 – соответственно АЦП 1, АЦП 2, АЦП 3, АЦП 4, АЦП 5, АЦП 6 – аналого-цифровые преобразователи соответствующих каналов; 19 – микроконтроллер; 20 – цифровой дисплей; 21 – источник беспроводной связи; 22 – батарея питания

Рис. 2. Структурная схема измерительного блока устройства

Принцип работы оптического датчика измерений, интегрированного в систему экспресс-диагностики, базируется на принципах абсорбционной фотометрии. Его основная задача — преобразование изменения оптической плотности моторного масла в электрический сигнал, пропорциональный концентрации продуктов износа и сажевых отложений.

Функционально блок оптического контроля можно разделить на несколько ключевых узлов:

1. Генератор светового потока, где в качестве излучателя применен прецизионный светодиод (LED), работающий в видимом или ИК-диапазоне. Чтобы добиться высокой

повторяемости результатов, схема дополнена драйвером стабилизации тока, что нивелирует влияние просадки напряжения на яркость свечения *I*.

2. Измерительная зона (кювета), которая представляет собой калиброванный зазор между излучающим и принимающим элементами, в который поступает анализируемое масло. Расстояние, проходимое светом, *l* жестко зафиксировано конструктивными особенностями зонда.

3. Детектор излучения, роль которого выполняет фототранзистор (или фотодиод), преобразующий интенсивность светового потока *I*, преодолевшего слой масла, в электрический сигнал (фототок).

4. Блок нормирования сигнала включает в себя усилитель и активный фильтр нижних частот для отсечения помех и наводок.

5. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и микроконтроллер осуществляют квантование сигнала и его математическую обработку.

Работа датчика описывается законом Бугера — Ламберта — Бера, который в упрощенном виде для дисперсных систем (каковой является отработанное масло) выглядит следующим образом:

$$I = I_0 \times e^{k \cdot c \cdot l}, \quad (1)$$

где I – интенсивность светового потока, достигшего фотоприемника;

I_0 – интенсивность исходного светового потока;

k – показатель поглощения;

c – концентрация мелкодисперсных частиц износа и шлама;

l – толщина слоя масла в измерительном зазоре.

В разработанном устройстве реализован информативный резонансный метод определения емкости по схеме колебательного контура [12].

Функционально блок емкостного контроля состоит из следующих компонентов.

Задающий генератор формирует высокочастотное переменное напряжение (обычно в диапазоне от 100 кГц до нескольких МГц). Высокая частота необходима для минимизации влияния эффектов поляризации и сквозной проводимости масла.

Дифференциальный измерительный блок (мостовая схема) включает:

- плечо сравнения ($C_э$) – это ёмкостный элемент, помещенный в герметичную полость с эталонным (чистым) маслом в головке прибора;

- измерительное плечо ($C_и$) представляет собой электроды, расположенные на зонде, которые контактируют с маслом из картера двигателя.

Детектор разности сигналов – это узел, который преобразует разность емкостей двух датчиков в аналоговое напряжение или цифровой код. В современных решениях часто используется специализированный преобразователь «емкость-цифра».

Блок обработки (микроконтроллер) анализирует полученное отклонение и пересчитывает его в процентное содержание примесей (воды/антифриза).

Эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{эф}$ работающего моторного масла определяется по формуле:

$$\varepsilon_{эф} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad (2)$$

где ε_1 - диэлектрическая проницаемость эталонного масла;

ε_2 - диэлектрическая проницаемость загрязняющего компонента.

Если работающим моторным маслом заполнить ячейку конденсатора, то величина ёмкости ячейки $C_м$ составит:

$$C_м = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{эф} S}{d}, \quad (3)$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

$\varepsilon_{эф}$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

S – площадь электродов;

d – расстояние между ними.

Поскольку геометрия датчиков (S и d) в обеих частях прибора идентична, изменение выходного сигнала зависит только от изменения ε.

Схема работает в режиме «компенсации». Микроконтроллер сравнивает два значения: $C_э$ и $C_и$.

Если $C_э \approx C_и$ система считает масло чистым.

При попадании влаги, топлива или металлических частиц износа тип среды меняется, вызывая разбаланс схемы.

Если отклонение емкости (увеличение диэлектрической проницаемости) превышает 10%, электроника интерпретирует это как потерю маслом диэлектрической стабильности, что свидетельствует о необходимости его срочной замены.

Это позволяет обнаружить скрытые дефекты двигателя, такие как микротрещины в ГБЦ (попадание антифриза) или негерметичность топливной аппаратуры, на ранних стадиях.

Для исключения температурной погрешности (так как вязкость и прозрачность масла могут незначительно меняться от температуры) устройство включается в работу при выравнивании температур эталонного и исследуемого масел. Для этого в схему интегрируются два NTC-термистора (один в измерительную головку к эталону, второй в зонд к маслу в картере), которые свободными каналами подключаются к АЦП микроконтроллера.

Для каждого NTC-датчика собирается классический делитель напряжения. Это позволяет преобразовывать изменение сопротивления термистора (которое зависит от температуры) в изменение напряжения, которое «понимает» аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера. Компонентом такого канала также является фиксированный прецизионный резистор, номинал которого обычно выбирают равным сопротивлению NTC при «целевой» температуре.

Для реализации портативного устройства экспресс-диагностики реализуется электронная схема на базе микроконтроллера (МК) с развитой периферией (АЦП, ШИМ, интерфейсы связи). В устройство включены цифровой OLED или LCD дисплей для вывода процентов загрязнения и модуль Bluetooth/Wi-Fi (опционально) для передачи данных на смартфон.

Алгоритм работы устройства основан на циклическом опросе датчиков и вычислении относительного отклонения параметров. Он состоит из следующих этапов.

1. Инициализация, включающая самодиагностику системы; проверку уровня заряда батареи; температурный мониторинг (опрос датчиков, сравнение значений, ожидание выравнивания температур); подачу стабильного питания на измерительные цепи.

2. Калибровка (снятие эталонных значений), включающая считывание значений с эталонной камеры в головке прибора: оптической плотности нового масла и диэлектрической проницаемости нового масла, а также запись этих значений в оперативную память как базовых (100% качества).

3. Измерение, включающее считывание данных с датчиков зонда, погруженного в картер. Для повышения точности производится серия из 10–20 замеров с последующим программным усреднением (фильтрация шумов).

4. Вычисление отклонений.

Расчет оптического загрязнения:

$$\Delta I = \frac{I_и - I_э}{I_и} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $I_и$ – интенсивность светового потока в исследуемом масле;

$I_э$ – интенсивность светового потока в эталонном масле.

Расчет ёмкостного отклонения (обводнение/топливо/износ):

$$\Delta C = \frac{C_и - C_э}{C_и} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $C_и$ – величина ёмкости ячейки в исследуемом масле;

$C_э$ – величина ёмкости ячейки в эталонном масле.

5. Логический анализ и вывод.

Если ΔC > 10%, активировать индикатор «Замена масла» (критическое наличие влаги или деструкция основы). Если $\Delta I > I_п$, отображается информация о наличии большого количества продуктов износа.

Результат выводится на цифровой индикатор в виде процентного отношения, где 0% соответствует абсолютно чистому маслу, а достижение критического порога (устанавливается программно) сигнализирует о необходимости немедленного сервиса.

Выводы

1. Разработана и теоретически обоснована модернизированная конструктивная схема устройства для комплексной экспресс-диагностики моторных масел, интегрируемого непосредственно в канал масляного щупа ДВС.

2. Реализован дифференциальный метод анализа, при котором отклонение параметров работающего масла фиксируется относительно герметичной камеры с эталонной средой той же марки, что повышает достоверность обнаружения деструкции основы.

3. Внедрение системы температурной коррекции на базе термисторов позволило исключить погрешности, связанные с вязкостно-температурными изменениями прозрачности и диэлектрической стабильности масла, обеспечив активацию измерительного цикла только при выравнивании температурных градиентов.

4. Разработанный алгоритм устройства обеспечивает цифровую индикацию уровня загрязнения в процентном соотношении, позволяя своевременно выявлять скрытые дефекты силового агрегата, такие как негерметичность системы охлаждения или топливной аппаратуры.

Список литературы.

1. Кукоз, В. Ф. Экспресс-метод оценки работоспособности моторных масел / В. Ф. Кукоз, В. Д. Хулла, А. В. Тарасов, Н. Г. Подгайный. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 75–76.

2. Власов, Ю. А. Метод диагностирования карьерных автосамосвалов по изменению диэлектрической проницаемости среды работающего масла / Ю. А. Власов, Э. И. Удлер, Н. Т. Тищенко, С. А. Земляной, Р. Ю. Таньков. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–6. – С. 1307–1311.

3. Методы контроля и результаты исследования состояния трансмиссионных и моторных масел при их окислении и триботехнических испытаниях : [монография] / В. И. Верещагин, В. С. Янович, Б. И. Ковальский [и др.]. – Красноярск : СФУ, 2017. – 208 с. – Текст : непосредственный.

4. Дунаев, А. В. Экспресс-контроль масла для снижения износов и предотвращения аварий моторов / А. В. Дунаев. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Серия Химические технологии. – 2009. – Т. 16, № 12. – С. 420–428.

5. Мяло, О. В. Использование метода капельной пробы для теоретического исследования изменения параметров моторного масла / О. В. Мяло, В. В. Мяло, Е. В. Демчук. – Текст : непосредственный // Вестник Омского ГАУ. Процессы и машины агроинженерных систем. – 2021. – № 3. – С. 137–145.

6. Синявский, Н. Я. Анализ частиц продуктов износа в отработанных судовых моторных маслах / Н. Я. Синявский, А. М. Иванов, Н. А. Кострикова. – Текст : непосредственный // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4–4 (54). – С. 44–48.

7. Асцатуров, Ю. Г. Разработка оптико-электронного устройства для анализа загрязнённости моторного масла двигателя внутреннего сгорания дисперсными частицами / Ю. Г. Асцатуров, В. В. Семенов, Ю. Б. Ханжонков. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2. – URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2376 (дата обращения: 22.04.2026).

8. Способ анализа загрязненности моторного масла двигателя внутреннего сгорания дисперсными частицами : патент 2498269 Российская Федерация, МПК G01N 15/02 / В. В. Семенов, Ю. Б. Ханжонков, Ю. Г. Асцатуров ; заявитель и патентообладатель Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса. – № 2012115075/28 ; заявл. 16.04.2012 ; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – Текст : непосредственный.

9. Устройство анализа загрязненности моторного масла двигателя внутреннего сгорания дисперсными частицами : патент 2583344 Российская Федерация, МПК G01N 15/02 / В. В. Семенов, Ю. Б. Ханжонков, Ю. Г. Асцатуров, П. В. Сучков ; заявитель и патентообладатель Донской государственный технический университет (ДГТУ). – № 2015106466/28 ; заявл. 25.02.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13. – Текст : непосредственный.

10. Способ анализа загрязненности моторного масла двигателя внутреннего сгорания дисперсными частицами : патент 2583351 Российская Федерация, МПК G01N 15/02 / В. В. Семенов, Ю. Б. Ханжонков, Ю. Г. Асцатуров ; заявитель и патентообладатель Донской государственный технический университет (ДГТУ). – № 2015104480/28 ; заявл. 25.02.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13. – Текст : непосредственный.

11. Семенов, В. В. Разработка оптико-электронного устройства для контроля качества моторного масла / В. В. Семенов, Ю. Г. Асцатуров, Ю. Б. Ханжонков. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 3. – URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3732 (дата обращения: 22.04.2026).

12. Семенов, В. В. Разработка комбинированного устройства для оценки качества моторных масел / В. В. Семенов, Ю. Г. Асцатуров, Ю. Б. Ханжонков, Н. В. Кочковая. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. – URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5378 (дата обращения: 22.04.2026).

References

1. Kukoz V.F., Khulla V.D., Tarasov A.V., Podgainyi N.G. Express method for assessing the performance of motor oils. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2007, no. 3, pp. 75–76. (In Russ.) .

2. Vlasov Yu.A., Udler E.I., Tishchenko N.T., Zemlyanoi S.A., Tan'kov R.Yu. Method of diagnosing quarry dump trucks by changing the dielectric constant of the operating oil

medium. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2013, no. 8–6, pp. 1307–1311. (In Russ.) .

3. Vereshchagin V.I., Yanovich V.S., Koval'skii B.I., Bezborodov Yu.N., Ganzha V.A. *Metody kontrolya i rezul'taty issledovaniya sostoyaniya transmissionnykh i motornykh masel pri ikh okislenii i tribotekhnicheskikh ispytaniyakh* [Methods of control and results of investigation of the state of transmission and motor oils during their oxidation and tribotechnical tests]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2017. 208 p. (In Russ.) .

4. Dunaev A.V. Express control of oil to reduce wear and prevent accidents of motors. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. Seriya Khimicheskie tekhnologii* [Mining informational and analytical bulletin. Series Chemical technologies], 2009, vol. 16, no. 12, pp. 420–428. (In Russ.) .

5. Myalo O.V., Myalo V.V., Demchuk E.V. Using the drop test method for the theoretical study of changes in the parameters of motor oil. *Vestnik Omskogo GAU. Protsessy i mashiny agroinzhenernykh sistem* [Bulletin of the Omsk State Agrarian University. Processes and machines of agro-engineering systems], 2021, no. 3, pp. 137–145. (In Russ.) .

6. Sinyavskii N.Ya., Ivanov A.M., Kostrikova N.A. Analysis of particles of wear products in waste marine motor oils. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intellectual Technologies], 2021, no. 4–4 (54), pp. 44–48. (In Russ.) .

7. Astsaturov Yu.G., Semenov V.V., Khanzhonkov Yu.B. Development of an optoelectronic device for analyzing the contamination of internal combustion engine motor oil with dispersed particles. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 2. Available at: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2376 (accessed 22.04.2026). (In Russ.) .

8. Semenov V.V., Khanzhonkov Yu.B., Astsaturov Yu.G. *Sposob analiza zagryaznennosti motornogo masla dvigatelya vnutrennego sgoraniya dispersnymi chastitsami* [Method for analyzing the contamination of internal combustion engine motor oil with dispersed particles]. Patent RF, no. 2498269, 2013.

9. Semenov V.V., Khanzhonkov Yu.B., Astsaturov Yu.G., Suchkov P.V. *Ustroistvo analiza zagryaznennosti motornogo masla dvigatelya vnutrennego sgoraniya dispersnymi chastitsami* [Device for analyzing the contamination of internal combustion engine motor oil with dispersed particles]. Patent RF, no. 2583344, 2016.

10. Semenov V.V., Khanzhonkov Yu.B., Astsaturov Yu.G. *Sposob analiza zagryaznennosti motornogo masla dvigatelya vnutrennego sgoraniya dispersnymi chastitsami* [Method for analyzing the contamination of internal combustion engine motor oil with dispersed particles]. Patent RF, no. 2583351, 2016.

11. Semenov V.V., Astsaturov Yu.G., Khanzhonkov Yu.B. Development of an optoelectronic device for motor oil quality control. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, no. 3. Available at: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3732 (accessed 22.04.2026). (In Russ.).

12. Semenov V.V., Astsaturov Yu.G., Khanzhonkov Yu.B., Kochkovaya N.V. Development of a combined device for assessing the quality of motor oils. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2018, no. 4. Available at: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5378 (accessed 22.04.2026). (In Russ.) .

Astsaturov Yu.G., Galushkin D.N., Rementsov A.V., Moisia D.L.

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF THE DEVICE FOR EXPRESS DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF MOTOR OILS

Annotation. *The article discusses the current problem of transition from routine maintenance of internal combustion engines to a strategy of replacing lubricants based on their actual technical condition. The necessity of prompt monitoring of physical and chemical parameters of motor oils subjected to intensive thermo-oxidative destruction and contamination with wear products is substantiated. An upgraded design of a portable device for express diagnostics is proposed, which combines photometric and capacitive analysis methods. Special attention is paid to minimizing the errors caused by the temperature difference between the reference and the studied media, by integrating NTC thermistors into the measuring circuit. The paper describes the device's algorithm, which is based on the differential measurement principle and software signal processing by a microcontroller, allowing for high-precision identification of critical waterlogging or sludge accumulation.*

Keywords: *Engine oil, express diagnostics, photometric method, capacitive method, dielectric permeability, optical density, temperature sensor, technical condition of the internal combustion engine.*

Сведения об авторах:

Асцатуров Юрий Георгиевич
Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты, Россия,
доцент кафедры «Автомобильный транспорт и технологическое оборудование»,
канд. техн. наук, доцент,
e-mail: astur73@yandex.ru.

Галушкин Дмитрий Николаевич
Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты, Россия,
заведующий кафедрой «Радиоэлектронные и электротехнические системы и комплексы»,
доктор техн. наук, доцент,
e-mail: dmitrigall@yandex.ru.

Ременцов Александр Владимирович
Институт технологий (филиал) ДГТУ в г. Волгодонске, Россия,
старший преподаватель кафедры «Экономика и управление в технических системах»,
e-mail: rementsov2010@yandex.ru.

Мойся Дмитрий Леонидович
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Донецкая академия транспорта, Россия,
заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация автомобилей»,
канд. техн. наук,
e-mail: dmitrymoisia@dat-dn.ru

Information about the authors:

Astsaturov Yuri Georgievich
Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of DSTU in Shakhty, Russia,
Associate Professor of the Department of Automotive Transport and Technological Equipment,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: astur73@yandex.ru.
Galushkin Dmitry Nikolaevich
Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of DSTU in Shakhty, Russia,
Head of the Department of Radio-Electronic and Electrical Systems and Complexes,
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: dmitrigall@yandex.ru.
Rementsov Alexander Vladimirovich
Institute of Technology (branch) of DSTU in Volgodonsk, Russia,
Senior Lecturer at the Department of Economics and Management in Technical Systems,
e-mail: rementsov2010@yandex.ru.
Moisia Dmitry Leonidovich
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education
Donetsk Academy of Transport, Russia,
Head of the Department of Technical Operation of Vehicles,
Candidate of Technical Sciences,
e-mail: dmitrymoisia@dat-dn.ru.

УДК 621.877.3

Корытов М.С., Щербаков В.С., Кашапова И.Е.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МОДЕЛЕЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ СИДЕНЬЯ НАЗЕМНОЙ МАШИНЫ

Аннотация. *Защита операторов наземных транспортно-технологических машин от вибраций и динамических воздействий остается актуальной задачей. Виброзащитные системы сидений являются важным элементом этой защиты. Математическое моделирование виброзащитных систем позволяет сократить трудоемкость и стоимость разработки, а также исследовать различные варианты и режимы работы. В работе проводится сравнительный анализ двух математических моделей пассивной виброзащитной системы сиденья оператора с одной степенью свободы: модели с кинематическим и модели с силовым возбуждением. Сравнение моделей проводилось при гармонических внешних воздействиях с частотой до двух Герц. Приводятся дифференциальные уравнения двух сравниваемых моделей. Приведены графики зависимостей показателя сравнения двух моделей в виде отношения максимальной абсолютной погрешности координаты сиденья к амплитуде колебаний координаты основания от коэффициентов жесткости и вязкого трения. При низких частотах относительная погрешность координаты сиденья упрощенной модели с силовым возбуждением, аналогом которой является колебательное звено второго порядка, приближается к ста процентам при больших значениях коэффициента вязкого трения. При приближении коэффициента вязкого трения к нулю модели становятся тождественными. То есть упрощенная модель с силовым возбуждением может заменить модель с кинематическим возбуждением при малых значениях коэффициента вязкого трения, что важно для практических приложений.*

Ключевые слова*: модели, виброзащитная система, сиденье, кинематическое возбуждение, колебательное звено.*

Постановка задачи

Защита от вибраций и динамических воздействий операторов наземных транспортно-технологических машин остается актуальной задачей. Возникающие в результате взаимодействия рабочих органов машин с обрабатываемой средой, например, грунтом, или при взаимодействии ходовых элементов машин с опорной поверхностью при перемещении, вибрации и динамические воздействия оказывают отрицательное влияние как на операторов, так и на производственный процесс [1, 2, 3, 4]. Операторы в длительной перспективе приобретают производственные заболевания в результате таких воздействий [5, 6, 7]. В краткосрочной перспективе у них снижается внимание, замедляется скорость реакций, падает работоспособность, что напрямую влияет на производительность выполняемых машинами работ, их точность и безопасность [8, 9, 10].

Виброзащитные системы сидений операторов являются одним из наиболее важных и необходимых элементов защиты операторов от вибраций и динамических воздействий, поскольку передают эти воздействия непосредственно оператору, являясь заключительным элементом в цепи такой передачи от источников воздействий [11, 12]. Их применение не исключает использования других элементов и мер виброзащиты, таких как виброзащитные опоры кабины [13, 14].

Математическое моделирование при разработке виброзащитных систем сидений выступает в качестве базового метода исследований, существенно уменьшающего их трудоемкость и стоимость, позволяющего выполнять анализ множества альтернативных вариантов, исследовать экстремальные или аварийные режимы работы сложного технического объекта [15, 16].

Виброзащитные системы сидений могут быть по конструкции пассивные, без использования внешней энергии, и активные, с использованием внешней энергии. При всех преимуществах активных систем, обладающих сравнительно большими возможностями, пассивные системы сохраняют свою актуальность и широко распространены ввиду их простоты, надежности, долговечности и невысокой стоимости [11, 17].

В настоящей работе поставлена задача провести сравнительный анализ двух базовых математических моделей пассивной виброзащитной системы с одной степенью свободы, которые могут быть использованы для исследования вертикальных колебаний массы сиденья с оператором на подвижном основании. Представляет интерес сравнение реакции на внешние воздействия модели с кинематическим возбуждением колебаний массы и аналогичной модели с силовым возбуждением колебаний. При этом целесообразно рассмотреть один из общепринятых видов воздействий, гармоническое внешнее воздействие на систему [17].

Основная часть

На рисунке 1, а приведена схема первой рассматриваемой математической модели колебаний виброзащищаемой массы сиденья с оператором на подвижном основании. Перемещение основания $z_{op}=f(t)$ не зависит от других параметров системы, в том числе от скоростей и координат виброзащищаемой массы m. То есть, в модели № 1 имеет место кинематическое возбуждение колебаний [17]. Она описывает вертикальные колебания сиденья с оператором, вызываемые вертикальными перемещениями основания сиденья, т.е. пола кабины, которые, в свою очередь, обусловлены перемещением машины по неровностям микрорельефа опорной поверхности. Данная модель была принята за эталонную.

Альтернативная математическая модель № 2, схема которой приведена на рисунке 1, б, описывает динамическую систему с силовым возбуждением колебаний виброзащищаемой массы. Подобные модели широко используются в том числе для математического моделирования пневмоколесных ходовых элементов наземных транспортно-технологических машин, виброзащитных опор и т.д. [2, 18]. Модель № 2 представляет интерес как более простая, широко распространенная и изученная по сравнению с первой моделью. Ее эквивалентом в операторной форме записи является базовый элемент теории автоматического управления – колебательное звено 2 порядка.

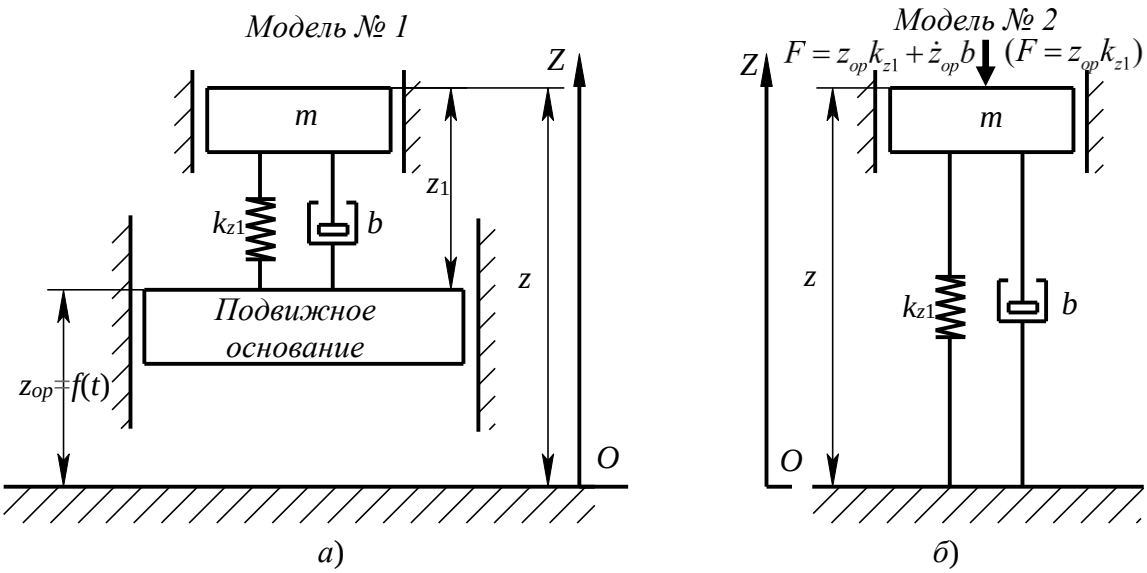


Рис. 1. Расчетные схемы моделей: а) с кинематическим возбуждением и подвижным основанием; б) с силовым возбуждением и неподвижным основанием

На схемах и в моделях приняты следующие обозначения: *OZ* – вертикальная ось неподвижной системы координат; *m* – виброзащищаемая масса сиденья с оператором; k_{z1} – коэффициент жесткости виброзащитного механизма системы; *b* – коэффициент вязкого трения виброзащитного механизма системы; *z* – вертикальная координата центра масс сиденья с оператором в неподвижной системе координат *OZ*; z_1 – в модели № 1 локальная координата смещения массы *m* относительно собственного равновесного положения при отсутствии внешних воздействий, т.е. смещения сиденья относительно его равновесного положения относительно собственного основания; z_{op} – вертикальная координата основания сиденья. При кинематическом возбуждении колебаний в модели № 1 z_{op} является заданной функцией времени, не зависимой от других параметров системы.

Для математической модели № 1 с кинематическим возбуждением и подвижным основанием, справедливо соотношение между координатами (рисунок 1, а):

$$z_1 = z - z_{op}\,. \tag{1}$$

В настоящей работе сравнение моделей выполнялось при одном из самых распространенных общепринятых воздействий – гармонических колебаниях основания сиденья:

$$z_{op} = A_{zop} \cdot \sin\left(t \cdot w\right), \tag{2}$$

где A_{zop} – амплитуда колебаний основания сиденья, м; $w=2\pi f$ – угловая частота колебаний основания сиденья; *f* – частота колебаний основания, Гц.

Математическая модель № 1 описывается следующим известным дифференциальным уравнением 2 порядка [17]:

$$m \cdot \ddot{z} + b \cdot \dot{z}_1 + k_{z1} \cdot z_1 = 0\,. \tag{3}$$

Точками здесь и далее обозначены производные координат по времени.

После замены локальной координаты деформации виброзащитного механизма z_1 на независимую координату z_{op} с учетом (1), уравнение (3) модели № 1 приобретает вид:

$$m \cdot \ddot{z} + b \cdot \dot{z} + k_{z1} \cdot z - b \cdot \dot{z}_{op} - k_{z1} \cdot z_{op} = 0\,. \tag{4}$$

Альтернативная математическая модель № 2 описывается также дифференциальным уравнением 2 порядка, но несколько иного вида:

$$m \cdot \ddot{z} + b \cdot \dot{z} + k_{z1} \cdot z = F\,, \tag{5}$$

где F – внешнее воздействие, осуществляемое непосредственно на массу m. Также отличие от первой модели заключается в том, что коэффициенты жесткости и вязкого трения умножаются на абсолютную координату сиденья z и ее первую производную, а не на локальную координату деформации виброзащитного механизма z_1.

Для того, чтобы координата z сиденья в модели № 2 при изменении координаты опоры z_{op} стремилась к значению последней аналогично модели № 1, в модели № 2 использовалось следующее выражение для вычисления силы F:

$$F = z_{op} \cdot k_{z1} + \dot{z}_{op} \cdot b . \tag{6}$$

То есть, сила F в модели № 2 не являлась независимой величиной, а привязывалась к значению условной координаты опоры z_{op} и ее первой производной.

После подстановки выражения (6) в дифференциальное уравнение (5), дифференциальное уравнение модели № 2 принимает вид, тождественный дифференциальному уравнению (4).

В то же время, при использовании в модели № 2 упрощенного выражения для вычисления силы F:

$$F = z_{op} \cdot k_{z1}, \tag{7}$$

в котором отсутствует производная условной координаты опоры $\dot{z}_{op}$, дифференциальное уравнение модели № 2 принимает вид, отличный от дифференциального уравнения (4):

$$m \cdot \ddot{z} + b \cdot \dot{z} + k_{z1} \cdot z - k_{z1} \cdot z_{op} = 0 . \tag{8}$$

В настоящей работе проводилось сравнение результатов решения дифференциальных уравнений (4) и (8). Они решались при помощи численного метода Рунге-Кутты. Для численного моделирования использовались программные реализации математических моделей на языке программирования MATLAB одноименной математической системы. Максимальный шаг интегрирования в функции MATLAB ode45 принимался равным 0.005 с.

В качестве одного из показателей сравнительной оценки точности упрощенной модели № 2 по сравнению с моделью № 1, принятой за эталонную, использовалась относительная погрешность координаты сиденья δz, выраженная в процентах и вычисляемая как отношение максимальной абсолютной погрешности Δz координаты сиденья z, к амплитуде A_{zop} колебаний координаты основания z_{op}:

$$\delta z = \frac{100 \cdot \Delta z}{A_{zop}}, \tag{9}$$

где Δz – максимальная абсолютная погрешность координаты сиденья.

Максимальная абсолютная погрешность координаты сиденья Δz вычислялась как разность амплитуд значений вертикальной координаты сиденья, полученных на модели № 1 и на модели № 2 в установившемся режиме колебаний, с середины до конца переходного процесса:

$$\Delta z = \max\left(\left|z_{mov\ base}(t) - z_{fix\ base}(t)\right|\right), \tag{10}$$

где $t \in \left[\frac{T_{end}}{2}; T_{end}\right]$; T_{end}=100 с – конечное время моделирования; $z_{mov\ base}(t)$ – значение координаты сиденья z в момент времени t, полученное на модели № 1; $z_{fix\ base}(t)$ – значение координаты сиденья z в момент времени t, полученное на модели № 2.

Вторым показателем сравнительной оценки точности модели № 2 выступала относительная погрешность ускорения сиденья δa, выраженная в процентах и вычисляемая как отношение максимальной абсолютной погрешности Δa ускорения сиденья $a = \ddot{z}$, к амплитуде A_{aop} ускорения колебаний основания:

$$\delta a = \frac{100 \cdot \Delta a}{A_{aop}}, \tag{11}$$

где Δa – максимальная абсолютная погрешность ускорения сиденья; A_{aop} – амплитуда колебаний ускорения основания сиденья, которая, при дифференцировании дважды по времени выражения (2) колебаний координаты основания, будет равна:

$$A_{aop} = A_{zop} \cdot w^2. \tag{12}$$

Максимальная абсолютная погрешность ускорения сиденья Δa вычислялась как разность амплитуд значений ускорения сиденья, полученных на модели № 1 и на модели № 2 в установившемся режиме колебаний:

$$\Delta a = \max\left(\left|a_{mov\ base}(t) - a_{fix\ base}(t)\right|\right), \tag{13}$$

где $t \in \left[\frac{T_{end}}{2}; T_{end}\right]$; $a_{mov\ base}(t)$ – значение ускорения сиденья $a = \ddot{z}$ в момент времени t, полученное на модели № 1; $a_{fix\ base}(t)$ – значение ускорения сиденья $a = \ddot{z}$ в момент времени t, полученное на модели № 2.

В описываемом вычислительном эксперименте постоянные параметры двух сравниваемых моделей принимали следующие значения: масса сиденья с оператором m=150 кг, амплитуда гармонических колебаний основания A_{zop}=0.05 м.

На рисунке 2, а в качестве примера приведены временные зависимости координаты сиденья z, полученной на двух сравниваемых моделях (рисунок 2, а), разности координат сиденья для двух моделей (рисунок 2, б), ускорения сиденья a, полученного на двух сравниваемых моделях (рисунок 2, в), разность ускорения двух моделей (рисунок. 2, г).

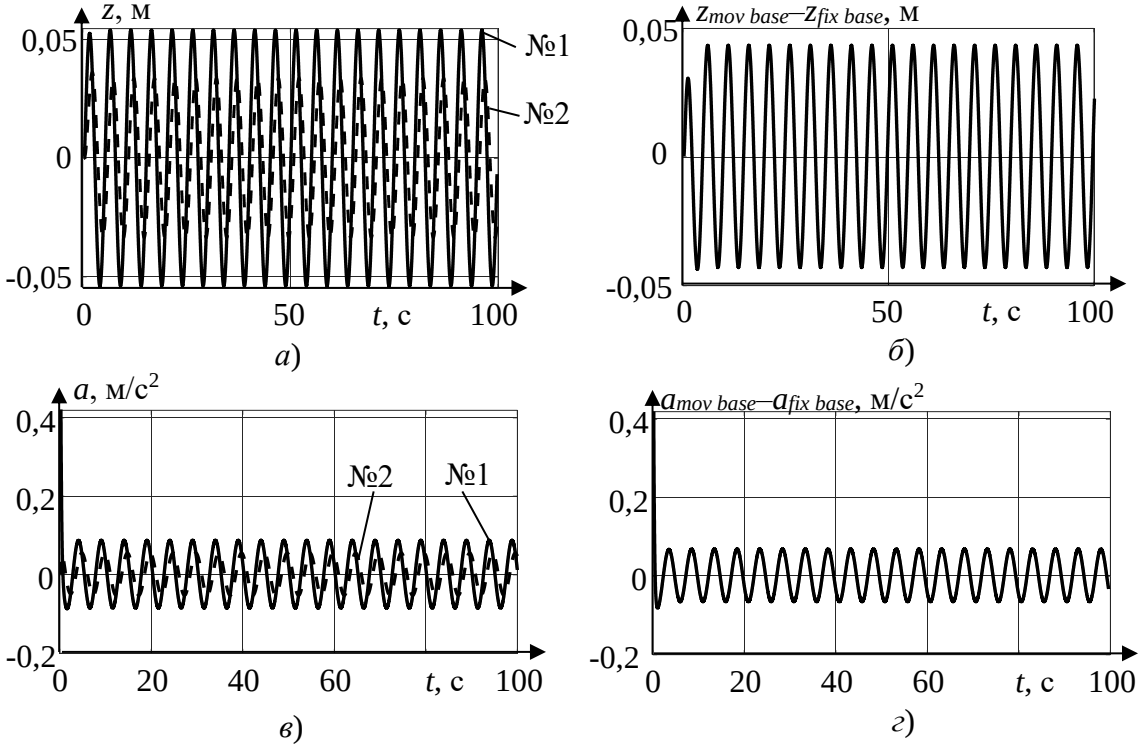


Рис. 2. Примеры временных зависимостей, полученные на двух исследуемых моделях: а) координата сиденья, две модели; б) разность значений координаты *z* двух моделей; в) ускорение сиденья, две модели; г) разность значений ускорения *a* двух моделей

Временные зависимости ни рисунке2 получены при частоте колебаний основания f=0,2 Гц, коэффициенте жесткости k_{z1}=1000 Н/м, коэффициенте вязкого трения b=1000 Н/(м/с).

Было установлено, что величина амплитуды колебаний основания A_{zop} не влияет на величину используемых относительных показателей δz (9) и δa (11). Дополнительно было установлено, что величины относительных показателей δz (9) и δa (11) равны друг другу при одинаковых значениях параметров моделей.

Был проведен вычислительный эксперимент, который заключался в серии запусков моделирования двух рассматриваемых моделей для варьирования трех параметров:

1. Частоты колебаний основания, принимавшей значения f= 0,2…2,0 Гц с шагом 0,2 Гц.

2. Коэффициента вязкого трения, принимавшего значения b=50…1000 Н/(м/с) с шагом 50 Н/(м/с).

3. Коэффициента жесткости, принимавшего значения k_{z1}=1000…20000 Н/м с шагом 1000 Н/м.

Функциональные зависимости относительной погрешности координаты сиденья от коэффициентов жесткости и вязкого трения при различных частотах гармонических колебаний величины внешнего воздействия приведены на рисунке 3.

При этом для обеих моделей в динамике, при отсутствии изменения координаты основания z_{op} имеет место стремление значения координаты сиденья к значению координаты основания (без учета возможной постоянной поправки на высоту): $z \to z_{op}$.

Обе рассматриваемые в работе модели широко используются при описании динамики различных конструктивных элементов наземных транспортно-технологических машин, в том числе виброзащитных опор сидений и кабин, ходовых элементов машин, и т. д. [2, 4, 17].

При рассматриваемых в настоящей работе низких частотах возмущающего внешнего воздействия, в диапазоне 0,2…2,0 Гц, относительная погрешность координаты сиденья δz приближается снизу к 100 %, не достигая этого значения. Это означает, что при определенных сочетаниях коэффициентов жесткости и вязкого трения в исследованных диапазонах, максимальная абсолютная погрешность координаты сиденья для модели с силовым возбуждением приближается по величине к амплитуде колебаний основания сиденья. Максимальная погрешность достигается при максимальных значениях коэффициента вязкого трения, а при приближении значений последнего к нулю, также стремится к нулю. Это объясняется указанной выше разницей в выражениях дифференциальных уравнений в виде слагаемого $-b \cdot \dot{z}_{op}$. При стремлении значения коэффициента b к нулю, данное слагаемое перестает оказывать влияние на характер движения, и дифференциальные уравнения двух моделей становятся тождественны друг другу.

Это задает область малых значений параметра системы $b \to 0$, в которой модель № 2 с силовым возбуждением колебаний и упрощенным описанием этого силового возмущения, может с достаточной для практических целей точностью заменить модель № 1 с кинематическим возбуждением.

Перспективы дальнейших научных исследований могут быть связаны с исследованием малых пороговых значений коэффициента вязкого трения, при превышении которого погрешность модели с силовым возбуждением становится недопустимо большой, при различных значениях прочих параметров моделируемой системы.

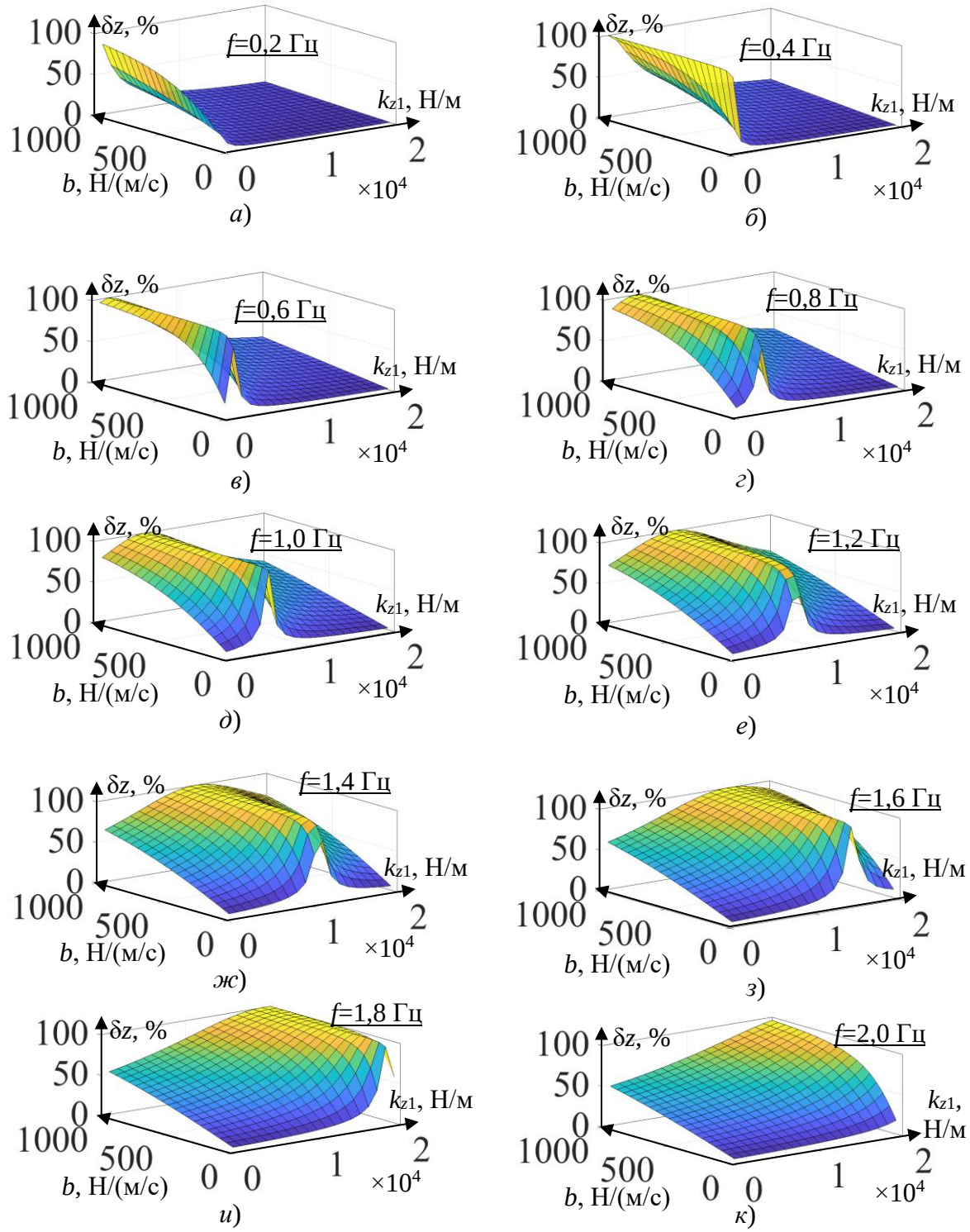


Рис. 3. Функциональные зависимости относительной погрешности координаты сиденья от коэффициентов жесткости и вязкого трения при различных частотах гармонических колебаний величины внешнего воздействия

Список литературы

1. Kang M., Han H., Park Y. Optimization of Cabin Mounting System for Tractor using a Genetic Algorithm // Journal of Biosystems Engineering. 2024. Vol. 49. Pp. 61–76. doi: 10.1007/s42853-024-00217-0.

2. Korchagin P.A., Teterina I.A., Letopolsky A.B. Effect of tire dynamic characteristics on vibration load at the operator's workplace // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441. Pp. 012097. doi: 10.1088/1742-6596/1441/1/012097

3. Seyedi M. Impact of train-induced vibrations on residents' comfort and structural damages in buildings // Journal of Vibration Engineering and Technologies. 2024. Vol. 12. Pp. 1961–1978. doi: 10.1007/s42417-024-01513-x

4. Tianyu L., Zhigui R., Xiaoping P., Dingjun C. et al. Dynamic digging force modeling and comparative analysis of backhoe hydraulic excavators // Measurement Science and Technology. 2024. Vol. 35. No. 3. Pp. 035025. doi: 10.1088/1361-6501/ad1814

5. Santos W., Rojas C., Isidoro R. et al. Efficacy of Ergonomic Interventions on Work-Related Musculoskeletal Pain: A Systematic Review and Meta-Analysis // Journal of Clinical Medicine. 2025. Vol. 14. Pp. 3034. doi: 10.3390/jcm14093034

6. Dhatrak S.V., Singh G., Prajapati S.S. Health Risk Assessment of Whole-Body Vibration in Indian Mining Operations // Mining, Metallurgy and Exploration. 2025. Vol. 42. Pp. 3249–3256. doi: 10.1007/s42461-025-01350-w

7. Dhatrak S.V., Shah I.A., Prajapati S.S. Determinants of discomfort from combined exposure to noise and vibration in dumper operators of mining industry in India // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2024. Vol. 21. No. 6. Pp. 389–396. doi: 10.1080/15459624.2024.2328296

8. Upadhyay R., Kumar A., Bhattacherjee A.A. Comprehensive Review of Whole-Body Vibration Exposure Assessment Among Heavy Earthmoving Equipment Operators in the Mining Industry // Mining, Metallurgy and Exploration. 2025. Vol. 42. Pp. 1389–1420. doi: 10.1007/s42461-025-01242-z

9. Jiang Z., Chang Y., Shehzad A. et al. Dynamics and vibration analysis of agricultural machinery systems: recent advances and future perspectives // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2026. Vol. 48. Pp. 67. doi: 10.1007/s40430-025-06024-8

10. Vikram P., Aruna M., Tripathi A.K. et al. Assessment of whole-body vibration in hydraulic rock breaker operators based on operating parameters // Discover Applied Sciences. 2025. Vol. 7. Pp. 866. doi: 10.1007/s42452-025-07308-3

11. Zhao Y., Zhang Y., Guo L. et al. Advances in machine learning-based active vibration control for automotive seat suspensions: A comprehensive review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2025. Vol. 231. Pp. 112645. doi: 10.1016/j.ymssp.2025.112645

12. Han G., Kim K.D., Ahn D.V. et al. Comparative Analysis of Tractor Ride Vibration According to Suspension System Configuration // Journal of Biosystems Engineering. 2023. Vol. 48. Pp. 69–78. doi: 10.1007/s42853-022-00165-7

13. Шайлиева М.М. Совершенствование конструкции амортизаторов кабин строительных машин для снижения вибронагруженности оператора // Строительные и дорожные машины. 2024. № 7-8. С. 22-35.

14. Kang M., Han H., Park Y. Optimization of Cabin Mounting System for Tractor using a Genetic Algorithm // Journal of Biosystems Engineering. 2024. Vol. 49. Pp. 61–76. doi: 10.1007/s42853-024-00217-0

15. Дик А.Б. Полуэмпирическая модель для описания стационарных характеристик шины // Вестник Донецкой академии транспорта. 2026. № 1. С. 70-83.

16. Мойся Д.Л., Бобров В.В. Нелинейная модель движения сочлененного автобуса и ее применение для оценки вписываемости в габаритный коридор // Вестник Донецкой академии транспорта. 2026. № 1. С. 58-69.

17. Корытов М.С., Щербаков В.С., Кашапова И.Е. Исследование виброзащитной системы сиденья оператора при полигармонических внешних воздействиях // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2024. № 3. С. 179-187. doi: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-179-187

18. Бурьян Ю.А., Ситников Д.В., Бурьян А.А. Система виброизоляции с активным динамическим гасителем колебаний с управлением по виброперемещению и виброскорости // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2023. № 11. С. 84-93. doi: 10.26160/2541-8637-2023-11-84-93

References

1. Kang M., Han H., Park Y. Optimization of Cabin Mounting System for Tractor using a Genetic Algorithm. Journal of Biosystems Engineering. 2024, vol. 49. pp. 61–76. doi: 10.1007/s42853-024-00217-0.

2. Korchagin P.A., Teterina I.A., Letopolsky A.B. Effect of tire dynamic characteristics on vibration load at the operator's workplace. Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1441. pp. 012097. doi: 10.1088/1742-6596/1441/1/012097

3. Seyedi M. Impact of train-induced vibrations on residents' comfort and structural damages in buildings. Journal of Vibration Engineering and Technologies. 2024, vol. 12. pp. 1961–1978. doi: 10.1007/s42417-024-01513-x

4. Tianyu L., Zhigui R., Xiaoping P., Dingjun C. et al. Dynamic digging force modeling and comparative analysis of backhoe hydraulic excavators. Measurement Science and Technology. 2024, vol. 35. no. 3. pp. 035025. doi: 10.1088/1361-6501/ad1814

5. Santos W., Rojas C., Isidoro R. et al. Efficacy of Ergonomic Interventions on Work-Related Musculoskeletal Pain: A Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of Clinical Medicine. 2025, vol. 14. pp. 3034. doi: 10.3390/jcm14093034

6. Dhatrak S.V., Singh G., Prajapati S.S. Health Risk Assessment of Whole-Body Vibration in Indian Mining Operations. Mining, Metallurgy and Exploration. 2025, vol. 42. pp. 3249–3256. doi: 10.1007/s42461-025-01350-w

7. Dhatrak S.V., Shah I.A., Prajapati S.S. Determinants of discomfort from combined exposure to noise and vibration in dumper operators of mining industry in India. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2024, vol. 21. no. 6. pp. 389–396. doi: 10.1080/15459624.2024.2328296

8. Upadhyay R., Kumar A., Bhattacherjee A.A. Comprehensive Review of Whole-Body Vibration Exposure Assessment Among Heavy Earthmoving Equipment Operators in the Mining Industry. Mining, Metallurgy and Exploration. 2025, vol. 42. pp. 1389–1420. doi: 10.1007/s42461-025-01242-z

9. Jiang Z., Chang Y., Shehzad A. et al. Dynamics and vibration analysis of agricultural machinery systems: recent advances and future perspectives. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2026, vol. 48. pp. 67. doi: 10.1007/s40430-025-06024-8

10. Vikram P., Aruna M., Tripathi A.K. et al. Assessment of whole-body vibration in hydraulic rock breaker operators based on operating parameters. Discover Applied Sciences. 2025, vol. 7. pp. 866. doi: 10.1007/s42452-025-07308-3

11. Zhao Y., Zhang Y., Guo L. et al. Advances in machine learning-based active vibration control for automotive seat suspensions: A comprehensive review. Mechanical Systems and Signal Processing. 2025, vol. 231. pp. 112645. doi: 10.1016/j.ymssp.2025.112645

12. Han G., Kim K.D., Ahn D.V. et al. Comparative Analysis of Tractor Ride Vibration According to Suspension System Configuration. Journal of Biosystems Engineering. 2023, vol. 48. pp. 69–78. doi: 10.1007/s42853-022-00165-7

13. Shaylieva M.M. Improving the design of shock absorbers for construction machine cabins to reduce operator vibration. Stroiteljnihe i dorozhnihe mashinih [Construction and road machinery], 2024, no. 7-8, pp. 22–35. (in Russian).

14. Kang M., Han H., Park Y. Optimization of Cabin Mounting System for Tractor using a Genetic Algorithm. Journal of Biosystems Engineering. 2024, vol. 49. pp. 61–76. doi: 10.1007/s42853-024-00217-0

15. Dik A.B. Semi-empirical model for describing stationary tire characteristics. Vestnik Doneckoyj akademii transporta [Bulletin of the Donetsk Academy of Transport], 2026, no. 1, pp. 70–83. (in Russian).

16. Moysya D.L., Bobrov V.V. Nonlinear model of articulated bus motion and its application to assessing its fit within a designated corridor. Vestnik Doneckoyj akademii transporta [Bulletin of the Donetsk Academy of Transport], 2026, no. 1, pp. 58–69. (in Russian).

17. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Kashapova I.E. Study of the vibration protection system of the operator's seat under polyharmonic external influences. Nauchno-tekhnicheskiyj vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University], 2024, no. 3, pp. 179–187. doi: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-179-187 (in Russian).

18. Buryan Yu.A., Sitnikov D.V., Buryan A.A. Vibration isolation system with an active dynamic vibration damper with vibration displacement and vibration velocity control. Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika [Mechatronics, Automation and Robotics], 2023, no. 11, pp. 84–93. doi: 10.26160/2541-8637-2023-11-84-93 (in Russian).

Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Kashapova I.E.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO MODELS OF A GROUND VEHICLE SEAT VIBRATION PROTECTION SYSTEM

Abstract*. Protecting ground-based transport and technological vehicle operators from vibration and dynamic impacts remains a pressing issue. Vibration-attenuating seat systems are a crucial element of this protection. Mathematical modeling of vibration-attenuating systems reducing the development time and cost, as well as exploring various options and operating modes. This paper provides a comparative analysis of two mathematical models of a passive vibration-attenuating system for an operator seat with one degree of freedom: a model with kinematic excitation and a model with force excitation. The models were compared under harmonic external influences with a frequency of up to two hertz. The differential equations of the two compared models are presented. Graphs are provided for the dependence of the comparison index of the two models as the ratio of the maximum absolute error of the seat coordinate to the oscillation amplitude of the base coordinate on the stiffness and viscous friction coefficients. At low frequencies, the relative error of the seat coordinate of the model with force excitation, whose analogue is a second-order oscillatory link, approaches one hundred percent at high values of the viscous friction coefficient. As the viscous friction coefficient approaches zero, the models become identical. This means that the force-driven model can replace the kinematic-driven model at low viscous friction coefficients, which is important for practical applications.*

Keywords*: models, vibration protection system, seat, kinematic excitation, oscillatory link.*

Сведения об авторах:

Корытов Михаил Сергеевич
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия,
профессор,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: **kms142@mail.ru**

Щербаков Виталий Сергеевич
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия,
профессор,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: **sherbakov_vs1947@mail.ru**

Кашапова Ирина Евгеньевна
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия,
ст. преподаватель,
кандидат технических наук,
e-mail: **kashapova_ie@mail.ru**

Information about the authors:

Mikhail Sergeevich Korytov
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia,
Professor,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: kms142@mail.ru

Vitaly Sergeevich Shcherbakov
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia,
Professor,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: sherbakov_vs1947@mail.ru

Irina Evgenievna Kashapova
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia,
Senior Lecturer,
Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: kashapova_ie@mail.ru

УДК 622.673: 14.001.6

Савенко Э.С., Попов Д.В., Матвиенко С.А.

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОВ НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИИ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Аннотация. *В статье рассмотрены вопросы эксплуатации подъемной машины с учетом параметров тяжело нагруженных элементов и их динамических процессов, вызванных периодически изменяющимися или повторяющимися по некоторому закону силовыми факторами, что обуславливает их долговечность. Рассмотрена трансмиссия подъемной машины как совокупность передаточных силовых и кинематических звеньев, являющихся одними из таких элементов. Определены статические усилия в двух ветвях канатов в точках набегания на барабан и сбегания с барабана, и соответствующая квазидинамическая поперечная нагрузка, воспринимаемая валом машины с учетом крутящего момента, действующего на вал однобарабанной машины. Предложено теоретическое обоснование расчётных величин силовых факторов в трансмиссии подъёмных машин в наиболее тяжелых периодах работы, какими являются переходные и нестационарные режимы работы.*

Ключевые слова: *Подъемная машина, статические усилия, ветви канатов, трансмиссионная цепь, торсионные элементы, главный вал, редуктор, крутящий момент, надёжность, долговечность, разрушение, усталость, наработка, отказ.*

Постановка задачи

Эксплуатация подъемной машины связана с динамическими нагрузками на основные элементы привода и барабана при различных переходных, нестационарных и установившихся режимах работы машины, что обуславливает долговечность работы подъемной установки [1].

Трансмиссия подъемной машины, как совокупность передаточных силовых и кинематических звеньев, является одним из таких элементов и занимает среди прочих особое «положение», так как является довольно дорогостоящей, трудно контролируемой, практически незащищенной и зачастую не восстанавливаемой механической системой. И наряду с этим, трансмиссия в такой же мере «ответственна» за безопасность эксплуатации подъемной установки, как и другие ее силовые элементы.

Анализ последних исследований

До сравнительно недавнего времени проблема усталостной долговечности и надежности трансмиссии подъемных машин представляла собой в определенном смысле некую абстракцию, так как при существовавшей плановой замене машин, основанной на сроках их амортизации, в большинстве случаев списание какой-либо конкретной машины производилось при заведомо большом ее фактическом ресурсе долговечности. Довольно редкие, спорадического характера, случаи разрушения главного вала машины или выхода из строя редукторных пар обосновывались экспертами либо как не выявленными дефектами заготовки или погрешностями изготовления, либо как

следствием несоблюдения строительных норм монтажа, и такого рода аварии, естественно, не становились и не могли стать предметом научных исследований [2, 3].

В настоящее время принцип назначения срока службы подъемных машин претерпел коренные изменения – их технический ресурс или долговечность теперь определяется практически повсеместно по техническому состоянию на основании инструментальных обследований и дефектоскопии специализированными организациями, что позволяет сэкономить значительные материальные средства.

Вместе с тем, современные представления об усталостной прочности металлов позволяют с достаточной для инженерных целей точностью «предсказать» долговечность любого элемента машины, подверженного действию циклически изменяющихся силовых факторов, если для таковых является известным закон их изменения во времени, их минимальные и максимальные значения в различных переходных, нестационарных и установившихся режимах эксплуатации. В свете сказанного, операции прогнозирования и действия эксперта по определению остаточного ресурса подъемной машины могут быть поставлены на научную основу, а сам назначаемый при этом ресурс будет настолько же достоверным, насколько достоверной является разработанная методология вычисления параметров цикла нагружения элементов трансмиссии.

Цель работы

В ней выражается теоретическое обоснование расчетных величин силовых факторов в трансмиссии подъемных машин в наиболее тяжелых периодах работы, какими являются переходные и нестационарные режимы, с дальнейшим использованием полученных результатов в практике проектирования и для установления прогнозных ресурсов сроков службы.

Основная часть

Теоретические основы расчета современных подъемных установок базируются на фундаментальных работах основоположников и их учеников: Федорова М. М., Шклярского Ф. М., Динника А. Н., Давыдова Б. Л., Еланчика Г. М., Нестерова П. П., Федоровой З. М., Потураева В. Н., Флоринского Ф. В., Савина Г. Н., Голубенцева А. Н., Глушко М. Ф., Горошко О. А., Гаркуши Н. Г., Дворникова В. И., Самуси В. И., Ильина С. Р., Виноградова Б.В., Траубе Е. С. и др.

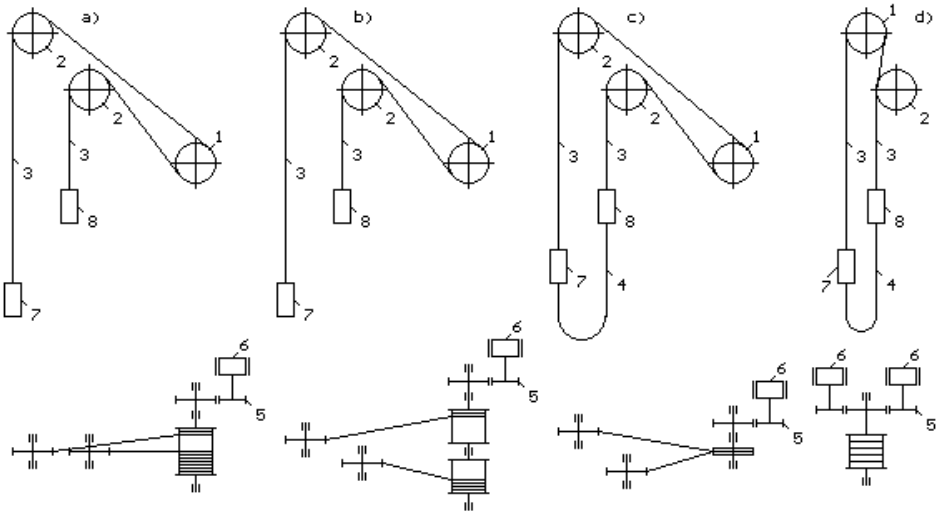
Подъемная машина (ПМ), предназначенная для транспортирования по вертикальному стволу людей и грузов, объединяет в себе редуктор, барабаны, тормозные устройства, электропривод и другие механизмы (подъемные машины в наклонных стволах здесь не рассматриваются). В настоящее время применяются несколько типов подъемных машин, которые классифицируются по следующим признакам:

а) ПМ барабанного типа (рисунок 1. a, b);

б) ПМ со шкивами трения (рисунок 1. c, d).

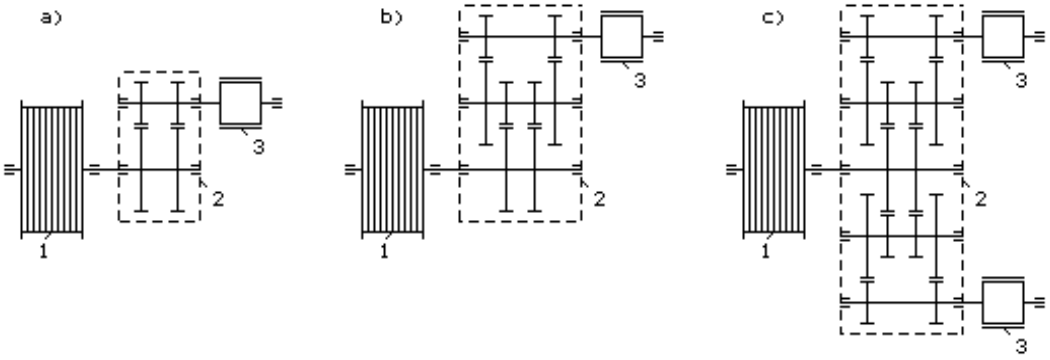
ПМ с быстроходными двигателями оснащаются двухприводными или одноприводными редукторами (по количеству двигателей). ПМ с тихоходными двигателями постоянного тока – безредукторные. Известны также машины со встроенными в барабан двигателями [4].

Редуктор, являющийся связующим звеном между двигателем и барабаном, в зависимости от числа оборотов двигателя и требуемой скорости вращения барабана, может быть одноступенчатым и двухступенчатым редуктором (рисунок 2). Соединения ротора двигателя с редуктором и выходного вала редуктора с барабаном осуществляются с помощью зубчатых муфт [5,6].



1 – барабан, 2 – шкивы направляющие и отклоняющие, 3 – подъемные канаты, 4 – канат уравновешивающий, 5 – редуктор, 6 –электродвигатель

Рис. 1. Принципиальные схемы подъемных установок: a) машина с одним барабаном, b) машина с двумя барабанами, c) машина оборудована шкивом трения, d) машина с двумя канатами



1 – барабан, 2 – редуктор, 3 – электродвигатель

Рис. 2. Принципиальные схемы редукторов подъемных машин: a) редуктор одноступенчатый, b) редуктор двухступенчатый, c) редуктор двухступенчатый с двумя входами

При исследовании динамики трансмиссии подъемных машин нельзя не обратить внимания на следующее немаловажное обстоятельство: несмотря на солидный арсенал разработанных методов и полученных результатов, расчет главного вала и редуктора все еще основывается на так называемой квазидинамической концепции, согласно которой нагрузки на вал принимаются равными статическим, умноженными на коэффициенты «динамичности»

$$K_{1,2} = 1 \pm \frac{R_б}{g} \cdot \frac{d\omega}{dt} = 1 \pm \frac{a}{g}, \qquad (1)$$

где знаки $\pm$ соответствуют индексам 1 и 2; $R_б$ – радиус барабана, $м$; $\omega(t)$ – частота вращения барабана, принимаемая равной частоте вращения ротора электродвигателя, деленной на передаточное число редуктора, c^{-1}; a и g – абсолютная величина

ускорения (замедления) машины, приведенная к окружности навивки каната на барабан, и соответственно ускорение свободного падения, $м/с^2$.

Так, если $F_{1ст}$ и $F_{2ст}$ – статические усилия в двух ветвях канатов в точках набегания на барабан и сбегания с барабана, то соответствующая квазидинамическая поперечная нагрузка, воспринимаемая валом машины, есть

$$F_{дин}^{к} = K_1 F_{1ст} + K_2 F_{2ст} = \left(F_{1ст} + F_{2ст}\right) + \left(F_{1ст} - F_{2ст}\right)\frac{a}{g}, \qquad (2)$$

а квазидинамический крутящий момент, действующий на вал, например, однобарабанной машины, определяется из выражения

$$\frac{M_{дин}^{к}}{R_б} = K_1 F_{1ст} - K_2 F_{2ст} = \left(F_{1ст} - F_{2ст}\right) + \left(F_{1ст} + F_{2ст} - P_б\right)\frac{a}{g}, \qquad (3)$$

где $P_б = m_б g$ – вес барабана машины ($m_б -$ масса барабана, приведенная к окружности навивки каната).

Проекция $F_{дин}^{к}$ на какую-либо главную ось поперечного сечения вращающегося вала есть

$$\tilde{F}_{дин}^{к} = F_{дин}^{к} \cos\varphi(t), \qquad (4)$$

где $\varphi(t)$ связано с $\omega(t)$ посредством очевидного соотношения

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t)dt. \qquad (5)$$

В зависимости от конструкции барабана и способа укладки каната на барабан (навивка или фрикционная перемотка) усилие $\tilde{F}_{дин}^{к}$ (2) распределяется определенным способом по местам сопряжения ступиц барабана с валом машины, и этим самым определяется расчетная схема вала на прочность и долговечность, а на основании квазидинамического момента $M_{дин}^{к}$ (3) строится расчет зубчатых передач редуктора [7].

Таким образом, истинные динамические нагрузки, в конечном счете, заменены квазидинамическими усилиями с помощью различного рода коэффициентов, якобы учитывающих динамичность системы и ее запасы прочности. Как свидетельствует опыт, такой методологический подход почти всегда чреват двумя крайностями – либо проектируемая машина оказывается неоправданно металлоемкой, и поэтому дорогой и неудобной в работе, либо, несмотря на завышенные запасы, машина или ее какая-нибудь ответственная деталь вопреки всем ожиданиям преждевременно выходит из строя. Последнее особенно характерно в тех случаях, когда «старый» метод расчета переносится на машины, предназначенные для работы в «новых» условиях эксплуатации.

В основу разрабатываемых математических моделей должен быть положен методологический принцип системного подхода. Иными словами, трансмиссия машины рассматривается в органической связи с «граничащими» с ней другими составными элементами подъемной установки – канатами, следовательно, и сосудами, с одной стороны и электроприводом и тормозной системой – с другой.

Системный подход, обуславливающий в определенном смысле автономность модели подъемной установки, вместе с тем дает возможность исключить необходимость

рассмотрения «входных и выходных» внешних силовых факторов, формирующих динамическое состояние трансмиссии.

Волновые процессы, происходящие в канатах, неизбежно оказывают влияние на движение барабана машины, а это в свою очередь является существенным фактором, формирующим динамику элементов редукторных пар. Поэтому, говоря о динамике трансмиссии, неизбежно подразумевается ее органическая связь с динамическими процессами в канатах как в упругой континуальной одномерной среде с распределенной по длине массой.

Динамическое состояние трансмиссии также зависит от электродинамических процессов, происходящих в статорных и роторных электрических цепях двигателя. По этой причине необходимо считаться с тем обстоятельством, что формирование динамического движущего момента электропривода происходит в зависимости от текущего состояния в целом всей системы – подъемных сосудов, канатов, машины, элементов трансмиссии и ротора двигателя.

При построении математических моделей трансмиссии подъемной машины будем руководствоваться следующими рабочими гипотезами и концепциями.

1. Все головные канаты многоканатной машины считаются некрутящимися, совершают лишь продольные перемещения вдоль своих осей и приведены к одному канату равноценной массы, продольной жесткости и диссипативной характеристики.

2. Массы ветвей уравновешивающих канатов приведены к соответствующим массам подъемных сосудов, совершающих одномерное движение в направлении осей присоединенных к ним головных канатов.

3. Массы отклоняющих и копровых шкивов (если таковые имеются) приведены к массе подъемной машины.

4. Несмотря на специфику структуры редуктора, характеризующейся двухрядным расположением косозубых шестерен и колес (рисунок 3), предполагается однорядное расположение эквивалентных им элементов.

5. Соединения ротора двигателя с редуктором, шестерни и колеса промежуточной ступени редуктора, выходного вала редуктора с барабаном представляют собой упругие безынерционные торсионные связи, характеристики которых являются линейными и стабильными во времени.

6. Барабан машины, ротор двигателя, вращающиеся шестерни и колеса редуктора считаются бесструктурными инерционными элементами, каждый из которых характеризуется моментом инерции относительно оси вращения, и может совершать лишь угловые перемещения; массы соединительных муфт считаются присоединенными к соответствующим дискретным массам барабана машины и ротора электродвигателя.

7. Редуктор подъемной машины считается *переборным*, то есть предполагается отсутствие явлений кромочного и серединного ударов зубьев, в связи с чем последние принимаются абсолютно жесткими.

8. Редуктор подъемной машины считается неподпружиненным.

Обоснованность принятых концепций зиждется на результатах многочисленных исследований, выполненных различными авторами на упрощенных моделях в рамках так называемой *изолирующей абстракции*, когда тот или иной динамический процесс в каком-либо элементе общей системы рассматривается в отрыве и без учета взаимовлияния с остальными.

Например, ряд теоретических работ [8,9], посвященных изучению влияния крутильных колебаний канатов на динамические продольные усилия, убедительно свидетельствуют о возможности пренебречь фактором крутимости канатов, тем более, когда ставится цель исследования динамики трансмиссии (допущение **1**).

Возможность упрощенной схематизации уравновешивающих канатов (допущение **2**) подтверждается, например, результатами работы [10]. Здесь показано, что в уравновешивающих канатах, продольная жесткость которых соизмерима с жесткостью головных (подъемных) канатов, и которые фактически, кроме собственного веса, не подвержены действию внешних силовых и инерционных факторов, реализуются высокочастотные продольные колебания малых амплитуд. Эти колебания, естественно, слабо влияют на динамические процессы в трансмиссии машины, особенно если учесть, что на их пути оказываются такие «мощные» инерционные фильтры как подъемные сосуды.

Физическая оправданность допущения **3** может быть в относительно малой массивности отклоняющих шкивов по сравнению с массивностью барабана машины (не более 10%), устанавливаемой в башенном копре. По этой причине нет смысла усложнять расчетную схему установки введением еще одной степени свободы, влияние которой заведомо ничтожно.

Допущение **4** может вызывать наибольшие сомнения, и оно к настоящему времени не имеет фактически никаких доводов «за» или «против», так как в предполагаемой формулировке в целом рассматриваемая задача ставится впервые. Возможно, это обстоятельство в какой-то части оправдывает принятую здесь схематизацию, требующую, естественно, уточнения в дальнейшем.

Допущения **5** и **6** являются обычными для задач динамики рассматриваемого типа, их физическая суть очевидна, и они не требуют специального обоснования.

Что же касается допущения **7**, то его приемлемость может быть обусловлена тем обстоятельством, что в данной статье не ставится задача динамической прочности зубьев шестерен и колес редуктора, а преследуется цель изучения динамики системы в связи с регулярно повторяющимся перекладыванием зазоров в зубчатых парах при различных условиях эксплуатации подъемной машины.

Особое внимание следует уделить концепции, оговоренной в допущении 8. Фундаментальные исследования динамики подпружиненных редукторов, выполненные проф. Нестеровым А.П.[8], свидетельствуют о том, что наличие, по крайней мере, одной степени свободы корпуса редуктора не в значительной степени влияет на характер крутильных колебаний вращающихся элементов редуктора, благодаря особой конструкции соединения быстроходного вала с первой ступенью редуктора. Разумеется, принятое допущение требует дальнейшего уточнения.

Таким образом, в силу принятых допущений 4-7, схематизация трансмиссии подъемной машины с двухступенчатым редуктором выглядит так, как это изображено на рисунке. 3.

Здесь $\varphi_3, \varphi_4, \varphi_4', \varphi_5, \varphi_5', \varphi_6$ – отсчитываемые от некоторых вполне определенных начальных, исходных состояний текущие углы поворота означенных на рисунке элементов; $J_3, J_4, J_4', J_5, J_5', J_6$ – их центральные моменты инерции, причем J_3 – момент инерции барабана машины, а J_6 – момент инерции ротора двигателя; K_{34}, K_{45}, K_{56} – торсионные жесткости элементов трансмиссии, причем K_{34} и K_{56} определяются с учетом жесткости соответствующих соединительных муфт редуктора с барабаном машины и двигателя с редуктором.

Предполагается, в силу допущения 6, что при угловых перемещениях означенных на рисунке элементов, их поперечные перемещения отсутствуют.

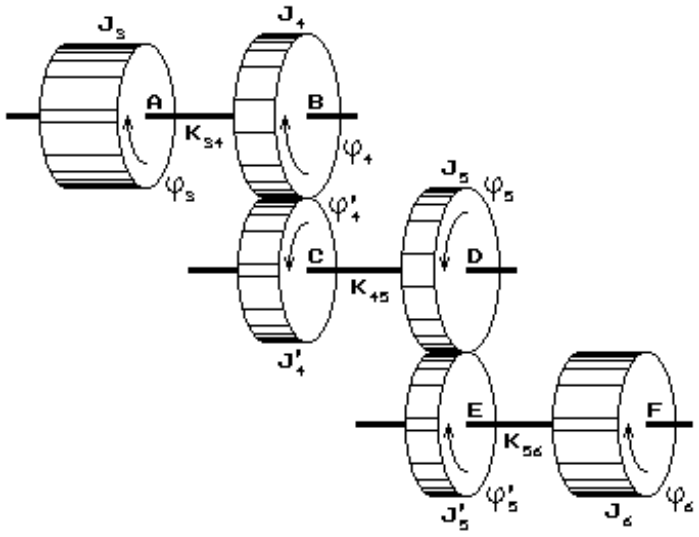


Рис. 3 Принципиальная схема связи ротора двигателя с барабаном машины посредством двухступенчатого редуктора

В совокупности с допущениями 1-3 принципиальная расчетная схема исследуемой механической системы «подъемные сосуды – канаты – трансмиссия машины» представлена на риунке. 4.

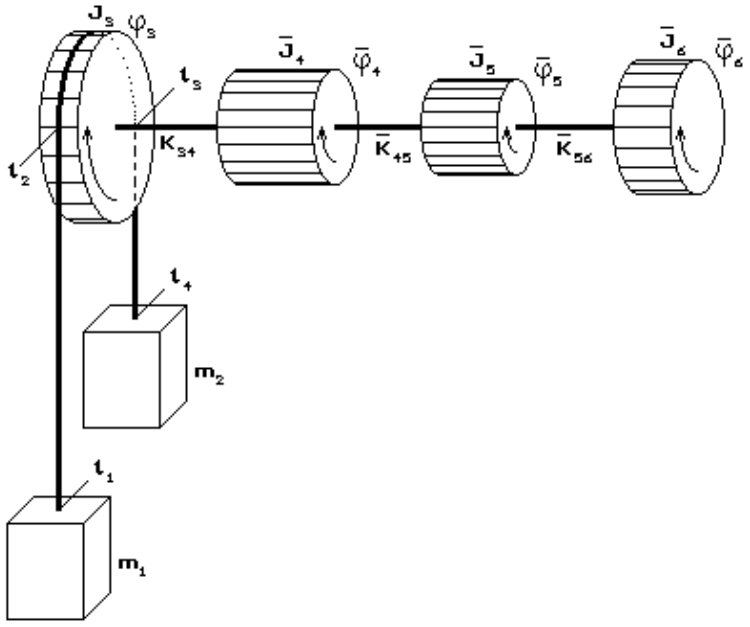


Рис. 4 Принципиальная расчетная схема подъемной установки с двухступенчатым редуктором

Здесь $m_1, m_2 -$ массы поднимаемого (первого) и опускаемого (второго) сосудов с учетом присоединенных масс отвесов уравновешивающих канатов в соответствии с гипотезой 2; $l_1, l_2, l_3, l_4 -$ так называемые лонгальные отметки или координаты, отсчитываемые от начального положения в стволе поднимающегося сосуда, при этом l_2 означает точку набегания каната на барабан, а $l_3 -$ точку сбегания. Очевидно, что в

неподвижной системе координат лонгальные координаты l_1, l_4 являются переменными, а l_2, l_3 – постоянными.

В связи с этим лонгальную эйлерову координату s, отмечающую положение произвольной точки каната, будем считать изменяющуюся от $s = l_1$ вверх до $s = l_2$ и далее от $s = l_3$ вниз до $s = l_4$.

В силу малости диаметра барабана по сравнению с длинами отвесов канатов допустимо принять $l_2 = l_3$, следовательно, $s \in [l_1, l_4]$. Таким образом, разности $l_2 - l_1$ и $l_4 - l_3$ являются длинами соответствующих ветвей головных канатов, изменяющиеся во времени, но при этом $l_2 - l_1 + l_4 - l_3 = L$ остается величиной постоянной, равной длине одного каната в навеске L.

Координату первого сосуда x_1 будем отсчитывать от его начального положения в нижней части ствола (в загрузке) и соответственно координату второго сосуда x_2 – от его начального положения в верхней части ствола (в разгрузке), как это изображено на рисунке 5. Здесь $h_Г$ – наименьшая длина отвеса головного каната при крайних положениях сосудов в разгрузке, h_y – наименьшая длина отвеса уравновешивающего каната при крайних положениях сосудов в загрузке, H – высота подъема. В принятых обозначениях разность лонгальных координат канатов $l_2 - l_1$ и $l_4 - l_3$ при движении подъемных сосудов изменяется в одном и том же интервале $[h_Г, H + h_Г]$.

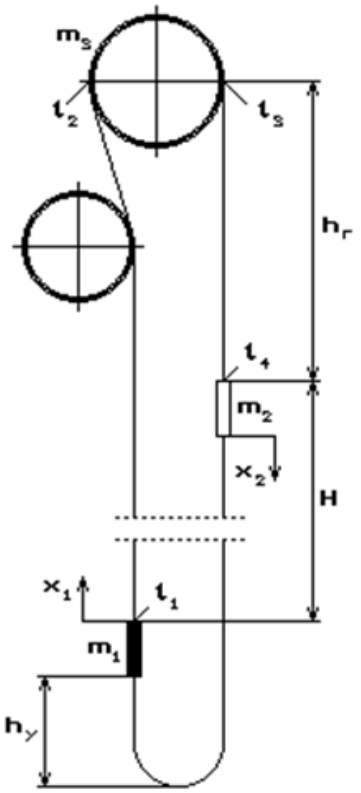


Рис. 5 Схема расположения сосудов в стволе

Тогда с учетом присоединенных масс отвесов уравновешивающих канатов можно записать

$$\left.\begin{aligned} m_1 &= m_c + m_{гр} + \wp[h_y + h_Г + H - (l_2 - l_1)], \\ m_2 &= m_c + \wp[h_y + h_Г + H - (l_4 - l_3)], \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

где m_c – масса порожнего сосуда, $m_{гр}$ – масса полезного груза (предполагается, что первый сосуд – груженый), $\wp$ – линейная масса уравновешивающих канатов. А так как $l_2 - l_1$ и $l_4 - l_3$ есть переменные величины, то и массы сосудов m_1 и m_2 будут переменными.

При отсутствии в системе подъема уравновешивающих канатов достаточно положить в (6) $\wp = 0$. Разности $l_2 - l_1$ и $l_4 - l_3$, представляющие собой длины ветвей канатов, алгебраически связаны между собой, так как (рисунок. 5)

$$(l_2 - l_1) + (l_4 - l_3) = 2h_Г + H,$$

и они однозначно определяют так называемое *квазистатическое положение* сосудов в стволе. В связи с этим представляется возможным эти разности выразить посредством безразмерной координаты ξ, определяемой соотношениями

$$\xi = \frac{h_Г + H - (l_2 - l_1)}{H} = \frac{(l_4 - l_3) - h_Г}{H}, \quad (7)$$

откуда видно, что в исходном положении сосудов, когда $l_2 - l_1 = h_Г + H$ и $l_4 - l_3 = h_Г$ координата $\xi = 0$, а в конечном положении, когда $l_2 - l_1 = h_Г$ и $l_4 - l_3 = h_Г + H$ координата $\xi = 1$. Таким образом, область определения безразмерной координаты ξ является закрытым интервалом $[0, 1]$.

Благодаря (7), формулы (6) приводятся к виду

$$\left.\begin{aligned} m_1 &= m_c + m_{гр} + \wp[h_y + \xi H], \\ m_2 &= m_c + \wp[h_y + H(1 - \xi)]. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

В приведенной на рисунке 4 схеме двухступенчатый редуктор условно идентифицирован вращающимися массами $\bar{J}_4$ и $\bar{J}_5$, которые имитируют соответственно тихоходную и быстроходную ступени редуктора.

В линейной схематизации, то есть в рамках концепции “плотного зацепления”, нет особой необходимости в подробном рассмотрении структуры редуктора, считающимся к тому же переборным (см. допущение 7). Поэтому представленную на рисунке 4 схему положим в основу для вывода линейных дифференциальных уравнений взаимодействия, полагая, что $\bar{J}_4$ и $\bar{J}_5$ – не просто «условные» массы, а именно являются моментами инерции вращающихся элементов редуктора, приведенными к тихоходному валу машины. При этом подразумевается, судя по обозначениям на рисунке 3, что

$$\bar{J}_4 = J_4 + i_{тих}^2 J_4', \quad \bar{J}_5 = i_{тих}^2 (J_5 + i_{быс}^2 J_5'), \quad \bar{J}_6 = i_{тих}^2 i_{быс}^2 J_6, \quad (9)$$

где $i_{тих}$ и $i_{быс}$ – передаточные отношения соответственно тихоходной и быстроходной ступеней, причем $i_{ред} = i_{тих}\, i_{быс}$ – общее передаточное отношение (число) редуктора.

Символы $\bar{K}_{45}$ и $\bar{K}_{56}$ на рис 4 означают «приведенные» торсионные жесткости промежуточного вала редуктора и быстроходного вала, соединяемого посредством муфты с валом ротора двигателя, что, сообразуясь с обозначениями на рисунке 3, определяется соотношениями

$$\overline{K}_{45} = i_{тих}^2 K_{45}, \quad \overline{K}_{56} = i_{тих}^2 i_{быс}^2 K_{56} = i_{ред}^2 K_{56}. \tag{10}$$

Обозначенные на рисунке 4 углы $\overline{\varphi}_4, \overline{\varphi}_5, \overline{\varphi}_6$ следует трактовать как аналоги углов поворота тихоходного колеса редуктора, колеса промежуточного вала и ротора двигателя, то есть (рисунок 3)

$$\overline{\varphi}_4 = \varphi_4, \quad \overline{\varphi}_5 = \frac{\varphi_5}{i_{тих}}, \quad \overline{\varphi}_6 = \frac{\varphi_6}{i_{тих}\, i_{быс}} = \frac{\varphi_6}{i_{ред}}. \tag{11}$$

В дальнейшем, в целях удобства выкладок, вместо моментов инерции, обозначенных на рисунке 4 как $J_3, \overline{J}_4, \overline{J}_5, \overline{J}_6$, в связи с определениями (7) будем рассматривать их эквивалентные приведенные массы, вычисляемые по формулам

$$m_3 = \frac{J_3}{R_б^2}, \quad m_4 = \frac{\overline{J}_4}{R_б^2}, \quad m_5 = \frac{\overline{J}_5}{R_б^2}, \quad m_6 = \frac{\overline{J}_6}{R_б^2}, \tag{12}$$

где $R_б -$ радиус барабана машины (точнее – радиус окружности навивки каната или радиус проточки желобов по футеровке канатоведущего шкива трения).

Суммарную массу подъемной установки, включающую дискретные массы m_k $(k = 1, 2, \ldots, 6)$, вычисляемые по формулам (10) и (12), а также общую распределенную массу канатов ρL, назовем приведенной к окружности навивки канатов массой подвижных элементов подъемной установки или просто *приведенной* массой:

$$m_{пр} = \rho L + \sum_{k=1}^{6} m_k \,. \tag{13}$$

По аналогии с (12) вместо торсионных жесткостей $K_{34}, \overline{K}_{45}, \overline{K}_{56}$, принимая во внимание (10), введем эквивалентные им в известном смысле коэффициенты линейных жесткостей

$$C_{34} = \frac{K_{34}}{R_б^2}, \quad C_{45} = \frac{\overline{K}_{45}}{R_б^2}, \quad C_{56} = \frac{\overline{K}_{56}}{R_б^2}. \tag{14}$$

Наконец, угловые перемещения вращающихся элементов, определяемые соотношениями (11), также приведем к линейным:

$$x_3 = \varphi_3 R_б, \quad x_4 = \overline{\varphi}_4 R_б, \quad x_5 = \overline{\varphi}_5 R_б, \quad x_6 = \overline{\varphi}_6 R_б, \tag{15}$$

что в совокупности с линейными перемещениями x_1 и x_2 двух сосудов образуют систему обобщенных координат рассматриваемой механической системы, совершающей одномерное движение в соответствии с рабочими гипотезами 1, 2, 6.

Выводы

- рассмотрено сочетание параметров подъемной машины в тяжело нагруженных элементах привода трансмиссии и машины в целом;
- рассмотрена задача динамического взаимодействия дискретных инерционных элементов подъемной машины, соединенных между собой упругими торсионными связями;
- разработана модель теоретического обоснования расчетных величин силовых факторов в трансмиссии подъемных машин в наиболее тяжелых периодах работы, какими являются переходные и нестационарные режимы,

- получены зависимости с составными элементами подъемной установки – канатами, следовательно, сосудами, электроприводом и тормозной системой.

Список литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 3 т. / И. В. Савельев. – М.: Лань, 2018. – Т. 1. – 436 с.

2. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний: учебник для вузов / С.П. Стрелков – 5е изд., стер.- Санкт – Петербург: Лань 2024 – 440с.

3. Венатовская Л.А. Исследование колебаний упругих тел методами компьютерной алгебры: Учебное пособие – СПб.: Издательство «Лань», 2018.-32с.

4. Гулиа Н.В. Детали машин: учебник для вузов / Н.В. Гулиа, В.Г. Клоков, С.А. Юрков; под общей редакцией Н.В. Гулиа – 4 е изд., стер. стер.- Санкт – Петербург: Лань 2025 – 416с.ил. – Текст: непосредственный

5. Константинов В.Ф. Детали машин и основы конструирования. Проектирование механического привода. Учебное пособие для СПО/ В.Ф. Константинов – 2 е изд., стер. стер.- Санкт – Петербург: Лань 2025 – 124с. ил. – Текст: непосредственный

6. Киселев Б.Р. Детали машин. Привод: учебник для СПО / Б.Р. Киселев. – 3 е изд., стер. стер.- Санкт – Петербург: Лань 2025 – 296 с.ил. – Текст: непосредственный

7. Детали механизмов и машин: учебник для вузов / Э.Я Живаго, Л.Н. Гудимова, И.С. Баклушина, Н.Н. Горелов: под редакцией Э.Я Живаго. - Санкт – Петербург: Лань 2024 – 292 с.ил. – Текст: непосредственный

8. Молотников В.Я. прикладная механика: Учебник для вузов / В.Я. Молотников, А.А Молотникова - Санкт – Петербург: Лань 2024 – 408 с.ил. – Текст: непосредственный

9. Ким Де Чан. Физика. Механика. Курс лекций с примерами решения задач: учебное пособие для вузов / Де Чан Ким, И.Г. Махро, Д.И. Левит. – 3 е изд., стер. стер.- Санкт – Петербург: Лань 2022 – 408 с.ил. – Текст: непосредственный

10. Тюняев А.В. Основы конструирования деталей машин. Валы и оси : учебно-методическое пособие / А.В. Тюняев. – 4 е изд., стер. стер.- Санкт – Петербург: Лань 2023 – 316с. ил. – Текст: непосредственный.

References

1. Savelyev, I. V. Course of General Physics: in 3 volumes / I. V. Savelyev. – Moscow: Lan, 2018. – Vol. 1. – 436 p.

2. Strelkov S.P. Introduction to the Theory of Oscillations: Textbook for Universities / S.P. Strelkov – 5th ed., ster.- Saint Petersburg: Lan 2024 – 440p.

3. Venatovskaya L.A. Research of Vibrations of Elastic Bodies by Methods of Computer Algebra: Textbook – SPb.: Publishing House "Lan", 2018.-32p.

4. Gulia N.V. Details of Machines: Textbook for Universities / N.V. Gulia, V.G. Klokov, S.A. Yurkov; under the general editorship of N.V. Gulia – 4th ed., ster. ster.- Saint Petersburg: Lan 2025 – 416p.il. – Text: direct.

5. Konstantinov V.F. Machine Parts and Fundamentals of Designing. Design of a Mechanical Drive. Textbook for Secondary Vocational Education/ V.F. Konstantinov – 2nd ed., ster. ster.- Saint Petersburg: Lan 2025 – 124p.il. – Text: direct.

6. Kiselev B.R. Machine Parts. Drive: Textbook for Secondary Vocational Education / B.R. Kiselev. – 3rd ed., ster. ster.- Saint Petersburg: Lan 2025 – 296 p.il. – Text: direct.

7. Details of Mechanisms and Machines: Textbook for Universities / E.Ya. Zhivago, L.N. Gudimova, I.S. Baklushina, N.N. Gorelov: edited by E.Ya. Zhivago. - Saint Petersburg: Lan 2024 – 292 p.il. – Text: direct.

8. Molotnikov V.Ya. Applied Mechanics: Textbook for Universities / V.Ya Molotnikov, A.A Molotnikova - St. Petersburg: Lan 2024 – 408 p.il. – Text: direct.

9. Kim De Chan. Physics. Mechanics. Course of Lectures with Examples of Solving Problems: Textbook for Universities / De Chan Kim, I.G. Makro, D.I. Levit. – 3rd ed., ster. ster.- Saint Petersburg: Lan 2022 – 408 p.il. – Text: direct.

10. Tyunyaev A.V. Fundamentals of Machine Parts Design. Shafts and Axles: Textbook and Methodological Guide / A.V. Tyunyaev. – 4th ed., ster. ster.- Saint Petersburg: Lan 2023 – 316 p.il. – Text: direct.

Savenko E.S., Popov D. V., Matvienko S.A.

LINEAR EQUATIONS OF TRANSMISSION DYNAMICS IN LIFTING MACHINES

Abstract. *The article discusses the issues of operating a lifting machine and ensuring its parameters based on heavily loaded elements and their dynamic processes caused by periodically changing or repeating force factors according to some law, which determines their durability. The transmission system of the lifting machine is considered as an assembly of power transfer and kinematic links that are one such element. Static efforts in two branches of ropes at the point of winding onto the drum and unwinding from it have been determined, along with corresponding quasi-dynamic transverse load perceived by the machine shaft taking into account the torque acting on the single-drum machine shaft. A theoretical justification for calculating the magnitudes of force factors in the transmission of lifting machines during the most severe periods of operation, namely transient and non-stationary modes, has been proposed.*

Keywords*: Lifting machine, static efforts, rope branches, transmission chain, torsional elements, main shaft, gearbox, torque, reliability, durability, failure, fatigue, running time, breakdown.*

Сведения об авторах:

Савенко Эдуард Станиславович
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиал федерального бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, РФ, доцент,
к.т.н., доцент,
e-mail: e.s.savenko@donnasa.ru

Попов Дмитрий Владимирович
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиал федерального бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, РФ, доцент,
к.т.н., доцент,
e-mail: d.v.popov@donnasa.ru

Матвиенко Сергей Анатольевич
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиал федерального бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, РФ, доцент,
к.т.н., доцент,
e-mail: s.a.matvienko@donnasa.ru

Information about the authors:

Savenko Eduard Stanislavovich
"Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture" — branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Makeevka, Russian Federation, associate professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: e.s.savenko@donnasa.ru

Popov Dmitry Vladimirovich
"Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture" — branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Makeevka, Russian Federation, associate professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: d.v.popov@donnasa.ru

Matvienko Sergey Anatolyevich
"Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture" — branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Makeevka, Russian Federation, associate professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: s.a.matvienko@donnasa.ru

УДК 625.161

Трунаев А.М.

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКА НА ПЕРЕЕЗДЕ С УЧЕТОМ ТИПА ОТКАЗА УСТРОЙСТВ СЦБ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА

Аннотация. *В статье предложена дифференцированная модель оценки риска на железнодорожном переезде, учитывающая тип отказа устройств сигнализации, централизации и блокировки, время реакции на неисправность, уровень автоматизации и скорость движения поезда. В отличие от упрощенных подходов, в модели выполнено разделение относительной интенсивности отказа и условной вероятности аварии при данном отказе. Это позволило устранить методологическое смешение вероятностных и эксплуатационных факторов и перейти к схеме сравнительной оценки риска. На основе полученного индексного показателя выведено выражение для допустимой скорости движения поезда через переезд. Проведен перерасчет риска по основным типам отказов, сформирована сводная таблица результатов и выполнен анализ наиболее опасных сценариев. Показано, что наибольший вклад в риск вносят механические отказы шлагбаумов, потеря сигнала с датчиков, отказ светофорной сигнализации и отключение питания. Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенного подхода для ранжирования неисправностей и формирования адаптивных ограничений скорости в системах СЦБ и бортовых подсистемах сигнализации.*

Ключевые слова: *железнодорожный переезд, СЦБ, риск отказа, функциональная безопасность, допустимая скорость, безопасность движения, переездная автоматика.*

Введение

Железнодорожные переезды относятся к наиболее уязвимым элементам транспортной инфраструктуры, поскольку именно в их пределах происходит пересечение железнодорожного и автомобильного потоков при ограниченном времени принятия решений и высоких последствиях ошибки. Даже при доминирующем влиянии нарушений со стороны водителей автотранспорта технические отказы устройств сигнализации, централизации и блокировки влияют на безопасность движения, так как эти устройства формируют автоматический контур предупреждения, заграждения и извещения о приближении поезда [1].

Анализ последних исследований

В существующих публикациях риск на железнодорожных переездах обычно рассматривается либо через статистику дорожно-транспортных происшествий, либо через описание надежности отдельных элементов автоматики, либо через организационные меры повышения безопасности. При этом в ряде прикладных работ используется упрощенное представление риска в виде произведения вероятности отказа, тяжести последствий и коэффициентов, отражающих время реакции либо уровень

автоматизации. Такой подход удобен для инженерных оценок, однако он содержит важное методологическое ограничение: доля происшествий, приходящаяся на определенный тип неисправности, не является вероятностью аварии в строгом смысле, а параметры времени реакции и автоматизации не должны непосредственно подменять вероятностную составляющую опасного события [2, 3, 4, 5].

Постановка задачи

В связи с этим требуется модель, которая позволяет ранжировать отказы без смешения вероятностных и эксплуатационных параметров. Дополнительное требование связано с учетом скорости движения поезда. Именно скорость во многом определяет тяжесть последствий возможного столкновения, должна присутствовать в модели не как произвольный весовой коэффициент, а как физически обоснованный параметр.

Случаи прямой причинно-следственной связи между отказом устройств переездной автоматики и возникновением ДТП являются относительно редкими вследствие реализации принципа безопасного отказа. В настоящей работе рассматриваются потенциально опасные сценарии деградации защитных функций переезда, которые способны повышать остаточный риск при неблагоприятном сочетании внешних факторов.

Целью работы является разработка дифференцированной сравнительной модели оценки риска на железнодорожном переезде с учетом типа отказа устройств СЦБ и скорости движения поезда, а также получение выражения для определения допустимой скорости движения в зависимости от интегрального уровня риска. Для достижения указанной цели решаются следующие задачи: анализ факторов риска и статистической базы; уточнение структуры математической модели; введение корректных переменных и допущений; перерасчет индекса риска по основным типам отказов; анализ результатов и формулирование практических рекомендаций для систем СЦБ.

Объектом исследования является железнодорожный переезд как техническая и организационная система обеспечения безопасности движения. Предметом исследования выступают процессы формирования риска аварийной ситуации при отказах устройств переездной автоматики и выборе режима движения поезда.

Статистика аварийности и исходные предпосылки исследования

По данным открытых материалов ОАО «РЖД», Ространснадзора и профильных публикаций, количество ДТП на переездах остается значительным. При этом основная доля дорожно-транспортных происшествий связана с нарушением правил дорожного движения водителями автотранспортных средств [6, 7, 18, 19].

По официальным данным ОАО «РЖД», количество дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах Российской Федерации остается на уровне порядка 200 случаев ежегодно. Так, в 2018 году зарегистрировано 259 ДТП, в 2020 году — 204 ДТП, в 2024 году — 196 ДТП, а в 2025 году — 197 ДТП [18-20].

Приведенные данные используются в настоящей работе исключительно для обоснования актуальности исследования и не применяются для непосредственного определения вероятностей отказов устройств СЦБ.

Несмотря на то, что устройства железнодорожной автоматики проектируются по принципу безопасного отказа, надежность их функционирования остается важным фактором обеспечения безопасности движения. Отказы технических средств, увеличение времени восстановления работоспособности либо снижение эффективности отдельных защитных функций способны повышать остаточный риск и требовать дополнительных эксплуатационных мер реагирования.

В связи с этим задача повышения безопасности должна рассматриваться не только через призму человеческого фактора, но и через обеспечение надежности и функциональной состоятельности устройств переездной автоматики.

Среди характерных технических сценариев, требующих дополнительного анализа при оценке безопасности железнодорожных переездов, в литературе и отраслевой практике выделяются: ложная свободность переезда, сбои в работе шлагбаумов и устройств заграждения, позднее включение извещения, отказы датчиков и рельсовых цепей, программные нарушения и сбои энергоснабжения. Следует отметить, что устройства СЦБ проектируются по принципу безопасного отказа, поэтому возникновение неисправности не означает автоматического возникновения аварийной ситуации. Однако отдельные виды отказов способны снижать эффективность защитных функций переезда, увеличивать время реакции персонала и повышать остаточный риск при неблагоприятном сочетании эксплуатационных факторов. В связи с этим для целей настоящего исследования статистические доли отказов рассматриваются не как абсолютные вероятности аварий, а как относительные показатели распространенности различных классов технических неисправностей [2, 3, 4, 8].

В зарубежных работах также отмечается необходимость совместного учета надежности оборудования, извещения, автоматизации и тяжести последствий. В работах по безопасности железнодорожных переездов подчеркивается, что надежность оборудования, корректность извещения, уровень автоматизации и сценарная опасность отказа должны учитываться совместно, а влияние скорости должно описываться через тяжесть последствий, а не через произвольный весовой множитель. Именно эта логика положена в основу предлагаемой модели [9, 10, 11].

Методология исследования и корректная математическая модель

В международной практике риск трактуется как комбинация вероятности опасного события и тяжести последствий. Для переездной автоматики это общее положение должно быть уточнено с учетом того, что сам факт отказа еще не означает возникновения аварии. Отказ не всегда приводит к происшествию; между ними учитывается условная вероятность развития опасной ситуации. [12].

Базовая структура риска для i-го типа отказа определяется следующим выражением:

$$R_i = \lambda_i \cdot P_{\text{acc|fail},i} \cdot S_i \quad (1)$$

где λ_i – относительная интенсивность отказа;

$P_{\text{acc|fail},i}$ – условная вероятность перехода данного отказа в аварийную ситуацию;

S_i – тяжесть последствий.

Данная формула получена из классического определения риска как произведения вероятности события и тяжести последствий. Вероятность аварии представлена как произведение интенсивности отказа λ_i и условной вероятности аварии при данном отказе $P_{\text{acc|fail},i}$.

Введение условной вероятности аварии при наличии отказа позволяет устранить распространенную ошибку, когда доля происшествий, приходящаяся на определенный отказ, подменяет собой вероятность опасного события.

Параметр λ_i в настоящем исследовании не интерпретируется как точная интенсивность в единицах 1/ч. Открытая статистика по каждому виду отказов и по каждому классу переездов, как правило, отсутствует. Поэтому λ_iиспользуется как нормированная сравнительная характеристика частоты отказа в структуре технических нарушений. Параметр $P_{\text{acc|fail},i}$ задается экспертно и отражает сценарную опасность неисправности: отказ, снимающий физическое заграждение или нарушающий

обнаружение приближения поезда, получает более высокое значение, чем ложное срабатывание, приводящее главным образом к избыточному ограничению движения.

Для учета эксплуатационных условий функционирования железнодорожного переезда базовая модель риска дополняется корректирующими коэффициентами, отражающими влияние времени пребывания системы в неисправном состоянии и уровня автоматизации процессов управления:

$$R_i^* = R_i \cdot K_T \cdot K_A \quad (2)$$

Необходимость введения данных коэффициентов обусловлена тем, что базовая модель риска (1)описывает мгновенную вероятность реализации опасного события, однако не учитывает динамику развития аварийной ситуации во времени и влияние организационно-технической структуры системы управления.

В общем виде расширенная модель риска может быть представлена как функция эксплуатационных параметров:

$$R_i^* = R_i \cdot f(T_i \cdot A_i) \quad (3)$$

где T_i— время нахождения системы в опасном состоянии

A_i— уровень автоматизации.

Функция $f(T_i \cdot A_i)$ в общем случае может иметь произвольный вид, отражающий совместное влияние времени реакции и уровня автоматизации на вероятность реализации аварийного сценария. В работе принимается допущение о раздельном и независимом влиянии указанных факторов, что позволяет представить функцию в мультипликативной форме:

$$f(T_i \cdot A_i) = K_T \cdot K_A$$

Такое представление соответствует модели первого приближения и широко применяется в инженерных расчетах надежности, когда отсутствует детализированная статистическая информация о совместном распределении факторов, что соответствует предположению о независимом влиянии времени реакции и уровня автоматизации на интегральный риск. Такое допущение является допустимым на уровне инженерной модели первого приближения и обеспечивает простоту интерпретации результатов.

Выбор линейной зависимости коэффициента K_T от времени реакции обусловлен предположением о стационарности потока потенциально опасных событий. В этом случае вероятность реализации аварийного сценария на интервале времени пропорциональна его длительности, что приводит к линейной зависимости риска от времени нахождения системы в неисправном состоянии. При более детальном анализе возможно использование нелинейных моделей, однако в условиях ограниченности статистических данных линейная аппроксимация является обоснованным и устойчивым решением.

Введенные коэффициенты K_T и K_A не являются строгими вероятностными характеристиками и не заменяют нормативные показатели функциональной безопасности. Их использование ограничено задачами сравнительной оценки и ранжирования отказов. Точное определение зависимости риска от времени и уровня автоматизации требует статистической калибровки на основе данных эксплуатации.

Коэффициент времени реакции определяется как:

$$K_T = \frac{T_i}{T_{\text{ref}}} \quad (4)$$

где: T_i — фактическое время обнаружения и устранения отказа;

T_{ref}— эталонное (нормативное) время реакции, принятое равным 1 часу.

Физический смысл данного коэффициента заключается в том, что вероятность реализации аварийного сценария возрастает с увеличением времени нахождения системы в неисправном состоянии. При прочих равных условиях более длительное

существование отказа увеличивает вероятность совпадения с неблагоприятными внешними условиями (приближение поезда, наличие автотранспорта на переезде и т.д.).

Линейная зависимость K_T от времени выбрана как первая аппроксимация, отражающая пропорциональный рост риска с увеличением длительности опасного состояния. Более сложные нелинейные зависимости возможны, однако требуют детализированной статистической базы и выходят за рамки настоящего исследования.

Влияние уровня автоматизации K_A на риск обусловлено тем, что при снижении степени автоматизации возрастает роль человеческого фактора, увеличивается время реакции и вероятность ошибок оператора.

Для количественного учета влияния уровня автоматизации используется следующее выражение:

$$K_A = 1 + \frac{A_i - 1}{4} \quad (5)$$

где A_i - уровень автоматизации по порядковой шкале:

A_i=1 — полностью автоматизированная система;

A_i=2 — автоматизированная система с участием оператора;

A_i=3 — частично автоматизированная система;

A_i=4 — система с преобладанием ручного управления;

A_i=5 — ручное управление.

Следует отметить, что зависимость между уровнем автоматизации, степенью участия человека в управлении системой и вероятностью ошибочного действия в реальных эксплуатационных условиях может иметь нелинейный характер. Особенно это относится к переходу от автоматизированных режимов управления к частично ручным или ручным режимам, где существенно возрастает влияние человеческого фактора.

В связи с отсутствием детализированной статистической базы, позволяющей выполнить достоверную калибровку нелинейной зависимости, в настоящей работе используется линейная аппроксимация первого приближения. Она не рассматривается как эмпирически доказанная закономерность, а применяется как инженерное допущение, обеспечивающее монотонное увеличение расчетного риска при снижении уровня автоматизации.

Делитель 4 используется как нормирующий множитель, обеспечивающий перевод порядковой шкалы автоматизации в безразмерный коэффициент, пригодный для сравнительного анализа различных сценариев отказов. В результате коэффициент K_Aизменяется от 1,0 для полностью автоматизированной системы до 2,0 для ручного управления, обеспечивая монотонное увеличение расчетного риска при снижении уровня автоматизации.

Следовательно, коэффициент K_A не является самостоятельной вероятностной характеристикой и не заменяет нормативные показатели функциональной безопасности. Он используется исключительно в рамках сравнительной инженерной модели для ранжирования сценариев отказов и сопоставления различных типов неисправностей.

Для дальнейшего развития модели возможно использование нелинейных зависимостей между уровнем автоматизации и риском, требующих статистической калибровки по данным эксплуатации. Однако решение данной задачи выходит за рамки настоящего исследования и требует накопления достаточного объема эксплуатационной статистики.

Это означает, что величина R_i^* является безразмерным сравнительным индексом риска. Она предназначена не для замены нормативных показателей функциональной безопасности наподобие THR либо PFH, а для ранжирования отказов, сравнительной оценки опасности и обоснования управляющих решений по режиму движения [13, 14].

Скорость движения поезда напрямую влияет на тяжесть последствий возможного столкновения. В первом приближении оправдано использование зависимости через кинетическую энергию подвижного состава:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (6)$$

Если принять, что тяжесть последствий пропорциональна квадрату скорости, то пересчитанный индекс риска для конкретного отказа может быть записан в виде:

$$R(V,i) = R_i^* \cdot \left(\frac{V}{V_{\text{норм}}}\right)^2 \quad (7)$$

где $V_{\text{норм}}$ - установленная скорость движения поезда через переезд в штатном режиме.

В настоящей работе для сопоставимости расчетов принята $V_{\text{норм}}$ = 120 км/ч. Значение 120 км/ч принято как верхняя граница эксплуатационного диапазона скоростей пассажирского движения и используется исключительно для демонстрации работы модели.

Далее вводится допустимый уровень риск-индекса $R_{\text{доп}}$. Значение $R_{\text{доп}}$= 0,01 принято, как условный нормирующий параметр сравнительной шкалы риска. Его назначение состоит не в воспроизведении нормативных показателей функциональной безопасности THR или PFH, а в формировании относительной шкалы для сопоставления рассматриваемых сценариев отказов. Изменение величины $R_{\text{доп}}$ приводит к пропорциональному масштабированию расчетных показателей модели, однако не влияет на порядок ранжирования сценариев по уровню риска. Таким образом, параметр $R_{\text{доп}}$ используется как калибрующий коэффициент сравнительной модели и требует дополнительной статистической настройки при практическом внедрении методики. Параметр Rдоп не претендует на статус нормативной вероятности опасного отказа и используется исключительно как калибрующий уровень сравнительной модели. Тогда требование безопасности принимает вид:

$$R(V,i) \le R_{\text{доп}} \quad (8)$$

Отсюда допустимая скорость определяется выражением:

$$V_{\text{доп}} = V_{\text{норм}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{доп}}}{R_i^*}} \quad (9)$$

где $V_{\text{норм}}$ – задает базовую физическую размерность скорости,

$\frac{R_{\text{доп}}}{R_i^*}$ - является безразмерным коэффициентом масштабирования.

Размерность итогового выражения определяется исключительно параметром $V_{\text{норм}}$, что обеспечивает физическую корректность формулы. Из формулы следует: чем выше расчетный риск, тем ниже допустимая скорость.

Выражение для допустимой скорости движения поезда в рамках предложенной модели имеет инженерно-оценочный характер и используется для сравнительного анализа сценариев отказов, а не для прямого нормативного расчета тормозного пути или динамики движения подвижного состава. Величина пересчитанного индексного показателя риска R_i^*является безразмерной, поскольку формируется как произведение нормированных коэффициентов, относительных интенсивностей отказов и экспертных оценок тяжести последствий. В то же время допустимая скорость $V_{\text{доп}}$ представляет собой физическую величину, измеряемую в км/ч.

Корректность перехода от безразмерного индексного показателя к скорости обеспечивается введением калибрующего параметра $R_{\text{доп}}$ и опорной скорости $V_{\text{норм}}$. В предлагаемой модели скорость определяется не как самостоятельный результат вероятностного расчета, а как относительное масштабирование штатного режима движения.

Поэтому предложенное выражение следует интерпретировать как модель адаптивного относительного ограничения скорости, в которой увеличение интегрального риска приводит к пропорциональному снижению допустимого скоростного режима относительно штатного значения. Модель не заменяет нормативных тягово-тормозных расчетов, используемых в действующих системах регулирования движения поездов, и не учитывает напрямую массу состава, профиль пути, коэффициент сцепления, длину тормозного пути и метеорологические условия.

В отличие от произвольного назначения фиксированного ограничения для всех неисправностей, такой подход позволяет формировать дифференцированные режимы движения и напрямую связывать диагностику отказа с управленческой реакцией.

Для сохранения сопоставимости с исходной версией работы значения λ_i принимаются на основе ранее использованной статистической части как относительные интенсивности возникновения соответствующих типов отказов. Это означает, что модель ориентирована на сравнительный анализ и ранжирование, а не на вычисление абсолютной частоты аварии на единицу времени.

Параметры тяжести последствий S_i и времени реакции T_i также сохраняются из исходной структуры исследования, поскольку они отражают экспертное обоснованное представление о степени опасности и продолжительности нахождения системы в неисправном состоянии. Основная корректировка касается параметра $P_{\text{acc|fail},i}$. Для отказов, непосредственно устраняющих физический барьер либо нарушающих обнаружение приближения поезда, используются высокие значения 0.80-0.90. Для отказов светофорной сигнализации, создающих ложное представление о безопасности, принимаются значения 0.60-0.80. Для ложных срабатываний и отказов вспомогательных каналов используются более низкие значения 0.20-0.40.

В рамках модели приняты следующие допущения. Отказы рассматриваются как независимые по отношению друг к другу. Внешние условия - погодные факторы, интенсивность автотранспортного потока, видимость, профиль пути и человеческое поведение - не вводятся в расчет явно. Тяжесть последствий связывается со скоростью через квадратичную зависимость. $R_{\text{доп}}$ используется как условный калибрующий параметр. Эти допущения сужают область применимости модели, однако не снижают ее ценности как инженерного инструмента ранжирования и выбора режима движения.

Для сопоставления различных сценариев отказов вводится коэффициент уровня небезопасности $K_{\text{УН}}$, представляющий собой отношение расчетного индекса риска к базовому допустимому уровню риска. Данный коэффициент является безразмерным сравнительным показателем и показывает, во сколько раз рассматриваемый сценарий превышает принятый базовый уровень риска:

$$K_{\text{УН}} = \frac{R_i^*}{R_{\text{доп}}} \tag{10}$$

По величине $K_{\text{УН}}$ предлагается использовать следующую шкалу:

- при $K_{\text{УН}} < 10$ уровень считается низким;
- при $10 <= K_{\text{УН}} < 30$ - средним;
- при $30 <= K_{\text{УН}} < 50$ - высоким;
- при $K_{\text{УН}} >= 50$ - критическим.

Данная градация не является нормативной и применяется в настоящей работе как условный сравнительный показатель.

На основе предложенной модели выполнен перерасчет риска для основных типов отказов устройств железнодорожного переезда. В отличие от исходного варианта, здесь исключено использование обратных величин 1/T и 1/A как элементов базовой вероятностной формулы. Все расчеты приведены к единой логически согласованной схеме.

Значения параметра λ_i в настоящей работе не являются абсолютными интенсивностями отказов в размерности 1/ч и не претендуют на воспроизведение фактической статистики отказов устройств СЦБ. Параметр λ_i используется как нормированный коэффициент относительной частоты возникновения отказа, предназначенный для сравнительного ранжирования различных сценариев.

Формирование значений λ_i выполнено на основе экспертного анализа эксплуатационной практики железнодорожной автоматики с учетом:

- частоты встречаемости неисправности;
- влияния отказа на защитные функции переезда;
- сложности обнаружения неисправности;
- времени восстановления работоспособности;
- последствий при неблагоприятном развитии событий.

Наибольшие значения λ_i присвоены отказам, которые одновременно характеризуются сравнительно высокой распространенностью и существенным влиянием на функционирование переезда. Наименьшие значения присвоены редким либо локальным неисправностям, не оказывающим значительного влияния на защитные функции системы.

Значения коэффициента λ_i задавались по относительной шкале от 0,01 до 0,30. Верхняя граница диапазона соответствует наиболее распространенным и эксплуатационно значимым отказам, тогда как нижние значения присваиваются редким либо локальным неисправностям. Конкретные значения выбирались экспертно с шагом 0,01–0,05 для обеспечения различимости сценариев при последующем ранжировании рисков. Таким образом, значения λ_i используются исключительно для сравнительного ранжирования рассматриваемых сценариев отказов.

Вероятность реализации опасной ситуации при возникновении отказа $P_{\mathrm{acc|fail},i}$ задается экспертно и отражает степень влияния конкретной неисправности на выполнение защитных функций железнодорожного переезда.

При выборе значения учитывались:

- нарушение функции обнаружения поезда;
- нарушение функции извещения участников движения;
- нарушение работы шлагбаумов и устройств заграждения;
- нарушение электроснабжения;
- возможность своевременного обнаружения отказа обслуживающим персоналом.

Более высокие значения присваиваются отказам, непосредственно влияющим на ключевые защитные функции переезда, тогда как более низкие значения соответствуют неисправностям локального характера либо отказам, компенсируемым резервированием и средствами контроля.

Значения коэффициента $P_{\mathrm{acc|fail},i}$ задавались экспертно в диапазоне от 0,2 до 0,9. Верхняя граница диапазона соответствует отказам, приводящим к утрате основных защитных функций переезда (обнаружение поезда, заграждение, извещение), тогда как нижняя граница соответствует неисправностям, не создающим непосредственной угрозы столкновения и компенсируемым средствами контроля либо резервирования.

Конкретные значения λ_i и $P_{\mathrm{acc|fail},i}$ не претендуют на воспроизведение фактической статистики и используются в качестве экспертных оценок для демонстрации работы модели на типовых сценариях отказов.

Например, для механической поломки шлагбаума принимаются λ_i = 0.27, $P_{\mathrm{acc|fail},i}$ = 0.90, S_i = 9, T = 2.0 ч, A = 2.

Тогда K_A = 1.25, базовый индекс R_i = 0.27 x 0.90 x 9 = 2.187, а пересчитанный индекс R_i^* = 2.187 x 2.0 x 1.25 = 5.468.

При $V_{\text{доп}}$= 0.01 коэффициент уровня небезопасности составляет 546.8, а допустимая скорость $V_{\text{доп}}$ = 5.1 км/ч. Тем самым механический отказ шлагбаума интерпретируется как критический сценарий, требующий фактически предельно жесткого ограничения движения.

Для потери сигнала с датчика принимаются λ_i=0.10, $P_{\text{acc|fail},i}$ = 0.90, S_i = 9, T = 2.0 ч, A = 1. Получаем R_i= 0.810, R_i^*= 1.620, KUN = 162.0 и $V_{\text{доп}}$= 9.4 км/ч.

Для ложного срабатывания системы извещения, напротив, при λ_i = 0.04, $P_{\text{acc|fail},i}$ = 0.20, S_i = 3, T = 1.0 ч, A = 1 индекс R_i^* составляет всего 0.024, коэффициент небезопасности равен 2.4, а допустимая скорость достигает 77.5 км/ч. Такие различия подтверждают необходимость дифференцированного подхода к назначению ограничений движения.

Результаты перерасчета показывают, что наиболее опасными являются механическая поломка шлагбаума, отключение питания, потеря сигнала с датчика, отказ светофорной сигнализации и сбой электропривода шлагбаума. Общим признаком этих сценариев является сочетание высокой относительной интенсивности отказа либо высокой сценарной вероятности аварии с существенным временем реакции. Именно эта комбинация приводит к резкому росту пересчитанного индекса R_i^* и, как следствие, к существенному уменьшению допустимой скорости движения.

Таблица 2

Пересчитанные индексы риска, коэффициенты небезопасности и допустимые скорости движения

№	Устройство	Тип отказа	λ_i	$P_{\text{acc\|fail},i}$	Si	T_i, ч	A_i	K_A	R_i	R_i^*	$K_{\text{УН}}$	$V_{\text{доп}}$, км/ч
1	Шлагбаумы	Механическая поломка	0.27	0.90	9	2.0	2	1.25	2.187	5.468	546.8	5.1
2	Шлагбаумы	Сбой электропривода	0.15	0.85	9	1.5	2	1.25	1.147	2.152	215.2	8.2
3	Шлагбаумы	Несрабатывание при сигнале	0.10	0.75	8	1.0	2	1.25	0.600	0.750	75.0	13.9
4	Светофорная сигнализация	Отсутствие сигнала	0.15	0.70	8	1.5	2	1.25	0.840	1.575	157.5	9.6
5	Светофорная сигнализация	Некорректное отображение	0.08	0.80	9	2.0	2	1.25	0.576	1.440	144.0	10.0
6	Светофорная сигнализация	Задержка срабатывания	0.05	0.60	7	1.0	2	1.25	0.210	0.263	26.2	23.4
7	Звуковая сигнализация	Отказ звукового сигнала	0.03	0.30	6	2.0	2	1.25	0.054	0.135	13.5	32.7
8	Системы извещени	Потеря сигнала	0.06	0.80	8	1.5	1	1.00	0.384	0.576	57.6	15.8
9	Системы извещени	Ложное срабатывание	0.04	0.20	3	1.0	1	1.00	0.024	0.024	2.4	77.5
10	Датчики	Потеря сигнала с датчика	0.10	0.90	9	2.0	1	1.00	0.810	1.620	162.0	9.4
11	Датчики	Ложные срабатывания	0.05	0.30	4	1.0	1	1.00	0.060	0.060	6.0	49.0
12	Датчики	Сбой калибровки	0.03	0.60	7	2.0	1	1.00	0.126	0.252	25.2	23.9
13	Системы энерго-снабжения	Отключение питания	0.08	0.90	10	3.0	2	1.25	0.720	2.700	270.0	7.3
14	Системы энерго-снабжения	Скачки напряжения	0.03	0.40	6	1.5	2	1.25	0.072	0.135	13.5	32.7
15	Программное обеспечение	Сбой ПО	0.05	0.70	9	3.0	1	1.00	0.315	0.945	94.5	12.3
16	Программное обеспечение	Кибератака	0.02	0.90	10	4.0	1	1.00	0.180	0.720	72.0	14.1

Важным результатом является перераспределение мест в ранжировании по сравнению с упрощенными схемами расчета. Например, отказ звуковой сигнализации, ложные срабатывания систем извещения и ложные срабатывания датчиков в логически корректной модели занимают существенно менее опасные позиции, чем отказы шлагбаумов, датчиков и энергоснабжения. Это соответствует реальной эксплуатационной логике: вспомогательный канал оповещения сам по себе редко формирует столкновение, тогда как отказ физического заграждения или потеря обнаружения поезда сразу разрушает основные защитные барьеры.

Отдельного внимания заслуживает сценарий полного отключения питания. В исходных упрощенных расчетах подобный отказ мог выглядеть сравнительно умеренно опасным, если время реакции и автоматизация подставлялись в формулу через обратные величины. В корректированной модели отключение питания получает высокий риск, поскольку потенциально приводит к одновременной потере нескольких защитных функций и длительному нахождению системы в опасном состоянии.

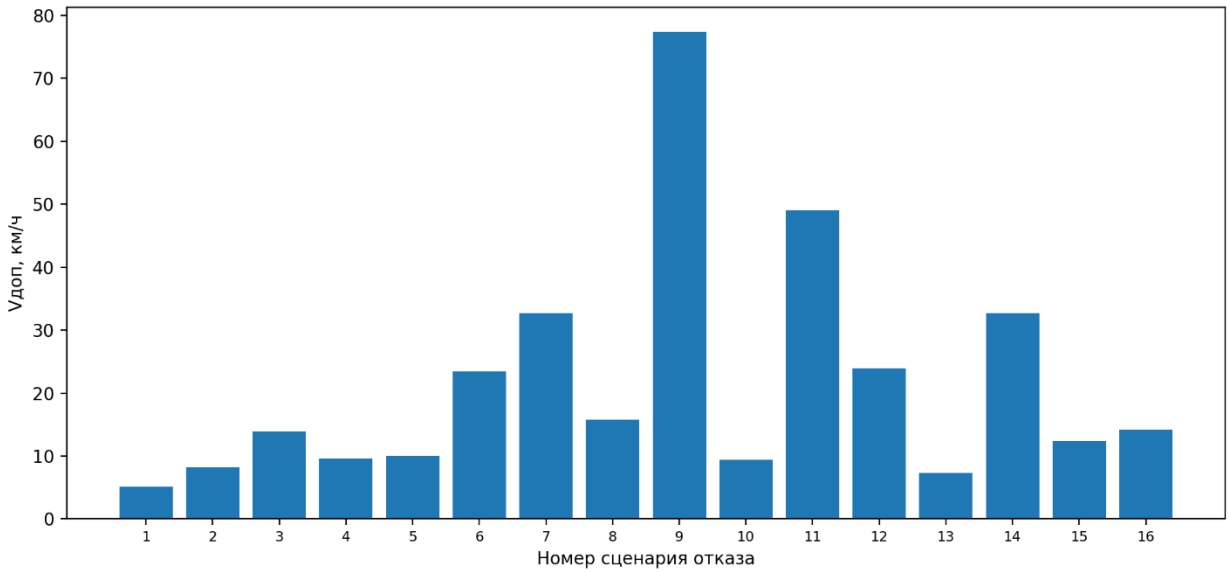


Рис. 1. Допустимая скорость движения поезда для различных сценариев отказа

Полученные значения допустимой скорости позволяют сформировать четыре условные группы управленческой реакции. К первой группе относятся критические сценарии, для которых $V_{доп}$ составляет приблизительно 5-11 км/ч; фактически это режим особой бдительности либо запрет движения без дополнительных подтверждений. Ко второй группе относятся высокоопасные сценарии с $V_{доп}$ порядка 12-16 км/ч. К третьей группе относятся среднеопасные сценарии со скоростями около 23-33 км/ч. Наконец, к четвертой группе относятся низкорисковые сценарии, при которых допустимая скорость может составлять 49-77 км/ч.

Графическое представление результатов удобно для практического применения, поскольку позволяет быстро соотнести код отказа с диапазоном допустимой скорости.

Практическая интерпретация результатов

Предлагаемый подход целесообразно рассматривать как сравнительную инженерную модель, предназначенную для ранжирования отказов и обоснования режимов движения, а не как замену формальных расчетов показателей функциональной безопасности, принятых в стандартах IEC 61508, EN 50126 и EN 50129. Преимущество

подхода состоит в том, что каждый параметр риска выделен отдельно. Риск в явном виде декомпозируется на частоту возникновения отказа, вероятность перехода к аварии, тяжесть последствий и эксплуатационные условия. Такая структура позволяет легче интерпретировать влияние каждого параметра и обосновывать выбранные значения.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности формирования адаптивных ограничений скорости в зависимости от диагностированного состояния переезда. В простейшем варианте код конкретного отказа может передаваться из системы переездной автоматики в локальную подсистему управления движением, где по встроенной таблице или аналитической формуле определяется допустимая скорость. Для критических сценариев это может означать движение с минимальной скоростью под особым контролем либо полный запрет прохода до подтверждения исправности. Для среднеопасных и низкоопасных сценариев возможно сохранение движения при ограничении скорости до безопасного уровня.

Особенно перспективным представляется использование модели в качестве одного из модулей более широкой интеллектуальной системы управления безопасностью железнодорожных переездов, что соответствует современным подходам к построению комплексных систем управления безопасностью на объектах железнодорожной инфраструктуры [15]. В такой системе рассматриваемый индекс риска по отказам СЦБ может дополняться данными о поведении участников движения, параметрами видимости, интенсивностью транспортных потоков и результатами нейросетевого анализа видеопотока. В этом случае модель, разработанная в настоящей статье, выступает как базовый технический слой общей оценки риска, отвечающий именно за вклад неисправностей устройств автоматики [16, 17].

Вместе с тем работа имеет ограничения. Параметры $P_{\mathrm{acc|fail},i}$ задаются экспертно и требуют дальнейшей калибровки на основе детализированной статистики развития инцидентов. Значения λ_i носят относительный характер и не являются абсолютной частотой в единицах времени. Кроме того, модель не учитывает погодные условия, класс переезда, интенсивность движения автотранспорта, длину состава, видимость и особенности человеческого поведения. Однако даже с учетом этих ограничений предлагаемый подход уже сейчас позволяет перейти от описательного перечня опасных отказов к количественно заданной схеме принятия решений.

Выводы

В статье разработана дифференцированная сравнительная модель оценки риска на железнодорожном переезде с учетом типа отказа устройств СЦБ и скорости движения поезда. В отличие от упрощенных инженерных схем, в предложенной модели устранено смешение вероятности отказа, вероятности аварии и эксплуатационных факторов. Риск сформулирован через произведение относительной интенсивности отказа, условной вероятности аварийного исхода и тяжести последствий, а влияние времени реакции и уровня автоматизации введено через отдельные корректирующие коэффициенты.

На основе полученной модели выведено аналитическое выражение допустимой скорости движения поезда через интегральный показатель риска. Проведенный перерасчет для основных типов отказов показал, что наиболее опасными являются механические поломки шлагбаумов, потеря сигнала с датчиков, отказ светофорной сигнализации и отключение питания. Для этих сценариев допустимая скорость при штатной скорости 120 км/ч снижается до диапазона приблизительно 5-11 км/ч, что требует введения наиболее жестких ограничений движения.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанного подхода для ранжирования технических неисправностей и формирования адаптивных режимов движения в системах СЦБ, локомотивной

сигнализации и цифровых подсистемах управления. Основной результат статьи — модель, связывающая тип отказа, индекс риска и допустимую скорость движения поезда. Полученные результаты могут использоваться для ранжирования отказов и выбора ограничений скорости при неисправностях переездной автоматики.

Список литературы

1. Шматченко В.В., Меремсон Ю.Я., Иванов В.Г. Специфика безопасности движения на железнодорожных переездах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. № 1. С. 143–154. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-143-154.

2. Балуев Н.Н. Возможные направления развития устройств автоматики на переездах // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 12. С. 25–27.

3. Савченко П.В., Менакер К.В., Ежиков Т.В., Неугодников П.Е. Подсистема контроля последовательного занятия и освобождения индуктивно-петлевых датчиков в системе контроля занятости железнодорожного переезда // Наука и техника транспорта. 2024. № 2. С. 57–63.

4. Коровяковский Е.К., Орлова В.М., Шапочкина Л.О., Алексеев Е.Э. Расчет фактической пропускной способности железнодорожного переезда с использованием систем машинного зрения // V Бетанкуровский международный инженерный форум. Санкт-Петербург, 2023. С. 365–369.

5. Михайлов Е.В., Татарникова Д.С., Татарникова Н.С. и др. Комплексная система защиты переездов // Молодая наука Сибири. 2018. № 2(2). С. 17–25.

6. Киселева Е.А., Маштакова А.В. Корреляционный анализ факторов, влияющих на количество аварий на железнодорожных переездах // Интеграция, эволюция, модернизация: пути развития науки и образования. 2024. С. 120–124.

7. Попов А.Н., Гришаев С.Ю. Безопасность движения при остановке автотранспорта на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом // Транспорт Урала. 2020. № 1(64). С. 39–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42.

8. Ефанов Д.В., Плотников Д.Г., Осадчий Г.В. Сервис прогнозирования временных параметров работы железнодорожного переезда // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 4(77). С. 31–36.

9. Попова Н.Б., Калидова А.Д., Кутень И.А., Швецов П.Г. Оценка эффективности внедрения систем контроля технического состояния железнодорожного переезда // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1(64). С. 74–84. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_64_74.

10. Сеславина Е.А., Сеславин А.И., Евдокимова Е.Н. Управление безопасностью на железнодорожных переездах на основе прогнозных моделей // Наука и техника транспорта. 2024. № 4. С. 119–126.

11. Евдокимова, Е. Н. Информационно-аналитическое обеспечение принятия решений по повышению безопасности железнодорожных перевозок / Е. Н. Евдокимова, Е. А. Сеславина // Экономика, предпринимательство и право. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 1217-1228. – DOI 10.18334/epp.12.4.114348. – EDN LHZVRM.

12. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

13. IEC 61508. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Geneva: International Electrotechnical Commission.

14. EN 50126. Railway applications — The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety. Brussels: CENELEC.

15. Климова Д.В., Астахов В.В. Системный подход к формированию системы управления безопасностью на железнодорожных переездах и переходах // Проблемы безопасности российского общества. 2021. № 2(34). С. 80–89.

16. Ахмедзянов Г.Г. Определение безопасности железнодорожного переезда с использованием нейронной сети // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте. Омск, 2024. С. 35–39.

17. Давыдов А.И. Модель информационного взаимодействия объектов инфраструктуры железнодорожного переезда и участников движения на переезде // Аллея науки. 2021. Т. 1. № 6(57). С. 910–914.

18. ОАО «РЖД». Количество ДТП на железнодорожных переездах в 2024 году сократилось на 20 % // Официальный сайт ОАО «РЖД». URL: https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=221157 (дата обращения: 14.05.2026).

19. Министерство транспорта Российской Федерации. За 2020 год на железнодорожных переездах по вине водителей допущено 204 столкновения с железнодорожным подвижным составом // Официальный сайт Минтранса России. URL: https://mintrans.gov.ru/press-center/branch-news/2976 (дата обращения: 14.05.2026).

20. Количество ДТП на железнодорожных переездах в России в 2018 году снизилось до 259 случаев // ТАСС. URL: https://tass.ru/transport/6004935 (дата обращения: 14.05.2026).

References

1. Shmatchenko V.V., Meremson Yu.Ya., Ivanov V.G. Spetsifika bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnykh pereezdakh [Specific Features of Traffic Safety at Railway Crossings]. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 143–154. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-143-154.

2. Baluev N.N. Vozmozhnye napravleniya razvitiya ustroistv avtomatiki na pereezdakh [Possible Directions for the Development of Railway Crossing Automation Devices]. Avtomatika, svyaz', informatika, 2017, no. 12, pp. 25–27.

3. Savchenko P.V., Menaker K.V., Ezhikov T.V., Neugodnikov P.E. Podsistema kontrolya posledovatel'nogo zanyatiya i osvobozhdeniya induktivno-petlevykh datchikov v sisteme kontrolya zanyatosti zheleznodorozhnogo pereezda [Subsystem for Monitoring Sequential Occupancy and Release of Inductive Loop Sensors in a Railway Crossing Occupancy Control System]. Nauka i tekhnika transporta, 2024, no. 2, pp. 57–63.

4. Korovyakovskii E.K., Orlova V.M., Shapochkina L.O., Alekseev E.E. Raschet fakticheskoi propusknoi sposobnosti zheleznodorozhnogo pereezda s ispol'zovaniem sistem mashinnogo zreniya [Calculation of Actual Capacity of a Railway Crossing Using Machine Vision Systems]. Proceedings of the V Betancourt International Engineering Forum. Saint Petersburg, 2023, pp. 365–369.

5. Mikhailov E.V., Tatarnikova D.S., Tatarnikova N.S. et al. Kompleksnaya sistema zashchity pereezdov [Integrated Railway Crossing Protection System]. Molodaya nauka Sibiri, 2018, no. 2(2), pp. 17–25.

6. Kiseleva E.A., Mashtakova A.V. Korrelyatsionnyi analiz faktorov, vliyayushchikh na kolichestvo avarii na zheleznodorozhnykh pereezdakh [Correlation Analysis of Factors Affecting the Number of Accidents at Railway Crossings]. Integratsiya, evolyutsiya, modernizatsiya: puti razvitiya nauki i obrazovaniya, 2024, pp. 120–124.

7. Popov A.N., Grishaev S.Yu. Bezopasnost' dvizheniya pri ostanovke avtotransporta na zheleznodorozhnykh pereezdakh pered priblizhayushchimsya poezdom [Traffic Safety When Vehicles Stop at Railway Crossings Before an Approaching Train]. Transport Urala, 2020, no. 1(64), pp. 39–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42.

8. Efanov D.V., Plotnikov D.G., Osadchii G.V. Servis prognozirovaniya vremennykh parametrov raboty zheleznodorozhnogo pereezda [Service for Predicting Time Parameters of Railway Crossing Operation]. Transport Rossiiskoi Federatsii, 2018, no. 4(77), pp. 31–36.

9. Popova N.B., Kalidova A.D., Kuten I.A., Shvetsov P.G. Otsenka effektivnosti vnedreniya sistem kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya zheleznodorozhnogo pereezda [Evaluation of the Effectiveness of Implementing Railway Crossing Technical Condition Monitoring Systems]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya, 2023, no. 1(64), pp. 74–84. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_64_74.

10. Seslavina E.A., Seslavin A.I., Evdokimova E.N. Upravlenie bezopasnost'yu na zheleznodorozhnykh pereezdakh na osnove prognoznykh modelei [Safety Management at Railway Crossings Based on Predictive Models]. Nauka i tekhnika transporta, 2024, no. 4, pp. 119–126.

11. Evdokimova E.N., Seslavina E.A. Informatsionno-analiticheskoe obespechenie prinyatiya reshenii po povysheniyu bezopasnosti zheleznodorozhnykh perevozok [Information and Analytical Support for Decision-Making to Improve Railway Transportation Safety]. Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 1217–1228. DOI: 10.18334/epp.12.4.114348. EDN: LHZVRM.

12. ISO 31000:2018. Risk Management — Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

13. IEC 61508. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Geneva: International Electrotechnical Commission.

14. EN 50126. Railway Applications — The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety. Brussels: CENELEC.

15. Klimova D.V., Astakhov V.V. Sistemnyi podkhod k formirovaniyu sistemy upravleniya bezopasnost'yu na zheleznodorozhnykh pereezdakh i perekhodakh [A System Approach to the Formation of a Safety Management System at Railway Crossings and Pedestrian Crossings]. Problemy bezopasnosti rossiiskogo obshchestva, 2021, no. 2(34), pp. 80–89.

16. Akhmedzyanov G.G. Opredelenie bezopasnosti zheleznodorozhnogo pereezda s ispol'zovaniem neironnoi seti [Assessment of Railway Crossing Safety Using a Neural Network]. Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte. Omsk, 2024, pp. 35–39.

17. Davydov A.I. Model' informatsionnogo vzaimodeistviya ob"ektov infrastruktury zheleznodorozhnogo pereezda i uchastnikov dvizheniya na pereezde [Model of Information Interaction Between Railway Crossing Infrastructure Objects and Road Users]. Alleya nauki, 2021, vol. 1, no. 6(57), pp. 910–914.

18. JSC Russian Railways. The number of accidents at level crossings decreased by 20% in 2024 // Official website of JSC Russian Railways. URL: https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=221157 (date of access: 14.05.2026).

19. Ministry of Transport of the Russian Federation. In 2020, 204 collisions with railway rolling stock occurred at level crossings due to the fault of drivers // Official website of the Ministry of Transport of the Russian Federation. URL: https://mintrans.gov.ru/press-center/branch-news/2976 (date of access: 14.05.2026).

20. The number of accidents at level crossings in Russia in 2018 decreased to 259 cases // TASS. URL: https://tass.ru/transport/6004935 (accessed: 14.05.2026).

Trunaev A.M.

A DIFFERENTIATED MODEL FOR RAIL CROSSING RISK ASSESSMENT, CONSIDERING THE TYPE OF SIGNALLING, INTERLOCKING, AND BLOCKING DEVICE FAILURE AND TRAIN SPEED

Abstract. *This article proposes a differentiated model for assessing level crossing risk, taking into account the type of signaling, interlocking, and blocking device failure, the response time to the failure, the level of automation, and train speed. Unlike simplified approaches, the model distinguishes between the relative failure rate and the conditional probability of an accident for a given failure. This eliminated the methodological confusion between probabilistic and operational factors and allowed for a transition to a comparative risk assessment framework. Based on the resulting index, an expression for the permissible train speed across the crossing was derived. Risk was recalculated for the main failure types, a summary table of the results was generated, and an analysis of the most hazardous scenarios was performed. It was shown that the greatest contributors to risk are mechanical failures of barriers, loss of sensor signals, traffic signal failure, and power outages. The practical significance of this work lies in the potential use of the proposed approach for fault ranking and the generation of adaptive speed limits in signaling and interlocking systems and on-board signaling subsystems.*

Keywords: *level crossing, signaling and interlocking systems, risk of failure, functional safety, permissible speed, traffic safety, crossing automation.*

Сведения об авторе:

Трунаев Андрей Михайлович
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»,
Кандидат технических наук, доцент,
e-mail: andrey.trunayev@mail.ru

Information about the author:

Andrey Mikhailovich Trunaev
Rostov State Transport University, Department of Automation and Remote Control in Railway Transport,
PhD in Engineering, Associate Professor,
e-mail: andrey.trunayev@mail.ru

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТРАНЫ, ЕЕ РЕГИОНОВ И ГОРОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.078 (575.4+470+571)

Вейискулыева Г., Куликов А.В.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ТЕРМИНАЛОВ ТУРКМЕНИСТАНА ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РОССИЕЙ

Аннотация. *Статья посвящена решению актуальной проблемы развития торгово-экономических связей республики Туркменистан путем внедрения новых технологических решений в продвижении материальных потоков. Проведенный анализ литературных источников показывает выгодное географическое положение Туркменистана в Центральной Азии с позиции перспективного развития мультимодальных транспортно-логистических коридоров «Восток-Запад» и «Север-Юг». В работе анализируются ключевые проблемы и перспективы развития транспортных сетей, характеристики пограничных переходов и транспортно-логистических терминалов всех видов транспорта позволяющих выполнять мультимодальные перевозки грузов. Особое внимание уделяется анализу современного состояния транспортно-логистического терминала – порта Туркменбаши, который позволяет развивать мультимодальность в сочетании использования морского – автомобильного, морского – железнодорожного, морского – воздушного транспорта. Исследована номенклатура различных видов перевозимых грузов на экспорт. Экспорт текстильной продукции является одним из наиболее развивающихся направлений в экономике Туркменистана с обеспечением стабильных объемов экспортного дохода. Большие объемы производства хлопковой продукции позволяют организовать экспорт с применением новых мультимодальных технологий, обеспечивающих уменьшение времени доставки, сокращение затрат в конечной стоимости перевозимой продукции. Представленные в статье выводы и рекомендации могут быть использованы агентством транспорта и коммуникаций при Кабинете министров Туркменистана и транспортными логистами в разработке мультимодальных транспортно-логистических терминалов для международных перевозок грузов.*

Ключевые слова*: транспорт Туркменистана, Великий шелковый путь, схема транспортных путей, международные транспортные коридоры, мультимодальные транспортно-логистические терминалы, международные пограничные пункты, международные аэропорты Туркменистана, грузовые*

терминалы, международный порт Туркменбаши, экспорт хлопковой продукции.

Постановка задачи

В рамках представленной работы решается научная задача исследования перспектив развития мультимодальных транспортно-логистических терминалов Туркменистана во взаимодействии с Россией с использованием системного подхода и системного анализа изучения основ взаимодействия различных видов транспорта.

Конкретные задачи проведенного исследования включают:

- анализ последних исследований в области развития транспортно-логистических терминалов Туркменистана;
- анализ географического положения и роли Туркменистана в создании транспортных коридоров «Восток-Запад» и «Север-Юг»;
- исследование характеристик взаимодействия различных видов транспорта в мультимодальных системах;
- анализ характеристик транспортных сетей и пограничных переходов с возможным обеспечением мультимодальных международных перевозок;
- исследование характеристик транспортно-логистических терминалов, а также характеристик транспортных средств каждого вида транспорта, используемых для выполнения мультимодальных перевозок;
- исследование номенклатуры различных видов перевозимых грузов на экспорт через мультимодальные транспортно-логистические терминалы, на примере функционирования хлопковой логистической системы «Поле-терминал-прядильная фабрика-текстильный комплекс-швейная фабрика» в единой «Хлопковой концепции Туркменистана» [1-4].

Анализ последних исследований

В настоящее время выбранная тема исследования является актуальной, что подтверждается множеством предшествующих опубликованных работ. В статьях авторов Ишанов М., Озбеков Н., Бяшимов А. и др. рассматриваются вопросы перспективного развития транспортной логистики в мультимодальных перевозках Туркменистана [5, 6, 7]. В научных работах подчеркивается историческое значение Великого шелкового пути и проводится анализ современного состояния дорожной автомобильной сети.

В проведенном исследовании О. Д. Покровская, З. Н. Елдашов, М. А. Марченко и др. установлено, что туркменская транспортно-логистическая система работает с грузопотоками почти по всем видам транспорта. Страна развивает инструментарий современной логистики, имеет в своем составе систему международных транспортных коридоров и логистических центров мультимодального типа и проводит политику открытого транспортно-логистического пространства и интеграции [8, 9]. Вопросам построения национальных транспортно-логистических систем и влияния функционирования транспортно-логистической инфраструктуры каждого региона посвящены работы [10–14].

В статье А. Дж. Насирова, Ф. А. Кадирова приводятся факторы формирования новых региональных транспортных маршрутов в контексте их влияния на социально-экономическое развитие стран региона и интеграцию в мирохозяйственные связи стран Центральной и Южной Азии [15]. Авторы Е. Тулендиев, Н. Апахаев, С. Бадамбаева и др. в статье «Развитие транзитного потенциала стран Центральной Азии в контексте экономического и интеграционного сотрудничества» приводят результаты исследования, которые вносят вклад в развитие науки, предоставляя аналитическую базу

для стратегий, направленных на увеличение транзитного потенциала стран Центральной Азии за счет интеграции инфраструктурных и экономических аспектов в контексте международного сотрудничества [16].

В работе авторов А. Ю. Крылатов, М. А. Федорова, А. П. Раевская [17] в результате расчётов было установлено, что при прогнозируемом к 2030 г. спросе на перевозки между Санкт-Петербургом и Мумбаи в объёме 41 млн т в год движение грузов между Европой и Азией через международный транспортный коридор (МТК) «Север-Юг» окажется быстрее на 20-40 %, чем через альтернативные маршруты. В долгосрочной перспективе МТК «Север-Юг» сможет обслуживать 80-100 млн т грузов в год, оставаясь конкурентной транспортной магистралью в сети мировых грузопотоков и способствуя развитию бизнеса вкупе с ростом рабочих мест в регионе.

В статье «Внешнеэкономическая политика Туркмении: итоги десятилетия» автор, А. А. Мигранян, даёт комплексную оценку итогов экономической политики Туркмении и потенциала развития Российско-Туркменского экономического сотрудничества [18].

Проведенные исследования автора И. С. Виноградова раскрывают проблемы внешнеэкономического сотрудничества и основные направления отношений Ашхабада с Москвой [19].

Проведенный анализ публикаций определяет актуальность проводимых исследований перспектив развития мультимодальных транспортно-логистических терминалов Туркменистана в международных торгово-экономических связях с мировым пространством.

Цель работы

Заключается в разработке комплексного подхода в создании перспективных международных мультимодальных систем перевозки грузов и пассажиров через транспортно-логистические терминалы Туркменистана.

Основная часть

Географически Туркменистан занимает важное положение не только в Центральной Азии и Каспийском бассейне, но и во всем Евразийском пространстве. В настоящее время страна играет основополагающую роль в создании транспортных коридоров «Восток-Запад» и «Север-Юг». Туркменистан – государство в Центральной Азии, расположенное между Каспийским морем на западе, рекой Амударьей и государством Узбекистан на востоке. С севера граничит со странами Казахстан и Узбекистан. На юге расположены Иран и Афганистан. Через нейтральные воды (Каспийского моря) существует перспективная возможность сотрудничать с Азербайджаном, Казахстаном, Ираном и Россией.

Территория страны простирается с запада на восток на 1100 км и с севера на юг на 650 км, общая площадь – 491,2 тыс. кв. км. Около 80 % всей территории страны занимает пустыня Каракум, общей площадью 350 тыс. кв. км. Пустыня накладывает дополнительные ограничения в развитии транспортных связей страны. В самой логистической стратегии Туркменистана заложен принцип историзма [5]. Как известно, в прошлые века через территорию страны проходил Великий Шелковый путь, сыгравший огромную роль в развитии мировой цивилизации (рисунок 1).



Рис. 1. Великий шелковый путь IV-XV век [20]

На рисунке 2 представлена современная транспортная система Туркменистана, которая включает все виды транспорта (кроме трубопроводного). В стране хорошо развит автомобильный, железнодорожный, воздушный и морской транспорт. На карте представлены схемы железнодорожных и автомобильных дорог с пограничными пунктами ближайших государств. Мультимодальные системы подразумевают использование нескольких видов транспорта для доставки товаров от места производства до конечного потребителя. Это может включать совместное использование железнодорожного, автомобильного, морского и воздушного транспорта. Применение мультимодальных решений позволяет оптимизировать логистические процессы, уменьшить время доставки и сократить затраты [21, 22, 23, 24]. В обзоре научной работы [25] выделены пять ключевых аспектов – экономическая эффективность логистики, устойчивость к кризисам, экологическая безопасность, технологическая интеграция и структура сети – которые являются определяющими для эффективности мультимодальных систем.

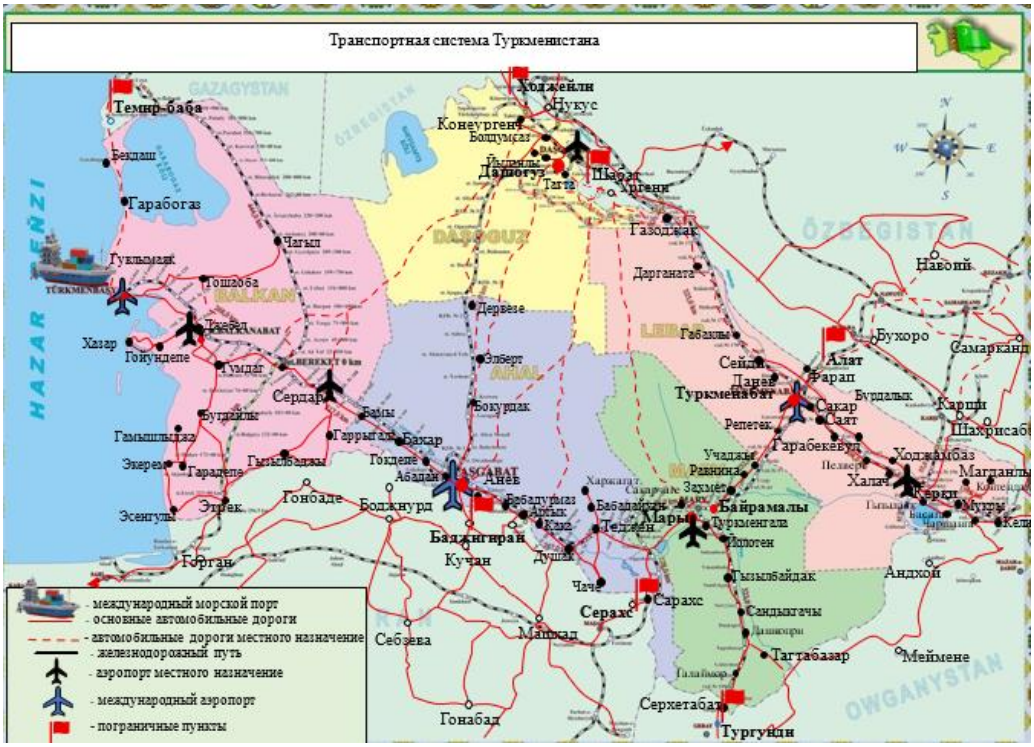


Рис. 2. Схема транспортных путей Туркменистана (составлено авторами на основе: [26])

Наземные пограничные переходы обозначены на рисунке 2 красными флажками. В настоящее время по территории Туркменистана проходят следующие автомобильные дороги, являющиеся составной частью международных транспортных коридоров: Туркменбаши–Ашхабад–Мары–Туркменабат–Фарап–граница с Узбекистаном; Ашхабад–Дашогуз; Ашхабад–Гаудан; Туркменбаши–Гарабогаз; Кызыларбат–Гудриолум.

Маршруты перечисленных дорог проложены по территории пяти областей страны и соединены со столицей г. Ашхабад [6]. В таблице 1 представлена характеристика автомобильных пограничных переходов.

Таблица 1

Международные пограничные пункты пропуска автомобилей на границе Туркменистана

№ п/п	Название пограничного государства	Место расположения пограничного пункта			Режим работы пункта
		на автомобильной дороге	в республике Туркменистан	в пограничном государстве	
1	Узбекистан	Фарап – Алат	Лебапская обл., район Фарап	Буарская обл., Алатский район	Светлое время суток
		Дашогуз – Шават	Дашогузская обл., район Шабат	Хорезмская обл., Шаватский район	Светлое время суток
		Конеургенч – Ходжейли	Дашогузская обл., район Конеургенч	Каракалпакстан, Ходжейлинский район	С 9:00 до 18:00 (только выезд в Узбекистан)
2	Иран	Гаудан – Баджигиран	32 км от Ашхабада	Административный центр Иранской губернии Кучан	Светлое время суток
		Сарахс – Серахс	Ахалская обл., поселок Сарахс	Провинция Хорасан – Резави	Светлое время суток
3	Афганистан	Серхетабат – Тургунди	Марыйская обл., г. Серхетабад	провинция Герат	Светлое время суток
4	Казахстан	Карабогаз – Темир-баба	Балканская обл., Каракиянский район	Мангистауская обл.	Светлое время суток
5	Азербайджан	Морской порт КПП «Туркменбаши» – Каспийская окружная морская погранбаза	Балканская обл., г. Туркменбаши	г. Баку, Баиловский район	Светлое время суток
6	Россия	Морской порт КПП «Туркменбаши» – порт Оля	Балканская обл., г. Туркменбаши	г. Астрахань, Лиманский район, село Оля	Светлое время суток

Анализируя данные таблице 1, можно отметить, что количество автомобильных пограничных пунктов с Казахстаном и Афганистаном по одному, с Ираном – два, с Узбекистаном – три, а также имеется КПП в логистическом терминале – порт Туркменбаши. В Россию и Азербайджан автомобильная дорога прерывается паромными переправами и может рассматриваться как мультимодальные сообщения с участием трех видов транспорта: автомобильно-водный и железнодорожно-водный. Общая протяженность автомобильных дорог общего пользования в Туркменистане составляет более 14 тыс. км, при этом практически вся сеть (12 тыс. км) состоит из дорог с твердым покрытием [27].

Железнодорожный транспорт Туркменистана имеет возможность осваивать большие грузо- и пассажиропотоки, протяженность железных дорог составляет – 3550,9 км. Железнодорожные пограничные станции страны в основном используются для грузовых перевозок. Транспортная сеть железных дорог представлена на рисунке 2, а в таблице 2 приведены характеристики железнодорожных пограничных пунктов на границе Туркменистана.

Таблица 2

Международные пограничные пункты пропуска железнодорожных поездов на границе Туркменистана

№ п/п	Название пограничного государства	Место расположения		
		на железной дороге	в республике Туркменистан	в пограничном государстве
1	Узбекистан	ст. Тахиадаш – ст. Наймакуль	Дашогузская обл., у р. Амударья	Каракалпакстан, Тахиаташский район
		ст. Губадаг – ст. Джумуртау	Дашогузская обл., район Болдумсаз	Каракалпакстан, Амударьинский район
		ст. Дашогуз – ст. №449	Дашогузская обл., г. Дашогуз	Хорезмская область
		ст. Газоджак – ст. Питныяк	Лебапская обл., город Газоджак	Хорезмская обл.
		ст. Фарап – Ходжадовлет	Лебапская обл., район Фарап	Бухарская обл.
		ст. Таллимарджан – ст. Таллимарджон	Лебапская обл., район Ходжамбаз	Узбекистан, Кашкадарьинская обл.
		ст. №161 – ст. Термез	Лебапская обл., разъездной ст. между ст. Таллимарджан и Разъезд №16	Сурхандарьинская обл.
2	Афганистан	ст. Имамназар – ст. Акина	Лебапская обл., южной части г. Керки	провинция Фарьяб
		ст. Серхетабат – ст. Торгунди	Марыйская обл., г. Серхетабат	провинция Герат
3	Иран	ст. Сарахс – ст. Серахс	Ахалская обл., пос. Сарахс	провинция Хорасан – Резави
		ст. Артик – ст. Лотфабад	Ахалская обл., район Кака	провинция Хорасан – Резави
		ст. Акяйла – ст. Инче-Бурун	Балканская обл., район Этрек	район Дашли – Бурун
4	Казахстан	ст. Серхетяка – Болашак	Балканская обл., регион Каспийского моря	обл. Мангистау
5	Россия	Порт Туркменбаши – порт Оля	Балканская обл., г. Туркменбаши	г. Астрахань, Лиманский район, с. Оля

По данным таблицы 2 один пропускной пункт находится на севере на границе с Казахстаном, два пункта с Афганистаном, три с Ираном (на юге страны) и семь с Узбекистаном. На западе в Россию и Азербайджан железная дорога прерывается паромными переправами через воды Каспийского моря и может рассматриваться как

перспективное мультимодальное сообщение через транспортно-логистический терминал – порт Туркменбаши.

Крупный железнодорожный узел (ст. Берекет, Балканская область) является важным стратегическим узлом на Транскаспийской магистрали (Каспийское море – Туркменистан – Узбекистан – Казахстан) на стыке с транспортной сетью «Восток-Запад» и Транснациональной магистралью «Север – Юг» (Россия – Казахстан – Туркменистан – Иран – Персидский залив) [5]. Крупные грузовые транспортно-логистические терминалы расположены на таких станциях, как Сарахс (Ахалская область) и Этрек (Балканская область). Логистический оператор железных дорог Туркменистана – государственная компания «Türkmendemirýollary» (Туркменские железные дороги). Главный офис компании находится в столице г. Ашхабад.

У железнодорожного транспорта существует хорошая возможность выбора различных типов вагонов (рисунок 3) (крытые, платформы, цистерны, рефрижераторы и др.) для перевозки всех видов грузов от промышленных (включая крупногабаритные и тяжеловесные) до сельскохозяйственных. Железнодорожный транспорт страны осваивает как внутренние перевозки, так и импортные, экспортные и транзитные перевозки с внедрением современных мультимодальных технологий [9].



Рис. 3. Виды железнодорожных вагонов (составлено авторами по: [28, 29, 30]): а) автомобилевозы; б) цистерны; в) пассажирские; г) платформы для перевозки контейнеров; д) крытые вагоны; е) полувагоны

Быстрый и надежный способ перевозки грузов и пассажиров обеспечивается использованием воздушного транспорта. Несмотря на самый дорогой вид транспорта, авиаперевозки позволяют с минимальными сроками выполнять доставки как на короткие, так и на дальние расстояния. На территории страны в каждой области имеются несколько аэропортов. Характеристики аэропортов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Характеристики аэропортов Туркменистана

№ п/п	Название аэропорта	Место расположения	Идентификация код IATA/ICAO	Тип аэропорта
1	Международный аэропорт Ашхабада (Ashgabat International Airport)	обл. Ахал, г. Ашхабад	ASB/UTAA	международный
2	Международный аэропорт Туркменабад (Turkmenabat International Airport)	обл. Лебап, г. Туркменабад	CRZ/UTAV	международный
3	Международный аэропорт Туркменбаши (Turkmenbashi International Airport)	обл. Балкан, г. Туркменбаши	KRW/UTAK	международный
4	Аэропорт Мары (Mary Airport)	обл. Мары, г. Мары	MYP/UTAM	внутренний
5	Аэропорт Керки (Kerki Airport)	обл. Лебап, г. Керки	KEA/UTAE	внутренний
6	Аэропорт Дашогуз (Dashoguz Airport)	обл. Дашогуз, г. Дашогуз	TAZ/UTAT	внутренний
7	Аэропорт Балканабат (Balkanabat Airport)	обл. Балкан, г. Балканабат	BKN/UTAN	внутренний
8	Аэропорт Гызыларбат	обл. Балкан, г. Сердар	UT52	внутренний

Из перечисленных аэропортов (таблица 3) только международные аэропорты могут выполнять мультимодальные перевозки экспортных грузов и пассажиров на большие расстояния в другие страны мира (рис. 4).



Рис. 4. Перевозка авиационным транспортом на дальние расстояния (составлено авторами по: [31])

Международные мультимодальные перевозки грузов и пассажиров могут выполнять самолеты из трех международных аэропортов страны (см. таблицу 3, рисунок. 5). Международный аэропорт в Ашхабаде является самым важным узлом для воздушных перевозок и крупным транзитным пунктом на континентальных и межконтинентальных авиатрассах. Пропускная способность суперсовременной воздушной гавани – более полутора тысяч пассажиров в час. А его грузовой терминал способен перерабатывать до 200 тыс. т грузов в год [5].



Рис. 5. Грузовые терминалы международных аэропортов Туркменбаши, Ашхабад и Туркменабад (составлено авторами по: [32, 33, 34]): Т1, Т2, СТ – транспортно-логистические терминалы

В таблице 4 приводится характеристика транспортно-логистических терминалов в международных аэропортах республики Туркменистан.

Анализируя характеристики транспортно-логистических терминалов в международных аэропортах (см. таблицу 4), можно выделить особую важность функционирования аэропорта Туркменбаши как составного элемента мультимодальных перевозок во взаимосвязи с транспортно-логистическим терминалом порта Туркменбаши, что позволяет организовать перевозки грузов и пассажиров как в Россию, так и в другие страны мира.

Для мультимодальных перевозок различных грузов в марте 2023 г. авиакомпания аэропорта Ашхабад приобрела переоборудованный самолет из пассажирского Airbus A330-200P2F в грузовой EZ-F429 (рисунок. 6), который стал первым в Центральной Азии широкофюзеляжным самолетом.

На сегодняшний день более 90% грузовых перевозок в межконтинентальной торговле между Азией и Европой осуществляются морским путём. Развивающиеся страны, не имеющие выхода к морю, расходуют около 18% своих экспортных поступлений на оплату транспортных услуг, тогда как в целом развивающиеся страны тратят 9% [15]. В западной части территории страны находится побережье Каспийского моря. на котором расположен крупнейший транспортно-логистический терминал (ТЛТ) – порт Туркменбаши. Особое внимание уделяется созданию здесь мультимодального центра, который связывает морской, железнодорожный, воздушный и автомобильный транспорт в единый узел, а также формирует системы логистического сервиса в порту, способные полностью обеспечить его конкурентоспособность и высокий уровень качества услуг по распределению грузов [5]. ТЛТ имеет возможность выполнять международные мультимодальные перевозки грузов и пассажиров по водному пути между Востоком и Западом, связывая Азию с Кавказом, а также осуществляя связь со странами Черного, Средиземного морей с выходом в страны Балтийского моря и морями Северного Ледовитого океана [20].

Таблица 4

Характеристики международных аэропортов Туркменистана

Сравниваемые показатели	Международный аэропорт Ашхабад (ASB)	Международный аэропорт Туркменбаши (KRW)	Международный аэропорт Туркменабад (CRZ)
Статус и роль	главный международный хаб страны, воздушные ворота столицы. Имеет статус порто – франко	Каспийский международный хаб, ключевой аэропорт национальной туристической зоны «Аваза»	международный и региональный аэропорт в Лебапской области, важный для восточных регионов
Местоположение	обл. Ахал, г. Ашхабад, 10 км к северо-западу	г. Туркменбаши, Балканская обл., побережье Каспийского моря	г. Туркменабат (бывш. Чарджоу), Лебапская обл.
Год реконструкции	2016	2010, модернизирован в 2018-2020 гг.	реконструирован в 2010-2018 гг.
Пассажиропоток	более 2 млн пассажиров в год	рассчитан на 1,6 млн пассажиров в год.	небольшой, обслуживает в основном внутренние и грузовые рейсы
Терминалы	две взлетно-посадочные полосы (ВПП) терминалы: три пассажирских и три грузовых	одна ВПП, способна принимать все типы ВС терминалы: международный и внутренний	одна ВПП, терминалы: грузовой и пассажирский
Основные направления	международные и внутренние	международные, внутренние, сезонные чартеры на «Авазу»	международные грузовые, внутренние
Уникальные особенности	архитектура в виде сокола, крупнейший и самый технологичный аэропорт, база национального авиаперевозчика «Туркменховаёллары»	«Морские ворота» Туркменистана, ключевая инфраструктура для туристической зоны «Аваза», спроектирован для обслуживания транзитных пассажиров между Азией и Европой.	обслуживает важные промышленные и сельскохозяйственные регионы на востоке страны
Геополитическое значение	главный мультимодальный транспортно-логистический терминал на пути между Азией и Европой, символ нейтралитета и современности Туркменистана	«Каспийский хаб» часть стратегии развития туризма и международных связей через Каспийское море	мультимодальный транспортно-логистический терминал для восточного Туркменистана и приграничных районов

Экономическая характеристика международного морского порта связана с его важной ролью в перевалке нефтепродуктов, сырья и экспортно-импортных товаров, включая продукцию химической, машиностроительной, текстильной промышленности и продукцию сельского хозяйства.

Большие грузопотоки между Туркменистаном и Россией возможно осваивать морским транспортом, используя суда река-моря различных типов (сухогрузы, танкеры, контейнеровозы, паромы автомобильные и железнодорожные, см. рисунок 7).



Рис. 6. Грузовой самолет EZ-F429 [35]

а)



б)



Рис. 7. Паромы различного типа:
а) универсальный паром класса RO-PAX «Бахтияр» [36];
б) железнодорожный паром «Авангард» [37]

На рисунке 8 представлен вид причалов для пассажирских и грузовых перевозок с использованием судов река-море и паромов для перевозки железнодорожных вагонов и автомобилей.



а)



б)

Рис. 8. Международный порт Туркменбаши: а) вид сверху порта на карте [38]; б) вид причалов для перевозки грузов и пассажиров [39]

В мультимодальном транспортно-логистическом терминале – порт Туркменбаши оборудованы погранично-пропускные пункты таблицы 5, обеспечивающие перевозку грузов и пассажиров в международных сообщениях.

Таблица 5

Международные морские пограничные пункты в порту Туркменбаши

№ п/п	Место расположения	Наименование порта	Место расположения	
			в республике Туркменистан	в приграничном государстве
1	Азербайджан	Туркменбаши – Баку	Балканская обл., г. Туркменбаши	г. Баку, поселок Алят
2	Россия	Туркменбаши – Оля	Балканская обл., г. Туркменбаши	г. Астрахань, Лиманский район, с. Оля
3	Иран	Туркменбаши – Бандар-Анзали, Астара	Балканская обл., г. Туркменбаши	провинция Гилян и г. Астара
4	Казахстан	Туркменбаши – Актау	Балканская обл., г. Туркменбаши	область Мангистауская

В таблице 5 раскрываются возможности порта Туркменбаши и показывается, что порт является крупным мультимодальным отправителем и приемщиком грузов в товарообороте с Россией, также обеспечивает выход через Азербайджан в Турцию и страны Европы в Чёрном и Средиземном морях. По коридору через Иран возможен выход к странам Персидского залива.

В Туркменистане внедряется проект по Программе Европейского союза ТРАСЕКА для Центральной Азии. Он подразумевает создание международной сети транспортно-логистических центров в Центральной Азии. Результаты исследования показали, что реализация проектов по развитию морского транспорта создает условия для устойчивого экономического роста стран Каспийского бассейна [40]. В соответствии с ним реализовано строительство современного международного мультимодального транспортно-логистического центра в морском порту г. Туркменбаши [7].

Порт Туркменбаши сталкивается с проблемами, связанными как с формированием инфраструктуры, так и с логистическими и административными аспектами. Основные проблемы включают:

а) инфраструктурные ограничения (малая пропускная способность автотранспортных средств и железнодорожного подвижного состава, что замедляет сквозной транзит грузов по коридорам "Север-Юг" и "Восток-Запад");

б) логистические узкие места (несмотря на рост грузооборота, не все процессы оптимизированы для растущих объемов мультимодальных перевозок, существуют задержки в реализации цифровых процедур в этапах перегрузки в портовых и терминальных комплексах [8];

в) слабая цифровизация таможенных процедур (несмотря на существующие улучшения, проблемы с трансграничными операциями все еще могут приводить к задержкам);

г) недостаток инвестиций и прозрачности (закрытость политических процессов и нехватка прозрачности законодательной системы затрудняют привлечение широкого круга иностранных инвесторов в транспортную логистику);

д) изменение уровня Каспийского моря (обмеление Каспийского моря является серьезной экологической проблемой, которая напрямую влияет на транспортную

логистику и требует постоянных дноуглубительных работ у причалов и, в частности, проведение дорогостоящих работ по углублению канала в порту Оля).

Перечисленный ряд проблем является современным вызовом в развивающихся мультимодальных транспортно-логистических взаимодействиях России и Туркменистана. Проблемы преодолеваются постепенно и эффективно, как с помощью обучения и подготовки молодых специалистов в российских вузах, так и с заимствованием и адаптацией новых цифровых технологий, которыми вооружены современные мультимодальные транспортно-логистические терминалы Москвы, Санкт-Петербурга, Новороссийска, Владивостока и др.

Астраханский новостной портал отмечает, что в 2022 г. президент РФ поручил провести работы по углублению канала для достижения проходной осадки судов не менее 4,5 метров. «Проведенные Росморпортом дноуглубительные работы способствовали повышению уровня судоходства на канале. В 2023 г. количество прошедших по каналу судов выросло на 17,4% по сравнению с 2022 г., а валовая вместимость судов увеличилась на 38,6%. За четыре месяца 2024 г. соответствующие показатели также выросли – на 53 и 42%» [41].

Экспорт текстильной продукции является одним из наиболее развивающихся направлений в стране. Поставки хлопка – вторая по значимости статья экспорта в Россию и его доля в общем объёме экспорта составляла 24,4 % (34,8 млн долл.) в 2011 г. и 23,9 % (36,2 млн долл.) в 2019 г. [18].

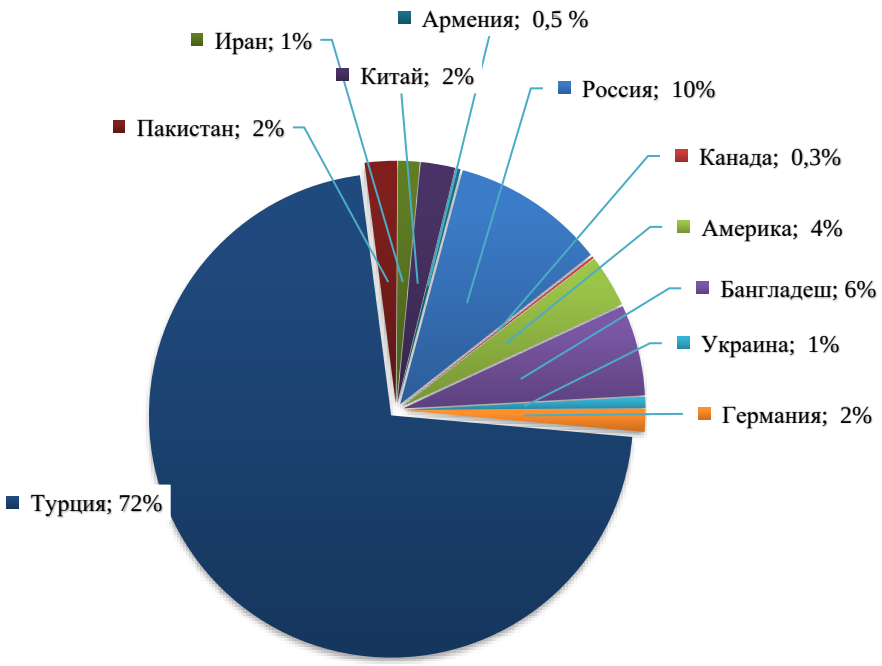


Рис. 9. Объемы экспорта хлопковой продукции (составлено авторами)

По данным рисунка 9 наибольшие поставки хлопковой продукции осуществляются в Турцию (72% от общего объема экспорта) и в Россию (10% соответственно). В остальные страны наблюдается малый объем экспорта: Канада 0,3%; Армения 0,5%; Иран 1%; Украина 1%. Экспорт нацелен на продолжительный период, что показывают устойчивые сельскохозяйственные площади возделывания хлопковой культуры во всех областях республики. В марте 2024 г. сообщалось, что за последние годы план сбора хлопка в стране поддерживался на уровне 1,2 млн т с 580 тыс. гектаров земли. Республика Туркменистан входит в десятку мировых производителей хлопковой

продукции. Авторами разработана логистическая «Хлопковая концепция Туркменистана», представленная в работах [1-4].

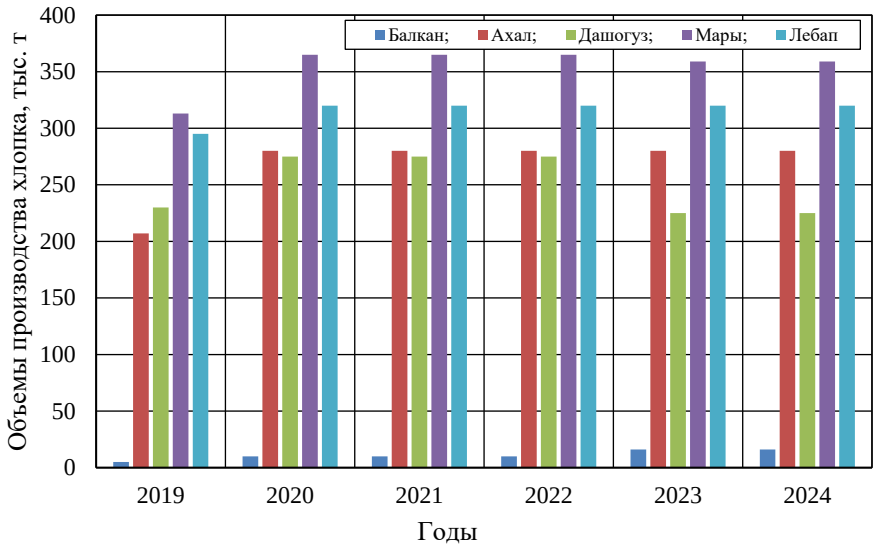


Рис. 10. Объемы производства хлопка по областям республики Туркменистана (2019-2024 гг.) [1-4]

На рисунке 10 представлены объемы производства хлопка по областям Туркменистана (в период 2019-2024 гг.): Балкан – 15 тыс. т, Ахал – 320 тыс. т, Дашогуз – 350 тыс. т, Лебап – 390 тыс. т и Марыйская область – 425 тыс. т [1-4]. Разница в объемах между регионами обусловлена географическими, климатическими и инфраструктурными факторами. Область Мары – самый перспективный регион для хлопководства, причиной является благоприятное расположение в бассейне реки Мургаб с наиболее плодородными сероземными почвами. Лебапская область – протянувшаяся вдоль русла р. Амударья обеспечивает стабильно высокую урожайность, несмотря на засушливый климат. Дашогуз – крупный производитель на севере страны, находящийся в низовьях Амударьи. Ахалская область – центральный регион страны. Земледелие сосредоточено в предгорьях Копетдага и вдоль трассы Каракумского канала, часть земель и ресурсов направлена на развитие инфраструктуры столицы и пригородов. Минимальные показатели дает Балканская область – регион, большая часть которого пустыня Каракум и неблагоприятная близость к Каспийскому морю обусловлена отсутствием оросительных каналов. Можно сделать вывод, что показатели урожайности хлопка выше в тех местах, где ближе всего находится река или основные ветви Каракумского канала.

Автомобильный транспорт играет важную роль в логистических звеньях: поле-терминал, терминал-прядильная фабрика, прядильная фабрика-текстильный комплекс, текстильный комплекс-швейная фабрика. Особая роль у автомобильного транспорта как связующего главного компонента в звеньях логистической системы «Хлопковая концепция Туркменистана». Хлопковая продукция занимает одно из центральных мест в экономике Туркменистана, обеспечивая значительный объем экспортных доходов. Однако для повышения эффективности экспортных операций необходимо оптимизировать логистические процессы, что становится возможным благодаря внедрению мультимодальных систем.

На рисунке 11 представлены схемы предлагаемых маршрутов «Ашхабад – Москва» для проектирования мультимодальных доставок хлопковой продукции из

Туркменистана в Россию. Разработано пять маршрутов. В первом маршруте перевозка выполняется только автомобильным транспортом: Ашхабад – Туркменбаши (580 км); Туркменбаши – Астрахань (1633 км); Астрахань – Волгоград – Москва (1422 км). Общая длина маршрута составляет 3635 км. Время перевозки составит 2 дн. 8 часов (для определения времени доставки груза использовались инструменты Яндекс.Карты и предлагаемые калькуляторы расчетов затрат времени на перевозку железнодорожным и морским транспортом по методике, представленной в работе авторов [42]).



Рис. 11. Мультимодальные схемы перевозок хлопковой продукции в Россию (составлено авторами по: [43])

Во втором маршруте используются автомобильный и морской транспорт (рисунок 11), причем морской осуществляет перевозку автомобиля с грузом на пароме: Ашхабад – Туркменбаши (автомобильный – 580 км); Туркменбаши – Астрахань (морской паром – 818,6 км); Астрахань – Волгоград – Москва (автомобильный – 1422 км). Общая длина мультимодального маршрута составляет – 3002 км. Предполагаемое время перевозки составит 2 дн. 14 часов.

В третьем маршруте используются автомобильный, морской и железнодорожный транспорт (рисунок 11), причем морской также осуществляет перевозку автомобиля с грузом на пароме: Ашхабад – Туркменбаши (автомобильный – 580 км); Туркменбаши – Астрахань (морской паром – 818,6 км); Астрахань – Волгоград – Москва (железнодорожный – 1532 км). Общая длина мультимодального маршрута составляет 3112 км. Предполагаемое время перевозки составит 8 дн. 20 часов.

В четвертом маршруте используются автомобильный и морской транспорт: Ашхабад – Туркменбаши (автомобильный – 580 км); Туркменбаши – Баку (морской паром – 306 км); Баку – Махачкала – Астрахань (автомобильный – 898 км); Астрахань – Волгоград – Москва (автомобильный – 1422 км). Общая длина мультимодального маршрута составляет – 3206 км. Предполагаемое время перевозки составит 2 дн. 6 часов.

В пятом маршруте используются автомобильный, железнодорожный и морской транспорт: Ашхабад – Туркменбаши (автомобильный – 580 км); Туркменбаши – Баку (морской паром – 306 км); Баку – Махачкала – Астрахань (железнодорожный – 680 км); Астрахань – Волгоград – Москва (железнодорожный – 1532 км). Общая длина мультимодального маршрута составляет 3098 км. Предполагаемое время перевозки составит 12 дн.

Время перевозки по предлагаемым маршрутам находится в пределах от 2 дн. 6 часов до 12 дн. Соответственно в результате будут получены и разные транспортные затраты. Разработка мультимодальных технологий совместного использования различных видов транспорта позволит определить и настроить режимы их работы с обеспечением оптимальных временных и стоимостных показателей для перевозки хлопковой продукции из Туркменистана в Россию. Этот объем в последние годы увеличивается и превышает 10% (36,2 млн долл. в год) от всего экспортного производства хлопка.

Поиск новых путей совершенствования организации и технологии функционирования автомобильного транспорта в мультимодальных перевозках остается главным направлением в продолжении научных работ авторов.

Выводы

В рамках представленной работы решается научная задача исследования перспектив развития мультимодальных транспортно-логистических терминалов Туркменистана во взаимодействии с Россией с использованием системного подхода и системного анализа основ взаимодействия различных видов транспорта. Следует отметить, что транспортно-логистическая инфраструктура Туркменистана позволяет реализовывать оптимальные решения как на собственной территории, так и на территориях сопредельных государств. Выстроенная структура проведенного научного исследования позволяет рассматривать предлагаемые мультимодальные транспортно-логистические терминалы как логистический каркас терминальной сети Туркменистана во взаимосвязи с маршрутами международных транспортных коридоров «Восток-Запад» и «Север-Юг». Проведены исследования по определению структурных характеристик взаимодействия различных видов транспорта в предлагаемых мультимодальных системах.

Выполнен анализ характеристик транспортных сетей и пограничных переходов с возможным обеспечением мультимодальных международных перевозок грузов и пассажиров. Анализируя характеристики транспортно-логистических терминалов в международных аэропортах, можно выделить особую важность функционирования аэропорта Туркменбаши как составного элемента мультимодальных перевозок во взаимосвязи с транспортно-логистическим терминалом порта Туркменбаши, которые позволяют организовать перевозки грузов и пассажиров как в Россию, так и в другие страны мира.

Каждый международный транспортно-логистический терминал республики имеет множество решаемых проблем, к которым относятся и озвученные в статье проблемы мультимодального Порта Туркменбаши. Насущной и острой необходимостью является скорейшая цифровизация транспортного сектора, в первую очередь – таможенного документооборота и совершенствование рациональной загрузки перегрузочных и логистических мощностей, обслуживающих международный транзит.

Исследовано взаимодействие различных видов транспорта в предлагаемых мультимодальных маршрутах перевозки растущего объема экспортной хлопковой продукции между Туркменистаном и Россией. Разработка мультимодальных технологий доставки хлопковой продукции позволит определить и настроить режимы работы используемых видов транспорта с обеспечением оптимальных временных и стоимостных показателей. Поиск новых путей совершенствования организации и технологии функционирования автомобильного транспорта в мультимодальных доставках через транспортно-логистические терминалы остается главным направлением в продолжении научных работ авторов.

Список литературы:

1. Вейискулыева, Г. Х. Исследование работы автомобильного транспорта в звеньях логистической системы «Поле-терминал-прядильная фабрика-текстильный комплекс-швейная фабрика» Республики Туркменистан / Г. Х. Вейискулыева // Конкурс научно-исследовательских работ студентов ВолгГТУ : тезисы докладов, Волгоград, 25–29 апреля 2022 года / редколлегия: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград : ВолгГТУ, 2022. – С. 130–131. – EDN ZHMMWN.

2. Вейискулыева, Г. Х. Применение линейного программирования в организации транспортного обслуживания звеньев логистической концепции хлопка в Республике Туркменистан / Г. Х. Вейискулыева, А. Б. Курбанов // XXVII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области : сборник материалов конференции, Волгоград, 02–15 ноября 2022 года / редколлегия: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград : ВолгГТУ, 2022. – С. 436–438. – EDN XOZTJH.

3. Вейискулыева, Г. Х. Совершенствование организации автомобильных перевозок грузов в звеньях логистической системы «Хлопковая концепция Туркменистана» / Г. Х. Вейискулыева, А. Б. Курбанов // Конкурс научно-исследовательских работ студентов ВолгГТУ : тезисы докладов, Волгоград, 24–28 апреля 2023 года / редколлегия: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград : ВолгГТУ, 2023. – С. 127–128. – EDN CAWEJW.

4. Вейискулыева, Г. Х. Исследование автомобильных перевозок мультимодальных систем экспорта хлопковой продукции Республики Туркменистан / Г. Х. Вейискулыева // XXIX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области : сборник материалов конференции, Волгоград, 16 сентября – 15 ноября 2024 года. – Волгоград : ВолгГТУ, 2024. – С. 292–293. – EDN WEBXXG.

5. Йегенмаммедов, А. Актуальные направления международной транспортной логистической стратегии независимого и нейтрального Туркменистана / А.

Йегенмаммедов, Д. Атажанова, М. Ишанов // Символ науки : международный научный журнал. – 2023. – № 3-2. – С. 40–41. – EDN RIELSI.

6. Современное состояние дорожной автомобильной сети Туркменистана / А. Бердиева, Н. Озбеков, А. Бяшимов, М. Ишанов // Символ науки : международный научный журнал. – 2023. – № 3-2. – С. 15–17. – EDN OFIOSO.

7. Перспективы развития транспортной логистики в мультимодальных перевозках Туркменистана / М. Ишанов, Н. Озбеков, А. Бяшимов, А. Бердиева // Символ науки : международный научный журнал. – 2023. – № 3-2. – С. 38–39. – EDN OBSOEJ.

8. Транспортно-логистическая система Туркменистана / О. Д. Покровская, З. Н. Елдашов, М. А. Марченко, М. В. Шевердова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 305–318. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-19-2-305-318. – EDN TCIRFH.

9. Покровская, О. Д. Железнодорожно-логистическая система Туркменистана / О. Д. Покровская, З. Н. Елдашов // Инновационный транспорт. – 2019. – № 4(34). – С. 22–29. – DOI 10.20291/2311-164X-2019-4-22-29. – EDN UYOVHR.

10. Rozin, M. Stereotypes of Transport Logistics in Geopolitical Analytics / M. Rozin, V. Ryabtsev, V. Svechkarev // Transportation Research Procedia. – 2022. – Vol. 61. – Pp. 285–288. – ISSN 2352-1465. – URL: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.047 (дата обращения: 03.03.2026).

11. Hickson, A. Supply chain intermediaries study / A. Hickson, B. Wirth, G. Morales. – University of Manitoba Transport Institute, 2008. – 56 p.

12. Бауэрсокс, Д. Д. Логистика: интегрированная цепь поставок / Д. Д. Бауэрсокс, Д. Д. Клосс. – М. : ЗАО «Олимп-Бизнес», 2010. – 640 с.

13. MH&L Staff. How Will Industry 4 Affect the Supply Chain? – Sep 16, 2015. – URL: http://mhlnews.com/global-supply-chain/how-will-industry-40-affectsupply-chain (дата обращения: 03.03.2026).

14. Syzdykbayeva, B. Improving the Transport and Logistic Infrastructure of a City Using the Graph Theory Method: The Case of Astana, Kazakhstan / B. Syzdykbayeva, Z. Raimbekov, R. Baiburiev, Z. Dulatbekova // Sustainability. – 2025. – Vol. 16, No. 6. – P. 2486. – 10.3390/su17062486.

15. Насиров, А. Д. Развитие транспортных коридоров в Центральной Азии и новые региональные инициативы в транспортно-логистической сфере / А. Д. Насиров, Ф. А. Кадиров // Транспорт шёлкового пути. – 2021. – № 1. – С. 12–19. – EDN VOJFDO.

16. Tulendiyev, Ye. Development of transit potential of Central Asian countries in the context of economic and integrational cooperation / Ye. Tulendiyev, N. Apakhayev, S. Badambayeva, G. Kenzhebayeva, M. Izteleuova // Scientific Bulletin of Mukachevo State University. Series "Economics". – 2025. – Vol. 12, No. 2. – P. 48–64. – DOI: 10.52566/msu-econ2.2025.48.

17. Krylatov, A. Y. Assessment of the Impact of the International North-South Transport Corridor on Transit Travel Time in Regional and Global Cargo Transportation / A. Y. Krylatov, M. A. Fedorova, A. P. Raevskaya // Economy of Regions. – 2025. – Vol. 21, No. 2. – P. 332–348. – DOI: 10.17059/ekon.reg.2025-2-6.

18. Мигранян, А. А. Внешнеэкономическая политика Туркмении: итоги десятилетия / А. А. Мигранян // Геоэкономика энергетики. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 43–66. – DOI 10.48137/2687-0703_2021_13_1_43. – EDN XASSEY.

19. Виноградов, И. С. Китай и Россия во внешней политике и экономике Туркменистана / И. С. Виноградов // Китай в мировой и региональной политике. История и современность. – 2022. – Т. 27, № 27. – С. 240–253. – DOI 10.48647/IFES.2022.69.40.016. – EDN PVGFWE.

20. Advantour : [сайт]. – URL: https://www.advantour.com/rus/?page=silkroad&city=index&ln=ru (дата обращения: 28.03.2026).

21. Куликов, А. В. Перспективы развития автомобильного транспорта в мультимодальных перевозках Северного морского пути РФ / А. В. Куликов // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-1(89). – С. 14–24. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-2-1(89)-14-24. – EDN APCQIO.

22. Исследование подходов формирования оптимальных компонентов в звеньях современных мультимодальных логистических систем поставок удобрений внутренним и мировым потребителям / А. В. Куликов, Е. А. Близнякова, С. А. Бондаренко, А. А. Куликов // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – № 2(77). – С. 16–26. – DOI 10.33979/2073-7432-2022-77-2-16-26. – EDN ILMYHS.

23. Куликов, А. В. Научно-практический механизм экономической оценки применения технологических схем в логистических мультимодальных системах / А. В. Куликов, П. А. Павлов, А. А. Куликов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2022. – Т. 10, № 4(59). – С. 147–163. – DOI 10.34220/2308-8877-2022-10-4-147-163. – EDN COJZKP.

24. Куликов, А. В. Исследование эффективных транспортно-логистических связей в организации международных мультимодальных перевозок минеральных удобрений / А. В. Куликов, Е. А. Близнякова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2021. – Т. 9, № 2(53). – С. 117–130. – DOI 10.34220/2308-8877-2021-9-2-117-130. – EDN OWJJZM.

25. Kurniawan, D. A. Multimodal Logistics for Resilient and Sustainable Global Supply Chains: Strategic Insights from Integrated Transport Systems / D. A. Kurniawan // Sinergi International Journal of Logistics. – 2024. – Vol. 2, No. 4. – DOI: 10.61194/sijl.v2i4.731.

26. Линия противостояния в Туркменистане // Фонд стратегической культуры : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.fondsk.ru/news/2023/02/23/liniya-protivostoyaniya-v-turkmenistane.html (дата обращения: 28.03.2026).

27. Туркменистан – важнейший транспортно-транзитный перекресток континента // Посольство Туркменистана в Китае : [сайт]. – 2026. – URL: https://china.tmembassy.gov.tm/en/news/3619 (дата обращения: 27.03.2026).

28. Новости Евразийского экономического союза // Е-СНГ : [сайт]. – URL: https://e-cis.info/news/567/116096/ (дата обращения: 28.03.2026).

29. Туркменистан увеличит закупку вагонов у России // Turkmenportal : [сайт]. – URL: https://turkmenportal.com/ru/news/44247-turkmenistan-russiyadan-satyn-aljak-wagonlarynyn-sanyny-artdyrmakchy (дата обращения: 28.03.2026).

30. Туркменские железные дороги возобновили продажу билетов в вагоны VIP-класса // Turkmenportal : [сайт]. – URL: https://turkmenportal.com/ru/news/64002-turkmenskie-zheleznye-dorogi-vozobnovili-prodazhu-biletov-v-vagony-vip-klassa (дата обращения: 28.03.2026).

31. [Карта-схема] : [фотография] // Ozon. – URL: https://ir.ozone.ru/s3/multimedia-1/6267647293.jpg (дата обращения: 28.03.2026).

32. Спутниковая карта города Туркменбаши // Яндекс.Карты. – URL: https://yandex.ru/maps/10326/turkmenbashi/hybrid/?from=tableau_yabro&ll=52.995238%2C40.042918&z=16 (дата обращения: 28.03.2026).

33. Спутниковая карта города Ашхабад // Яндекс.Карты. – URL: https://yandex.ru/maps/10324/ashgabat/hybrid/?from=tableau_yabro&ll=58.372047%2C37.981357&z=14 (дата обращения: 28.03.2026).

34. Спутниковая карта Туркменистана // Яндекс.Карты. – URL: https://yandex.ru/maps/?from=tableau_yabro&l=sat%2Cskl&ll=63.568945%2C38.936699&z=15 (дата обращения: 28.03.2026).

35. [Фотография самолета Turkmenistan Airlines] // Planespotters. – URL: https://cdn.plnspttrs.net/39225/ez-f429-turkmenistan-airlines-airbus-a330-243-p2f_PlanespottersNet_1418599_bbabfbfc38_o.jpg (дата обращения: 28.03.2026).

36. [Фотография транспортного средства] // Paluba. – URL: https://paluba.media/wp-content/uploads/2022/01/01-25.jpg (дата обращения: 28.03.2026).

37. [Фотография инфраструктуры] // Министерство транспорта РФ. – URL: https://mintrans.gov.ru/storage/app/uploads/public/5a2/4db/90c/thumb_380410_1800_1200_0_0_auto.jpg (дата обращения: 28.03.2026).

38. Спутниковая карта Международного порта Туркменбаши // Яндекс.Карты. – URL: https://yandex.ru/maps/10326/turkmenbashi/search/Международный%20порт%20Туркменбаши/?l=sat&ll=53.014486%2C40.004242&sctx=ZAAAAAgCEAAaKAoSCQHcLF4sQkZAESkGSDSBWkhAEhIJkUjb%2BBOV4j8RrmNccXFU3j8iBgABAgMEBSgKOABA1lBIAWoCcnWdAc3MzD2gAQCoAQC9AU6lmrKCAjrQnNC10LbQtNGD0L3QsNGA0L7QtNC90YvQuSDQv9C%2B0YDRgiDQotGD0YDQutC80LXQvdCx0LDRi4igIAkgIFMTAzMjaaAgxkZXNrdG9wLW1hcHM%3D&sll=53.014486%2C40.004242&source=serp_navig&sspn=0.008937%2C0.004637&z=17 (дата обращения: 28.03.2026).

39. [Фотография] // MySeldon. – URL: https://storage.myseldon.com/news-pict-be/BEDBAB85E666FC76D21549D82EE393C2 (дата обращения: 28.03.2026).

40. Akbulaev, N. Maritime transport and economic growth: Interconnection and influence (an example of the countries in the Caspian sea coast; Russia, Azerbaijan, Turkmenistan, Kazakhstan and Iran) / N. Akbulaev, G. Bayramli // Marine Policy. – 2020. – Vol. 118. – DOI: 10.1016/j.marpol.2020.104005. – (Scopus, SSCI).

41. Международный порт Туркменбаши // KaspyInfo : [сайт]. – URL: https://kaspyinfo.ru/news/gorod/101714 (дата обращения: 28.03.2026).

42. Исследование организации функционирования транспорта в международной логистической системе доставки каустической соды из Волгограда в Бишкек / А. В. Куликов, Б. Советбеков, А. А. Вальковская, А. А. Куликов // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2022. – Т. 22, № 12. – С. 49–61. – DOI 10.36979/1694-500X-2022-22-12-49-61. – EDN TSYZEH.

43. Карта маршрута // Яндекс.Карты. – URL: https://yandex.ru/maps/?ll=56.537568%2C41.233568&z=5 (дата обращения: 28.03.2026).

References

1. Veiskulyeva, G. Kh. (2022). Investigation of the operation of motor transport in the links of the logistics system "Field-terminal-spinning mill-textile complex-garment factory" of the Republic of Turkmenistan. In Competition of research works of students of VolgSTU: Abstracts of reports, Volgograd, April 25–29, 2022 (pp. 130–131). Volgograd: VolgSTU. EDN: ZHMMWN. (In Russ.)

2. Veiskulyeva, G. Kh., & Kurbanov, A. B. (2022). Application of linear programming in the organization of transport services for the links of the cotton logistics concept in the Republic of Turkmenistan. In XXVII Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region: Collection of conference materials, Volgograd, November 02–15, 2022 (pp. 436–438). Volgograd: VolgSTU. EDN: XOZTJH. (In Russ.)

3. Veiskulyeva, G. Kh., & Kurbanov, A. B. (2023). Improvement of the organization of road freight transportation in the links of the logistics system "Cotton Concept of Turkmenistan". In Competition of research works of students of VolgSTU: Abstracts of reports,

Volgograd, April 24–28, 2023 (pp. 127–128). Volgograd: VolgSTU. EDN: CAWEJW. (In Russ.)

4. Veiskulyeva, G. Kh. (2024). Investigation of road transport of multimodal systems for the export of cotton products of the Republic of Turkmenistan. In XXIX Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region: Collection of conference materials, Volgograd, September 16 – November 15, 2024 (pp. 292–293). Volgograd: VolgSTU. EDN: WEBXXG. (In Russ.)

5. Yegenmammedov, A., Atajanova, D., & Ishanov, M. (2023). Current directions of the international transport logistics strategy of independent and neutral Turkmenistan. Symbol of Science: International Scientific Journal, (3-2), 40–41. EDN: RIELSI. (In Russ.)

6. Berdiyeva, A., Ozbekov, N., Byashimov, A., & Ishanov, M. (2023). Current state of the road network of Turkmenistan. Symbol of Science: International Scientific Journal, (3-2), 15–17. EDN: OFIOSO. (In Russ.)

7. Ishanov, M., Ozbekov, N., Byashimov, A., & Berdiyeva, A. (2023). Prospects for the development of transport logistics in multimodal transport of Turkmenistan. Symbol of Science: International Scientific Journal, (3-2), 38–39. EDN: OBSOEJ. (In Russ.)

8. Pokrovskaya, O. D., Eldashov, Z. N., Marchenko, M. A., & Sheverdova, M. V. (2022). Transport and logistics system of Turkmenistan. Proceedings of Petersburg Transport University, 19(2), 305–318. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-305-318. EDN: TCIRFH. (In Russ.)

9. Pokrovskaya, O. D., & Eldashov, Z. N. (2019). Railway logistics system of Turkmenistan. Innovative Transport, (4(34)), 22–29. DOI: 10.20291/2311-164X-2019-4-22-29. EDN: UYOVHR. (In Russ.)

10. Rozin, M., Ryabtsev, V., & Svechkarev, V. (2022). Stereotypes of transport logistics in geopolitical analytics. Transportation Research Procedia, 61, 285–288. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.047.

11. Hickson, A., Wirth, B., & Morales, G. (2008). Supply chain intermediaries study. University of Manitoba Transport Institute.

12. Bowersox, D. J., & Closs, D. J. (2010). Logistics: An integrated supply chain. Moscow: ZAO "Olymp-Business". (In Russ.)

13. MH&L Staff. (2015, September 16). How Will Industry 4 Affect the Supply Chain? Retrieved March 3, 2026, from http://mhlnews.com/global-supply-chain/how-will-industry-40-affectsupply-chain

14. Syzdykbayeva, B., Raimbekov, Z., Baiburiev, R., & Dulatbekova, Z. (2025). Improving the transport and logistic infrastructure of a city using the graph theory method: The case of Astana, Kazakhstan. Sustainability, 16(6), 2486. DOI: 10.3390/su17062486.

15. Nasirov, A. D., & Kadirov, F. A. (2021). Development of transport corridors in Central Asia and new regional initiatives in the transport and logistics sphere. Transport of the Silk Road, (1), 12–19. EDN: VOJFDO. (In Russ.)

16. Tulendiyev, Ye., Apakhayev, N., Badambayeva, S., Kenzhebayeva, G., & Izteleuova, M. (2025). Development of transit potential of Central Asian countries in the context of economic and integrational cooperation. Scientific Bulletin of Mukachevo State University. Series "Economics", 12(2), 48–64. DOI: 10.52566/msu-econ2.2025.48.

17. Krylatov, A. Y., Fedorova, M. A., & Raevskaya, A. P. (2025). Assessment of the impact of the International North-South Transport Corridor on transit travel time in regional and global cargo transportation. Economy of Regions, 21(2), 332–348. DOI: 10.17059/ekon.reg.2025-2-6.

18. Migranyan, A. A. (2021). Foreign economic policy of Turkmenistan: Results of the decade. Geoeconomics of Energy, 13(1), 43–66. DOI: 10.48137/2687-0703_2021_13_1_43. EDN: XASSEY. (In Russ.)

19. Vinogradov, I. S. (2022). China and Russia in the foreign policy and economy of Turkmenistan. China in World and Regional Politics. History and Modernity, 27(27), 240–253. DOI: 10.48647/IFES.2022.69.40.016. EDN: PVGFWE. (In Russ.)

20. Advantour. (n.d.). Great Silk Road. Retrieved March 28, 2026, from https://www.advantour.com/rus/?page=silkroad&city=index&ln=ru (In Russ.)

21. Kulikov, A. V. (2025). Prospects for the development of road transport in multimodal transportation of the Northern Sea Route of the Russian Federation. World of Transport and Technological Machines, (2-1(89)), 14–24. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-1(89)-14-24. EDN: APCQIO. (In Russ.)

22. Kulikov, A. V., Bliznyakova, E. A., Bondarenko, S. A., & Kulikov, A. A. (2022). Research of approaches to the formation of optimal components in the links of modern multimodal logistics systems for the supply of fertilizers to domestic and world consumers. World of Transport and Technological Machines, (2(77)), 16–26. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-77-2-16-26. EDN: ILMYHS. (In Russ.)

23. Kulikov, A. V., Pavlov, P. A., & Kulikov, A. A. (2022). Scientific and practical mechanism of economic evaluation of the application of technological schemes in logistics multimodal systems. Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 10(4(59)), 147–163. DOI: 10.34220/2308-8877-2022-10-4-147-163. EDN: COJZKP. (In Russ.)

24. Kulikov, A. V., & Bliznyakova, E. A. (2021). Investigation of effective transport and logistics links in the organization of international multimodal transportation of mineral fertilizers. Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 9(2(53)), 117–130. DOI: 10.34220/2308-8877-2021-9-2-117-130. EDN: OWJJZM. (In Russ.)

25. Kurniawan, D. A. (2024). Multimodal logistics for resilient and sustainable global supply chains: Strategic insights from integrated transport systems. Sinergi International Journal of Logistics, 2(4). DOI: 10.61194/sijl.v2i4.731.

26. Line of confrontation in Turkmenistan. (2023). Foundation for Strategic Culture. Retrieved March 28, 2026, from https://www.fondsk.ru/news/2023/02/23/liniya-protivostoyaniya-v-turkmenistane.html (In Russ.)

27. Turkmenistan – the most important transport and transit crossroads of the continent. (2026). Embassy of Turkmenistan in China. Retrieved March 27, 2026, from https://china.tmembassy.gov.tm/en/news/3619

28. News of the Eurasian Economic Union. (n.d.). E-CIS. Retrieved March 28, 2026, from https://e-cis.info/news/567/116096/ (In Russ.)

29. Turkmenistan will increase the purchase of wagons from Russia. (n.d.). Turkmenportal. Retrieved March 28, 2026, from https://turkmenportal.com/ru/news/44247-turkmenistan-russiyadan-satyn-aljak-wagonlarynyn-sanyny-artdyrmakchy (In Russ.)

30. Turkmen railways resumed ticket sales for VIP-class carriages. (n.d.). Turkmenportal. Retrieved March 28, 2026, from https://turkmenportal.com/ru/news/64002-turkmenskie-zheleznye-dorogi-vozobnovili-prodazhu-biletov-v-vagony-vip-klassa (In Russ.)

31. [Map-scheme] [Photograph]. (n.d.). Ozon. Retrieved March 28, 2026, from https://ir.ozone.ru/s3/multimedia-1/6267647293.jpg

32. Satellite map of the city of Turkmenbashi. (n.d.). Yandex.Maps. Retrieved March 28, 2026, from https://yandex.ru/maps/10326/turkmenbashi/hybrid/?from=tableau_yabro&ll=52.995238%2C40.042918&z=16 (In Russ.)

33. Satellite map of the city of Ashgabat. (n.d.). Yandex.Maps. Retrieved March 28, 2026, from https://yandex.ru/maps/10324/ashgabat/hybrid/?from=tableau_yabro&ll=58.372047%2C37.981357&z=14 (In Russ.)

34. Satellite map of Turkmenistan. (n.d.). Yandex.Maps. Retrieved March 28, 2026, from https://yandex.ru/maps/?from=tableau_yabro&l=sat%2Cskl&ll=63.568945%2C38.936699&z=15 (In Russ.)

35. [Photograph of Turkmenistan Airlines aircraft]. (n.d.). Planespotters. Retrieved March 28, 2026, from https://cdn.plnspttrs.net/39225/ez-f429-turkmenistan-airlines-airbus-a330-243-p2f_PlanespottersNet_1418599_bbabfbfc38_o.jpg

36. [Photograph of a vehicle]. (n.d.). Paluba. Retrieved March 28, 2026, from https://paluba.media/wp-content/uploads/2022/01/01-25.jpg

37. [Photograph of infrastructure]. (n.d.). Ministry of Transport of the Russian Federation. Retrieved March 28, 2026, from https://mintrans.gov.ru/storage/app/uploads/public/5a2/4db/90c/thumb_380410_1800_1200_0_0_auto.jpg

38. Satellite map of the International Port of Turkmenbashi. (n.d.). Yandex.Maps. Retrieved March 28, 2026, from https://yandex.ru/maps/10326/turkmenbashi/search/Международный%20порт%20Туркменбаши/?l=sat&ll=53.014486%2C40.004242&sctx=ZAAAAAgCEAAaKAoSCQHcLF4sQkZAESkGSDSBWkhAEhIJkUjb%2BBOV4j8RrmNccXFU3j8iBgABAgMEBSgKOABA1lBIAWoCcnWdAc3MzD2gAQCoAQC9AU6lmrKCAjrQnNC10LbQtNGD0L3QsNGA0L7QtNC90YvQuSDQv9C%2B0YDRgiDQotGD0YDQutC80LXQvdCx0LDRi4igIAkgIFMTAzMjaaAgxkZXNrdG9wLW1hcHM%3D&sll=53.014486%2C40.004242&source=serp_navig&sspn=0.008937%2C0.004637&z=17 (In Russ.)

39. [Photograph]. (n.d.). MySeldon. Retrieved March 28, 2026, from https://storage.myseldon.com/news-pict-be/BEDBAB85E666FC76D21549D82EE393C2

40. Akbulaev, N., & Bayramli, G. (2020). Maritime transport and economic growth: Interconnection and influence (an example of the countries in the Caspian sea coast; Russia, Azerbaijan, Turkmenistan, Kazakhstan and Iran). Marine Policy, 118. DOI: 10.1016/j.marpol.2020.104005.

41. International Port of Turkmenbashi. (n.d.). KaspyInfo. Retrieved March 28, 2026, from https://kaspyinfo.ru/news/gorod/101714 (In Russ.)

42. Kulikov, A. V., Sovetbekov, B., Valkovskaya, A. A., & Kulikov, A. A. (2022). Research of the organization of transport functioning in the international logistics system for the delivery of caustic soda from Volgograd to Bishkek. Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University, 22(12), 49–61. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-49-61. EDN: TSYZEH. (In Russ.)

43. Route map. (n.d.). Yandex.Maps. Retrieved March 28, 2026, from https://yandex.ru/maps/?ll=56.537568%2C41.233568&z=5 (In Russ.)

Veiskulyeva G., Kulikov A.V.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MULTIMODAL TRANSPORT AND LOGISTICS TERMINALS OF TURKMENISTAN IN COOPERATION WITH RUSSIA

Abstract*. The article is devoted to solving the urgent problem of developing trade and economic relations of the Republic of Turkmenistan by introducing new technological solutions in the promotion of material flows. The analysis of literary sources shows the advantageous geographical location of Turkmenistan in Central Asia from the perspective of the prospective development of the East-West and North-South multimodal transport and logistics corridors. The paper analyzes the key problems and prospects of developing transport networks, the*

characteristics of border crossings and transport and logistics terminals of all types of transport that allow for multimodal transportation of goods. Special attention is paid to the analysis of the current state of the transport and logistics terminal, the Turkmenbashi port, which allows for the development of multimodality in the combination of sea-road, sea-rail, and sea-air transport. The article explores the nomenclature of various types of cargo transported for export. The export of textile products is one of the most rapidly developing sectors in the Turkmen economy, generating stable export revenues. The large-scale production of cotton products allows for the implementation of new multimodal technologies, which reduce delivery times and costs. The findings and recommendations presented in the article can be used by the Agency of Transport and Communications under the Cabinet of Ministers of Turkmenistan and transportation logistics professionals in the development of multimodal transport and logistics terminals for international cargo transportation.

***Keywords**: Transport in Turkmenistan, the Great Silk Road, transport routes, international transport corridors, multimodal transport and logistics terminals, international border checkpoints, international airports in Turkmenistan, cargo terminals, the Turkmenbashi International Port, and cotton exports.*

Сведения об авторах:

Вейискулыева Гулдана Хошгелдиевна
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия
Студент магистратуры второго курса специальности «Транспортная логистика»
e-mail: guldanaweyiskulyyewa@gmail.com
Куликов Алексей Викторович
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия
Доцент кафедры «Автомобильные перевозки»,
Кандидат технических наук
e-mail: v2xoda@ya.ru

Information about the authors:

Veiskulyeva Guldana Khoshgeldievna
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
Second-year Master's student in Transport Logistics
e-mail: guldanaweyiskulyyewa@gmail.com
Kulikov Alexey Viktorovich
FGBOU VO "Volgograd State Technical University", Volgograd, Russia
Associate Professor of the Department of Road Transport,
Candidate of Technical Sciences
e-mail: v2xoda@ya.ru

УДК 656.073

Завалищин Д.С., Хазимуллин А.Д.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Аннотация. *Статья посвящена актуальной проблеме повышения эффективности мультимодальных грузовых перевозок в условиях нестабильности транспортной инфраструктуры. Отмечено, что традиционные подходы к оптимизации, ориентированные на единичные критерии, не учитывают многокритериальную природу реальных логистических задач. Особую сложность представляет принятие решений в динамически изменяющейся среде, когда параметры перевозочного процесса могут меняться в пути следования. В качестве математического аппарата для решения подобных задач предлагается использовать метод динамического программирования, позволяющий строить поэтапные стратегии управления. Рассмотрена содержательная постановка задачи на примере железнодорожных перевозок с использованием автомобильного транспорта для первой и последней мили. Показано, что визуализация загруженности инфраструктуры позволяет выбирать альтернативные маршруты с увеличенными автомобильными плечами в обход узких мест. Приведены экономические расчеты, демонстрирующие сокращение времени доставки при незначительном увеличении стоимости. Построена математическая модель мультимодальной перевозки в терминах многошагового процесса принятия решений. Рассмотрены особенности моделирования с учетом случайных параметров, в том числе с применением бета-распределения. Обоснована целесообразность использования динамического программирования в стохастической постановке, а также перспективность динамической постановки задачи с возможностью корректировки решений в промежуточных пунктах на основе поступающей информации.*

Ключевые слова*: мультимодальные перевозки, динамическое программирование, многошаговый процесс принятия решений, оптимизация маршрута, транспортная инфраструктура, бета-распределение, стохастическая неопределенность, принцип оптимальности Беллмана, контейнерные перевозки, железнодорожный транспорт.*

Введение

Эффективность грузовых перевозок в значительной мере зависит от качества принимаемых решений на всех этапах транспортного процесса, начиная с планирования маршрутов до выбора способов транспортировки и существующих ресурсов. При этом традиционные подходы к оптимизации, ориентированные часто на поиск экстремума единичных критериев (например, минимизацию транспортных издержек или времени доставки, максимизацию прибыли), не позволяют в полной мере учесть многокритериальную природу реальных логистических задач.

Особую сложность представляет принятие решений в условиях изменяющейся внешней среды, когда параметры транспортного процесса (технологические окна обслуживания и ремонта, загруженность дорог, доступность транспортных средств, стоимость топлива) могут меняться в процессе движения. В таких условиях необходимы инструменты, позволяющие не только находить оптимальные решения в детерминированной постановке, но и адаптироваться к изменениям в реальном времени, формируя многошаговые стратегии управления. Одним из наиболее мощных математических аппаратов для решения подобных задач является динамическое программирование (ДП), позволяющее декомпозировать сложную многошаговую задачу на последовательность более простых подзадач и строить оптимальную стратегию принятия решений на всем интервале планирования.

Классический метод динамического программирования как для дискретных, так и для непрерывных задач, ориентирован на однокритериальную оптимизацию. В то же время реальные задачи маршрутизации и выбора способов транспортировки грузов характеризуются наличием нескольких критериев. Интеграция многокритериального подхода в рамках динамического программирования требует разработки специальных процедур, позволяющих формировать Парето-оптимальные множества решений на каждом шаге. Например, в исследовании [1] описываются методы решения задач динамической многокритериальной оптимизации. Традиционный подход к их решению предполагает сведение векторного критерия к скалярному. Однако для прикладных задач такой подход имеет ограничения, так как возникает потребность в описании всей парето-оптимальной границы в динамике. Следовательно, существует потребность в развитии векторного динамического программирования по аналогии с классическим вариантом [2]. В работе [3] проведен оригинальный синтез современных подходов в целостную концепцию, формализованную математически и архитектурно, с акцентом на проактивность и адаптивность, что отличает ее от существующих преимущественно реактивных решений. Представленная концепция формирует теоретический и методологический фундамент для перехода к новому классу интеллектуальных транспортных систем.

Содержательная постановка задачи мультимодальной перевозки

С 2019 года наблюдается стагнация с последующим снижением грузооборота железнодорожного транспорта, вызванное нарушением международных цепей поставок вследствие мировой пандемии COVID–19 в 2020 году, сменой направлений грузопотоков в 2022 году. Перечисленные обстоятельства способствовали к повышению нагрузки на пропускную способность отдельных участков сети. Особенно остро с данной проблемой столкнулся дальневосточный полигон железной дороги, в частности железнодорожные пункты пропуска, однако, своеобразные железнодорожные пробки можно наблюдать и на внутренних полигонах дороги, в частности, на Московском узле (см. рисунок 1).

В качестве дополнительной нагрузки на инфраструктуру можно отметить высокий трафик транзитных перевозок, представленный на рисунке 2, через территорию Российской Федерации. Трафик транзитных перевозок, по оценкам экспертов транспортной отрасли, продолжит расти.

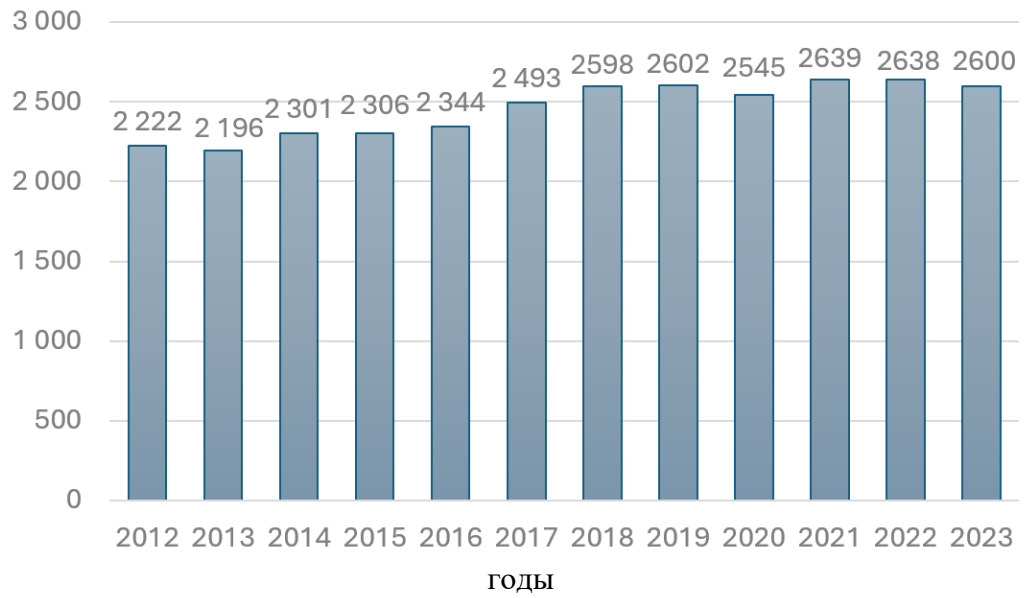


Рис. 1. Динамика объема грузооборота на железнодорожном транспорте в млрд тонно-километров

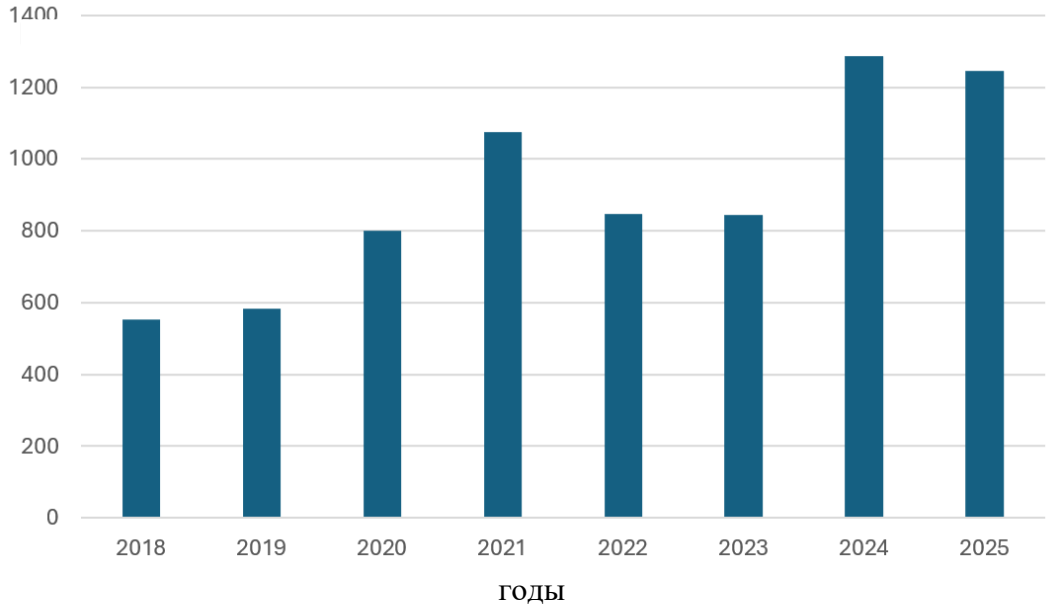


Рис. 2. Динамика трафика транзитных перевозок на железнодорожном транспорте по территории Российской Федерации в тысячах ДФЭ

Сложившаяся обстановка привела к увеличению сроков согласования заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом, оставлением грузовых поездов уже в пути следования, что приводит к увеличению сроков доставки и, как следствие, снижению доверия к железнодорожному транспорту и переходу грузовой базы на альтернативные виды транспорта, в первую очередь на автомобильный.

Вышеперечисленные аспекты подчеркивают актуальность выработки организационно-управленческих решений в области железнодорожных перевозок, разработке новых логистических решений, маршрутов перевозки и способов кооперации между участниками транспортного рынка.

В большинстве случае грузоотправители при перевозке на В большинстве случаев грузоотправители при перевозке на железнодорожном транспорте сталкиваются с необходимостью в использовании автомобильного транспорта для покрытия первой и последней мили, вызванной физической удаленностью железнодорожной инфраструктуры от производства (см. рисунок 3).

Обычно плечо перевозки на автомобильном транспорте до железнодорожной станции отправления, подъездных путей предприятия, непосредственно примыкающего к железнодорожным путям общего пользования, или транспортно-логистического центра относительно расстояния железнодорожной перевозки минимально.



Рис. 3. Популярная схема мультимодальной перевозки

Однако в сложившейся ситуации грузоотправители сталкиваются с дополнительными финансовыми и временными издержками по использованию инфраструктуры отправления и подвижного состава в ожидании согласования заявки на железнодорожную перевозку, а также с рисками оставления поезда от движения в пути следования (см. рисунок 4). Перечисленные факторы приводят к увеличению сроков доставки и повышают риски утраты части грузов в пути следования.



Рис. 4. Проблемная ситуация, приводящая к вынужденной мультимодальной перевозке

Расширение пропускных способностей не представляется решением сложившейся ситуации, так как требует серьезных финансовых и временных затрат, при условии сохранения узких мест, вызванных перерабатывающей способностью станции назначения и железнодорожного пункта пропуска. Таким образом, существует необходимость переосмысления логистических подходов при планировании цепей поставок.

На всем полигоне ОАО «РЖД» используется технология планирования перевозок грузов с помощью динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» (ДМЗИ) [3 – 8]. Основной задачей ДМЗИ является ежедневный анализ пропускных способностей железнодорожной инфраструктуры, и на основе данного анализа обеспечение стабильного приема грузов к перевозке при равномерной загрузке инфраструктуры.

Функциональные возможности ДМЗИ:

– автоматическое рассмотрение заявки на перевозку грузов ГУ–12 в соответствии с правилами очереди на железнодорожном транспорте;

– анализ суточного клиентского плана погрузки (СКПП);

– оценка пропускной способности инфраструктуры на основании заявляемых объемов отгрузки;

Логичным развитием возможностей ДМЗИ является интерактивная визуализация пропускных способностей полигона железных дорог по примеру навигационного приложения «Яндекс–карты», интерпретированного на рисунке 5, с возможностью отображения участков движения с повышенной загрузкой, из-за которых может не согласовываться заявка на перевозку или повышается риск оставления поезда от движения в пути следования.



Рис. 5. Визуализация пропускных способностей

Визуализация загруженности инфраструктуры позволит выработать решение по организации перевозки с наименьшими временными издержками, которое будет заключаться в увеличении плеча автомобильной перевозки по мере необходимости.

Представленная концепция перевозок особенно подходит для грузов, перевозимых в контейнерах, так как уникальность транспортной тары позволяет минимизировать затраты по проведению погрузочно-разгрузочных работ.

В качестве примера рассматривается распространенная грузоперевозка из города Москва в морской порт Советская гавань. Данная перевозка будет состоять из автомобильной «первой мили» со склада отправителя до железнодорожной станции «Москва-Сортировочная» и железнодорожной перевозки до станции Советская гавань. Расстояние первой мили составляет от 20 до 100 км, общее расстояние железнодорожной перевозки – 9206 км.

На участках железнодорожной перевозки присутствуют несколько отрезков пути с затрудненной эксплуатационной обстановкой (см. рисунок 7), что влияет на сроки согласования заявки на железнодорожную перевозку, а также повышает риски нарушения сроков доставки со стороны железнодорожного перевозчика.

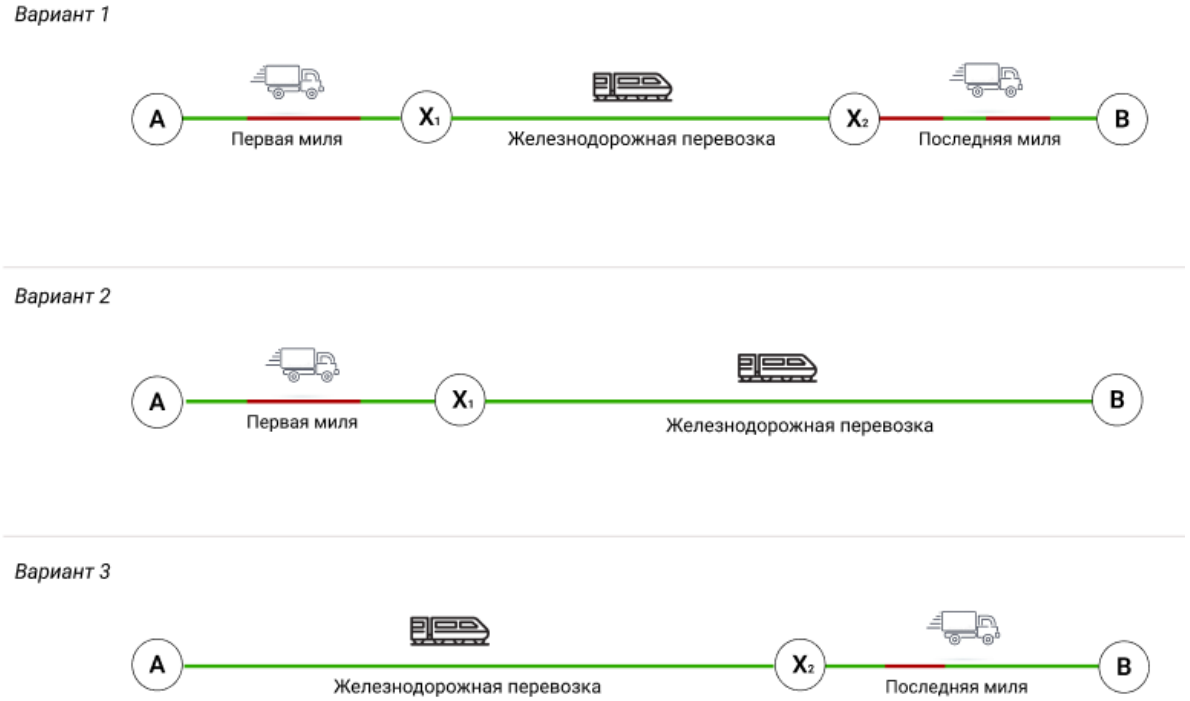


Рис. 6. Варианты увеличения автомобильных плеч, красные участки на схеме – железнодорожные перегоны с недостаточными пропускными способностями

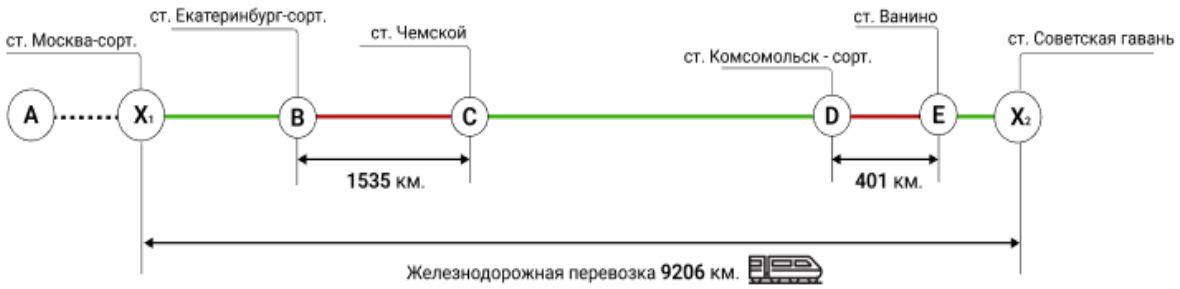


Рис. 7. Пример грузоперевозки с ограниченными пропускными способностями в пути следования

В качестве альтернативных способов организации цепочек поставок предлагается рассматривать увеличение автомобильных плеч при выборе максимально длинного участка железнодорожной перевозки без участков с ограниченными пропускными способностями (см. рисунок 8). Таким образом, в рассматриваемом примере большая часть маршрута осуществляется на железнодорожном транспорте с меньшими затратами на тариф, а перевозка автотранспортом от склада отправителя до железнодорожной станции Чемской позволит сократить общее время грузоперевозки, за счет сокращения времени согласования заявок на железнодорожную перевозку, а также минимизирует риски повышенных затрат на непроизводительные простои в пути следования.

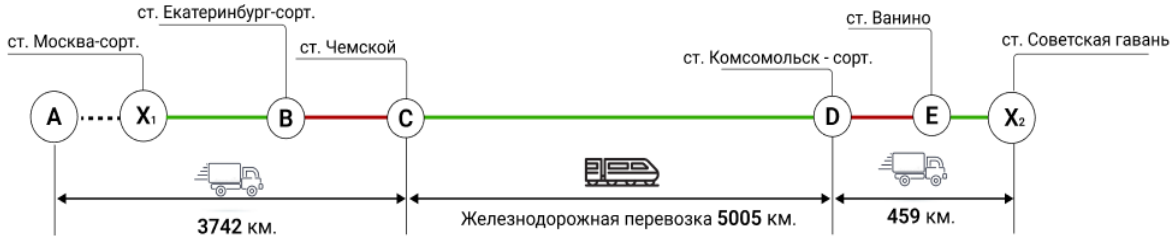


Рис. 8. Вариант организации грузоперевозки с увеличенными автомобильными плечами

Такой подход к процессу организации перевозок может встретить критику со стороны железнодорожного перевозчика, однако необходимо отметить, что рассматриваемое решение позволит сохранить объем погрузки на железнодорожный транспорт и повысить лояльность грузоотправителей, минимизируя риски полного отказа от железнодорожных перевозок.

Также в случае, если владельцем процесса будет выступать железнодорожный перевозчик, усматривается дополнительная коммерциализация в виде агентского вознаграждения от автоперевозчиков.

Будем рассматривать перевозку груза «оборудование» в контейнере. Для получения более объективных результатов экономики перевозки будем учитывать не только тарифы на грузоперевозку на различных видах транспорта, но стоимость суточной аренды фитинговой платформы 60-футов, аренды контейнера 20-футов, среднее время согласования заявки на перевозку железнодорожным транспортом, нормативный срок доставки.

Общие данные для экономического расчета:

– аренда фитинговой платформы составляет около 1500 рублей в сутки;

– средняя стоимость аренды 20-футового контейнера составляет 12500 рублей в месяц;

– среднее время согласования заявки на железнодорожную перевозку с Московского узла по состоянию на конец 2025 г. составляет от 10 до 20 суток, будем использовать среднее значение в 15 суток;

– среднее время согласования заявки на железнодорожную перевозку со станции Чемской в адрес Дальневосточного полигона дорог около 7 суток;

– время грузоперевозки автотранспортом от г. Москвы до г. Новосибирска 4 суток;

– нормативный срок доставки на жд. транспорте Москва – Советская гавань 23 дня;

– нормативный срок доставки на жд. Чемской – Комсомольск-Сорт. 13 суток;

Расчет стандартной грузоперевозки на железнодорожном транспорте с привлечением автотранспорта на первую/последнюю милю (рисунок 7).

Исходя из заданных параметров грузоперевозки, будем учитывать следующие затраты (указаны без НДС):

– аренда фитинговой платформы – 57000 рублей;

– аренда 20-ти футового контейнера – 25000 рублей;

– железнодорожный тариф составит 106000 рублей;

– первая миля в г. Москве на основании предложений перевозчиков составит 19000 рублей;

– последняя миля – 10000 рублей.

Итоговые затраты составят 207000 рублей без учета затрат на проведение погрузочно-разгрузочных работ, дополнительных сборов на жд, так как они

присутствуют в обоих вариантах перевозки, общее время грузоперевозки составит от 35 до 40 дней.

Необходимо отметить, что с экономической точки зрения не учитываются риски на оставление поезда от движения в пути следования, что влечет за собой увеличение сроков доставки и затрат на аренду подвижного состава 1500 рублей в сутки за платформу и 12500 рублей за контейнер, если общее время простоя и движения составит более одного календарного месяца.

Расчет грузоперевозки с увеличенными автомобильными плечами перевозки в обход узких мест железнодорожной инфраструктуры (рисунок 8)

Перечень затрат для мультимодальной грузоперевозки:

– стоимость автоперевозки г. Москва – г. Новосибирск составит 92000 рублей (актуально на 18.02.2026 г.);

– железнодорожный тариф Чемской – Комсомольск-Сорт. 79000 рублей;

– аренда фитинговой платформы – 36750 рублей;

– аренда 20-футового контейнера – 12500 рублей;

– стоимость автоперевозки со ст. Комсомольск-Сорт. до ст. Советская гавань составит 12000 рублей (актуально на 18.02.2026 г.);

Итоговые затраты составят 232000 рублей, срок доставки 24 дня.

Таким образом, стоимость грузоперевозки с удлиненными автомобильными плечами больше на 25000 рублей, чем стандартная перевозка железнодорожным транспортом, но быстрее на 11-16 суток, что очень часто может иметь большее значение при выборе способов транспортировки грузов. Особенно актуально данное утверждение при исполнении внешнеэкономических контрактов поставок.

При реализации вышеупомянутого функционала усматривается необходимость создания ОАО «РЖД» единого информационного пространства, которое бы объединяло существующие сервисы с визуализацией загруженности инфраструктуры, тем самым создавая возможность организации оптимальной перевозки в одном цифровом сервисе. Актуальность такого решения подчеркивает необходимость согласования более 50 цифровых продуктов, входящих в экосистему компании.

Построение математической модели мультимодальной перевозки

В мультимодальной перевозке в минимальной конфигурации можно отметить два основных момента, существенных для моделирования. Во-первых, это использование не менее двух видов транспорта (не обязательно различного типа). И во-вторы, наличие не менее двух возможных перегрузочных пунктов. Схема такой конфигурации изображена на рисунке 9.

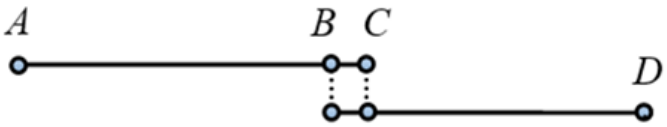


Рис. 9. Схема мультимодальной перевозки в минимальной конфигурации

Первый перевозчик задействован на участке *AB* или *AC*, а второй – на участке *BD* или *CD* в зависимости от выбора перегрузочного пункта *B* или *C*. Схема может быть интерпретирована двумя альтернативными вариантами перевозки (см. рисунок 10), отличающимися пунктом перегрузки – на Станции *B* или на Станции *C*. Станция *A* – начальный пункт, Станция *D* – конечный.

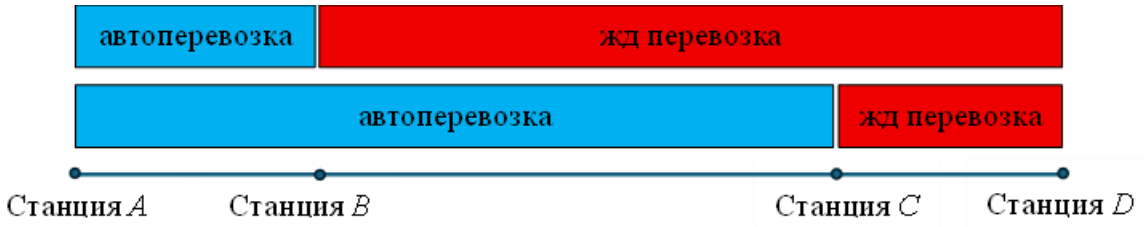


Рис. 10. Варианты мультимодальной перевозки

С точки зрения теории управления, рассматриваемую мультимодальную перевозку можно считать объектом управления. Само же управление будет заключаться в выборе (принятии) одного из альтернативных решений – пункта перегрузки на Станции *B* либо на Станции *C*.

Схема многошагового процесса принятия решений для рассматриваемого примера показана на рисунке 11.

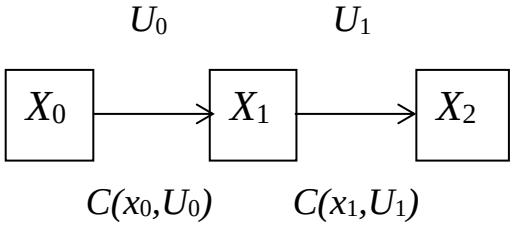


Рис. 11. Схема многошагового процесса принятия решений мультимодальной перевозки в минимальной конфигурации

Здесь символы X_0, X_1, X_2 обозначают последовательные этапы транспортного процесса: старт перевозки, перегрузочную операцию и доставку груза получателю. Смысл многошаговой процедуры принятия решений (показанной на рисунке 11) заключается в следующем.

Допустим, система находится в начальной точке X_0. После того, как выбрано и реализовано управление U_0, система переходит в следующее состояние X_1. При этом данное решение влечет за собой затраты, равные $C(X_0, U_0)$. В рассматриваемом примере (рисунок 9) состояние X_0 означает, что груз все еще находится у отправителя *A*. Выбор U_0 соответствует привлечению первого автомобильного перевозчика для доставки груза на станцию *B* либо на станцию *C*. После этого система оказывается в состоянии X_1 — груз прибыл на соответствующую станцию. Далее принимается очередное решение U_1, после чего система переходит в конечное состояние X_2, что означает перемещение груза уже железнодорожным транспортом до станции *D* и в итоге доставку конечному потребителю.

Чтобы найти наилучший способ управления таким многошаговым процессом, применяется метод динамического программирования. Использование этого подхода вместе с принципом оптимальности Беллмана дает возможность легко адаптировать модель к разным вариантам задачи и учитывать возможные нештатные ситуации.

Минимальная цена принятия решений за i шагов из j-го состояния описывается рекуррентным соотношением Беллмана [2]

$$f_i(X_j) = \min_{U_j}\{C(U_j, X_j) + f_{i-1}(X_{j+1})\}, \quad (1)$$

где U_j – управление на j -м шаге, $C(U_j, X_j)$ – цена принятия решения на j -м шаге. В качестве U_j реализуется выбор минимальной цены j -й перевозки. Последовательность переходов в многошаговом процессе принятия решений следующая.

1. Система находится в предпоследнем состоянии X_1. Цена принятия решения за один последний шаг определяется функцией

$$f_1(X_1) = \min_{U_1}\{C(U_1, X_1)\}.$$

2. Система находится в состоянии X_0. Цена принятия решения за два последних шага учитывает цену предыдущего решения и равна

$$f_2(X_0) = \min_{U_0}\{C(U_0, X_0) + f_1(X_1)\}.$$

Данные затраты соответствуют минимальной стоимости всей мультимодальной перевозки.

Алгоритм расчета оптимального варианта перевозки в минимальной конфигурации (привлечение двух субперевозчиков) с помощью предложенной модели опубликован в [9].

Мультимодальная перевозка несколькими видами транспорта

В повседневной практике транспортной деятельности большинство задач связано с необходимостью выбора из нескольких альтернатив. Среди имеющихся вариантов можно отыскать наилучший, если учитывать ограничения, связанные с природными условиями, экономикой, технологиями и кадровыми ресурсами. В связи с этим становится очевидной потребность в применении математических методов исследования операций для планирования и управления экономическими процессами. Поиск рациональных способов организации сложных перевозок ведет к разработке адаптированных (модифицированных) вариантов методов исследования операций. В данной работе, в частности, предлагается подход к решению задачи выбора наилучшего маршрута поездки. Рассматриваются перевозки с использованием нескольких видов транспорта. Лицо, отвечающее за принятие решений, может подобрать перевозчиков, опираясь на сведения о пункте отправления, пункте назначения и доступных видах транспорта. Для оптимизации процесса выбора применяется метод динамического программирования [10, 11].

Исходной информацией для решения задачи планирования маршрутов транспортных перевозок служит транспортная сеть, определяющая географические возможности доступа к различным пунктам отправления и назначения, оценки стоимостных характеристик услуг каждого из потенциальных перевозчиков, временные ограничения на перевозку, а также сведения о расписании движения маршрутных видов транспорта. Основным вопросом о возможности применения динамического программирования к задаче оптимального планирования маршрута является принципиальная доступность построения многошагового процесса принятия решений. Для разработки математической модели мультимодальной (составной) перевозки, допускающей использование аппарата динамического программирования в целях нахождения оптимального решения задачи построения полного маршрута, необходимо формализованное описание многошагового процесса принятия решений, схематическое представление которого приведено на рисунке 12.

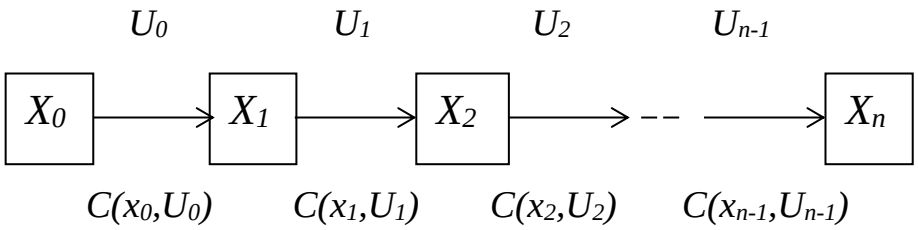


Рис. 12. Схема многошагового процесса принятия решений

Описание самого процесса принятия решений и алгоритм его оптимизации аналогичны рассмотренному выше и приведенному в [11].

Алгоритмическая реализация метода динамического программирования для оптимизации мультимодальной перевозки

Рассмотрим контейнерную перевозку двумя традиционными способами – с использованием железнодорожной платформы и полуприцепа контейнеровоза (ЖД и ППК). Перевозка осуществляется по шести перегонам со станциями, допускающими перегрузку с ЖД на ППК или обратно. Обозначим через *j* – перегон по ЖД, а через *j′* – перегон на ППК.

Если контейнер на текущем *j*-м перегоне перевозится по ЖД, то на очередной станции возможно принятие двух решений - продолжить перевозку по ЖД или перегрузить контейнер на ППК.

Если контейнер на текущем *j′*-м перегоне перевозится на ППК по федеральной автомобильной дороге, то на очередной станции возможно принятие двух решений - продолжить перевозку на ППК или перегрузить контейнер на ЖД платформу. Временные затраты на перевозку по перегонам и перегруз приведены в таблице 1. Для ясности используются цвета: красный для ЖД перегонов и синий для автомобильных. Перегрузка возможна в начале перегона, начало перегонов – состояние системы (перевозки). На 4-м ЖД перегоне – узкое место с длительностью перевозки **26** часов.

Таблица 1

Временные затраты на перевозку контейнера и его перегрузку

перегон	1	2	3	4	5	6
перевозка ЖД, час	10	14	13	**26**	13	15
перегрузка ЖД→ППК	5	6	5	4	4	5
перевозка ППК, час	11	12	14	15	15	17
перегрузка ППК→ЖД	7	5	6	7	3	6

Начать расчет можно с последнего перегона, вычислив для него минимальное время для каждого из двух возможных состояний (перевозка по ЖД или на ППК) на входе в перегон. Затем последовательно двигаться к началу маршрута, на каждом перегоне для каждого состояния выбрать лучший вариант (остаться на том же транспорте или перегрузиться – выбранный вариант выделен жирным шрифтом). В конце производится выбор наименьшего из двух значений для первого перегона – это и есть оптимальное общее время.

Последний перегон после 5-го:

6

$f_1(5) = \min \{15; 5+17\} = \min \{15; 22\} = 15$ продолжить ЖД или перегрузка на ППК

$f_1(5') = \min \{17; 6+15\} = \min \{17; 21\} = 17$ продолжить ППК или перегрузка на ЖД

Два последних перегона после 4-го:

5	6

$f_2(4) = \min \{13 + f_1(5); 4 + 15 + f_1(5')\} = \min \{13 + 15; 4 + 15 + 17\} = \min \{28; 36\} = 28$
продолжить ЖД или перегрузка на ППК

$f_2(4') = \min \{15 + f_1(5'); 3 + 13 + f_1(5)\} = \min \{15 + 17; 3 + 13 + 15\} = \min \{32; 31\} = 31$
продолжить ППК или перегрузка на ЖД

Три последних перегона после 3-го:

4	5	6

$f_3(3) = \min \{26 + f_2(4); 4 + 15 + f_2(4')\} = \min \{26 + 28; 4 + 15 + 31\} = \min \{54; 50\} = 50$
продолжить ЖД или перегрузка на ППК

$f_3(3') = \min \{15 + f_2(4'); 7 + 26 + f_2(4)\} = \min \{15 + 31; 7 + 26 + 28\} = \min \{46; 61\} = 46$
продолжить ППК или перегрузка на ЖД

Четыре последних перегона после 2-го:

3	4	5	6

$f_4(2) = \min \{13 + f_3(3); 5 + 14 + f_3(3')\} = \min \{13 + 50; 5 + 14 + 46\} = \min \{63; 65\} = 63$
продолжить ЖД или перегрузка на ППК

$f_4(2') = \min \{14 + f_3(3'); 6 + 13 + f_3(3)\} = \min \{14 + 46; 6 + 13 + 50\} = \min \{60; 69\} = 60$
продолжить ППК или перегрузка на ЖД

Пять последних перегонов после 1-го:

2	3	4	5	6

$f_5(1) = \min \{14 + f_4(2); 6 + 12 + f_4(2')\} = \min \{14 + 63; 6 + 12 + 60\} = \min \{77; 78\} = 77$
продолжить ЖД или перегрузка на ППК

$f_5(1') = \min \{12 + f_4(2'); 5 + 14 + f_4(2)\} = \min \{12 + 60; 5 + 14 + 63\} = \min \{72; 82\} = 72$
продолжить ППК или перегрузка на ЖД

Шесть последних перегонов (весь маршрут):

1	2	3	4	5	6

$f_6(0) = \min \{10 + f_5(1); 5 + 11 + f_5(1')\} = \min \{10 + 77; 5 + 11 + 72\} = \min \{87; 88\} = 87$
продолжить ЖД или перегрузка на ППК

$f_6(0') = \min \{11 + f_5(1'); 7 + 10 + f_5(1)\} = \min \{11 + 72; 7 + 10 + 77\} = \min \{83; 94\} = 83$
продолжить ППК или перегрузка на ЖД

Таким образом общая минимальная длительность перевозки составляет 83 часа. Восстановим схему оптимальной мультимодальной перевозки (см. таблицу 2):

Таблица 2

Оптимальная схема мультимодальной перевозки контейнера

перегон	1	2	3	4	5	6			
перевозка ЖД, час	10	14	13	26	13	15	**91**	по ЖД	минимум
перегрузка ЖД-ППК, час	5	6	5	4	4	5			83
перевозка ППК, час	11	12	14	15	15	17	**84**	на ППК	
перегрузка ППК-ЖД, час	7	5	6	7	3	6			

В таблице 2 используемые перегоны и перегрузка выделены желтым фоном. Для сравнения указаны суммарное время доставки только по ЖД или только на ППК.

Наконец, можно привести блок-схему алгоритма кода – программы, решающей поставленную задачу (см. рисунок 13).

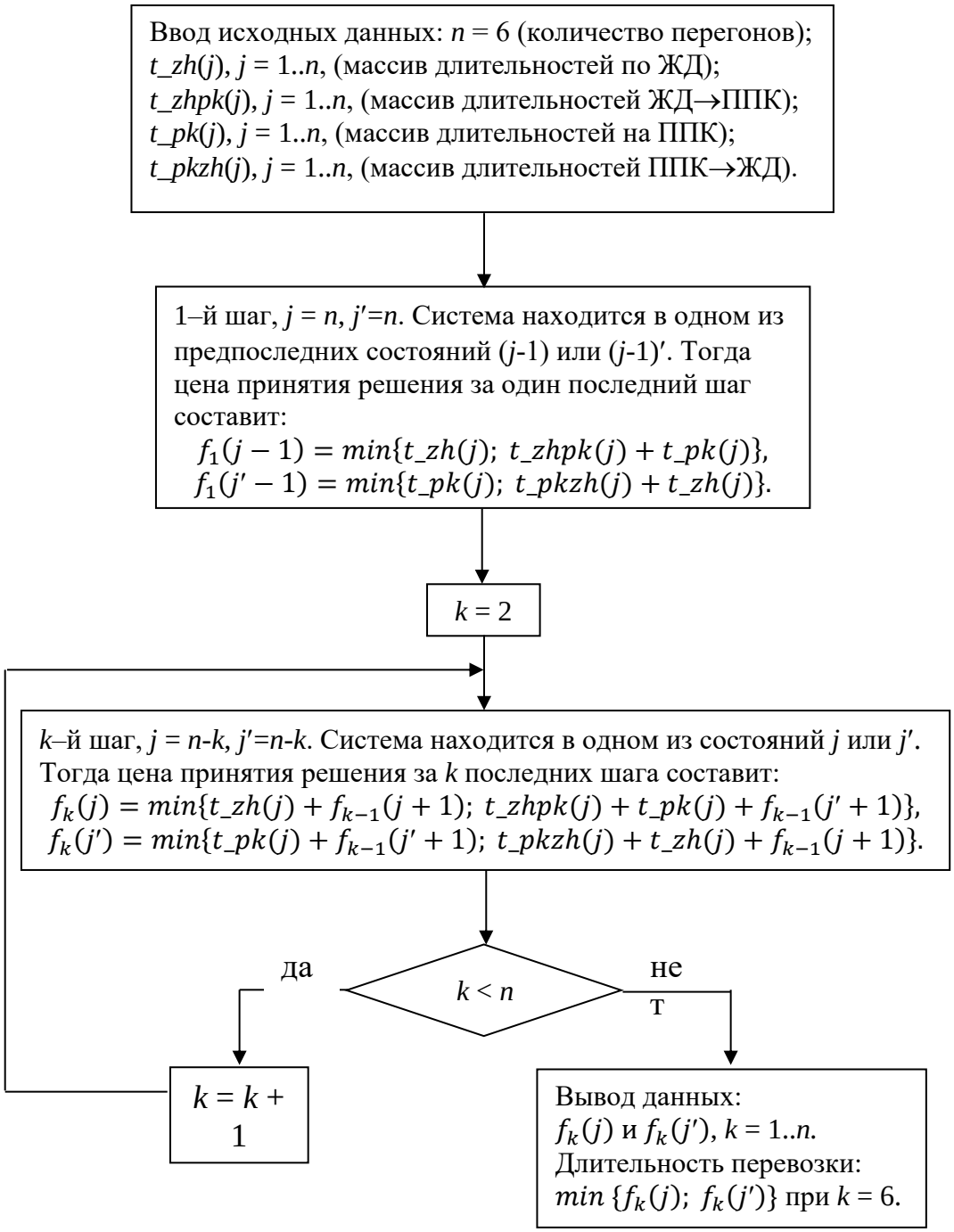


Рис. 13. Блок-схема алгоритма оптимизации мультимодальной перевозки

Необходимо отметить, что в отличие от алгоритмов и результатов в опубликованных ранее работах, например в [11], здесь процесс мультимодальной перевозки оптимизируется не по ограниченному выбору станции перегрузки или продолжению перевозки на выбранном ранее транспорте, а по всему маршруту от начала и до конца.

Специфика моделирования при наличии случайных параметров

Перспективное направление исследований – анализ особенностей применения метода динамического программирования для планирования транспортных перевозок в условиях неопределенности [12]. Построение многошаговой процедуры принятия решений в задаче оптимизации транспортировки позволяет учитывать дополнительные критерии.

В предшествующих исследованиях [10, 11, 13, 14] рассматривалась задача оптимизации мультимодальных перевозок в условиях неопределенности, при этом существует множество современных подходов к решению подобных проблем, которые, как правило, базируются на комбинации и развитии классических методов исследования операций. Так, в работе [15] авторы изучают задачи планирования перевозок, уделяя особое внимание интермодальным грузоперевозкам. В ней описан системный подход, позволяющий решать проблемы мультимодальных перевозок для крупной реальной компании. Данный подход заключается в сочетании линейного программирования и методов планирования для получения решений приемлемого качества. Предложен новый алгоритм, объединяющий линейное программирование и оптимальное планирование, который эффективно решает задачи, возникающие в деятельности компании.

В исследовании [16] разработана и реализована параметризованная модель оптимизации мультимодальных перевозок, предназначенная для оценки потенциала повышения интенсивности работы мультимодальной транспортной службы. Для реализации модели и алгоритма оптимизации были интегрированы различные методы. Прогрессивная формулировка оптимизационного процесса получена путем комбинирования эволюционного алгоритма и конструктивной эвристики.

В работе [17] предложен подход к количественной оценке степени удовлетворения потребностей территории транспортной сетью. Данный подход развивает классические результаты в этой области. Однако, в отличие от известных аналогов, предложены количественные характеристики транспортной сети, активно использующие информацию о территории с учетом ее неполноты и неопределенности. В статье также введены показатели, позволяющие оценить средние затраты на перевозку единицы груза по сети и относительную эффективность сети путем ее сравнения с гипотетической сетью, в которой каждая пара вершин соединена прямолинейным звеном. Предложенные показатели учитывают неопределенность и неполноту информации о территории, что достигается использованием недетерминированной матрицы корреспонденций для их расчета.

Общая стоимость перевозки формируется как сумма затрат на услуги субперевозчиков, причем даже незначительные колебания этих затрат могут существенно влиять на итоговую цену. Кроме того, целесообразно учитывать и другие факторы, обусловливающие разброс стоимости перевозки, такие как рыночная конъюнктура, динамика валютных курсов (в случае международных перевозок), колебания цен на топливо и многие другие. Не говоря уже о редких событиях, связанных с нештатными ситуациями и обстоятельствами непреодолимой силы, воздействие которых может быть весьма значительным. Таким образом, общая стоимость мультимодальной перевозки в известной степени представляет собой случайную величину, однако ее значения ограничены конечным интервалом

$$x \in [C_a, C_b].$$

Законом распределения, удачно отражающим перечисленные особенности, является бета-распределение [18], плотность которого является непрерывной унимодальной функцией с формой графика (см. рисунок 14), задаваемого двумя параметрами: α и β.

Плотность бета–распределения определяется формулой

$$B(x,\alpha,\beta)=\begin{cases}\frac{1}{B(\alpha,\beta)}\ x^{\alpha-1}\ (1-x)^{\beta-1}, & 0\le x\le 1\ ,\\ 0\ , \quad x<0, \quad x>1\ ,\end{cases} \tag{2}$$

где $B(\alpha,\beta)$ – бета–функция

$$B(\alpha,\beta)=\int_0^1 x^{\alpha-1}\ (1-x)^{\beta-1}dx\ . \tag{3}$$

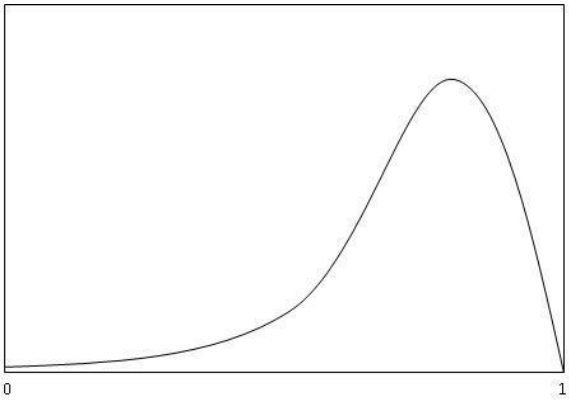


Рис. 14. График плотности бета–распределения при $\alpha=5$ и $\beta=2$

Математическое ожидание и дисперсия определяются по формулам

$$M(x)=\frac{\alpha}{\alpha+\beta}\ , \tag{4}$$

$$D(x)=\frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2\ (\alpha+\beta+1)}\ . \tag{5}$$

Применение бета-распределения оказывается обоснованным в ситуациях, когда наряду с множеством случайных факторов, каждый из которых в отдельности оказывает незначительное воздействие, присутствует несколько (также случайных) факторов, обладающих малой частотой, но существенной силой влияния [18].

Для построенного оптимального маршрута перевозки вычисляется средняя стоимость. Кроме того, учитывая стохастический характер затрат на каждом участке, итоговая стоимость, являющаяся суммой этих случайных величин, также приобретает случайный характер. Для оценки диапазона разброса суммарной стоимости и интервала ее варьирования может быть применен минимаксный подход [19]. Так, если известны интервалы разброса стоимостей по каждому участку маршрута, причем эти стоимости подчиняются бета-распределению с плотностью (2) и характеристиками (4), (5), то подобная задача успешно решается методами имитационного моделирования [19]. При использовании бета-распределения необходимо учитывать наиболее вероятные значения стоимости, получаемые на основе анализа ранее собранных статистических данных.

Опираясь на результаты, полученные в работах [10, 11, 19], формулируется и решается задача выбора оптимального маршрута перевозки в стохастической постановке. Далее рассматривается задача динамического планирования маршрута, состоящего из отдельных участков, с учетом их случайного состояния [19]. Помимо времени и стоимости поездки, могут приниматься во внимание иные показатели прохождения маршрута, например, экологический ущерб от загрязнения атмосферы. В последнее время данный показатель учитывается крупными пассажирскими транспортными компаниями. Не следует пренебрегать и экспертными системами безопасности движения [20, 21].

При смене вида транспорта возможны задержки. Также требуется представление исходных данных о продолжительности поездок по участкам транспортной сети в виде

массивов, соответствующих набору маршрутов, с учетом того, что один и тот же участок может входить в разные маршруты.

Кроме того, согласно современным подходам, целесообразно не ограничиваться оптимизацией среднего значения, а использовать квантильный критерий. Возможно также рассмотрение комплекса из двух критериев.

Более перспективной представляется динамическая постановка задачи выбора маршрута, допускающая возможность корректировки решения в некоторых промежуточных пунктах в зависимости от поступающей информации о состоянии транспортной сети. В этом случае состояние участков перевозок описывается марковской цепью с непрерывным временем, а для выбора оптимального решения применяется динамическое программирование.

Заключение

Применение динамического программирования для решения задач оптимизации маршрутов в стохастической постановке является оправданным в тех случаях, когда использование стандартных методов затруднительно. Более того, если исследуемый объект изменяет свою структуру или характеристики, построенный многошаговый процесс принятия решений позволяет оперативно корректировать алгоритм получения оптимального решения. Результаты исследования могут найти применение при математическом моделировании транспортных сетей в контексте развития скоростного наземного транспорта, в частности, для планирования пассажирских и грузовых железнодорожных перевозок.

Список литературы

1. Комаров Ю.А. Гамильтонов формализм для задачи управления движением с векторным критерием / Ю.А. Комаров, А. Б. Куржанский // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 480, № 4. – С. 408-412.

2. Bellman R.E. An introduction to the theory of dynamic programming. The Rand Corporation, Santa Monica, Calif., 1953. 107 p.

3. Володарец Н.В. Комплексный анализ современных интеллектуальных систем поддержки принятия решений для транспортных средств / Н.В. Володарец, А.С. Маренич, С.А. Ткачев // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2025. – № 4. – С. 22-42.

4. Карышев М.Ю. Загрузка железнодорожной инфраструктуры: проблемы и решения / М.Ю. Карышев, П. В. Куренков // Логистика. – 2024. – № 10(215). – С. 26-29.

5. Лапидус Б.М. О возможности разработки и применения технологии искусственного интеллекта при реализации транспортно-логистических услуг в сфере грузовых перевозок / Б.М. Лапидус, А.Т. Осьминин, А.А. Лазарев, А.В. Кабанов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2024. – № 4-5. – С. 1-25.

6. Осьминин А.Т. О возможности применения в управлении железнодорожными транспортными системами и перевозочным процессом искусственного интеллекта / А.Т. Осьминин, А.Н. Баушев, И.И. Осьминина, А.А. Шатохин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 20–21 октября 2021 года. – Москва: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта", 2022. – С. 332-343.

7. Лапидус Б.М. О перспективах разработки и применения технологии искусственного интеллекта при реализации транспортно-логистических задач в сфере грузовых перевозок / Б.М. Лапидус, А.Т. Осьминин, А.А. Лазарев, А. В. Кабанов // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 5. – С. 4-12.

8. Белозерова И.Г. Совершенствование системы планирования перевозок грузов в условиях цифровой трансформации ОАО «РЖД» (на примере КБШ и ДВЖД) / И.Г. Белозерова, А.Т. Осьминин, Н.С. Ошкина, С.В. Матченко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2023. – № 3(36). – С. 5-14.

9. Завалищин Д.С. Динамическая оптимизация сервисов грузоперевозок / Д.С. Завалищин, А. А. Габдулхаков // Актуальные проблемы прикладной математики и механики : Тезисы докладов XIII Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых, посвященной памяти академика А.Ф. Сидорова, Джанхот, 02–08 сентября 2024 года. – Екатеринбург: Институт математики и механики УрО РАН им. Н.Н. Красовского, 2024. – С. 17-18.

10. Завалищин, Д. С. Методика формирования индивидуального рейтинга грузоотправителей / Д. С. Завалищин, А. Д. Хазимуллин, Г. А. Тимофеева // Транспорт Урала. – 2025. – № 4(87). – С. 62-67.

11. Zavalishchin D.S., Popkov A.D. Dynamic Programming Method for Optimization Problem of Multi–Modal Transportation // Proceedings of 3rd Russian Conference on Mathematical Modeling and Information Technologies, Yekaterinburg. – CEUR Workshop Proceedings. Vol. 1825, 2017, p.p. 118–122.

12. Завалищин Д.С., Тимофеева Г.А. Динамическая постановка задачи построения оптимального маршрута мультимодальной перевозки в условиях неопределенности // Экономика и менеджмент систем управления. – 2017. – № 4–2(26). – С. 294–300.

13. Timofeefa G.A., Timofeev N.A. Evaluation of payment flows based on Markov chain model within complete information // AIP Conf. Proc. Vol. 1631, 2014, p.p. 17–22.

14. Zavalishchin D.S., Timofeeva G.A. Construction of Confidence Sets for Markov Chain Model // Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 402, Springer, 2017, p.p. 253–264.

15. Fl´orez Jose E. et al., Planning Multi–Modal Transportation Problems // Proceedings of the XXIst International Conference on Automated Planning and Scheduling Computing Surveys, ICAPS-11, 2011, p.p. 66–73.

16. Crespo–Pereira et al. Hybrid Algorithm for the Optimization of Multimodal Freight Transport Services: Maritime Application // Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2013, p.p. 3406–3417.

17. Мартыненко А.В. Количественные оценки взаимного влияния транспортной сети и территории // Вестник УрГУПС. – Екатеринбург: УрГУПС. 2017. – №3(35). – С.29–39.

18. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками. – Воронеж: «Научная книга», 2010. – 284 с.

19. Завалищин Д.С., Тимофеева Г.А. Транспортная сеть с неопределенными параметрами: оптимизация маршрута // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 3–6.

20. Клявин В.Э. Оценка инвестиционной привлекательности реализации мероприятий по безопасности дорожного движения / В.Э. Клявин, И.П. Энглези, Н.В. Володарец // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2023. – № 4. – С. 7-15.

21. Энглези И.П. Управление перевозкой опасных грузов / И.П. Энглези // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления : сборник научных трудов, Москва, 17–20 июня 2024 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. – С. 1813-1816.

References

1. Komarov Yu.A., Kurzhanskii A.B. Gamitonov formalizm dlya zadachi upravleniya dvizheniem s vektornym kriteriem [Hamiltonian formalism for the problem of motion control

with a vector criterion]. Doklady Akademii nauk, 2018, vol. 480, no. 4, pp. 408–412 (in Russian).

2. Bellman R.E. An introduction to the theory of dynamic programming. The Rand Corporation, Santa Monica, Calif., 1953. 107 p.

3. Volodarets N.V., Marenich A.S., Tkachev S.A. Kompleksnyi analiz sovremennykh intellektualnykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii dlya transportnykh sredstv [Comprehensive analysis of modern intelligent decision support systems for vehicles]. Vestnik Donetskoi akademii transporta, 2025, no. 4, pp. 22–42 (in Russian).

4. Karyshev M.Yu., Kurenkov P.V. Zagruzka zheleznodorozhnoi infrastruktury: problemy i resheniya [Railway infrastructure loading: problems and solutions]. Logistika, 2024, no. 10(215), pp. 26–29 (in Russian).

5. Lapidus B.M., Osminin A.T., Lazarev A.A., Kabanov A.V. O vozmozhnosti razrabotki i primeneniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta pri realizatsii transportno-logisticheskikh uslug v sfere gruzovykh perevozok [On the possibility of developing and applying artificial intelligence technology in the implementation of transport and logistics services in the field of freight transportation]. Byulleten Obedinennogo uchenogo soveta OAO RZhD, 2024, no. 4-5, pp. 1–25 (in Russian).

6. Osminin A.T., Baushev A.N., Osminina I.I., Shatokhin A.A. O vozmozhnosti primeneniya v upravlenii zheleznodorozhnymi transportnymi sistemami i perevozochnym protsessom iskusstvennogo intellekta [On the possibility of using artificial intelligence in the management of railway transport systems and the transportation process]. Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: Sbornik trudov nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Moscow, 20–21 oktyabrya 2021 goda. Moscow: Rossiiskii universitet transporta, 2022, pp. 332–343 (in Russian).

7. Lapidus B.M., Osminin A.T., Lazarev A.A., Kabanov A.V. O perspektivakh razrabotki i primeneniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta pri realizatsii transportno-logisticheskikh zadach v sfere gruzovykh perevozok [On the prospects for the development and application of artificial intelligence technology in the implementation of transport and logistics tasks in the field of freight transportation]. Zheleznodorozhnyi transport, 2025, no. 5, pp. 4–12 (in Russian).

8. Belozerova I.G., Osminin A.T., Oshkina N.S., Matchenko S.V. Sovershenstvovanie sistemy planirovaniya perevozok gruzov v usloviyakh tsifrovoi transformatsii OAO "RZhD" (na primere KBSH i DVZhD) [Improving the freight transportation planning system in the context of digital transformation of Russian Railways (on the example of Kuibyshev and Far Eastern Railways)]. Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona, 2023, no. 3(36), pp. 5–14 (in Russian).

9. Zavalishchin D.S., Gabdulkhakov A.A. Dinamicheskaya optimizatsiya servisov gruzoperevozok [Dynamic optimization of cargo transportation services]. Aktualnye problemy prikladnoi matematiki i mekhaniki: Tezisy dokladov XIII Vserossiiskoi konferentsii s elementami shkoly molodykh uchenykh, posvyashchennoi pamyati akademika A.F. Sidorova, Dzhankhot, 02–08 sentyabrya 2024 goda. Ekaterinburg: Institut matematiki i mekhaniki UrO RAN im. N.N. Krasovskogo, 2024, pp. 17–18 (in Russian).

10. Zavalishchin D.S., Khazimullin A.D., Timofeeva G.A. Metodika formirovaniya individualnogo reitinga gruzootpravitelei [Methodology for forming an individual rating of shippers]. Transport of the Urals, 2025, no. 4(87), pp. 62–67 (in Russian).

11. Zavalishchin D.S., Popkov A.D. Dynamic Programming Method for Optimization Problem of Multi–Modal Transportation. Proceedings of 3rd Russian Conference on Mathematical Modeling and Information Technologies, Yekaterinburg. CEUR Workshop Proceedings, vol. 1825, 2017, pp. 118–122.

12. Zavalishchin D.S., Timofeeva G.A. Dinamicheskaya postanovka zadachi postroeniya optimalnogo marshruta multimodalnoi perevozki v usloviyakh neopredelennosti [Dynamic

formulation of the problem of constructing an optimal route for multimodal transportation under uncertainty]. Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya, 2017, no. 4–2(26), pp. 294–300 (in Russian).

13. Timofeefa G.A., Timofeev N.A. Evaluation of payment flows based on Markov chain model within complete information. AIP Conference Proceedings, vol. 1631, 2014, pp. 17–22.

14. Zavalishchin D.S., Timofeeva G.A. Construction of Confidence Sets for Markov Chain Model. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 402, Springer, 2017, pp. 253–264.

15. Flórez Jose E., et al. Planning Multi–Modal Transportation Problems. Proceedings of the XXIst International Conference on Automated Planning and Scheduling Computing Surveys, ICAPS-11, 2011, pp. 66–73.

16. Crespo–Pereira, et al. Hybrid Algorithm for the Optimization of Multimodal Freight Transport Services: Maritime Application. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2013, pp. 3406–3417.

17. Martynenko A.V. Kolichestvennye otsenki vzaimnogo vliyaniya transportnoi seti i territorii [Quantitative assessments of the mutual influence of the transport network and territory]. Herald of the USURT, Ekaterinburg: UrGUPS, 2017, no. 3(35), pp. 29–39 (in Russian).

18. Golenko-Ginzburg D.I. Stokhasticheskie setevye modeli planirovaniya i upravleniya razrabotkami [Stochastic network models for planning and managing developments]. Voronezh: "Nauchnaya kniga", 2010. 284 p. (in Russian).

19. Zavalishchin D.S., Timofeeva G.A. Transportnaya set s neopredelennymi parametrami: optimizatsiya marshruta [Transport network with uncertain parameters: route optimization]. Transport of the Urals, 2013, no. 3(38), pp. 3–6 (in Russian).

20. Klyavin V.E., Englezi I.P., Volodarets N.V. Otsenka investitsionnoi privlekatelnosti realizatsii meropriyatii po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Assessment of investment attractiveness of road safety measures implementation]. Vestnik Donetskoi akademii avtomobilnogo transporta, 2023, no. 4, pp. 7–15 (in Russian).

21. Englezi I.P. Upravlenie perevozkoi opasnykh gruzov [Management of dangerous goods transportation]. XIV Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya: sbornik nauchnykh trudov, Moscow, 17–20 iyunya 2024 goda. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2024, pp. 1813–1816 (in Russian).

Zavalishchin D.S., Khazimullin A.D.

DYNAMIC OPTIMIZATION OF MULTIMODAL TRANSPORTATION

Abstract. *This article addresses the pressing issue of improving the efficiency of multimodal freight transportation in the face of unstable transport infrastructure. It is noted that traditional optimization approaches focused on single criteria fail to account for the multicriteria nature of real-world logistics problems. Decision-making in a dynamically changing environment, where transportation process parameters may change en route, presents particular challenges. Dynamic programming, which enables the development of step-by-step control strategies, is proposed as a mathematical framework for solving such problems. A substantive formulation of the problem is considered using the example of rail transportation using road transport for the first and last miles. It is shown that visualizing infrastructure congestion enables the selection of alternative routes with extended road hauls, bypassing bottlenecks. Economic calculations are presented demonstrating a reduction in delivery time with a slight increase in cost. A mathematical model of multimodal transportation is constructed in terms of a multi-step decision-making process. The features of modeling taking into account random parameters, including the use of the beta distribution, are considered. The*

feasibility of using dynamic programming in a stochastic setting is substantiated, as well as the prospects of a dynamic statement of the problem with the possibility of adjusting decisions at intermediate points based on incoming information.

Keywords: *multimodal transportation, dynamic programming, multi-step decision making process, route optimization, transport infrastructure, beta distribution, stochastic uncertainty, Bellman's optimality principle, container transportation, rail transport.*

Сведения об авторах:

Завалищин Дмитрий Станиславович
Институт математики и механики им. Н.Н.Красовского Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия, старший научный сотрудник Отдела оптимального управления,
Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия, доцент кафедры Мировой экономики и логистики,
кандидат физико-математических наук, доцент,
e-mail: zavalishin@usurt.ru

Хазимуллин Артем Дамирович
Свердловский территориальный центр фирменного транспортного обслуживания филиала ОАО РЖД, Екатеринбург, Россия, начальник отдела таможенной деятельности,
Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия, научный сотрудник Лаборатории транспортного моделирования,
кандидат технических наук,
e-mail: hazimullinad@mail.ru

Information about the authors:

Dmitry Stanislavovich Zavalishin
N.N. Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, Senior Researcher, Optimal Control Department,
Ural State Transport University, Yekaterinburg, Russia, Associate Professor, Department of Global Economy and Logistics,
PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,
email: zavalishin@usurt.ru

Artem Damirovich Khazimullin
Sverdlovsk Territorial Center for Branded Transport Services, Branch of JSC Russian Railways, Yekaterinburg, Russia, Head of Customs Department,
Ural State Transport University, Yekaterinburg, Russia, Researcher, Transport Modeling Laboratory,
PhD in Engineering,
email: hazimullinad@mail.ru

УДК 629.424.1:621.319.4

Кретова А.В., Володарец Н.В., Сидоренко К.И.

ИНФРАСТРУКТУРА ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация. *Современное состояние транспортной системы Донецкой Народной Республики является ключевым фактором социально-экономического развития региона, однако на фоне значительного износа объектов инфраструктуры и недостатка современных технологий возникают серьезные проблемы, угрожающие безопасности и эффективности перевозок. В статье предложена трёхэтапная методика оценки состояния транспортных объектов, включающая систему весов, пятибалльную шкалу нормирования износа, алгоритм принятия решений с аварийным отсечением и интегральный индекс I. На основе официальных статистических данных проведена оценка восьми объектов транспортной инфраструктуры ДНР. В результате установлено, что аварийный класс Д (немедленная замена) присвоен стрелочным переводам ЖД (I=1,3) и местным автодорогам (I=1,0), предаварийный класс Г (срочная реконструкция) — региональным дорогам, ж/д путям, портовым кранам и электротранспорту. Предложенная методика позволяет ранжировать объекты по срочности ремонта при ограниченном бюджете и может использоваться для планирования работ Министерством транспорта ДНР. В заключение сделаны выводы о необходимости стратегического планирования, инвестирования в обновление инфраструктуры и внедрения современных технологий.*

Ключевые слова*: транспортная система, инфраструктура, методика оценки, алгоритм принятия решений, интегральный индекс, классификация состояний, железнодорожный транспорт, автомобильные дороги, модернизация, автоматизация.*

Постановка задачи

Данная работа посвящена изучению современного состояния инфраструктуры транспортной системы Донецкой Народной Республики – ключевой отрасли, обеспечивающей грузовые и пассажирские перевозки в регионе. В условиях постоянных технологических изменений, износа существующих объектов и необходимости внедрения новых инновационных решений актуально проводить системный анализ для определения возможностей их модернизации и повышения эффективности функционирования.

На сегодняшний день в научной сфере существует множество исследований, касающихся транспортных систем и их развития, однако вопросы анализа технического состояния инфраструктуры, определения приоритетных направлений обновления и стратегий автоматизации остаются недостаточно проработанными в контексте Донецкой Народной Республики. Особенно остро стоит проблема недостаточной автоматизации

процессов, что негативно сказывается на безопасности и надежности транспортных перевозок.

Ключевыми аспектами, требующими дальнейшего изучения, являются выявление наиболее уязвимых объектов инфраструктуры и создание условий для устойчивого развития транспортной системы региона.

Актуальность проведения данного исследования определяется необходимостью обновления транспортной инфраструктуры региона для обеспечения её надежности, повышения безопасности перевозок и повышения общей эффективности системы. В условиях роста социальных и экономических вызовов, а также необходимости сохранения стабильных транспортных связей, разработка новых решений для модернизации транспортной отрасли Донецкой Народной Республики становится особенно важной и своевременной задачей.

Анализ последних исследований

В последние годы в научной литературе активно обсуждаются вопросы оценки состояния инфраструктуры транспортных систем в регионах с высоким уровнем износа и необходимости их модернизации. Так, в работе Ивановой Е. А. рассматриваются современные подходы к оценке технического состояния железнодорожных путей в условиях дефицита инвестиций и необходимости автоматизации процессов управления транспортным движением. Исследование показывает, что автоматизация и внедрение информационных технологий существенно повышают эффективность транспортных операций, однако не рассматривает особенности Донецкой Народной Республики и ее специфические проблемы [1].

В статье Петрова А. В. и соавторов представлен анализ стратегии модернизации дорожной инфраструктуры в условиях экономического спада и конфликта, что актуально для Донецкой Народной Республики. Авторы подчеркивают необходимость внедрения новых методов оценки износа дорожных покрытий и разработки программ долгосрочного обновления, однако в работе недостаточно подробно освещены вопросы автоматизации управления транспортными потоками и их влияние на безопасность перевозок [2].

Работа Сидоровой М. Н. посвящена анализу использования современных технологий в области автоматизации транспортных систем в регионах с высокой степенью износа инфраструктуры. В ней предлагаются алгоритмы оценки технического состояния объектов инфраструктуры и рекомендации по их автоматизации, однако практическая реализация данных методов в условиях Донецкой Народной Республики остается недостаточно проработанной [3].

Несмотря на наличие указанных исследований, существенные части проблемы, связанные с комплексным подходом к модернизации транспортной инфраструктуры Донецкой Народной Республики, в настоящее время остаются нерешенными. В частности, отсутствуют системные оценки состояния инфраструктурных объектов региона, не разработаны единые методики автоматизации и оптимизации транспортных процессов с учетом специфики региона. Также недостаточно изучены вопросы интеграции новых технологий в существующую инфраструктуру и оценки их эффективности. Данная статья посвящена решению этих нерешенных аспектов, включая разработку методов анализа современного состояния транспортных объектов Донецкой Народной Республики, внедрение систем автоматизации и автоматизированного управления, а также оценку их влияния на безопасность и эффективность транспортных перевозок.

Методика исследования

Для решения поставленной задачи разработана трёхэтапная методика оценки состояния транспортных объектов ДНР.

На первом этапе определена система критериев. Оценка выполняется по трём группам параметров: физический износ (вес 0,5), безопасность / риск аварии (вес 0,3) и пропускная способность (вес 0,2). Выбор весов обоснован экспертным ранжированием: износ является первичным фактором, определяющим необходимость вмешательства, затем следуют безопасность и пропускная способность. Для количественной оценки износа вводится пятибалльная шкала: износ до 20% соответствует 5 баллам (отличное состояние), 21–40% — 4 балла (хорошее), 41–60% — 3 балла (удовлетворительное), 61–80% — 2 балла (неудовлетворительное), свыше 80% — 1 балл (предаварийное/аварийное). Безопасность и пропускная способность оцениваются в баллах от 1 (критически низкие) до 5 (норма).

Второй этап — реализация алгоритма принятия решений, представленного на рисунке 1. На вход алгоритма поступают три параметра: износ в процентах, балл безопасности и балл пропускной способности. Сначала физический износ переводится в балл по указанной выше шкале. Затем выполняется проверка аварийного состояния: если балл износа равен 1 или балл безопасности не превышает 2, объект немедленно относится к классу Д с решением «немедленная замена / закрытие», и дальнейшие расчёты не производятся. В противном случае рассчитывается интегральный индекс состояния I по формуле $I = 0{,}5 \cdot B_износ + 0{,}3 \cdot B_безопасность + 0{,}2 \cdot B_пропускная$. После этого индекс сравнивается с пороговыми значениями: $I \geq 4{,}5$ соответствует классу А (плановое обслуживание), $3{,}5 \leq I < 4{,}5$ — классу Б (текущий ремонт), $2{,}5 \leq I < 3{,}5$ — классу В (капитальный ремонт), $1{,}5 \leq I < 2{,}5$ — классу Г (срочная реконструкция), $I < 1{,}5$ — классу Д (немедленная замена). Таким образом, каждому объекту присваивается класс и рекомендуемый тип вмешательства.

Третий этап — обработка неопределённости исходных данных. Поскольку в официальной статистике часть показателей приведена в виде интервалов (например, износ 45–70%), для расчётов используется медиана интервала с последующим округлением до целого балла. При отсутствии данных по безопасности или пропускной способности применяется консервативная оценка (минимальный балл из наблюдаемых для аналогичных объектов). После выполнения алгоритма для каждого объекта формируется заключение, включающее интегральный индекс I, класс состояния и рекомендуемое решение. Результаты применения методики к транспортной инфраструктуре ДНР представлены в следующем разделе.

Цель работы

Целью данной статьи является анализ современного состояния инфраструктуры транспортной системы Донецкой Народной Республики на основе официальных статистических данных и применение разработанной балльно-весовой методики для классификации объектов по срочности ремонта.

Основная часть

Транспортная инфраструктура играет ключевую роль в обеспечении социально-экономического прогресса региона. В условиях нестабильности, связанной с боевыми действиями, быстрого технологического развития и необходимости масштабных модернизационных мероприятий своевременный анализ текущего состояния транспортных объектов и их будущих возможностей приобретает особую актуальность. В данной статье рассматриваются исторические аспекты формирования инфраструктуры транспортной системы региона, её современные технические характеристики, а также перспективные инновационные направления развития.

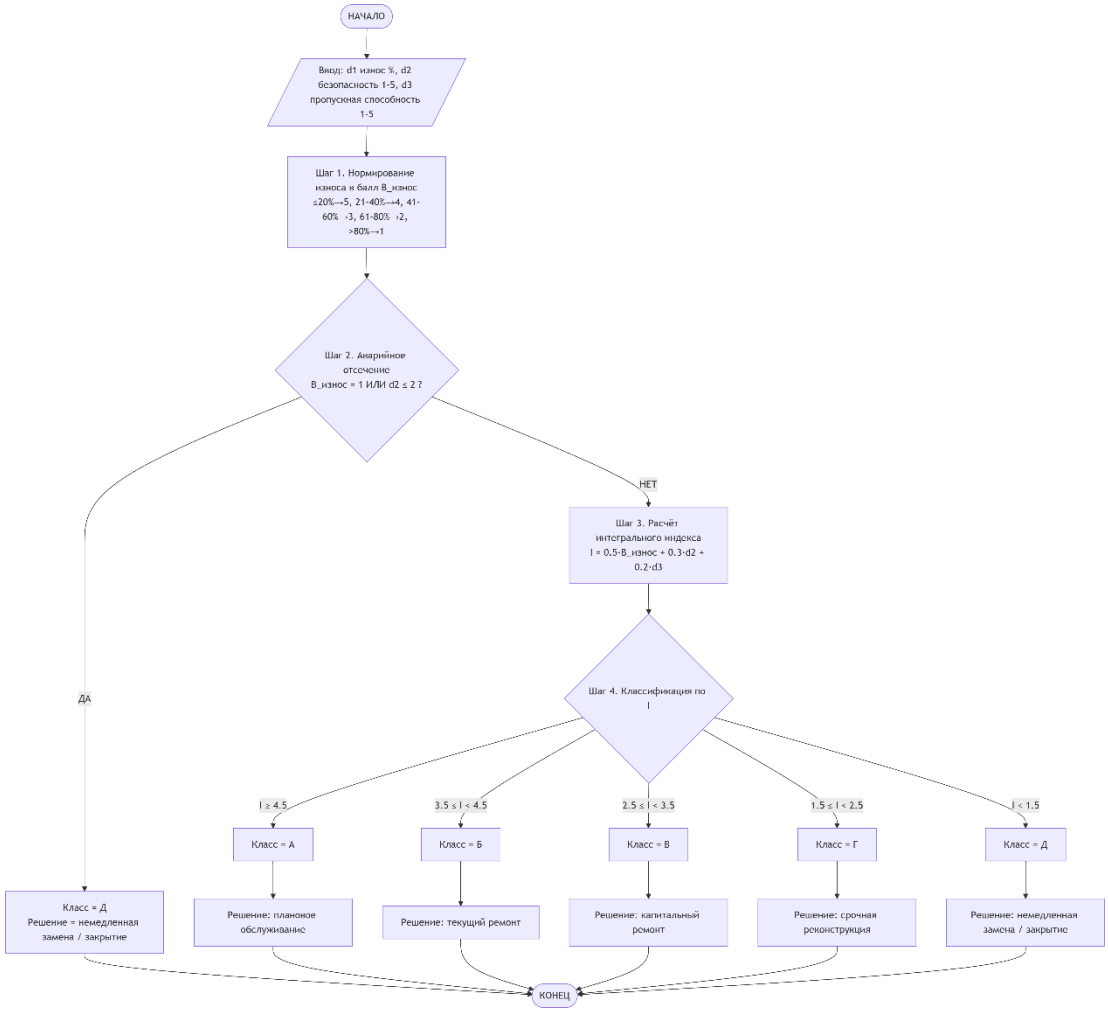


Рис. 1. Алгоритм оценки состояния транспортного объекта

Исторические аспекты формирования инфраструктуры транспортной системы Донецкой Народной Республики. Период Советского Союза стал эпохой активного развития транспортной инфраструктуры региона. Были созданы крупные транспортные узлы, обеспечивающие промышленную специализацию Донбасса — металлургическую, угольную и машиностроительную отрасли. Основные технические стандарты этого времени предусматривали использование автоматизированных систем управления движением, что обеспечивало надежную работу транспортных средств и инфраструктуры. Особое значение имели железнодорожные пути, порты и авиационные базы. Важнейшие магистрали проходили через Донецкую и Луганскую области, связывая их с другими регионами СССР. Развитие специализированных грузовых вагонов, мостов и тоннелей позволило транспортировать крупногабаритные и тяжелые грузы, что соответствовало задачам промышленного комплекса региона. Исторические источники указывают, что транспортная система региона в советский период была достаточно однородной, стандартизированной и автоматизированной, что способствовало развитию производственного потенциала [12].

Современное состояние транспортной инфраструктуры Донецкой Народной Республики.

Автомобильный транспорт: технические параметры и состояние.

Общая протяженность автомобильных дорог составляет 8121,5 км, из которых 3 687,86 км — допустимы для эксплуатации и проходят техническое обслуживание [14]. В рамках реализации программ модернизации за 2024 год выполнено ремонтных работ на 590 км, что составляет около 16% всей протяженности дорог.

Таблица 1

Техническое состояние дорожной сети

Категория дорог	Общая протяженность, км	В нормативе, км	% в нормативе	Основные дефекты
Федеральные	296,4	251,2	84,7	Трещины, износ покрытия
Региональные и межмуниципальные	2729,798	1070,676	39,2	Выбоины, изношенность покрытия
Местные	661,662	78	12	Деформированные покрытия, повреждения обочин

Технические параметры дорожных покрытий:

- Тип асфальтобетонных смесей: горячие, теплые, холодные;
- Средняя толщина слоя асфальта: 5-10 см;
- Состояние покрытия: изношенность 65%, наличие трещин, деформаций, поврежденных участков [14].

Железнодорожный транспорт: инфраструктура и техническое состояние.

Железнодорожная сеть протяженностью 2917,6 км включает 74 станции, три крупных узловых центра — Донецк, Ясиноватая, Мариуполь.

Таблица 2

Технические параметры инфраструктуры железнодорожного транспорта

Параметр	Значение
Протяженность путей	2 917,6 км
Типы путей	однопутные — 60%, двухпутные — 40%
Средний износ пути	45-70% (по состоянию на 2024 год)
Верхнее строение	изношено на 50-70%, требует реконструкции и модернизации
Подвижной состав	стареющий, изношенность 60-80%

Объекты инфраструктуры, такие как стрелочные переводы, мосты и вокзалы, требуют срочной замены и автоматизации систем переключения. В частности, износ стрелочных переводов достигает 80%, что создает риск аварийных ситуаций [15].

Морской порт Мариуполя: технические характеристики и грузопотоки.

Порт занимает площадь 77,86 га, включает 15 причалов, оборудованных современными системами разгрузки и перегрузки грузов.

Таблица 3

Технические параметры инфраструктуры порта

Параметр	Значение
Максимальная длина судна	240 м
Грузоподъемность	до 20 000 т/сутки
Технологическая оснащенность	автоматические краны с грузоподъемностью 50-100 т
Обновление техники	реконструкция 39 кранов, модернизация складских комплексов [9]

Инфраструктура порта включает системы автоматизированного управления грузовыми операциями, видеонаблюдение и контроль доступа, что повышает безопасность и эффективность работы.

Городской электротранспорт: технические параметры и модернизация.

Общий парк включает троллейбусы и трамваи.

Таблица 4

Технические параметры подвижного состава

Параметр	Значение
Количество единиц	230 троллейбусов, 120 трамваев
Средний возраст подвижного состава	10-15 лет (устаревшие модели)
Новые модели	отечественные троллейбусы «Электрон» и трамваи «Татра» с системами ГЛОНАСС/GPS
Технические показатели	мощность — 150-300 кВт, длина — 12-30 м, автономный ход — до 10 км [10]

Модернизация включает замену электросетей, установку систем автоматического управления и видеонаблюдения, что повышает безопасность и комфорт пассажиров.

Трубопроводный транспорт: параметры и технологические особенности.

Магистральные трубопроводы для транспорта нефти и газа имеют параметры:

- протяженность магистралей - 1500 км;
- **д**иаметр трубопроводов - 102-1420 мм;
- **м**аксимальное давление - 8-12 Мпа;
- **т**ип системы - автоматизированные, с системами контроля и аварийной остановки [19].

Работы по реконструкции включают автоматизацию систем мониторинга, замену изношенных участков, модернизацию насосных станций и компрессорных узлов.

Аналитика текущих проблем и вызовов.

Техническое состояние и износ объектов:

- Железнодорожные пути требуют капитальной реконструкции, особенно верхнее строение и стрелочные переводы [15].
- Автомобильные дороги — значительный износ покрытия, что ведет к повышенным эксплуатационным затратам.
- Морской порт нуждается в постоянных модернизационных работах для сохранения грузопотоков.

Для решения этих проблем применимы следующие инженерные решения и инновации:

- Внедрение систем мониторинга состояния дорожных покрытий и путей (датчики трещин, вибрационный контроль) [14].

- Использование новых материалов: асфальтобетон с высокой стойкостью к износу, самовосстанавливающиеся покрытия.

- Автоматизация управления движением, системы интеллектуального транспорта (ITS).

Что касается финансирования и технологических рисков, то ограниченность бюджета ведет к ухудшению технического состояния объектов, риску возникновения аварийных ситуаций из-за изношенности путей, мостов, портовых сооружений. Кроме того, наблюдается недостаток современных систем автоматизации и диспетчеризации.

Результаты оценки по разработанной методике

Для проверки работоспособности предложенной методики проведена оценка восьми основных объектов транспортной инфраструктуры ДНР по данным официальной статистики 2023–2025 годов. Для каждого объекта определены три исходных параметра: физический износ (в процентах или интервале), балл безопасности (от 1 до 5) и балл пропускной способности (от 1 до 5). Значения безопасности и пропускной способности назначались экспертно на основе данных о количестве аварий, заторов и ограничений движения. Затем по алгоритму (рисунок 1) последовательно вычислялся балл износа, интегральный индекс I, класс состояния и рекомендуемое решение.

В таблице 5 приведены результаты оценки.

Таблица 5

Результаты оценки состояния транспортных объектов ДНР

Объект	Износ, %	Балл износа	Безопасность	Пропускная способность	I	Класс	Решение
Ж/д пути	45–70	2	2	2	2,0	Г	срочная реконструкци
Ж/д стрелки	до 80	1	1	2	1,3	Д	немедленная замена
Автодороги федеральные	15,3	5	4	4	4,5	А	плановое обслуживани
Автодороги региональные	60,8	2	2	3	2,2	Г	срочная реконструкци
Автодороги местные	88	1	1	1	1,0	Д	немедленная замена
Порт (краны)	60–70	2	3	3	2,4	Г	срочная реконструкци
Электротранспорт	50–70	2	2	3	2,2	Г	срочная реконструкци
Трубопроводы	40–60	3	3	4	3,2	В	капитальный ремонт

Как следует из таблицы, наибольшую срочность требуют объекты аварийного класса Д — стрелочные переводы железных дорог (I=1,3) и местные автомобильные дороги (I=1,0). Для них алгоритм предписывает немедленную замену или закрытие. Предаварийный класс Г (I от 1,5 до 2,4) присвоен железнодорожным путям, региональным дорогам, портовым кранам и электротранспорту — эти объекты нуждаются в срочной реконструкции. Трубопроводы отнесены к классу В (I=3,2) с рекомендацией капитального ремонта. Единственный объект в нормативном состоянии — федеральные автомобильные дороги (класс А, I=4,5), для которых достаточно планового обслуживания.

Полученные результаты подтверждают, что разработанная методика позволяет ранжировать объекты по срочности вмешательства и может служить инструментом для принятия решений при ограниченном бюджете на ремонтные работы.

Перспективные направления развития и инновационные решения.

1. Модернизация инфраструктуры должна включать:

- Замену устаревших путей и мостов на новые с использованием высокопрочных материалов [16].
- Внедрение систем автоматического контроля состояния дорожных покрытий и путей (использование беспилотных летательных аппаратов, датчиков вибрации) [17].
- Разработка технологий ремонта: холодное ресайклирование, использование геосинтетиков.

2. Внедрение цифровых технологий и автоматизации, а именно:

- Создание единой информационной системы управления транспортом (транспортный центр данных — ТЦД).
- Использование систем навигации на базе ГЛОНАСС/GPS для оптимизации маршрутов.
- Внедрение систем видеонаблюдения, автоматического сбора данных о состоянии объектов [10].

3. Инновационные материалы и технологии:

- Самовосстанавливающиеся асфальтобетоны для дорожных покрытий.
- Новые композиционные материалы для мостов и путей, повышающие износостойкость.
- Использование солнечных батарей для питания систем освещения и контроля.

4. Технологии энергосбережения и экологические решения:

- Внедрение электрифицированных дорожных систем (например, электросамосвалы для ремонта).
- Использование экологичных транспортных средств: электробусов, трамваев, троллейбусов.

Что касается долгосрочной перспективы, то необходимо:

- Создание современных диспетчерских центров с аналитическими платформами.
- Внедрение систем прогнозирования аварийных ситуаций на основе ИИ.
- Разработка программ по использованию возобновляемых источников энергии в инфраструктуре.

Выводы

1. Разработана трёхэтапная методика оценки состояния транспортных объектов, включающая систему весов (износ 0,5, безопасность 0,3, пропускная способность 0,2), пятибалльную шкалу нормирования износа, формальный алгоритм принятия решений (рисунок 1) и процедуру обработки интервальной неопределённости. Интегральный индекс рассчитывается по формуле $I = 0{,}5 \cdot B_износ + 0{,}3 \cdot d2 + 0{,}2 \cdot d3$.

2. Применение методики к данным ДНР показало: аварийный класс Д (немедленная замена) — стрелочные переводы ЖД (I=1,3) и местные автодороги (I=1,0). Предаварийный класс Г (срочная реконструкция) — региональные дороги, ж/д пути, портовые краны, электротранспорт. Класс В (капитальный ремонт) — трубопроводы.

3. Предложенная методика позволяет ранжировать объекты по срочности ремонта при ограниченном бюджете и может использоваться Министерством транспорта ДНР для планирования работ по обновлению транспортной инфраструктуры, а также может быть включена в систему методов и инструментов стратегического планирования развития транспортной системы республики.

Список литературы

1. Иванова Е. А. Современные подходы к оценке технического состояния железнодорожных путей // Журнал «Транспорт и логистика». — 2022. — № 3. — С. 45–52.

2. Петров А. В. Стратегии обновления дорожной инфраструктуры в регионах с высоким уровнем износа // Транспортная стратегия. — 2023. — № 2. — С. 33–41.

3. Сидорова М. Н. Использование современных технологий автоматизации транспортных систем // Вестник транспортных технологий. — 2021. — № 4. — С. 78–85.

4. Постановление Народного Совета Донецкой Народной Республики от 21 августа 2015 г. № 123-5 «Об утверждении закона о дорожном движении» // Официальный сайт Донецкой Народной Республики. URL: https://dnrsovet.su/zakonodatelnaya-deyatelnost/prinyatye/zakony/zakon-donetskoj-narodnoj-respubliki-ob-avtomobilnom-transporte/ (дата обращения: 01.06.2026).

5. Постановление Правительства Донецкой Народной Республики от 30 декабря 2025 г. № 135-6 «Об утверждении государственной программы развития транспортной системы» // Официальный сайт Правительства Донецкой Народной Республики. URL: https://pravdnr.ru/npa/postanovlenie-pravitelstva-donezc... (дата обращения: 01.06.2026).

6. Клюева М. Р. Объекты обеспечения устойчивого развития и безопасности транспортной системы Донецкой Народной Республики // Транспортное право и безопасность. — 2024. — № 4 (52). — С. 41–46.

7. Российская газета. «Крым и Ростов-на-Дону соединит железная дорога» // URL: https://rg.ru/2023/10/03/s-vidom-na-more.html (дата обращения: 01.06.2026).

8. Савинкина А. Р., Данилина А. А., Чижикова А. В. Современное состояние и актуальные проблемы развития водного транспорта России // International Journal of Humanities and Natural Sciences. — 2021. — № 2. — С. 34–40.

9. Комсомольская правда. «Глава Минтранса ДНР проинспектировал работу Мариупольского порта» // URL: https://www.donetsk.kp.ru/online/news/5783665/ (дата обращения: 01.06.2026).

10. Сакульева Т. Н., Сотникова В. В. Роль электротранспорта в городской транспортной системе // Вестник университета. — 2022. — № 5. — С. 108–114.

11. Комсомольская правда. «В марте этого года 1,7 миллиона жителей ДНР воспользовались электротранспортом» // URL: https://www.donetsk.kp.ru/online/news/5763459/ (дата обращения: 01.06.2026).

12. Исторические источники о развитии транспортной системы СССР // Архивные материалы. — М.: Издательство «История», 2020.

13. Статистические данные Министерства транспорта ДНР, 2025 // Официальный сайт Минтранса Донецкой Народной Республики. URL: https://mintrans.dnr.ru/ (дата обращения: 01.06.2026).

14. Итоги ремонтных работ в рамках программ развития инфраструктуры, 2024 // Департамент дорожного хозяйства ДНР. URL: https://doh.dnr.ru/ (дата обращения:

01.06.2026).

15. Официальные данные по железнодорожной сети ДНР, 2025 // Министерство транспорта и связи Донецкой Народной Республики. URL: https://transport.dnr.ru/ (дата обращения: 01.06.2026).

16. Проектирование нового железнодорожного коридора, 2024 // Научно-исследовательский институт транспортных систем. URL: https://nits.ru/ (дата обращения: 01.06.2026).

17. Итоги работы порта Мариуполя, 2024 // Официальный сайт порта Мариуполь. URL: https://marport.com/ (дата обращения: 01.06.2026).

18. Статистика перевозок городским электротранспортом, 2023–2024 // Министерство транспорта ДНР. URL: https://mintrans.dnr.ru/statistics/ (дата обращения: 01.06.2026).

19. Доклады по развитию трубопроводной системы, 2024 // Федеральное агентство по трубопроводам. URL: https://ftp.ru/ (дата обращения: 01.06.2026).

References

1. Ivanova E. A. Modern Approaches to Assessing the Technical Condition of Railway Tracks // Journal “Transport and Logistics”. — 2022. — No. 3. — Pp. 45–52.

2. Petrov A. V. Strategies for Updating Road Infrastructure in Regions with High Wear Levels // Transport Strategy. — 2023. — No. 2. — Pp. 33–41.

3. Sidorova M. N. Use of Modern Automation Technologies in Transport Systems // Bulletin of Transport Technologies. — 2021. — No. 4. — Pp. 78–85.

4. Decree of the People's Council of the Donetsk People's Republic dated August 21, 2015 No. 123-5 “On Approval of the Road Traffic Law” // Official Website of the Donetsk People's Republic. URL: https://dnrsovet.su/zakonodatelnaya-deyatelnost/prinyatye/zakony/zakon-donetskoj-narodnoj-respubliki-ob-avtomobilnom-transporte/ (accessed: 01.06.2026).

5. Decree of the Government of the Donetsk People's Republic dated December 30, 2025 No. 135-6 “On Approval of the State Program for the Development of the Transport System” // Official Website of the Government of the Donetsk People's Republic. URL: https://pravdnr.ru/npa/postanovlenie-pravitelstva-donezc... (accessed: 01.06.2026).

6. Klyueva M. R. Objects Ensuring Sustainable Development and Safety of the Transport System of the Donetsk People's Republic // Transport Law and Safety. — 2024. — No. 4 (52). — Pp. 41–46.

7. Rossiyskaya Gazeta. “Railway Will Connect Crimea and Rostov-on-Don” // URL: https://rg.ru/2023/10/03/s-vidom-na-more.html (accessed: 01.06.2026).

8. Savinkina A. R., Danilina A. A., Chizhikova A. V. Current State and Actual Problems of Russia’s Water Transport Development // International Journal of Humanities and Natural Sciences. — 2021. — No. 2. — Pp. 34–40.

9. Komsomolskaya Pravda. “Minister of Transport of the DPR Inspected the Work of Mariupol Port” // URL: https://www.donetsk.kp.ru/online/news/5783665/ (accessed: 01.06.2026).

10. Sakulieva T. N., Sotnikova V. V. The Role of Electric Transport in the Urban Transport System // Bulletin of the University. — 2022. — No. 5. — Pp. 108–114.

11. Komsomolskaya Pravda. “In March of this Year, 1.7 Million Residents of the DPR Used Electric Transport” // URL: https://www.donetsk.kp.ru/online/news/5763459/ (accessed: 01.06.2026).

12. Historical Sources on the Development of the USSR Transport System // Archival Materials. — M.: Publishing House “History”, 2020.

13. Statistical Data of the Ministry of Transport of the DPR, 2025 // Official Website of the Ministry of Transport of the Donetsk People's Republic. URL: https://mintrans.dnr.ru/

(accessed: 01.06.2026).

14. Results of Repair Works within Infrastructure Development Programs, 2024 // Department of Road Management of the DPR. URL: https://doh.dnr.ru/ (accessed: 01.06.2026).

15. Official Data on the Railway Network of the DPR, 2025 // Ministry of Transport and Communications of the Donetsk People's Republic. URL: https://transport.dnr.ru/ (accessed: 01.06.2026).

16. Design of a New Railway Corridor, 2024 // Scientific Research Institute of Transport Systems. URL: https://nits.ru/ (accessed: 01.06.2026).

17. Results of the Mariupol Port Operation, 2024 // Official Website of Mariupol Port. URL: https://marport.com/ (accessed: 01.06.2026).

18. Transportation Statistics of Urban Electric Transport, 2023–2024 // Ministry of Transport of the DPR. URL: https://mintrans.dnr.ru/statistics/ (accessed: 01.06.2026).

19. Reports on Pipeline System Development, 2024 // Federal Agency for Pipelines. URL: https://ftp.ru/ (accessed: 01.06.2026).

Kretova A.V., Volodarets N.V., Sidorenko K.I.

INFRASTRUCTURE OF THE DONETSK PEOPLE'S REPUBLIC TRANSPORT SYSTEM: CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Abstract. *The modern condition of the transport system of the Donetsk People's Republic is a key factor in the socio-economic development of the region; however, against the background of significant wear of infrastructure objects and a lack of modern technologies, serious problems arise that threaten the safety and efficiency of transportation. The article proposes a three-stage methodology for assessing the condition of transport objects, including a weighting system, a five-point wear normalization scale, an emergency decision-making algorithm with cutoff, and an integral index I. Based on official statistical data, an assessment of eight transport infrastructure objects was conducted. As a result, it was established that the emergency class D (immediate replacement) is assigned to railway switches (I=1.3) and local roads (I=1.0), while the pre-emergency class G (urgent reconstruction) is assigned to regional roads, railway tracks, port cranes, and electric transport. The proposed methodology allows ranking objects by urgency of repair within a limited budget and can be used for work planning by the Ministry of Transport of the DPR. In conclusion, the need for strategic planning, investment in infrastructure renewal, and the implementation of modern technologies is emphasized.*

Keywords: *transport system, infrastructure, assessment methodology, decision-making algorithm, integral index, condition classification, railway transport, roads, modernization, automation.*

Сведения об авторах:

Кретова Алина Викторовна
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, Россия,
профессор кафедры,
доктор экономических наук, доцент,
e-mail: kav03058@mail.ru

Володарец Никита Витальевич
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк,
проректор по научной работе и инновационному развитию,

кандидат технических наук, доцент,
e-mail: volodarets.nikita@yandex.ru
Сидоренко Кристина Игоревна
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта», г. Донецк, Россия,
старший преподаватель,
e-mail: sidorenko-kristina@list.ru

Information about the authors:

Kretova Alina Viktorovna
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Transport Academy", Donetsk, Russia,
Professor of the Department,
Doctor of Economic Sciences, Associate Professor,
e-mail: kav03058@mail.ru
Volodarets Nikita Vitalevich
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Academy of Transport", Donetsk,
Vice-Rector for Research and Innovative Development,
PhD in Engineering, Associate Professor,
e-mail: volodarets.nikita@yandex.ru
Sidorenko Kristina Igorevna
Autonomous Non-Profit Educational Organization of Higher Education "Donetsk Transport Academy", Donetsk, Russia,
Senior Lecturer,
e-mail: sidorenko-kristina@list.ru

УДК 656.212.7

Романенко А.И., Чуйкова О.Ю., Гришкова Д.Ю.

О РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ МНОГОВАРИАНТНОСТИ СОЧЕТАНИЙ ГРУЗОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ГОРНОШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПОЛУВАГОНАХ

Аннотация. *Данная работа посвящена актуальной проблеме перевозки широкой номенклатуры грузов: железобетонных, металлических и других изделий на открытом подвижном составе (полувагонах). В статье отмечено, что существующие способы размещения и крепления зачастую разрабатываются предприятиями вручную, основываясь на опыте разработчика, что не всегда обеспечивает правильный подбор единиц груза, когда есть многовариантность их размещения и закрепления и приводит порой к отцепкам вагонов из-за несохранности перевозимых грузов, а также к повреждению вагонов. Авторами на основании натурных наблюдений в течение полугода предложена оригинальная классификация грузов по прочностным и объёмным характеристикам с разделением их на четыре класса. С помощью вероятностного анализа построены структурные модели сочетаний классов и групп грузов, что позволило заменить одни изделия другими в пределах группы без нарушения технологии крепления, что является актуальным в условиях неопределенности очередности и количества предъявляемых готовых изделий предприятием-изготовителем. Для каждого характерного сочетания разработаны местные технические условия (МТУ), включающие 5 глав и 15 иллюстраций. Проверка достоверности предложенных мероприятий осуществлялась на 30 отправленных вагонах и ударных испытаниях трёх опытных вагонов. Проверка подтвердила надёжность предложенных решений. Разработанные МТУ утверждены железной дорогой и рекомендованы к практическому использованию.*

Ключевые слова: *открытый подвижной состав, крепление грузов, классификация грузов, местные технические условия (МТУ), полувагоны, многовариантность*

Постановка задачи

Железнодорожный транспорт, сохраняя лидирующее положение в транспортной системе России, выполняет более 85 % грузовых перевозок.

Благодаря сокращению издержек и повышению эффективности работы удалось существенно улучшить многие качественные показатели. Увеличены средний вес поезда, среднесуточная производительность локомотива и вагона, повышена участковая скорость грузовых поездов, уменьшен удельный расход топлива и электроэнергии на тягу поездов, ускорен оборот вагона. Возросла и прибыль от перевозок [1, 2].

Обострение конкурентной борьбы на рынке транспортных услуг требует внедрения новых форм взаимодействия железнодорожников с отправителями и получателями грузов [3, 4].

В соответствии с этими требованиями важное значение имеет совершенствование условий перевозок грузов, в частности, грузов на открытом подвижном составе, составляющих значительную долю от общего объема погрузки [5, 6]. К таким грузам относятся железобетонные, пенобетонные, газобетонные, металлические и др. изделия. Из всех строительных материалов, перевозимых по железной дороге, доставка этих изделий отличается наибольшей трудоемкостью и повышенными денежными затратами, так как перевозить их в контейнерах, пакетах, на поддонах невозможно, требуются только специально разработанные схемы их погрузки и крепления в вагонах [1, 7].

Большие затруднения при организации перевозок этих грузов вызывает широкая номенклатура изделий и разнообразие их по форме и массе, что усложняет комплектацию поставок и способы размещения и крепления их на открытом подвижном составе [8]. В настоящее время количество только железобетонных и железных изделий, предъявляемых к перевозке, превышает 4 тысячи наименований. Подавляющая часть изделий перевозится по схемам местного значения, разработанным многочисленными предприятиями – грузоотправителями и утвержденными дорогой в качестве местных технических условий (МТУ) или непредусмотренных технических условий (НТУ) [9, 10].

Анализ последних исследований

Совершенствование условий перевозки грузов и обеспечение их устойчивости, включающие в себя разработку рациональных способов размещения и крепления грузов на железнодорожном подвижном составе, являются актуальной прикладной задачей, имеющей важное значение для федерального железнодорожного транспорта и транспортной науки.

Различным аспектам этой прикладной задачи посвящены исследования институтов: Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), ряда транспортных ВУЗов (Московского, Ленинградского, Хабаровского, Днепропетровского, Новосибирского), проектного и научно-исследовательского института транспортного строительства (ВНИИС) и др. [1].

Исследованиям коммерческих неисправностей, их причин и влияния на перевозочный процесс, посвящены работы следующих ученых А.Д. Малова, А.Н. Котенко, В.А. Болотина, Х.Т. Туранова, Е.Н. Тимухиной, О.В. Молчановой, А.Л. Рыкова, Г.Н. Алиева, В.А. Оленцевич, Д.Ю. Гришковой, С.П. Похилко и других [1].

Совершенствованию методики обоснования способов размещения и крепления, технологий размещения и крепления грузов на открытом подвижном составе, развитию инновационных средств крепления посвящены труды А.Д. Малова, Г.П. Ефимова, П.С. Анисимова, Л.О. Грачевой, В.А. Болотина, В.Б. Зылева, Х.Т. Туранова, Г.М. Третьякова, С.А. Егорова, М.В. Корнеева, К.В. Желдака, Е.Д. Псеровской, Н.В. Власовой, В.А. Оленцевич, Е.Н. Тимухиной, А.Л. Рыкова, О.В. Молчановой, Л.Ф. Казанской, Э.А. Шайкиной, Г.Н. Алиева, Н. Андерсона, П. Андерсона, Р. Байландера и других [11, 12].

Вопросам устойчивости и сохранности сборных железобетонных конструкций при перевозке по железным дорогам посвящена работа А.И. Бутора [13]. В ней произведен анализ существующей методики расчета крепления грузов, основанной на результатах экспериментальных исследований, обращено внимание на некоторые недостатки, связанные с расчетом инерционных сил и работой нескольких элементов крепления одновременно.

Шинкаренко В. М. проводил теоретические и экспериментальные исследования способов перевозки листового проката [14]. Составлены системы уравнений, позволяющие изучать влияние на устойчивость груза в вагонах, таких факторов, как масса и жесткость груза, силы трения между грузами и вагоном, способ размещения грузов.

Учеными ТашИИТа проводились исследования условий перевозки длинномерных грузов в целях определения допускаемой их длины в зависимости от массы и положения центра тяжести при перевозке со скоростью 100 км/ч [15, 16]. Были составлены дифференциальные уравнения движения с учетом коэффициента вертикальной динамики.

Исследования зарубежных специалистов в области крепления грузов показывают, что при выборе способа погрузки должны приниматься во внимание технические

характеристики вагона и участков, по которым будет выполняться перевозка, а также масса, размерность, конфигурация и количество единиц груза. Исходным материалом всех анализов является вид и размеры динамического воздействия, которые сильно различаются в зависимости от вида вагона, условий перевозки и способа погрузки [1, 17].

Обзор отечественного и зарубежного опыта показывает, что вопросам совершенствования способов размещения и крепления грузов на подвижном составе посвящены многочисленные исследования.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о необходимости дифференцированного подхода к вопросам закрепления груза с учетом его особенностей и применяемого крепления.

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка местных технических условий, характеризующих способы размещения и крепления для отдельных сочетаний классов грузов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Рассмотрение существующего метода размещения и крепления разных классов грузов.
2. Разработка структурной модели сочетаний классов грузов.
3. Определение возможных количественных соотношений грузов в вагонах.
4. Проведение проверки применимости этих способов для отправляемых вагонов.

Основная часть

Сохранность перевозимых грузов – одно из условий договора перевозки, выполнение которого входит в обязанности перевозчика. Устав железнодорожного транспорта РФ (ст. 95) предусматривает ответственность перевозчика за несохранность груза после принятия его для перевозки и хранения до выдачи грузополучателю (рисунок 1) [18, 19].

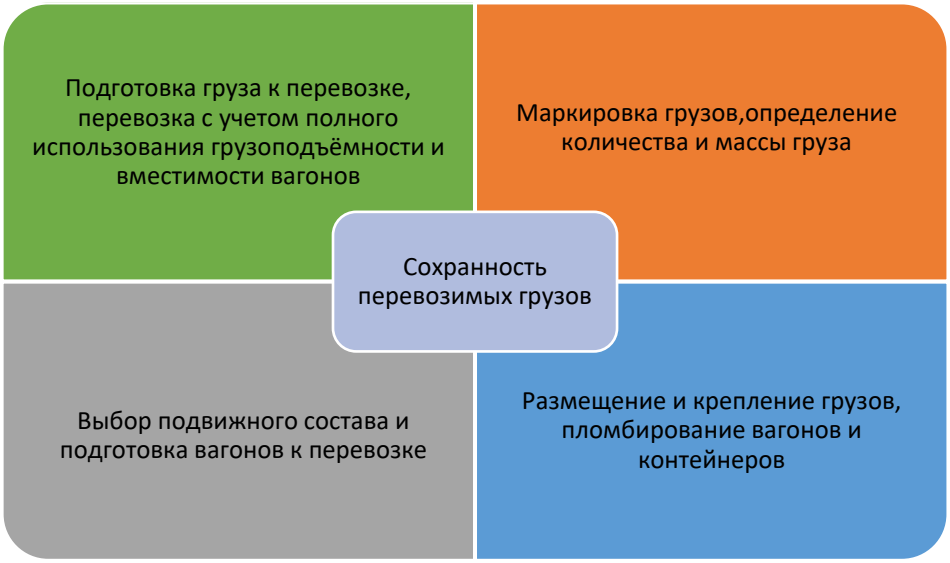


Рис. 1. Факторы, оказывающие влияние на сохранность перевозимых грузов

Сохранности грузов касаются также требования, предъявляемые к путевому развитию, сооружениям и устройствам грузового хозяйства железнодорожных станций,

к весовому хозяйству, к местам общего и необщего пользования, условиям размещения и закрепления грузов.

Кроме того, сохранность перевозимых грузов повышается за счет маршрутизации перевозок, так как при этом ускоряется доставка грузов и шире используются специализированные вагоны.

Несохранность груза определяется ухудшением или полной потерей качества, изменением количества, а также пересортицей, в результате которой груз уценивается до более низкого сорта [19].

Рассмотрим перечень основных причин, вызывающих несохранные перевозки:

-предъявление груза к перевозке в нетранспортабельном (неподготовленном) состоянии;

-предъявление груза в неисправной упаковке, без маркировки или с неправильной маркировкой;

-неправильное определение массы и количества мест;

-погрузка груза в неисправные, загрязненные или не соответствующие роду груза вагоны;

-нарушение правил пломбирования вагонов и контейнеров;

-небрежная укладка груза при погрузке и сортировке;

-неправильное крепление груза на открытом подвижном составе;

-непринятие мер предосторожности при перевозке опасных грузов;

-неправильное обслуживание в пути следования скоропортящихся грузов;

-утрата, порча и повреждение грузов;

-при авариях, крушениях и пожарах;

-в результате длительных задержек на станциях;

-из-за просрочки в доставке;

-разъединение груза от документов и засылка грузов не по назначению.

Каждая несохранная перевозка должна быть оформлена, причины её расследуются в специально установленные сроки. По результатам расследования принимают соответствующие меры. Важнейшее условие – обеспечение полной сохранности грузов – точное выполнение требований Устава железных дорог РФ, правил перевозок и Технических условий размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах (ТУ).

Ликвидации потерь способствуют механизация погрузочно-разгрузочных работ и правильный выбор подвижного состава.

Сохранность груза – один из самых значимых критериев в перевозочном процессе. Такой вывод следует из результатов опроса среди клиентов железнодорожного транспорта в сфере грузовых перевозок. Значительная часть респондентов поставили этот аспект взаимодействия с железной дорогой на 1 место.

Наиболее распространенными коммерческими неисправностями, угрожающими безопасности движения, являются: нарушения ТУ [7, 19], расстройство погрузки в пути следования и др.

Данные по отцепкам вагонов с коммерческими неисправностями приведены на рисунках 2 и 3.

На основании рисунков 2 и 3 нельзя сказать об устойчивой тенденции изменения отцепок. В 2020 – 2021 годах наблюдалось наименьшее количество отцепок по всем категориям, в последние годы наблюдается рост. Наиболее заметное снижение за 10 лет достигнуто по отцепкам вагонов с нарушениями ТУ.

Количество отцепленных вагонов с коммерческими неисправностями по родам грузов представлена на рисунке 4. На основании рисунка 4 можно сделать вывод, что наибольшее количество вагонов с коммерческими неисправностями ежегодно отцепляется с техникой.

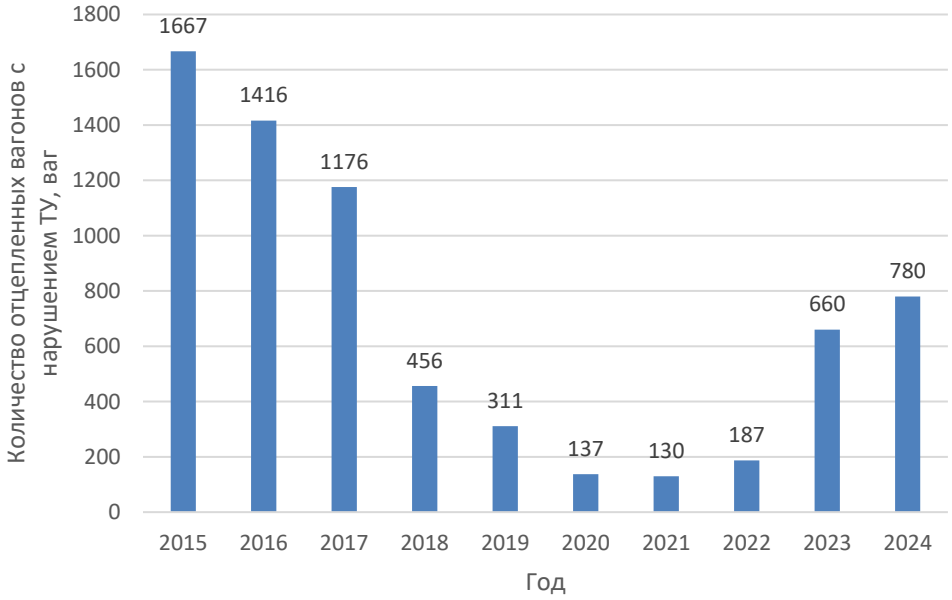


Рис. 2. Количество отцепленных вагонов с нарушением ТУ

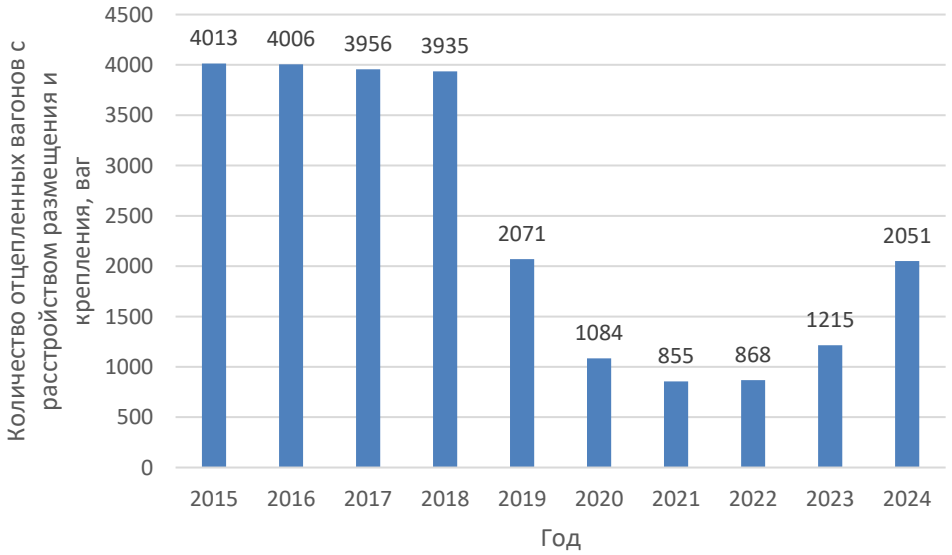


Рис. 3. Количество отцепленных вагонов с расстройством размещения и крепления

Динамика отцепленных вагонов с коммерческими неисправностями подтверждает необходимость детального анализа способов и подходов к размещению и закреплению грузов отдельных категорий на вагонах. Рассмотрим возможность многовариантности сочетания различных элементов оборудования на открытом подвижном составе – железнодорожных полувагонах [7, 19].

ОАО НПО «С» разрабатывает конструкции и производит конвейеры для угольных шахт с учётом объёмов производства и особенностей условий работы каждой шахты. Производство и отправка конвейеров производятся по частям по мере выпуска деталей и узлов и поэтапной оплаты за продукцию покупателями. В день может быть погружено от 2 до 6 полувагонов. При этом детали и узлы поступают на склад готовой продукции предприятия из разных цехов не равномерно, а по мере готовности. В результате невозможно заранее спрогнозировать, какие именно грузы будут погружены в

конкретный вагон, а разработка схем погрузки, расчёты и согласование способа размещения и крепления грузов требуют от 5 до 7 дней.

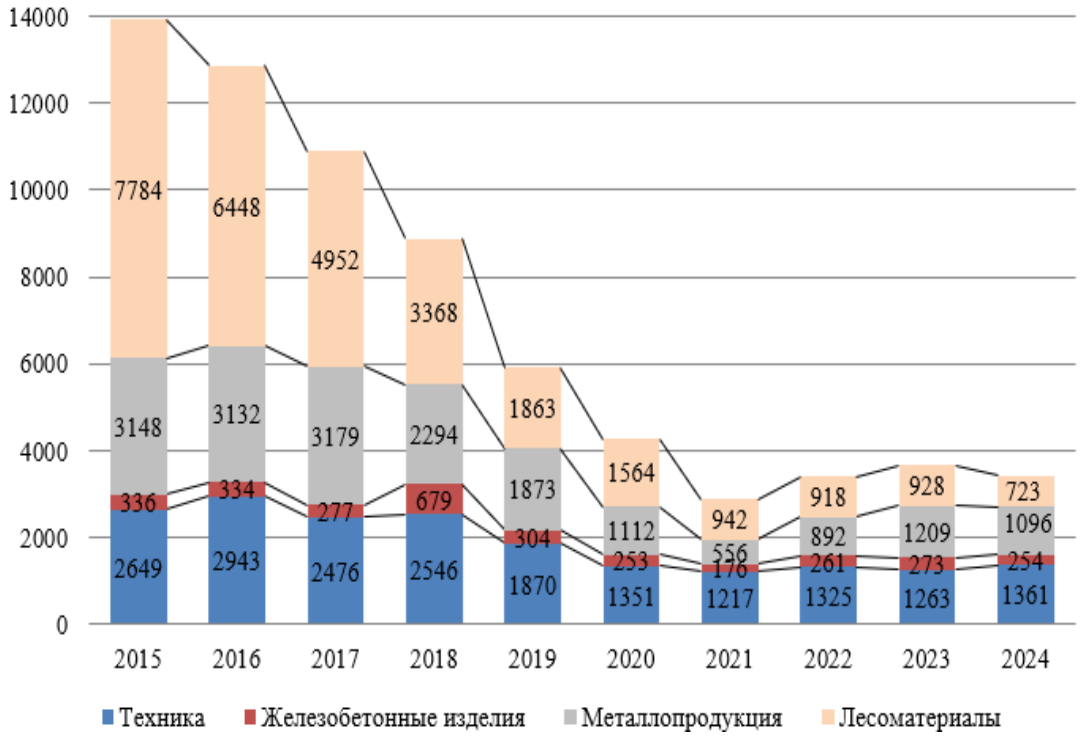


Рис. 4. Количество отцепленных вагонов с коммерческими неисправностями по родам грузов

Поэтому грузы размещают в вагонах произвольно на основе собственного опыта, без какого-либо теоретического обоснования, что приводит в отдельных случаях к повреждению грузов и вагонов, выдавливанию люков и отцепкам вагонов в пути следования (рисунок 5).



Рис. 5. Примеры произвольного размещения грузов в вагонах

Специалистами, занимающимися расчетами по размещению и закреплению грузов в железнодорожных вагонах, не раз приходилось решать проблемы многовариантности сочетаний грузов, отправляемых с разных предприятий: Главным материальным складом [20] и грузосортировочными платформами [21] железной дороги 3, ЗАО «СИБКАБЕЛЬ» [22]. В каждом случае использовался метод, предусматривающий:

1. классификацию грузов, позволяющую заменять одни грузы в вагоне другими;
2. анализ структуры сочетаний грузов в вагонах;
3. определение вероятности появления сочетаний классов и групп грузов;
4. составление структурных моделей сочетаний классов и сочетаний групп грузов в вагонах;
5. выбор для каждого сочетания групп наиболее вероятных и характерных сочетаний грузов и разработка для них типовых схем или местных технических условий погрузки, позволяющих охватить возможные сочетания грузов в вагонах.

При этом подход к решению поставленной задачи в каждом случае зависит от технологии работы предприятия и специфики грузопотока.

На главном материальном складе основные грузы устанавливали плотно по длине вагона, а закрепляли отдельные грузовые места в нижнем или верхних ярусах. Поэтому при разработке транспортной классификации грузов классы выбраны по длине грузов, а группы в классах – по характеру опорной поверхности и способу крепления. На грузосортировочных платформах объём кузова полувагонов и площадь платформ использовались не полностью, поэтому классы определены по характеру опорной поверхности и способу крепления, группы – по длине, подгруппы – по ширине грузов. При погрузке барабанов с кабелем ЗАО «Сибкабель» основной задачей являлось равномерное распределение нагрузки по ширине и длине вагона. Поэтому для разработки способов погрузки предложено две классификации:

1. первая классификация для штабелируемой части груза – классы по диаметру барабанов, группы по весу штабеля;
2. вторая классификация для малых групп барабанов – классы по номеру барабанов, группы по количеству барабанов в группе, подгруппы по весу барабанов в группе.

При погрузке горно-шахтного оборудования грузы в полувагоне с ОАО НПО «С» размещают штабелями в 1-3 яруса, используя полную длину вагона. Поэтому при совместном расположении разных грузов особо важными транспортными характеристиками являются их прочностные и объёмные характеристики, а во вторую очередь – длина. Поэтому грузы разделены на 4 класса по прочностным и объёмным характеристикам:

1 класс – тяжелые крупногабаритные грузы – размещаются в нижнем ярусе погрузки;

2 класс – лёгкие объёмные грузы в связках – размещаются в любом ярусе погрузки;

3 класс – тяжелые малогабаритные грузы в связках, несвязанные и грузы в ящиках – размещаются в нижнем ярусе погрузки;

4 класс – лёгкие крупногабаритные неустойчивые грузы – размещаются возле бортов полувагона с закреплением к ним и с ограждением другими грузами.

Каждый класс разделён на группы по длине:

а) малой длины – 1-метровые;

б) средней длины – 2-метровые, 3-метровые;

в) длинные – 4-метровые, 5-метровые, 6-метровые и т.д.

Ввиду многообразия грузов, изучение транспортных характеристик и применяемых на практике способов размещения и крепления грузов проводилось путём проведения натурных наблюдений на протяжении 5 месяцев. Затем с учётом предложенной классификации был выполнен анализ выборки из нарядов на погрузку вагонов, характеризующих структуру сочетаний грузов, отправляемых ОАО НПО «С» в течение 6 месяцев. При этом грузы в сочетаниях были классифицированы.

Вероятности появления сочетаний классов определялись по формуле:

$$P(a_i) = n(a_i)/m, \quad (1)$$

где a_i – i-е сочетание классов;

$n(a_i)$ – количество вагонов с сочетанием классов a_i, ваг;

m – общее количество вагонов в выборке, ваг.

Вероятности появления сочетаний групп в сочетаниях классов определялись по формуле:

$$P(b_j) = Pb_i/ a_i \cdot P(a_i), \quad (2)$$

где b_j – j-е сочетание групп,

Pb_i/ a_i – вероятность появления сочетания групп b_j в сочетании классов a_i (условная вероятность – рассчитывается на основании выборки натурных наблюдений),

В результате построены структурные модели сочетаний классов и сочетаний групп грузов (таблица 1 и таблица 2).

Таблица 1

Структурная модель сочетаний классов грузов

Сочетание классов	Усл. обозначение сочетаний классов	Вероят-ность появле-ния сочетания
Тяжелые крупногабаритные грузы, лёгкие объёмные грузы в связках и тяжелые малогабаритные грузы в связках, несвязанные и грузы в ящиках	1,2,3	0,28
Тяжелые крупногабаритные грузы	1	0,21
Тяжелые крупногабаритные грузы и тяжелые малогабаритные грузы в связках, несвязанные и грузы в ящиках	1,3	0,21
Тяжелые крупногабаритные грузы и лёгкие объёмные грузы в связках	1, 2	0,12
Тяжелые крупногабаритные грузы, лёгкие объёмные грузы в связках, тяжелые малогабаритные грузы в связках, несвязанные и грузы в ящиках и лёгкие крупногабаритные неустойчивые грузы	1,2,3,4	0.08
Лёгкие объёмные грузы в связках и тяжелые малогабаритные грузы в связках, несвязанные и грузы в ящиках	2,3	0,04
Лёгкие объёмные грузы в связках	2	0,02
Тяжелые малогабаритные грузы в связках, несвязанные и грузы в ящиках	3	0,02
Тяжелые крупногабаритные грузы, лёгкие объёмные грузы в связках и лёгкие крупногабаритные неустойчивые грузы	1,2,4	0.02

Таблица 2

Фрагмент структурной модели сочетаний групп грузов для сочетаний классов 1,2,3 и 1.

Сочетание классов	Сочетание групп грузов (условное обозначение)	Вероятность появления сочетания
1,2,3	1(с)1(д)2(с)3(м)3(с)	0,048
	1(д)2(с)3(м)3(с)	0,048
	1(м)2(с)3(с)	0,023
	1(м)2(м)2(с)3(м)3(с)	0,023
	1(м)1(с)2(м)2(с)3(м)	0,023
	1(с)2(с)3(м)3(с)	0,023
	1(с)2(с)3(м)3(с)3(д)	0,023
	1(с)1(д)2(с)3(м)	0,023
	1(с)2(м)2(с)3(с)3(д)	0,023
	1(с)2(с)2(д)3(д)	0,023
1	1(м)	0,023
	1(с)	0,048
	1(с)1(д)	0,091
	1(д)	0,048

Для каждого сочетания групп в сочетании классов модели изучена структура сочетаний грузов и определены возможные количественные соотношения грузов в вагонах. Из сочетаний грузов выделены наиболее вероятные и характерные, которые использовались для разработки рекомендаций по размещению и креплению грузов.

На основе рекомендаций для каждого сочетания классов проработаны способы размещения и крепления грузов. При этом заложенный в классификации принцип «замены одних грузов другими в пределах группы», а также выделение для грузов одного класса определённых мест в вагоне позволили подобрать необходимые способы размещения и крепления и, не нарушая их, заменять одни грузы другими и изменять количество грузов.

Разработанные способы были положены в основу местных технических условий, включивших в себя 5 глав, характеризующих способы размещения и крепления для отдельных сочетаний классов грузов и 15 иллюстраций к ним.

С целью контроля была проведена проверка применимости этих способов для отправляемых вагонов. Оказалось, что по выборке из 30 вагонов, отправленных за два месяца, все сочетания грузов можно погрузить и закрепить предложенными способами.

Выполненные теоретические расчёты подтвердили надёжность предложенных способов размещения и крепления.

Вывод

Для использования предложенных местных технических условий (МТУ) мастеру погрузки необходимо составить перечень грузов, которые необходимо загрузить в вагон, классифицировать их, определить сочетание классов и выбрать по нему соответствующую главу. В главе необходимо выбрать соответствующие пункты. Затем, имея масштабные изображения грузов, от руки или с использованием чертёжной программы сделать рабочий эскиз для погрузочной бригады. А при оформлении оригинала накладной на вагон на оборотной стороне в графе 1 указывается номер МТУ, номер главы и пунктов, в соответствии с требованиями которых размещен и закреплён груз.

Для проведения ударных испытаний и опытных перевозок в произвольном порядке из отправляемых вагонов было погружено 3 вагона по проекту МТУ. Отправляемые грузы оказались из сочетаний классов 1, 2, 3 и 1, 2. При этом один из вагонов был загружен самыми тяжелыми грузами – роликами для конвейеров. Оказалось, что все сочетания грузов можно погрузить и закрепить предложенными в работе способами.

Ударные испытания и опытные перевозки подтвердили надёжность предложенных способов размещения и крепления грузов, а местные технические условия утверждены для использования на железной дороге.

Список литературы

1. Королева, Д. Ю. Совершенствование метода расчета крепления грузов при соударениях вагонов : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Королева Диана Юрьевна ; Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск, 2001. – 20 с. – Текст : электронный. – URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01000374038 (дата обращения: 21.05.2026).

2. Гришкова, Д. Ю. Мероприятия по сокращению простоя транзитного вагона с переработкой / Д. Ю. Гришкова. – DOI 10.46684/2020.1-2.88-93. – Текст : электронный // Техник транспорта: образование и практика. – 2020. – Т. 1, № 1-2. – С. 88-93. – URL: https://www.ttspo.ru/jour/article/view/23 (дата обращения: 21.05.2026).

3. Гришкова, Д. Ю. Формирование грузового каркаса для грузового экспресса / Д. Ю. Гришкова, О. Д. Покровская. – DOI 10.46684/2687-1033.2020.3.194-200. – Текст : электронный // Техник транспорта: образование и практика. – 2020. – Т. 1, № 3. – С. 194-200. – URL: https://www.ttspo.ru/jour/article/view/26 (дата обращения: 21.05.2026).

4. Гришкова, Д. Ю. Организация работы грузовой станции : учебно-методическое пособие / Д. Ю. Гришкова, И. Н. Кагадий. – 2-е изд. – Новосибирск : СГУПС, 2019. – 54 с. – ISBN 978-5-00148-030-3. – Текст : электронный. – URL: https://cat.gpntb.ru/?id=FT/ShowFT&sid=3f8f4f6c4b1a8e7d5c2b9a6d8f3a5c7e (дата обращения: 21.05.2026).

5. Каширцева, Т. И. Размещение и крепление грузов, перевозимых на открытом подвижном составе : учебно-методическое пособие для студентов специальности «Эксплуатация железных дорог» / Т. И. Каширцева. – Ставрополь : СКФУ, 2022. – 85 с. – Текст : электронный. – URL: https://lib.dm-centre.ru/irbis64r_14/index.html?dok=000000001 (дата обращения: 21.05.2026).

6. Власова, Н. В. Анализ нагруженности и выбор параметров элементов крепления грузов на открытом железнодорожном подвижном составе : специальность 05.22.08 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Власова Наталья Васильевна. – Москва, 2009. – 210 с. – Текст : электронный. – URL: https://www.dissercat.com/content/analiz-nagruzhennosti-i-vybor-parametrov-elementov-krepleniya-gruzov-na-otkrytom-zheleznodor (дата обращения: 21.05.2026).

7. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах : утв. МПС России 27 мая 2003 г. № ЦМ-943. – Москва : Юртранс, 2003. – 544 с. – ISBN 5-88187-194-4. – Текст : электронный. – URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=76769 (дата обращения: 21.05.2026).

8. Малов, А. Д. Размещение и крепление грузов в вагонах : справочник / А. Д. Малов, О. И. Михайлов, Г. М. Штейнфер, Г. П. Ефимов ; под общ. ред. А. Д. Малова. – Москва : Транспорт, 1970. – 344 с. – Текст : электронный. – URL: https://cat.gpntb.ru/?id=FT/ShowFT&sid=f8f6c06e245793be6abf80f22975d050 (дата обращения: 21.05.2026).

9. Распоряжение ОАО «РЖД» от 22 августа 2016 г. № 1699р «Об утверждении Порядка согласования и утверждения Местных технических условий, способов, не предусмотренных техническими условиями, и эскизов размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах, перевозимых ОАО "РЖД"» : (с изм. от 05.07.2017). – Москва, 2016. – Текст : электронный. – URL: https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-22082016-n-1699r-ob/ (дата обращения: 21.05.2026).

10. Даусеитов, Е. Б. Теория расчетов крепления грузов, перевозимых железнодорожным транспортом : специальность 05.22.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Даусеитов Ерген Балгаевич. – Алматы, 2006. – 38 с. – Текст : электронный. – URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01003497217 (дата обращения: 21.05.2026).

11. Тимухина, Е. Н. Совершенствование методики расчета гибких элементов креплений груза на открытом железнодорожном подвижном составе : специальность 05.22.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тимухина Елена Николаевна. – Екатеринбург, 2012. – 24 с. – Текст : электронный. – URL: https://tekhnosfera.com/sovershenstvovanie-metodiki-rascheta-gibkih-elementov-krepleniy-gruza-na-otkrytom-zheleznodorozhnom-podvizhnom-sostave (дата обращения: 21.05.2026).

12. Коровяковский, Е. К. Методические основы размещения и крепления грузов с плоской опорой на подвижном составе железных дорог : специальность 05.22.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коровяковский Евгений Константинович. – Москва, 2008. – 24 с. – Текст : электронный. – URL: https://www.dissercat.com/content/metodicheskie-osnovy-razmeshcheniya-i-krepleniya-gruzov-s-ploskoi-oporoi-na-podvizhnom-sostav (дата обращения: 21.05.2026).

13. Бутор, А. И. Предложения по пересмотру ТУ погрузки и крепления грузов / А. И. Бутор. — Текст : непосредственный // Совершенствование способов перевозки железобетонных конструкций железнодорожным транспортом : сборник научных трудов / Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта (НИИЖТ). — Новосибирск : НИИЖТ, 1978. — С. 3-4. — URL: https://www.sgups.ru (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

14. Шинкаренко, В. Н. Совершенствование условий перевозок листового проката по железным дорогам / В. Н. Шинкаренко. — Текст : непосредственный // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). — 1974. — № 5. — С. 52-54. — URL: https://www.vniizht.ru (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

15. Рейдемейстер, Г. В. Исследование условий перевозки длинномерных грузов в одиночных вагонах со скоростью 100 км/ч / Г. В. Рейдемейстер, О. М. Савчук, И. К. Мороз. — Текст : непосредственный // Вопросы рациональной организации перевозки грузов и интенсификации использования технических средств железнодорожного транспорта в условиях Средней Азии и Казахстана : межвузовский сборник научных трудов / Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ). — Ташкент : ТашИИТ, 1978. — С. 3-8. — URL: https://www.uzrailway.uz (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

16. Рахманбердыев, Р. Х. К вопросу определения инерционных сил, действующих на груз при повышенных скоростях транспортировки / Р. Х. Рахманбердыев, В. Х. Исхаков, Н. И. Ибрагимов. — Текст : непосредственный // Вопросы рациональной организации перевозки грузов и интенсификации использования технических средств железнодорожного транспорта в условиях Средней Азии и Казахстана : межвузовский сборник научных трудов / Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ). — Ташкент : ТашИИТ, 1978. — С. 8-12. — URL: https://www.uzrailway.uz (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

17. Волков, Д. В. Особенности крепления груза со смещенным центром тяжести вдоль вагона : специальность 05.22.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Волков Денис Владимирович. – Москва, 2012. – 25 с. – Текст : электронный. – URL: https://www.dslib.net/upravlenie-processami/osobennosti-kreplenija-gruza-so-smeshhennym-centrom-tjazhesti-vdol.html (дата обращения: 21.05.2026).

18. Приказ МПС РФ от 16 июня 2003 г. № 19 «Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом грузов в открытом подвижном составе». – Текст : электронный. – URL: https://legalacts.ru/doc/prikaz-mps-rf-ot-16062003-n-19/ (дата обращения: 21.05.2026).

19. Молчанова, О. В. Снижение коммерческих браков у грузов со смещенным центром тяжести на вагоне : специальность 05.22.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Молчанова Оксана Викторовна. – Москва, 2010. – 24 с. – Текст : электронный. – URL: https://www.dissercat.com/content/snizhenie-kommercheskikh-brakov-u-gruzov-so-smeshchennym-tsentrom-tyazhesti-na-vagone (дата обращения: 21.05.2026).

20. Романенко, А. И. О структуре потока грузов, отправляемых Главным материальным складом / А. И. Романенко. — Текст : непосредственный // Вопросы улучшения использования вагонов и сохранности грузов : сборник научных трудов / Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта (НИИЖТ). — Новосибирск : НИИЖТ, 1990. — С. 52-56. — URL: https://www.sgups.ru (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

21. Войтюк, Н. С. Разработка способов размещения и крепления грузов разных наименований в сборных вагонах / Н. С. Войтюк, А. И. Романенко. — Текст : непосредственный // Совершенствование технологии и условий железнодорожных перевозок : межвузовский сборник научных трудов / Сибирская государственная академия путей сообщения (СГАПС). — Новосибирск : СГАПС, 1995. — С. 60-71. — URL: https://www.sgups.ru (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

22. Романенко, А. И. О решении проблемы многовариантности сочетаний грузов при перевозке кабельной продукции в крытых вагонах / А. И. Романенко. — Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2005. — Вып. 12. — С. 189-195. — URL: https://www.sgups.ru (дата обращения: 21.05.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

References

1. Koroleva, D. Y. Improving the method of calculating the fastening of goods in the event of collisions of wagons : specialty 05.22.08 "Management of transportation processes" : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Koroleva Diana Yuryevna ; Siberian State University of Railways. Novosibirsk, 2001. 20 p. – Text : electronic. – URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01000374038 (date of request: 05/21/2026).

2. Grishkova, D. Y. Measures to reduce the downtime of a transit wagon with recycling / D. Y. Grishkova. – DOI 10.46684/2020.1-2.88-93 . – Text : electronic // Transport technician: education and practice. – 2020. – Vol. 1, No. 1-2. – pp. 88-93. – URL: https://www.ttspo.ru/jour/article/view/23 (date of request: 05/21/2026).

3. Grishkova, D. Y. Formation of a cargo frame for a freight express / D. Y. Grishkova, O. D. Pokrovskaya. – DOI 10.46684/2687-1033.2020.3.194-200. – Text : electronic // Transport technician: education and practice. – 2020. – Vol. 1, No. 3. – pp. 194-200. – URL: https://www.ttspo.ru/jour/article/view/26 (date of request: 05/21/2026).

4. Grishkova, D. Y. Organization of the work of the cargo station: an educational and methodical manual / D. Y. Grishkova, I. N. Kagady. – 2nd ed. – Novosibirsk : SGUPS, 2019. – 54 p. – ISBN 978-5-00148-030-3. – Text : electronic. – URL: https://cat.gpntb.ru/?id=FT/ShowFT&sid=3f8f4f6c4b1a8e7d5c2b9a6d8f3a5c7e (date of request: 05/21/2026).

5. Kashirtseva, T. I. Placement and fastening of goods transported on open rolling stock : an educational and methodological guide for students of the specialty "Railway operation" / T. I. Kashirtseva. Stavropol : NCFU, 2022. 85 p. – Text : electronic. – URL: https://lib.dm-centre.ru/irbis64r_14/index.html?dok=000000001 (date of request: 05/21/2026).

6. Vlasova, N. V. Load analysis and selection of parameters of cargo fastening elements on open railway rolling stock : specialty 05.22.08 : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Vlasova Natalia Vasilyevna. Moscow, 2009. 210 p. – Text : electronic. – URL: https://www.dissercat.com/content/analiz-nagruzhennosti-i-vybor-parametrov-elementov-krepleniya-gruzov-na-otkrytom-zheleznodor (date of request: 05/21/2026).

7. Technical conditions for the placement and fastening of goods in wagons and containers : approved by Ministry of Internal Affairs of Russia on May 27, 2003 № CM-943. – Moscow : Yurtrans, 2003. – 544 p. – ISBN 5-88187-194-4. – Text : electronic. – URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=76769 (date of request: 05/21/2026).

8. Malov, A.D. Placement and fastening of goods in wagons : a handbook / A.D. Malov, O. I. Mikhailov, G. M. Steinfer, G. P. Efimov; under the general editorship of A.D. Malov. Moscow : Transport Publ., 1970. 344 p. – Text : electronic. – URL:

https://cat.gpntb.ru/?id=FT/ShowFT&sid=f8f6c06e245793be6abf80f22975d050 (date of request: 05/21/2026).

9. Russian Railways Order No. 1699r dated August 22, 2016 "On Approval of the Procedure for Coordinating and Approving Local Technical Specifications, Methods not provided for in the Technical Specifications, and Sketches for the Placement and Fastening of Goods in Wagons and Containers Transported by Russian Railways": (as amended. dated 05.07.2017). – Moscow, 2016. – Text : electronic. – URL: https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-22082016-n-1699r-ob / (date of access: 05/21/2026).

10. Dauseitov, E. B. Theory of calculations for securing goods transported by rail : specialty 05.22.08 : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Dauseitov Ergen Balgaevich. – Almaty, 2006. – 38 p. – Text : electronic. – URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01003497217 (date of request: 05/21/2026).

11. Timukhina, E. N. Improving the methodology for calculating flexible cargo fastening elements on open railway rolling stock : specialty 05.22.08 : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Timukhina Elena Nikolaevna. Yekaterinburg, 2012. 24 p. – Text : electronic. – URL: https://tekhnosfera.com/sovershenstvovanie-metodiki-rascheta-gibkih-elementov-krepleniy-gruza-na-otkrytom-zheleznodorozhnom-podvizhnom-sostave (date of request: 05/21/2026).

12. Korovyakovsky, E. K. Methodological foundations of the placement and fastening of goods with a flat support on railway rolling stock : specialty 05.22.08 : abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical Sciences / Korovyakovsky Evgeny Konstantinovich. – Moscow, 2008. – 24 p. – Text : electronic. – URL: https://www.dissercat.com/content/metodicheskie-osnovy-razmeshcheniya-i-krepleniya-gruzov-s-ploskoi-oporoi-na-podvizhnom-sostav (date of request: 05/21/2026).

13. Butor, A. I. Proposals for the revision of technical specifications for loading and securing goods / A. I. Butor. — Text : direct // Improving the methods of transportation of reinforced concrete structures by rail : a collection of scientific papers / Novosibirsk Institute of Railway Transport Engineers (NIIHT). Novosibirsk : NIIZHT, 1978, pp. 3-4. URL: https://www.sgups.ru (date of request: 05/21/2026). — Access mode: for registered users.

14. Shinkarenko, V. N. Improving the conditions of transportation of rolled steel by railways / V. N. Shinkarenko. — Text : direct // Bulletin of the All-Union Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT). — 1974. — № 5. — Pp. 52-54. — URL: https://www.vniizht.ru (date of request: 05/21/2026). — Access mode: for registered users.

15. Reidemeister, G. V. Investigation of the conditions of transportation of long-length goods in single wagons at a speed of 100 km/h / G. V. Reidemeister, O. M. Savchuk, I. K. Moroz. — Text : direct // Issues of rational organization of cargo transportation and intensification of the use of railway transport equipment in Central Asia and Kazakhstan : Interuniversity collection of scientific papers / Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (TASHIIT). Tashkent: Tashiit, 1978. pp. 3-8. URL: https://www.uzrailway.uz (date of request: 05/21/2026). — Access mode: for registered users.

16. Rakhmanberdyev, R. H. On the issue of determining inertial forces acting on cargo at increased transportation speeds / R. H. Rakhmanberdyev, V. H. Iskhakov, N. I. Ibragimov. — Text : direct // Issues of rational organization of cargo transportation and intensification of the use of railway transport equipment in Central Asia and Kazakhstan : Interuniversity collection of scientific papers / Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (TASHIIT). Tashkent: Tashiit, 1978. pp. 8-12. URL: https://www.uzrailway.uz (date of request: 05/21/2026). — Access mode: for registered users.

17. Volkov, D. V. Features of securing cargo with an offset center of gravity along the carriage : specialty 05.22.08 : abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical

Sciences / Volkov Denis Vladimirovich. – Moscow, 2012. – 25 p. – Text : electronic. – URL: https://www.dslib.net/upravlenie-processami/osobennosti-kreplenija-gruza-so-smeshhennym-centrom-tjazhesti-vdol.html (date of request: 05/21/2026).

18. Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation No. 19 dated June 16, 2003 "On Approval of the Rules for the Carriage of Goods by Rail in open rolling Stock". – Text : electronic. – URL: https://legalacts.ru/doc/prikaz-mps-rf-ot-16062003-n-19 / (date of access: 05/21/2026).

19. Molchanova, O. V. Reduction of commercial defects in cargo with a displaced center of gravity on the wagon : specialty 05.22.08 : abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical Sciences / Molchanova Oksana Viktorovna. – Moscow, 2010. – 24 p. – Text : electronic. – URL: https://www.dissercat.com/content/snizhenie-kommercheskikh-brakov-u-gruzov-so-smeshchennym-tsentrom-tyazhesti-na-vagone (date of request: 05/21/2026).

20. Romanenko, A. I. On the structure of the cargo flow sent by the Main material warehouse / A. I. Romanenko. — Text : direct // Issues of improving the use of wagons and cargo safety : a collection of scientific papers / Novosibirsk Institute of Railway Transport Engineers (NIIHT). Novosibirsk : NIIZHT, 1990. pp. 52-56. URL: https://www.sgups.ru (date of request: 05/21/2026). — Access mode: for registered users.

21. Voityuk, N. S. Development of methods for placing and securing cargoes of various names in prefabricated wagons / N. S. Voityuk, A. I. Romanenko. — Text : direct // Improving the technology and conditions of railway transportation : an interuniversity collection of scientific papers / Siberian State Academy of Railways (SSAPS). Novosibirsk : SGAPS Publ., 1995, pp. 60-71. — URL: https://www.sgups.ru (date of request: 05/21/2026). — Access mode: for registered users.

22. Romanenko, A. I. On solving the problem of the multivariance of cargo combinations during transportation of cable products in covered wagons / A. I. Romanenko. — Text : direct // Bulletin of the Siberian State University of Railway Communications. — 2005. — Vol. 12. — Pp. 189-195. — URL: https://www.sgups.ru (date of request: 05/21/2026). — Access mode: for registered users.

Romanenko A.I., Chuikova O.Y., Grishkova D.Y.

ON SOLVING THE PROBLEM OF MULTIPLE CARGO COMBINATIONS WHEN TRANSPORTING MINING EQUIPMENT IN GONDOLA CARS

Abstract. *This work is devoted to the urgent problem of transportation of a wide range of goods: reinforced concrete, metal and other products on open rolling stock (gondola cars). The article notes that existing methods of placement and fastening are often developed manually by enterprises based on the developer's experience, which does not always ensure the correct selection of cargo units when there is a variety of their placement and fastening and sometimes leads to uncoupling of wagons due to the insecurity of the transported goods, as well as damage to wagons. Based on field observations over the course of six months, the authors proposed an original classification of cargoes by strength and volume characteristics, dividing them into four classes. Using probabilistic analysis, structural models of combinations of classes and groups of goods were built, which made it possible to replace some products with others within the group without violating the fastening technology, which is relevant in conditions of uncertainty about the order and quantity of finished products presented by the manufacturer. Local technical specifications (MTS) have been developed for each characteristic combination, including 5 chapters and 15 illustrations. Verification of the validity of the proposed measures was carried out on 30 shipped wagons and shock tests of three experimental wagons. The*

verification confirmed the reliability of the proposed solutions. The developed MTU has been approved by the railway and recommended for practical use.

Keywords: *open rolling stock, cargo securing, cargo classification, local technical specifications, gondola cars, multiple options.*

Сведения об авторах:

Романенко Александр Иванович
Сибирский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, 630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук 191
К.т.н., доцент
Кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»
E-mail: rai@stu.ru
Чуйкова Ольга Юрьевна
Сибирский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, 630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук 191
К.т.н., доцент
Кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»
E-mail: chuykova1974@bk.ru
Гришкова Диана Юрьевна
Сибирский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, 630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук 191
К.т.н., доцент
Кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»
E-mail: Raigas@inbox.ru

Information about the Authors:

Romanenko, Alexander Ivanovich
Siberian State University of Railway Transport
D. Kovalchuk str., 191,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Novosibirsk, 630049, Russian Federation
Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock
E-mail: rai@stu.ru
Chuikova Olga Yurievna
Siberian State University of Railway Transport
D. Kovalchuk str., 191,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Novosibirsk, 630049, Russian Federation
Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock
E-mail: chuykova1974@bk.ru
Grishkova Diana Yurievna
Siberian State University of Railway Transport
D. Kovalchuk str., 191,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Novosibirsk, 630049, Russian Federation
Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock
E-mail: Raigas@inbox.ru

УДК 656.02

Рунец Р.С.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАЦИОНАРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ, НАВИГАЦИОННЫХ СЕРВИСОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. *В статье приведена методика оценки скоростей транспортного потока, регистрируемых стационарными детекторами транспорта (Long Distance Detector, LDD), получаемых на основе телематических данных пользователей навигационных сервисов (Floating Car Data, FCD), натурных обследований, выполненных методом «плавающего автомобиля» на отдельных участках федеральной автомобильной дороги М-4 «Дон». Измерения методом «плавающего автомобиля» проводились с периодичностью 1 раз в час на 8 дорожных участках протяжённостью по 1 км (5 прямолинейных, 3 непрямолинейных). Для обеспечения сопоставимости с данными LDD и FCD, имеющими дискретность 10 минут, применялось усреднение значений скорости в соответствующих временных интервалах. Метод взвешенного объединения продемонстрировал наилучшую точность, существенно снижая величину ошибок по сравнению с отдельными источниками данных. Сравнительный анализ показал, что данные LDD характеризуются наибольшими отклонениями от результатов натурных измерений, тогда как данные FCD более согласованы. По показателю MAPE относительно замеренных данных методом «плавающего автомобиля» для LDD значение составило 11,93%, для FCD — 8,60%, для простого усреднения — 6,77%, тогда как для метода взвешенного объединения — 4,75%. Таким образом, использование взвешенного объединения позволяет снизить ошибку более чем в 2,5 раза по сравнению с LDD и почти в 2 раза по сравнению с FCD, что подтверждает его наибольшую эффективность. Использование натурных измерений в качестве опорного источника и объединение разнородных данных LDD и FCD позволяют существенно повысить достоверность оценки скоростей транспортного потока. При использовании метода простого усреднения при объединении результатов измерений разными способами можно повысить точность оценки реальных скоростей транспортного потока. Но больший эффект при верификации скоростей транспортного потока дает метод взвешенного объединения данных.*

Ключевые слова*: участки автомагистрали, интеллектуальные транспортные системы, стационарные детекторы транспорта (LDD), навигационные сервисы (FCD), метод «плавающего автомобиля», скорость транспортного потока, верификация данных.*

Введение

Для опорной дорожной сети обеспечение качества первичных транспортных данных является одной из ключевых задач, поскольку именно они лежат в основе управления транспортными потоками. В современных интеллектуальных транспортных системах (ИТС) применяются несколько источников информации, отличающихся как по способу получения, так и по достоверности оцениваемых показателей.

LDD обеспечивают высокое временное разрешение и непрерывность наблюдений, однако фиксируют параметры движения в локальном сечении дороги и подвержены эксплуатационным ограничениям. Данные, получаемые от навигационных сервисов (FCD), позволяют формировать агрегированные оценки скорости движения на протяжённых участках, однако их точность определяется уровнем проникновения и структурой пользовательской выборки. Данные, получаемые в ходе натурных измерений методом «плавающего автомобиля», являются наиболее достоверными, поскольку отражают фактическое время проезда по участку. Вместе с тем их применение повышает трудоёмкость исследований и отличается сравнительно невысокой частотой наблюдений [14, 15].

Различия в принципах формирования данных из разных источников приводят к неоднородности получаемых результатов оценки скорости транспортного потока и обусловливают необходимость разработки методов их согласования и верификации.

Целью работы является разработка и апробация методики верификации скоростей транспортного потока на участках автомагистрали с использованием данных LDD, данных навигационных сервисов FCD и результатов натурных исследований методом «плавающего автомобиля».

Обзор литературы

Проблематика использования данных «плавающих автомобилей» в транспортных исследованиях рассматривается на протяжении длительного времени. Основы теории транспортных потоков сформировались в рамках классических исследований, посвящённых описанию закономерностей движения транспортных средств. В современных условиях эти подходы получили дальнейшее развитие благодаря внедрению технологий «больших данных» и средств спутниковой навигации, что значительно расширило возможности анализа транспортных процессов. В работе Zhang C. [1] представлена систематизация эволюции методов использования FCD — от простого сбора треков до сложных систем с данными детекторов. Авторы выделяют три этапа развития: первый (2000–2010 гг.) характеризовался использованием FCD преимущественно для оценки времени в пути на магистралях; второй (2010–2020 гг.) ознаменовался внедрением методов слияния разнородных данных; современный этап характеризуется переходом к гибридным схемам, где FCD выступает инструментом валидации инфраструктурной сенсорики и основой для построения макроскопических транспортных моделей [1].

Одним из ключевых параметров, определяющим пригодность FCD для верификации данных со стационарных детекторов транспорта, является уровень проникновения (penetration rate) — доля транспортных средств в транспортном потоке, выступающих источниками достоверной информации. Комплексный анализ надежности данных, полученных с FCD на основе сопоставления с фиксированными радарными датчиками на УДС Катании (Италия) выполнял Torrisi V. с соавторами [2]. Установлено, что уровень проникновения FCD демонстрирует значительную пространственную и временную изменчивость: в дневные часы он достигает 8–10%, в ночное время снижается до 2–3%. Разработана прогностическая модель уровня проникновения,

позволяющая динамически оценивать достоверность данных, полученных с применением FCD.

Decae R. и соавторы [3] исследовали применимость FCD для анализа скоростного режима на муниципальных дорогах до и после внедрения мер по организации дорожного движения. Установлено, что при уровне проникновения выше 5% FCD обеспечивает достаточную точность выявления статистически значимых изменений скоростного режима, однако на участках с низкой интенсивностью движения погрешность возрастает.

Скудина А.А. [21] выполнила анализ зависимости точности оценок параметров транспортного потока от доли плавающих автомобилей и дискретности получаемой информации. На основе имитационного моделирования установлено, что при уровне проникновения 3–5% и интервале агрегации 5–10 минут погрешность оценки средней скорости не превышает 10–12%. В работе [22] дополнительно исследовано влияние возникновения дорожных инцидентов на достоверность FCD-данных; показано, что при резком изменении условий движения требуется увеличение частоты наблюдений для сохранения репрезентативности выборки.

Интеграция разнородных источников транспортной информации является одним из наиболее активно развиваемых направлений в области ИТС. В руководстве Национальных академий наук, инженерии и медицины США [4] систематизированы современные подходы к слиянию данных от зондовых и точечных датчиков. Документ охватывает методы статистической обработки, байесовские подходы, методы нечеткой логики и алгоритмы машинного обучения, а также содержит практические рекомендации по калибровке и валидации результатов слияния. Bai L. и соавторы [5] предложили метод фузии разнородных данных для оценки фундаментальных зависимостей «скорость–плотность». Объединение данных от стационарных детекторов (высокочастотных, но ограниченных пространственно) и FCD (разреженных во времени, но пространственно-распределенных) позволяет получить более точные оценки параметров транспортного потока по сравнению с использованием каждого источника в отдельности. Разработанный подход учитывает различное временное разрешение источников и позволяет восстанавливать пропущенные значения [5].

Практическая реализация фузии для оценки скорости на городских магистралях представлена в работе Ipekyuz B. и соавторов [7]. Авторами предложен метод обобщенного слияния данных на основе связей (LB-GDFM), интегрирующий коммерческие FCD и данные Bluetooth-детекторов. Метод включает этапы предварительной обработки, нормализации, пространственно-временного согласования и взвешенного объединения с учетом неопределенности каждого источника. Результаты показывают, что объединенные оценки скорости транспортного потока обеспечивают снижение средней абсолютной ошибки на 15–25% по сравнению с одноисточниковыми подходами. Zheng L. и соавторы [6] исследовали методы оценки времени в пути на городских магистралях с использованием мульти-источниковых данных. Авторами предложена структура, объединяющая данные детекторов, FCD и данные систем автоматической идентификации транспортных средств. Показано, что при комбинировании источников достигается повышение точности оценки времени в пути, особенно в периоды нестабильного движения [6]. В работе Zhang J. и соавторов [16] также представлен метод оценки состояния транспортного потока на автомагистралях, основанный на оптимизации и слиянии разнородных данных. Разработанный подход позволяет учитывать различную природу погрешностей источников и обеспечивает робастность оценок при наличии пропусков данных в информационном потоке [16].

Проблематика выявления недостоверных значений и аномалий в параметрах транспортных потоков напрямую связана с задачами их верификации. В работе

Purkrabkova Z. и соавторов [9] предложен гибкий полупараметрический подход к обнаружению аномалий в транспортных данных, позволяющий разделять реальные изменения дорожной обстановки (например, заторы или инциденты) и искажения, обусловленные сбоями оборудования либо ошибками передачи информации.

В исследовании Taheri Sarteshnizi и соавторов [10] проведено сопоставление различных методов выявления аномалий во временных рядах интенсивности движения, включая статистические подходы, алгоритмы машинного обучения и их комбинации. Показано, что результативность обнаружения во многом определяется типом аномалии (единичные выбросы, систематические смещения, пропуски данных), что обуславливает необходимость адаптивного выбора применяемых методов [10].

В работе Partzsch I. и соавторов [11] рассмотрен потенциал использования инфраструктурных сообщений V2X (Vehicle-to-Everything) для выявления аномалий на регулируемых перекрестках. Установлено, что информация от подключённых транспортных средств позволяет оперативно фиксировать отклонения в параметрах движения и может использоваться в качестве дополнительного источника при верификации данных, получаемых от стационарных детекторов [11].

Rathi G. и соавторы [17] предложили многоуровневую структуру обнаружения аномалий в дорожных данных, охватывающую уровни от точечных измерений до сетевых показателей. Разработаны критерии для классификации аномалий и рекомендации по их обработке в зависимости от требуемого уровня надежности ИТС [17].

Оценка времени, потерянного транспортными средствами из-за заторов, является одним из ключевых приложений верифицированных транспортных данных. Erdelić T. и соавторы [18] предложили метод оценки зон заторов и индексов времени в пути на основе FCD. Разработанный подход позволяет идентифицировать пространственно-временные кластеры заторов и количественно оценивать потери времени с учетом динамики их распространения [18]. Гантимурова Ю.О. [19] выполнила исследование по оценке зон транспортных заторов на основе данных плавающих автомобилей. Автором предложена методика идентификации границ заторовых зон и оценки их пространственной протяженности с использованием траекторных данных. Braun M. и соавторы [20] исследовали возможности использования FCD для поддержки локализованных измерений производительности дорожной сети. Показано, что агрегированные данные плавающих автомобилей позволяют формировать устойчивые показатели эффективности функционирования сети, включая индексы времени в пути и показатели надежности движения [20]. Вопросы оценки потерь времени с использованием метода «плавающего автомобиля» рассматривались также в работах Косолапова А.В. [25], где предложены подходы к расчету задержек на основе измерений времени проезда контрольными транспортными средствами [25]. Методологические основы расчета показателей надежности времени в пути изложены в руководствах Федерального управления автомобильных дорог США (FHWA) [15]. В Highway Capacity Manual 7-го издания [14] представлены современные методы оценки пропускной способности и уровней обслуживания, включая подходы к учету временных потерь при расчете задержек на перекрестках и перегонах.

Вопросы калибровки имитационных транспортных моделей с использованием FCD освещены в методических руководствах FHWA [15] и в документах по микросимуляционному моделированию [26]. Показано, что использование агрегированных данных FCD для калибровки позволяет повысить точность модельных оценок по сравнению с калибровкой только по детекторным данным [15]. Крысин и соавторы [23] исследовали возможности адаптации метода «плавающего автомобиля» на основе использования данных спутниковой навигации городского пассажирского

транспорта. Показана перспективность использования курсирующих на маршрутах транспортных средств в качестве источника FCD для калибровки транспортных моделей [23].

Отдельное направление исследований связано с возможностью оценки интенсивности движения на основе FCD. Eisinga K. и Lorkowski S. [12] предложили метод оценки интенсивности на уровне дорожной сети с использованием зондовых данных. Разработанный подход позволяет восстанавливать значения интенсивности на участках, не оснащенных стационарными детекторами, на основе данных о количестве FCD-зондов и динамической оценки уровня проникновения [12]. Young S. и соавторы [13] представили обзор методов оценки интенсивности по зондовым данным и сформулировали рекомендации для практического внедрения в системах управления транспортом [13].

Трофименко Ю.В. и соавторы [24] рассмотрели концепцию интеллектуального управления движением с использованием высокоавтоматизированных транспортных средств при интеграции с инфраструктурой V2X. Авторами показано, что развитие технологий подключенных автомобилей открывает новые возможности для получения высококачественных данных о параметрах движения, которые могут быть использованы для верификации данных стационарных детекторов [24].

Проведенный анализ литературы позволяет выявить ряд проблем, требующих дальнейших исследований. Во-первых, большинство работ сосредоточено либо на оценке качества отдельных источников данных, либо на разработке методов их слияния, однако системные подходы, связывающие верификацию детекторных данных с последующей оценкой потерь времени, представлены недостаточно полно. Во-вторых, вопросы выбора эталонного источника для верификации остаются дискуссионными: в одних исследованиях в качестве эталона принимаются данные навигационных сервисов, в других — результаты натурных измерений методом «плавающего автомобиля», что затрудняет сопоставимость результатов. В-третьих, влияние геометрических характеристик участков дорог (прямолинейные, непрямолинейные) на эффективность верификации требует дополнительного изучения. На участках с усложнённой конфигурацией влияние локальных факторов на скорость движения возрастает, что приводит к снижению сопоставимости результатов различных источников. На линейных участках наблюдается более высокая согласованность данных, что позволяет использовать их в рамках единых процедур анализа. В связи с этим возникает необходимость разработки дифференцированного подхода к верификации данных, учитывающего особенности формирования информации различными источниками, а также различную временную дискретность измерений [3, 4, 12].

Объект исследования и исходные данные

Объектом исследования являются сегменты федеральной автомобильной дороги М-4 «Дон». Для анализа были выделены 8 сегментов (5 прямолинейных и 3 непрямолинейных) с различными ограничивающими факторами (Таблица 1). Каждый сегмент имеет протяженность 1 км и центрируется относительно места установки детектора транспорта, что обеспечивает сопоставимость точечных измерений LDD с данными FCD и результатами натурных исследований методом «плавающего автомобиля» [3, 7, 12].

Таблица 1

Перечень размещения детекторов транспорта и исследуемых сегментов на автомобильной дороге М-4 «Дон» на участке от км 1388+500 до км 1527+650

№	Исследуемый сегмент	Тип участка	Протяжённость, км	Координаты детектора транспорта
1	1388+500 – 1389+500	прямолинейный	1	44.629079; 39.094492
2	1429+650 – 1430+650	прямолинейный	1	44.431419; 38.772858
3	1443+000 – 1444+000	непрямолинейный	1	44.355973; 38.672394
4	1458+300 – 1459+300	непрямолинейный	1	44.385661; 38.527192
5	1503+504 – 1504+504	непрямолинейный	1	44.552456; 38.130975
6	1516+700 – 1517+700	прямолинейный	1	44.622262; 38.017962
7	1522+030 – 1523+030	прямолинейный	1	44.645984; 37.963542
8	1526+650 – 1527+650	прямолинейный	1	44.667629; 37.913144

Натурные исследования были выполнены 11.02.2026 г. В течение указанного дня осуществлялись сбор и последующая обработка суточных значений скоростей транспортного потока по всем выделенным сегментам и используемым источникам информации. Исходные данные, полученные от LDD и FCD, имели шаг дискретизации 10 минут, тогда как результаты натурных наблюдений фиксировались с часовым интервалом (рисунок 1). Для обеспечения согласованности разнородных временных рядов все полученные данные были приведены к единому интервалу агрегации: значения скоростей усреднялись в идентичных временных промежутках.

Такой подход позволил обеспечить единый формат данных и позволил корректно оценить суточную динамику транспортного потока, а также выявить характерные различия между рассматриваемыми источниками данных.

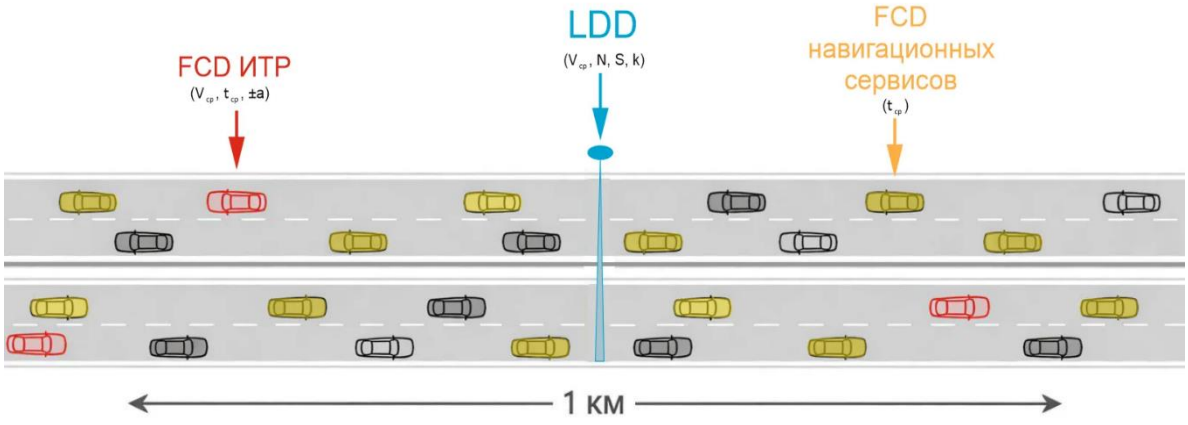


Рис. 1. Схема получения данных со стационарных детекторов транспорта и плавающих автомобилей на прямолинейном сегменте дороги М-4 «Дон»

Данная схема иллюстрирует принцип пространственной агрегации:

- LDD осуществляет точечную регистрацию параметров транспортного потока в сечении дороги;

- FCD и «плавающие автомобили» позволяют оценивать среднюю скорость движения на исследуемом сегменте.

Устойчивые расхождения между источниками данных объясняются различиями в принципах формирования соответствующих показателей. Скорость, фиксируемая LDD, отражает состояние потока в конкретном поперечном сечении дороги и существенно зависит от локальных условий движения, таких как близость съездов и примыканий, зоны перестроения, а также участки ускорения и торможения транспортных средств. В отличие от этого, данные FCD и результаты натурных исследований методом «плавающего автомобиля» характеризуют среднюю скорость движения на участке, поскольку основаны на измерении времени прохождения транспортными средствами протяжённого участка дороги [1, 2, 13].

Таким образом, при сопоставлении указанных источников неизбежно возникают различия, обусловленные не только случайными отклонениями, но и различной пространственной природой формируемых данных. Точечные значения LDD, скорость по данным FCD и «плавающего автомобиля» по-разному отражают структуру транспортного потока, что особенно проявляется на неоднородных участках дорожной сети.

С учётом указанных отклонений в работе применяется процедура верификации, обеспечивающая приведение разнородных данных к сопоставимому виду в рамках единой системы анализа. Такой подход должен учитывать как особенности формирования данных, так и различия в условиях движения на отдельных участках.

На прямолинейных участках график суточной динамики скоростей демонстрирует высокую степень согласованности между LDD, FCD и данными «плавающего автомобиля», т.е. в условиях однородного движения точечные измерения детектора могут приближённо отражать среднюю скорость на участке. В данном случае верификация может осуществляться путём прямого сопоставления значений LDD, FCD и результатов натурных измерений [3–5, 12].

На непрямолинейных участках наблюдается иная картина: значения, полученные с LDD, существенно отклоняются от значений других источников. Характер отклонений определяется положением детектора относительно зон ограничения скорости, радиусов, а также участков разгона и торможения. В зависимости от этих факторов детектор может систематически завышать или занижать фактическую скорость на участке. В таких условиях данные FCD и результаты натурных исследований методом «плавающего автомобиля» оказываются более репрезентативными для оценки реальной скорости движения, что обусловливает необходимость их приоритетного использования при верификации [1, 2, 13–15].

Таким образом, в работе применяется дифференцированный подход к верификации значений скорости движения транспортных потоков: для прямолинейных сегментов используется сопоставление LDD, FCD и данных «плавающего автомобиля», для сложных участков основное внимание уделяется согласованию FCD и натурных измерений.

Методика

Методика исследования основана на сопоставлении трёх взаимодополняющих источников данных о скорости транспортного потока: эксплуатационных данных LDD; агрегированных данных FCD; результатов натурных исследований методом «плавающего автомобиля».

В отличие от подходов, в которых FCD безусловно принимаются за эталон, в настоящей работе в качестве независимого источника данных используются результаты натурных исследований методом «плавающего автомобиля». Данный метод позволяет фиксировать фактическое время прохождения исследуемого участка и, следовательно, определять среднюю скорость движения в реальных дорожных условиях [14, 15, 18]. При этом необходимо учитывать различие временной дискретности используемых источников.

Натурные исследования методом «плавающего автомобиля» были выполнены в соответствии с Методическими рекомендациями по проведению мониторинга дорожного движения (АК-337-р от 27.12.2022) [27]. Объём выборки и количество задействованных «плавающих автомобилей» определялись расчётным путём с обеспечением доверительной вероятности не ниже 95%.

На первом этапе для каждого участка были выполнены пробные заезды, по результатам которых рассчитывался коэффициент вариации времени проезда:

$$k_T = \frac{\sigma_T}{\bar{T}} \quad (1)$$

где σ_T — среднеквадратическое отклонение времени проезда;

$\bar{T}$ — среднее время проезда по сегменту.

По результатам пробных измерений было установлено, что:

- для прямолинейных сегментов $k_T \approx 10-12\%$;
- для непрямолинейных сегментов $k_T \approx 16-18\%$.

При обоснованной вероятности 95% и допустимой относительной ошибке $\pm 10\%$, было определено необходимое число заездов:

- для прямолинейных сегментов: $n = 4-6$;
- для непрямолинейных сегментов: $n = 10-12$.

Далее рассчитали минимальное количество «плавающих автомобилей», одновременно работающих на сети, по формуле:

$$N_{КТС} = \frac{100 \cdot L \cdot n}{V_{max} \cdot \gamma \cdot t_{об}} \quad (2)$$

где L — протяжённость обследуемого участка, км (принято L = 1 км);

n — число заездов (для расчёта использовано максимальное значение: n = 6 для прямолинейных,

n = 12 для непрямолинейных);

V_{max} — допустимая скорость движения, км/ч (принято V = 90 км/ч, что соответствует ограничению на исследуемом участке);

γ — коэффициент, учитывающий снижение скорости в пиковый период ($\gamma = 0,7$);

$t_{об}$ — продолжительность обследования, ч (t = 24 ч).

Подстановка фактических параметров даёт $N_{КТС} < 1$. Это означает, что для обследования 1 сегмента дороги достаточно 1 автомобиля, а требуемый объём данных обеспечивается за счёт увеличения повторных проездов [27]. В рамках проведённого исследования 1 автомобиль выполнял повторные заезды по каждому сегменту с периодичностью 1 раз в час на протяжении суток. Такая схема позволила охватить различные состояния транспортного потока, включая пиковые и межпиковые периоды, и обеспечить выполнение требуемого числа наблюдений для достижения вероятности не ниже 95%.

Таким образом, схема проведения натурных исследований была принята следующей: для каждого участка дороги использовался 1 автомобиль, выполняющий повторные проезды в течение суток. Количество заездов составило: для прямолинейных сегментов — 4–6; для непрямолинейных сегментов — 10–12.

Фактически в ходе обследований было выполнено не менее 24 заездов на каждом участке, что превышает минимально необходимый объём выборки и обеспечивает статистическую достоверность результатов.

Для каждого исследуемого участка i и момента времени t ошибка скорости определялась относительно опорных значений, полученных по данным «плавающего автомобиля»:

$$e_v(i,t) = v_{method}(i,t) - v_{ctl}(i,t) \quad (3)$$

где: $e_v(i,t)$ — ошибка скорости на участке i в момент времени t;

$v_{method}(i,t)$ — скорость, полученная из сравниваемого источника данных;

$v_{ctl}(i,t)$ — скорость, полученная методом «плавающего автомобиля».

В качестве $v_{method}(i,t)$ рассматривались: скорость по данным LDD; скорость по данным FCD; скорость, полученная методом простого усреднения источников; скорость, полученная методом взвешенного объединения.

Для интегральной оценки использовались стандартные статистические метрики.

Средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|e_v(i)\right| \quad (4)$$

Среднеквадратическая ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}e_v(i)^2} \quad (5)$$

Средняя абсолютная процентная ошибка:

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{e_v(i)}{v_{ctl}(i)}\right| \quad (6)$$

где n — число наблюдений.

Дополнительно рассчитывалось систематическое смещение $Bias$, характеризующее наличие устойчивого завышения или занижения значений одного источника данных относительно опорного:

$$Bias = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(v_{method}(i) - v_{ctl}(i)\right) \quad (7)$$

В отличие от MAE и $RMSE$, данный показатель не учитывает модуль ошибки, а отражает направленность отклонений.

Использование скорости, полученной методом «плавающего автомобиля», в качестве опорной величины позволяет оценивать LDD и FCD в единой системе сравнения и избегать ситуации, при которой один из источников сопоставляется с самим собой. Это особенно важно при совместном анализе точечных измерений LDD и оценок FCD.

Для повышения практической значимости результатов в работе рассмотрены две схемы объединения данных. В исследовании используются два основных инструментальных источника — LDD и FCD, которые сопоставляются с опорными натурными измерениями методом «плавающего автомобиля». На этой основе

дополнительно рассчитывались две объединённые оценки скорости: методом простого усреднения и методом взвешенного объединения.

Скорость, полученная методом простого усреднения, определялась как:

$$v_{avg}(i,t) = \frac{v_{det}(i,t) + v_{fcd}(i,t)}{2} \quad (8)$$

где: $v_{avg}(i,t)$ — скорость, полученная методом простого усреднения;

$v_{det}(i,t)$ — скорость по данным LDD;

$v_{fcd}(i,t)$ — скорость по данным FCD.

Скорость, полученная методом взвешенного объединения, определялась по формуле:

$$v_{ver}(i,t) = \frac{w_{det}(i,t)v_{det}(i,t) + w_{fcd}(i,t)v_{fcd}(i,t)}{w_{det}(i,t) + w_{fcd}(i,t)} \quad (9)$$

где: $v_{ver}(i,t)$ – верифицированная скорость, полученная методом взвешенного объединения;

$v_{det}(i,t)$ – скорость по данным LDD; $v_{fcd}(i,t)$ — скорость по данным FCD;

$w_{det}(i,t), w_{fcd}(i,t)$ – весовые коэффициенты источников.

Весовые коэффициенты задавались с учётом качества, характера и пространственной репрезентативности исходных данных, а также особенностей исследуемых участков. Поскольку LDD фиксирует скорость в локальном сечении дороги, в ходе эксперимента для него наблюдались отдельные временные ряды с неполнотой данных, кратковременными отключениями и повышенной вариативностью измерений. Кроме того, точечный характер LDD не позволяет учитывать пространственную изменчивость скорости, особенно на непрямолинейных участках.

Данные FCD, напротив, формируются по траекториям движения большого числа транспортных средств и более полно отражают условия движения на протяжении всего сегмента, что делает их более репрезентативными для оценки средней скорости.

В связи с этим FCD присвоен больший вес (0,7), а LDD — меньший (0,3). При этом значения весов могут варьироваться в зависимости от типа участка и качества доступных данных [3,7,8,9,12].

С учётом этого базовое ранжирование источников принималось в виде:

$$w_{fcd} > w_{det}, \quad (10)$$

что отражает более высокую пригодность FCD для оценки сегментной скорости. На основе полученных скорректированных значений выполнялся анализ их согласованности с опорными данными по каждому исследуемому участку. В качестве критерия использовался коэффициент корреляции Пирсона R, характеризующий степень линейной зависимости между сравниваемыми наборами данных:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

где x_i, y_i – сравниваемые значения;

$\underline{x}, \underline{y}$ – их средние значения;

n — количество наблюдений.

Результаты

Анализ сопоставления скоростей на диаграмме (рисунок 2) дает возможность оценить расхождения между значениями, полученными из различных источников, и данными, зафиксированными в ходе натурных исследований методом «плавающего автомобиля». В целом ряды демонстрируют достаточно близкую динамику, однако величина и характер отклонений заметно варьируются в зависимости от типа рассматриваемого сегмента и особенностей формирования исходной информации.

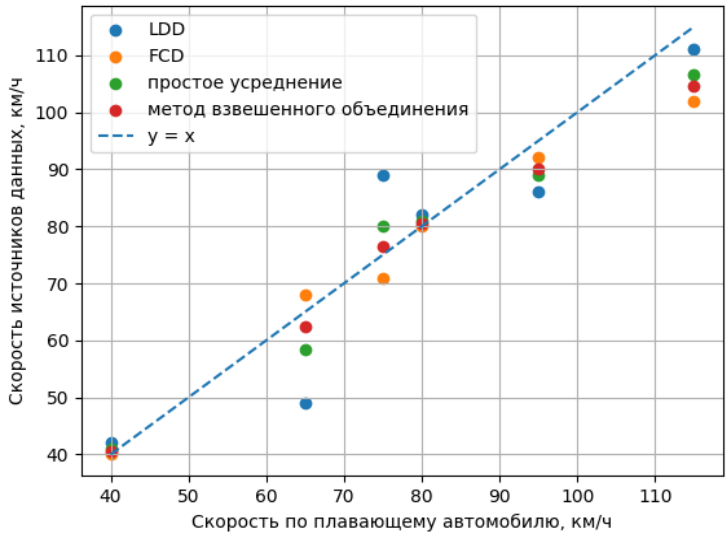


Рис. 2. Анализ отклонения скоростей эмпирических источников данных от значений натурных исследований

Включение в рассмотрение оценок, полученных на основе простого усреднения и метода взвешенного объединения, показывает, что комбинирование источников способствует снижению влияния их индивидуальных ограничений. Метод простого усреднения в основном обеспечивает сглаживание локальных колебаний, тогда как взвешенное объединение позволяет более точно учитывать различия в репрезентативности данных LDD и FCD для конкретных условий движения на исследуемых сегментах.

В результате итоговая верифицированная скорость, как правило, располагается ближе к опорным значениям, полученным методом «плавающего автомобиля», чем исходные данные LDD [3–6, 12].

Для более строгой интерпретации результатов после сопоставления абсолютных значений скоростей был выполнен анализ отклонений относительно опорных натурных измерений. Такой подход позволяет оценить не только степень согласованности источников данных, но и характер отклонений, а также устойчивость воспроизведения средней скорости на участке.

Суточная динамика скорости транспортного потока приведена на рисунке 3 и рисунке 4.

Анализ показывает, что на прямолинейных сегментах дороги отклонения LDD, FCD и объединённых оценок в целом остаются ограниченными, что свидетельствует о достаточной согласованности источников данных в условиях однородного движения. Вместе с тем даже на таких участках данные LDD могут демонстрировать отдельные отклонения, обусловленные локальными особенностями в точке установки детектора транспорта.

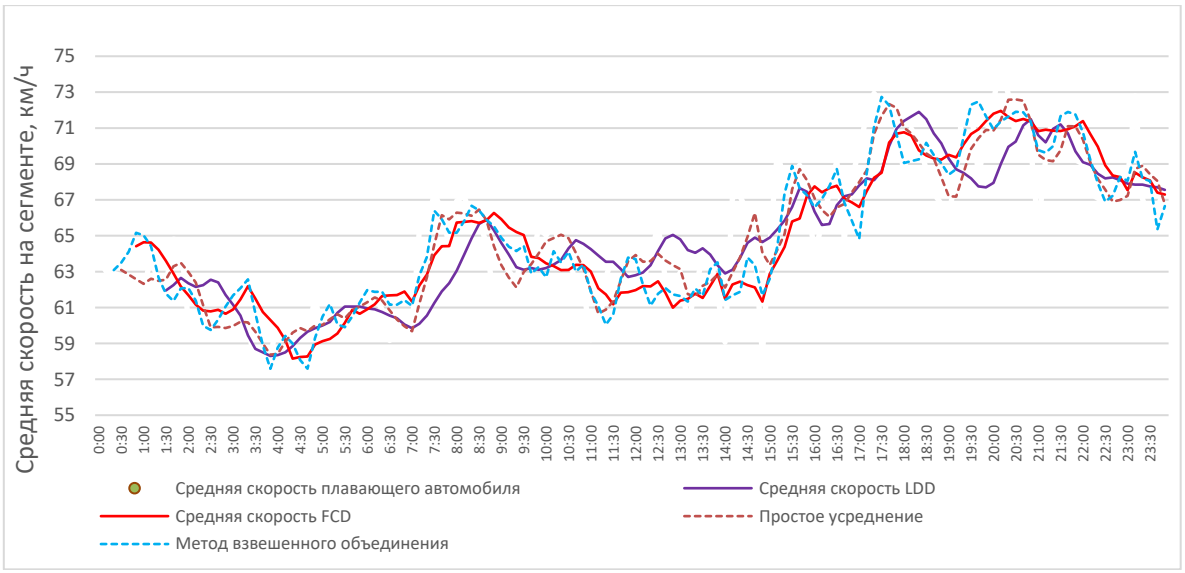


Рис. 3. Суточная динамика скорости транспортного потока на прямолинейном участке автомагистрали М-4 «Дон», оцененная по данным LDD, FCD и «плавающего автомобиля», с применением методов простого усреднения и взвешенного объединения

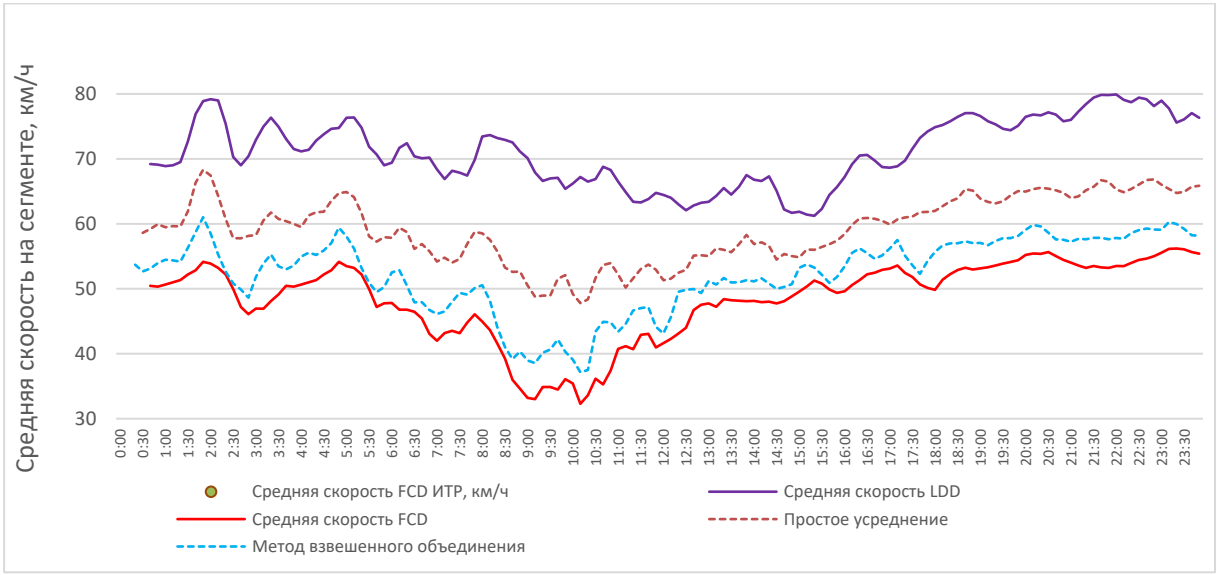


Рис. 4. Суточная динамика скорости транспортного потока на непрямолинейном участке автомагистрали М-4 «Дон», оцененная по данным LDD, FCD и «плавающего автомобиля», с применением методов простого усреднения и взвешенного объединения

На непрямолинейных участках величина отклонений для LDD возрастает, а сами ошибки приобретают более выраженный систематический характер. Это подтверждает то, что точечные измерения детектора транспорта в условиях неоднородного движения хуже воспроизводят среднюю скорость на исследуемом сегменте дороги по сравнению с FCD и натурными исследованиями методом «плавающего автомобиля».

Данные, полученные с FCD, характеризуются более устойчивыми результатами: отклонения имеют меньший разброс и в меньшей степени зависят от геометрии сегмента. Метод простого усреднения позволяет дополнительно снизить влияние случайных отклонений, однако не всегда устраняет систематическое смещение. Наиболее близкие

результаты к полученным значениям путем натурных исследований методом «плавающего автомобиля» обеспечивает метод взвешенного объединения, который учитывает различную репрезентативность источников данных и позволяет получить более согласованную оценку скорости транспортного потока [3–5, 12].

Для оценки точности источников данных и методов их обработки выполнено агрегирование отклонений скоростей относительно данных, полученных с натурных измерений за весь период наблюдений (рисунок 5). Результаты демонстрируют, что метод взвешенного объединения обеспечивает наименьшие значения MAE, RMSE и MAPE.

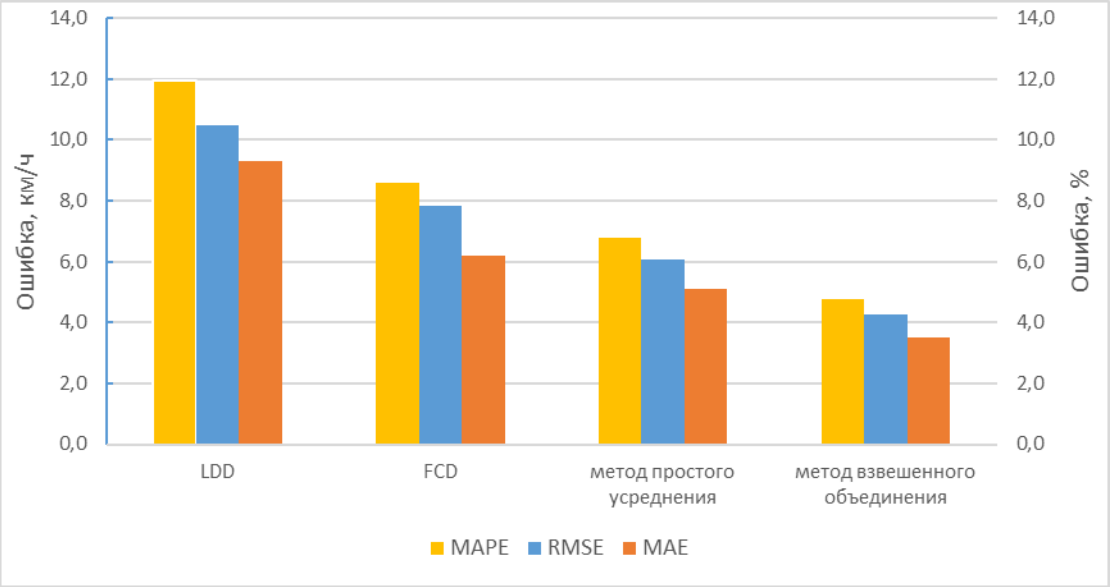


Рис. 5. Сравнение отклонений LDD, FCD, метода простого усреднения и метода взвешенного объединения по суточной выборке

Обсуждение

Полученные результаты согласуются с выводами, представленными в некоторых зарубежных работах [1–7], где подчеркивается важность комплексного подхода при верификации данных стационарных детекторов транспорта. Существенные отклонения показателей LDD от значений, полученных методом «плавающего автомобиля», как правило, обусловлены точечным характером измерений, что особенно проявляется на сегментах с неоднородными условиями движения. Аналогичные выводы приводятся в работе Maiti N. и Leclercq L. [8], где подсвечивается необходимость учета пространственной агрегации при сопоставлении точечных и протяжённых характеристик транспортного потока.

Достаточно высокая точность данных FCD свидетельствует об их репрезентативности для однородных магистральных участков. Это соответствует результатам Torrisi V. и соавторов [2], указывающих, что даже при уровне проникновения порядка 5% возможно получение устойчивых и надежных данных параметров дорожного движения. В отличие от этого, данные LDD демонстрируют более значительные отклонения, что подтверждает необходимость их дополнительной проверки и калибровки.

Самые точные оценки были получены при использовании метода взвешенного объединения. Его применение позволило достичь наилучших результатов по сравнению с каждым источником в отдельности, включая наиболее точные из них. Данный эффект

согласуется с результатами исследований [4, 5, 16], где показана эффективность подходов, основанных на фузии данных. Использование весовых коэффициентов позволило снизить влияние локальных искажений и повысить устойчивость итоговых оценок.

Выявленные различия между источниками данных носят закономерный характер и обусловлены их различной пространственной природой. Это объясняет более высокую чувствительность данных LDD к локальным условиям и, как следствие, увеличение отклонений, особенно на сегментах с криволинейной геометрией.

В связи с этим представляется целесообразным дифференцированное использование источников информации. Для прямолинейных сегментов данные LDD могут рассматриваться как информативный источник при условии стабильной работы стационарных детекторов транспорта. В то же время на участках со сложной геометрией более корректные результаты обеспечивают данные FCD, а также их совместная обработка с использованием метода взвешенного объединения.

Ограничения исследования

Несмотря на полученные результаты и подтверждение работоспособности предложенной методики верификации данных детекторов транспорта, проведённое исследование имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации результатов.

Во-первых, анализ выполнялся на ограниченном количестве сегментов дорожной сети. Несмотря на то, что выбранные участки охватывают различные условия движения, результаты не могут автоматически распространяться на всю дорожную сеть без дополнительной проверки на других типах дорог и геометрических конфигурациях.

Во-вторых, натурные измерения методом «плавающего автомобиля» выполнялись ограниченным числом автомобилей. В рамках исследования использовался один автомобиль, осуществлявший повторные проезды по каждому сегменту в течение суток. Несмотря на достаточный объём выборки, обеспеченный кратностью проездов, полученные данные отражают усреднённую картину движения и не в полной мере учитывают вариативность поведения водителей в транспортном потоке.

В-третьих, данные FCD зависят от плотности зондовых наблюдений, которая может изменяться в зависимости от времени суток, уровня загрузки дорожной сети и доли пользователей навигационных сервисов в потоке. При снижении уровня проникновения зондовых транспортных средств точность оценки скорости на сегменте может уменьшаться [1, 2, 13, 14].

В-четвёртых, данные LDD подвержены влиянию локальных условий в месте установки детектора. Показания могут зависеть от близости съездов, полос разгона и торможения, геометрии трассы и локальных манёвров транспортных средств. В ходе исследования также фиксировались эпизоды неполноты данных и кратковременных сбоев в работе детекторов, что может влиять на точность отдельных наблюдений [8, 9].

В-пятых, используемый метод взвешенного объединения основан на фиксированных весовых коэффициентах, подобранных для условий рассматриваемого участка. При применении методики на других дорогах или при изменении структуры транспортного потока параметры весов могут требовать дополнительной адаптации.

Несмотря на перечисленные ограничения, полученные результаты демонстрируют устойчивые закономерности различий между точечными измерениями LDD и сегментными оценками скорости по данным FCD и натурных исследований методом «плавающего автомобиля», что подтверждает применимость предложенной методики для практической верификации транспортных данных на опорной дорожной сети [3–5, 12].

Заключение

Предложена и апробирована методика верификации скоростей транспортного потока, регистрируемых LDD, на участке федеральной автомобильной дороги М-4 «Дон». Методика основана на совместном использовании трёх источников информации: эксплуатационных данных LDD, агрегированных данных FCD и результатов натурных измерений методом «плавающего автомобиля». В качестве опорного источника верификации используются натурные измерения, позволяющие фиксировать фактическое время прохождения сегмента и определять среднюю скорость движения в реальных условиях.

Установлено, что на сегменте со сложной геометрией данные LDD демонстрируют наибольшие отклонения относительно натурных измерений (MAE = 9,30 км/ч, RMSE = 10,47 км/ч, MAPE = 11,93 %). Данные FCD обеспечивают более устойчивую оценку (MAE = 6,20 км/ч, RMSE = 7,84 км/ч, MAPE = 8,60 %), при простом усреднении значения ошибок составляют (MAE = 5,12 км/ч, RMSE = 6,05 км/ч, MAPE = 6,77 %), а метод взвешенного объединения демонстрирует наилучшие результаты (MAE = 3,52 км/ч, RMSE = 4,28 км/ч, MAPE = 4,75 %), снижая отклонения более чем в 2 раза по сравнению с LDD.

Практическое значение результатов заключается в формировании достоверного слоя скоростей для расчёта времени в пути, транспортных задержек и оценки надёжности движения. Наибольшая согласованность между источниками данных достигается на геометрически однородных участках; на сегментах со сложной геометрией расхождения возрастают, что подтверждает необходимость дифференцированного подхода к интерпретации точечных и сегментных измерений.

Список литературы

1. Zhang C., et al. Review and prospect of floating car data research in transportation // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2025. Vol. 12, No. 4. P. 752–771. DOI: 10.1016/j.jtte.2024.09.005.

2. Torrisi V., et al. Exploring the reliability of Floating Car Data (FCD) through penetration rate prediction in urban contexts // Research in Transportation Business & Management. 2026. Vol. 64. Art. 101565. DOI: 10.1016/j.rtbm.2025.101565.

3. Decae R.J., Van Petegem J.H., Wijlhuizen G.J. Assessing the usability of Floating Car Data for before-after analysis on speed behaviour on municipal roads. TRENDLINE project report. 2025.

4. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Data Fusion of Probe and Point Sensor Data: A Guide. Washington, DC: The National Academies Press, 2024. DOI: 10.17226/27992.

5. Bai L., Wong W., Xu P., et al. Fusion of multi-resolution data for estimating speed-density relationships // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2024. Vol. 165. Art. 104742. DOI: 10.1016/j.trc.2024.104742.

6. Zheng L., Ma H., Wang Z. Travel Time Estimation for Urban Arterials Based on the Multi-Source Data // Sustainability. 2024. Vol. 16(17). Art. 7845. DOI: 10.3390/su16177845.

7. Ipekyuz B., Sevinen P.K., Yaman H.T. Performance Evaluation of Fused Floating Car Data (FCD) and Bluetooth (BT) Data Speed Estimation on Urban Arterials // Arabian Journal for Science and Engineering. 2025. Vol. 50. P. 17091–17108. DOI: 10.1007/s13369-025-10088-y.

8. Maiti N., Leclercq L. Estimating Spatial Mean Speeds from Local Sensors: A Machine-Learning Approach // Data Science for Transportation. 2025. Vol. 7. Art. 6. DOI: 10.1007/s42421-025-00120-w.

9. Purkrábková Z., Langr M., Hrubeš P., Brabec M. Detecting anomalies in traffic data using a flexible semi-parametric model // European Transport Research Review. 2025. Vol. 17. Art. 33. DOI: 10.1186/s12544-025-00728-7.

10. Taheri Sarteshnizi I., Sarvi M., Asadi Bagloee S., Nassir N. On the applicability of time series anomaly detection methods to real-world traffic volume data // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2026. Vol. 184. Art. 105536. DOI: 10.1016/j.trc.2026.105536.

11. Partzsch I., Bellanger A., Klöppel-Gersdorf M., et al. Anomaly Detection for Traffic Management Purposes at Urban Intersections Using Infrastructure-Generated Vehicle-to-X Messages // Proceedings of VEHITS 2025. 2025. P. 565–570. DOI: 10.5220/0013404700003941.

12. Eisinga K., Lorkowski S. Network-Wide Traffic Volume Estimation Based on Probe Vehicle Data // Transportation Research Record. 2025. Vol. 2679(4). P. 264–277. DOI: 10.1177/03611981241289408.

13. Young S., Vander Laan Z., Sadabadi K. REVEAL: Real-Time Volume Estimates from Probe Traffic Data: State of the Industry and Recommendations for the Eastern Transportation Coalition Transportation Data Marketplace. Final Report. 2025.

14. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Washington, DC: The National Academies Press, 2022.

15. FHWA Office of Operations. Calibration in Quantitative Alternatives Analysis: Chapter 3 (web resource). URL: https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop20057/index.htm.

16. Zhang J., Huang D., Liu Z., et al. A data-driven optimization-based approach for freeway traffic state estimation based on heterogeneous sensor data fusion // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2024. Vol. 189. Art. 103656. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103656.

17. Rathi G., Kamble S., Sharma N. Road Traffic Outlier Detection for Reliable ITS: A Multi-Level Framework from Point to Network Fidelity // IETE Technical Review. 2026. DOI: 10.1080/02564602.2025.2608748.

18. Erdelić T., Carić T., Erdelić M., Tišljarić L., Turković A., Jelušić N. Estimating congestion zones and travel time indexes based on the floating car data // Computers, Environment and Urban Systems. 2021. Vol. 87. Art. 101604. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101604.

19. Гантимурова Ю.О. Оценка зон транспортных заторов на основе данных об условиях дорожного движения «плавающих» автомобилей // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2023. № 17. С. 221–223.Скудина А.А. Анализ достоверности информации от «плавающих» автомобилей при возникновении инцидента // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2012. № 3(26). С. 11-18.

20. Braun M., Kunkler J., Kellner F. Towards Sustainable Cities: Utilizing Floating Car Data to Support Location-Based Road Network Performance Measurements // Sustainability. 2020. Vol. 12(19). Art. 8145. DOI: 10.3390/su12198145.

21. Скудина А.А. Исследование зависимости доли «плавающих» автомобилей в потоке и дискретности получаемой информации для достоверной оценки характеристик транспортного потока // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. № 4(23). С. 11–17.

22. Скудина А.А. Анализ достоверности информации от «плавающих» автомобилей при возникновении инцидента // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2012. № 3(26). С. 11–18.

23. Крысин С.Н., Бородин Д.А., Меньшаков С.И., Ярыгин А.В. Адаптация метода «плавающего автомобиля» на основе использования данных спутниковой навигации городского пассажирского транспорта // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая». 2017. С. 84–91.

24. Трофименко Ю.В., Рунец Р.С., Буриков Е.И. Концепция интеллектуального управления движением с использованием высокоавтоматизированных транспортных средств при интеграции с инфраструктурой V2X // Вестник Донецкой академии транспорта. 2025. № 4. С. 94–106.

25. Косолапов А.В. Оценка транспортных задержек с помощью «плавающих» автомобилей // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин: материалы международной научно-технической конференции. 2009. С. 203–207.

26. Traffic Microsimulation Modelling. Design Manual for Roads and Bridges (Guidance on development, calibration and validation). UK, 2024.

27. Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения (утв. распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р).

References

1. Zhang, C., et al. (2025). Review and prospect of floating car data research in transportation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 12(4), 752–771. DOI: 10.1016/j.jtte.2024.09.005.

2. Torrisi, V., et al. (2026). Exploring the reliability of Floating Car Data (FCD) through penetration rate prediction in urban contexts. *Research in Transportation Business & Management*, 64, 101565. DOI: 10.1016/j.rtbm.2025.101565.

3. Decae, R. J., Van Petegem, J. H., & Wijlhuizen, G. J. (2025). *Assessing the usability of Floating Car Data for before-after analysis on speed behaviour on municipal roads*. TRENDLINE project report.

4. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2024). *Data Fusion of Probe and Point Sensor Data: A Guide*. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: 10.17226/27992.

5. Bai, L., Wong, W., Xu, P., et al. (2024). Fusion of multi-resolution data for estimating speed-density relationships. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 165, 104742. DOI: 10.1016/j.trc.2024.104742.

6. Zheng, L., Ma, H., & Wang, Z. (2024). Travel Time Estimation for Urban Arterials Based on the Multi-Source Data. *Sustainability*, 16(17), 7845. DOI: 10.3390/su16177845.

7. Ipekyuz, B., Sevinen, P. K., & Yaman, H. T. (2025). Performance Evaluation of Fused Floating Car Data (FCD) and Bluetooth (BT) Data Speed Estimation on Urban Arterials. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 17091–17108. DOI: 10.1007/s13369-025-10088-y.

8. Maiti, N., & Leclercq, L. (2025). Estimating Spatial Mean Speeds from Local Sensors: A Machine-Learning Approach. *Data Science for Transportation*, 7, 6. DOI: 10.1007/s42421-025-00120-w.

9. Purkrábková, Z., Langr, M., Hrubeš, P., & Brabec, M. (2025). Detecting anomalies in traffic data using a flexible semi-parametric model. *European Transport Research Review*, 17, 33. DOI: 10.1186/s12544-025-00728-7.

10. Taheri Sarteshnizi, I., Sarvi, M., Asadi Bagloee, S., & Nassir, N. (2026). On the applicability of time series anomaly detection methods to real-world traffic volume data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 184, 105536. DOI: 10.1016/j.trc.2026.105536.

11. Partzsch, I., Bellanger, A., Klöppel-Gersdorf, M., et al. (2025). Anomaly Detection for Traffic Management Purposes at Urban Intersections Using Infrastructure-Generated

Vehicle-to-X Messages. In *Proceedings of VEHITS 2025* (pp. 565–570). DOI: 10.5220/0013404700003941.

12. Eisinga, K., & Lorkowski, S. (2025). Network-Wide Traffic Volume Estimation Based on Probe Vehicle Data. *Transportation Research Record*, 2679(4), 264–277. DOI: 10.1177/03611981241289408.

13. Young, S., Vander Laan, Z., & Sadabadi, K. (2025). *REVEAL: Real-Time Volume Estimates from Probe Traffic Data: State of the Industry and Recommendations for the Eastern Transportation Coalition Transportation Data Marketplace*. Final Report.

14. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). *Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Washington, DC: The National Academies Press.

15. FHWA Office of Operations. (n.d.). *Calibration in Quantitative Alternatives Analysis: Chapter 3. Retrieved from https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop20057/ index.htm*

16. Zhang, J., Huang, D., Liu, Z., et al. (2024). A data-driven optimization-based approach for freeway traffic state estimation based on heterogeneous sensor data fusion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 189, 103656. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103656.

17. Rathi, G., Kamble, S., & Sharma, N. (2026). Road Traffic Outlier Detection for Reliable ITS: A Multi-Level Framework from Point to Network Fidelity. *IETE Technical Review*. DOI: 10.1080/02564602.2025.2608748.

18. Erdelić, T., Carić, T., Erdelić, M., Tišljarić, L., Turković, A., & Jelušić, N. (2021). Estimating congestion zones and travel time indexes based on the floating car data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 87, 101604. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101604.

19. Gantimurova, Yu. O. (2023). Assessment of traffic congestion zones based on floating car data on road traffic conditions. *Bulletin of Angarsk State Technical University*, (17), 221–223. (In Russ.)

20. Braun, M., Kunkler, J., & Kellner, F. (2020). Towards Sustainable Cities: Utilizing Floating Car Data to Support Location-Based Road Network Performance Measurements. *Sustainability*, 12(19), 8145. DOI: 10.3390/su12198145.

21. Skudina, A. A. (2011). Study of the dependence of the share of floating cars in the traffic flow and the discreteness of the information obtained for reliable assessment of traffic flow characteristics. *Bulletin of Pacific State University*, (4(23)), 11–17. (In Russ.)

22. Skudina, A. A. (2012). Analysis of the reliability of information from floating cars in the event of an incident. *Bulletin of Pacific State University*, (3(26)), 11–18. (In Russ.)

23. Krysin, S. N., Borodin, D. A., Menshakov, S. I., & Yarygin, A. V. (2017). Adaptation of the floating car method based on the use of satellite navigation data of urban passenger transport. In *Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists "Russia Young"* (pp. 84–91). (In Russ.)

24. Trofimenko, Yu. V., Runets, R. S., & Burikov, E. I. (2025). Concept of intelligent traffic management using highly automated vehicles integrated with V2X infrastructure. *Bulletin of the Donetsk Academy of Transport*, (4), 94–106. (In Russ.)

25. Kosolapov, A. V. (2009). Assessment of traffic delays using floating cars. In *Problems of operation and maintenance of transport and technological machines: Proceedings of the international scientific and technical conference* (pp. 203–207). (In Russ.)

26. Traffic Microsimulation Modelling. (2024). *Design Manual for Roads and Bridges (Guidance on development, calibration and validation)*. UK.

27. Methodological recommendations for conducting traffic monitoring. (2022). Approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. AK-337-r dated December 27, 2022. (In Russ.)

Runets R. S.

A METHOD FOR ESTIMATING TRAFFIC FLOW SPEEDS USING STATIONARY DETECTORS, NAVIGATION SERVICES AND RESULTS OF FIELD STUDIES

Abstract*. This article presents a methodology for estimating traffic flow speeds recorded by stationary vehicle detectors (Long Distance Detectors, LDDs) based on telematics data from navigation service users (Floating Car Data, FCDs) and field surveys conducted using the "floating car" method on selected sections of the M-4 "Don" federal highway. Floating car measurements were taken hourly on eight 1-km-long road sections (5 straight, 3 curved). To ensure comparability with LDD and FCD data, which have a resolution of 10 minutes, speed values were averaged over the corresponding time intervals. The weighted fusion method demonstrated the highest accuracy, significantly reducing errors compared to individual data sources. Comparative analysis revealed that LDD data exhibited the greatest deviations from field measurements, while FCD data were more consistent. The MAPE indicator for the "floating vehicle" measured data was 11.93% for LDD, 8.60% for FCD, 6.77% for simple averaging, and 4.75% for the weighted data merging method. Thus, using weighted data merging reduces the error by more than 2.5 times compared to LDD and almost 2 times compared to FCD, confirming its superior effectiveness. Using field measurements as a reference source and combining disparate LDD and FCD data significantly improves the reliability of traffic flow estimates. Using simple averaging when combining measurement results in different ways can improve the accuracy of estimating actual traffic flow speeds. However, the weighted data merging method is more effective in verifying traffic flow speeds.*

Keywords*: highway sections, intelligent transport systems, fixed vehicle detectors (LDD), navigation services (FCD), floating car method, traffic flow speed, data verification.*

Сведения об авторе:

Рунец Роман Сергеевич
ООО «Центр дорожных инноваций», «Институт транспортного развития»,
г. Краснодар, Российская Федерация, основатель, генеральный директор,
аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного
технического университета (МАДИ),
e-mail: rrunets@gmail.com

Information about the author:

Runets Roman Sergeevich
Road Innovation Center, Institute of Transport Development,
Krasnodar, Russian Federation, CEO, Director,
Postgraduate Student at the Moscow Automobile and Road
Construction State Technical University (MADI)
e-mail: rrunets@gmail.com

УДК 656.078.1:303.2

Степаненко А.С., Сафонова А.В.

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ АВИАТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аннотация: *в статье проведено системно-структурное исследование национальной авиатранспортной системы (АТС) России. Проведен анализ распределения аэропортов опорной сети страны по федеральным округам, и определены особенности федеральных округов с точки зрения размещения в них авиатранспортных предприятий. Рассмотрено распределение объемов авиационных пассажиропотоков по федеральным округам и структуры такого распределения на примерах Дальневосточного и Северо-Кавказского федеральных округов. Сделаны выводы о производительности региональных АТС, выявлены критерии их развития и точки роста. Структура региональной авиатранспортной системы выстраивается на базе одного или нескольких ключевых аэропортов (аэропортов федерального значения, имеющих достаточные мощности и стабильные показатели среднегодового пассажиропотока), при условии наличия востребованности его услуг у перевозчика. Смоделирована структура показателей эффективности АТС, а также критерии оценки влияния факторов эффективности предприятий, объединенных в систему. Результаты исследования выявляют неравномерность распределения мощностей предприятий по территории страны, а также неравномерное распределение потенциала роста региональных АТС, что позволяет предложить основные варианты государственной стратегии их развития, такие как равномерное распределение мощностей систем по федеральным округам и вариант распределения мощностей с упором на ведущие региональные АТС. Новизна исследования состоит в формировании критериев оценки эффективности региональных авиатранспортных систем как единого комплекса.*

Ключевые слова: *региональные авиатранспортные системы, аэропорты, авиапредприятия, стратегия развития, системы показателей.*

Постановка задачи

В настоящее время глобальные мировые процессы трансформации экономического сектора и изменения в политике стран - лидеров создают предпосылки для фундаментальных изменений в сфере транспорта. Геополитическое положение России, а также размеры ее территории, разнообразие климатических условий, рельефа местности определяют значимость решения задачи развития транспортного комплекса страны, как совокупности региональных транспортных систем. Ключевыми направлениями этого развития являются маршрутные сети, мощности транспортной

инфраструктуры, собственное производство и техническое обслуживание транспортных средств.

Авиационный транспорт обеспечивает связанность территорий нашей страны и тем самым способствует обеспечению устойчивого роста производства и сбыта продукции, не только внутри страны, но и на международных рынках.

Характерной особенностью России является обширность территорий, порядка 40% которых составляют земли Дальнего Востока, где проживает около 6% населения страны. При этом Кавказ, который занимает только 1,5 % территорий, населяет около 10% населения, а в центральной России проживает почти 28% населения. Арктическая зона занимает 22% территорий. Её удалённые регионы насчитывают всего 1,3%.

С учетом большой площади, территориальной разобщенности и климатических различий регионов России представляется целесообразным рассматривать ее транспортную систему как совокупность региональных транспортных систем. А с учетом количества регионов целесообразно объединить некоторые из них в кластеры, что значительно облегчит процесс управления. Поэтому актуальность темы данного исследования обусловлена формирующимся в настоящее время разделением авиатранспортной системы России на региональные АТС и возникающей необходимостью оценки эффективности их функционирования, что и составляет предмет настоящего исследования. В исследовании поставлены такие задачи, как:

- Анализ научных исследований, затрагивающих вопросы оценки операционной деятельности развития в целом региональных авиатранспортных систем.
- Рассмотрение текущих операционных показателей АТС на примере регионов Российской Федерации.
- Формирование подхода к оценке функционирования региональных АТС с использованием критериев оценки и сформированной системы показателей.

Новизна исследования обусловлена необходимостью развития регионального транспорта Российской Федерации и отсутствием единой системы показателей оценки функционирования региональных авиатранспортных систем. Моделирование единых принципов оценки позволит как формировать четкие стратегии развития систем, так и моделировать их цифровые двойники, усиливая достоверность отраслевых прогнозов в отрасли.

Анализ последних исследований

Имеющиеся на данный момент исследования позволяют разделить их результаты на несколько уровней рассмотрения авиатранспортных систем. В частности рассмотрение АТС как сложной системы, в этом случае рассматриваются такие аспекты Имеющиеся на данный момент исследования позволяют разделить их результаты на несколько уровней рассмотрения авиатранспортных систем. В частности, рассмотрение АТС как сложной системы в этом случае рассматриваются такие аспекты эффективного функционирования, как влияние масштаба системы, влияние социально- экономической ситуации и структуры рынков [1]. В глобальном смысле региональные АТС Российской Федерации являются как источником требований к элементам такой системы, так и зависят от качества функционирования каждого элемента. К примеру, современные тенденции развития гражданской авиации таковы, что решающая роль в повышении её эффективности и безопасности переходит от улучшения эксплуатационных характеристик воздушных судов (ВС) к оптимизации системы, в которой они используются [2]. Охапкин А.А. рассматривает элементы как способ оценки всей авиатранспортной системы [3]. Чаще отправной точкой для исследования качества функционирования АТС является достижение необходимых показателей в области безопасности полетов, эксплуатации ВС и топливообеспечения региональными

авиакомпаниями [2,4]. Следует уделить внимание исследованиям, основанным на рассмотрении только пассажирских перевозок при анализе качества функционирования региональных авиатранспортных систем. Сформированный подход позволяет оценить систему через показатели транспортной доступности, однако учитывает только пассажирские перевозки при анализе данных, представленных в исследовании [5].

При формировании общего подхода к оценке функционирования региональных АТС необходимо рассматривать вопрос с точки зрения анализа интегрированных показателей системы без привязки к данным только по одному элементу, в частности, авиакомпании.

Цель работы

Цель работы – разработка критериев оценки эффективности функционирования региональных АТС и предложений по методике их определения, а также разработка типовых рекомендаций по результатам проведения оценки.

Таким образом, исследование предусматривает выполнение следующих задач:

1. Системно-структурный анализ национальной авиатранспортной системы с разделением на административные единицы (федеральные округа и, точечно, на субъекты Российской Федерации).
2. Определение основных характеристик и особенностей федеральных округов.
3. Выявление закономерностей в полученных результатах исследования. Определение критериев оценки АТС в федеральных округах, при необходимости – в субъектах Российской Федерации.
4. Проведение комплексной оценки региональных АТС по ключевым критериям.
5. Изучение результатов проведённой оценки. Разработка предложений по развитию региональных АТС.

Таким образом, результаты исследования могут стать основой для формирования метода размещения отраслевых предприятий в рамках формирования и развития региональных АТС.

В работе использованы аналитические методы исследования, такие как метод выявления трендов, метод классификации. Также представлены результаты математического моделирования показателей эффективности технологических процессов региональной АТС.

Основная часть

Значимой особенностью Российской Федерации является неравномерность или значительная дифференциация плотности населения (рисунок 1).

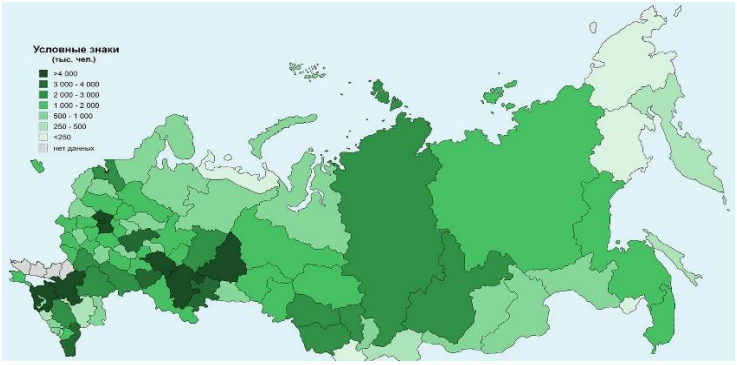


Рис. 1. Карта плотности населения России на 2024 год[1]

[1] https://миркарт.рф

Принимая во внимание климатические особенности некоторых регионов (Мурманская область, Республика Саха (Якутия), Камчатский край, Северный Кавказ), ряд территорий являются труднодоступными для железнодорожного и водного транспорта, а также малопригодными для строительства надежных и долговечных автомобильных дорог. Воздушный транспорт в таких регионах является практически безальтернативным видом связи с другими территориями страны [6].

Рассмотрим характеристики авиатранспортной системы Российской Федерации в целом.

В стране насчитывается порядка 228 аэропортов. При этом согласно Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года [7, 36], опорная сеть аэропортов составит 199, в том числе 92 аэропорта федерального значения, а также 107 аэропортов социально-экономического значения.

Авиатранспортная отрасль страны насчитывает более 1200 ВС, из которых порядка 90% являются пассажирскими.

На рынке авиатранспортных услуг функционирует около 100 авиакомпаний. Суммарный объем авиаперевозок по итогам 2025 года составил 108 миллионов человек, что на 3% больше, чем за аналогичный период 2023 года, но на 2,5% меньше, чем за период 2024 года, причем с 2022 до 2023 года прирост составил около 11%. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о резком замедлении темпов прироста и снижении шага динамики[2].

Территория России разделена на 8 федеральных округов: Центральный, Северо-Западный, Южный, Приволжский, Уральский, Сибирский, Дальневосточный и Северо-Кавказский. Объекты воздушного транспорта расположены на карте страны неравномерно, что обуславливается особенностями отдельных макрорегионов – федеральных округов. Распределение аэропортов по округам представлено в таблице 1.

Таблица 1

Распределение опорной сети аэропортов страны по федеральным округам[3]

Федеральный округ		Количество аэропортов федерального значения	Количество аэропортов социального значения	Всего аэропортов в федеральном округе
Центральный	ЦФО	14	10	24
Северо-Западный	СЗФО	8	5	13
Южный	ЮФО	8	12	20
Приволжский	ПФО	17	5	22
Уральский	УФО	13	14	27
Сибирский	СФО	16	25	41
Дальневосточный	ДФО	9	65	74
Северо-Кавказский	СкФО	7	0	7
Итого:		92	136	228

Для упрощения управления авиатранспортной отраслью страны представляется целесообразным при разделении авиатранспортной системы на региональные составляющие отталкиваться от существующего разделения территории страны на федеральные округа (ФО). При этом не исключается как объединение нескольких ФО в одну региональную систему, например, ЦФО и СЗФО, так и разделение одного округа на несколько региональных систем, например, ДФО.

[2] https://www.rosstat.gov.ru/statistics/transport

[3] https://www.rosstat.gov.ru/statistics/transport

Наибольшее количество аэропортов находится в Дальневосточном федеральном округе, наименьшее – в Северо-Кавказском. При этом наибольшее количество аэропортов федерального значения расположено в Приволжском, Сибирском и Центральном федеральных округах, наименьшее – в Северо-Западном, Южном и Северо-Кавказском федеральных округах. Интересно, что при таком распределении аэропортовых мощностей опорной сети воздушного транспорта доля ключевых аэропортов в Северо-Кавказском федеральном округе составляет 100%, а в Дальневосточном – всего 12%.

Анализ данных, представленных в таблице 1, позволяет отметить, что в Дальневосточном федеральном округе в связи с практической безальтернативностью воздушного транспорта количество аэропортов, имеющих потенциал экономического роста и стратегического развития, относительно мало.

Для достижения целей настоящего исследования рассматривалось распределение объема пассажирских перевозок по федеральным округам в условиях равномерного и поступательного развития рынка авиаперевозок. Приведены средние значения в расчете на один аэропорт округа. Вследствие усреднения ежегодных показателей становится выражена общая картина авиатранспортной системы Российской Федерации. Структура пассажиропотока за указанный период распределена следующим образом (рисунок 2).

Согласно представленной диаграмме, можно говорить о выраженной разнице между Центральным федеральным округом и региональными авиатранспортными системами, которые в свою очередь имеют более равномерное распределение пассажиропотока.

В целях дальнейшего исследования определим коэффициент выработки аэропортов относительно обслуженных пассажиров ($К_{выр}$) по формуле 1.

$$(К_{выр}) = \frac{N_{пасс}}{N_{ап}} \quad , \qquad (1)$$

где $N_{пасс}$ – среднее количество обслуженных пассажиров в аэропортах федерального округа, млн. пасс.;

$N_{ап}$ – количество аэропортов в федеральном округе.

Полученные результаты расчетов отображены на рисунке 3. В качестве базового периода исследования статистических данных взят временной отрезок 2020-2023 годов. В связи со слабо выраженной волатильностью данного показателя можно говорить о средних показателях за несколько лет.



Рис. 2. Распределение объема пассажиров по федеральным округам (сформировано авторами на основе данных Росавиации)

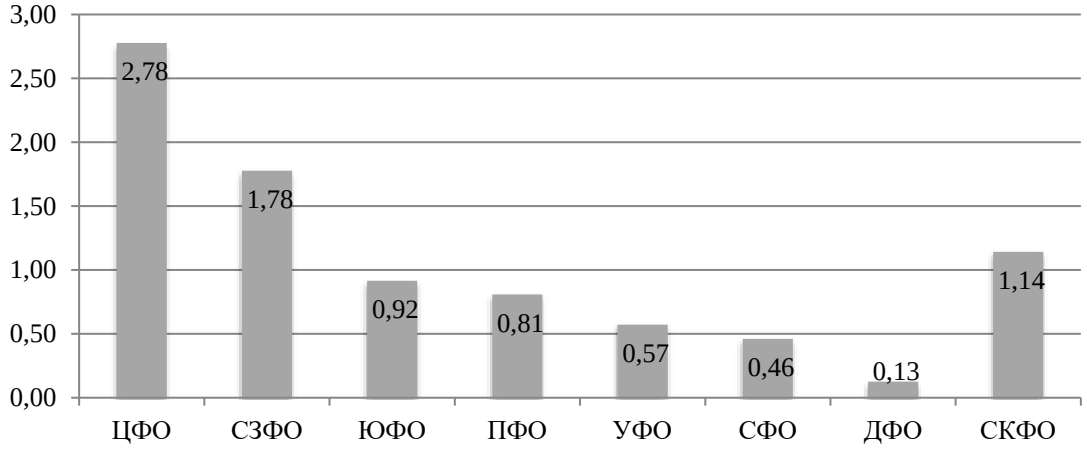


Рис. 3. Значение коэффициента выработки аэропортов по федеральным округам за базовый период
(сформировано авторами на основе данных Росавиации)

Из представленных выше данных можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее загруженными аэропортами относительно обслуживания пассажиров являются аэропорты Центрального федерального округа. В них коэффициент выработки составляет 2,78.
2. Наименее загруженными аэропортами являются аэропорты Дальневосточного федерального округа. В них коэффициент выработки составляет 0,13.
3. Разница максимального и минимального значений коэффициента составляет 2,65. То есть нагрузка на аэропорты ЦФО в 22 раза больше, чем в аэропортах ДФО, что однозначно указывает на неравномерность распределения пассажиропотока по стране.
4. Среднее значение коэффициента выработки аэропортов составляет 0,78. Выше среднего значения – аэропорты 5 федеральных округов (Центрального, Северо-Западного, Южного, Приволжского и Северо-Кавказского), а ниже – аэропорты 3 федеральных округов (Уральского, Сибирского и Дальневосточного).
5. Федеральные округа, исходя из коэффициента выработки, могут быть разделены на 4 группы: со значением коэффициента более 2 (Центральный), со значением от 1 до 2 (Северо-Западный и Северо-Кавказский), со значением от 0,5 до 1 (Южный, Приволжский и Уральский) и менее 0,5 (Сибирский и Дальневосточный) соответственно.

Важным показателем региональной авиатранспортной системы является среднегодовой объем пассажиропотока. Среднее значение темпа роста перевозок в млн пассажиров за последнее десятилетие составляет 3% (рисунок 4).

Среднегодовой объем пассажиропотока является наиболее очевидным индикатором, определяющим точки роста и ключевые объекты авиатранспортной системы федерального округа [8].

Рассмотрим структуры распределения объемов пассажиропотока на примере Дальневосточного и Северо-Кавказского федеральных округов (рисунки 5, 6) в связи с ярко выраженным ростом авиаперевозок. В СКФО малое количество аэропортов опорной сети, а в ДФО много аэропортов и посадочных площадок, из них относительно мало федерального значения и вообще кроме Якутска, Хабаровска, Владивостока и Комсомольска-на-Амуре, нет миллионников. Таким образом, СКФО – зона роста региональных транспортных систем, имеющих потенциал при соблюдении иных условий региона, а ДФО, несмотря на всю поддержку, обладает в основном социальным характером. Также следует учитывать коэффициенты доступности выбранных регионов.

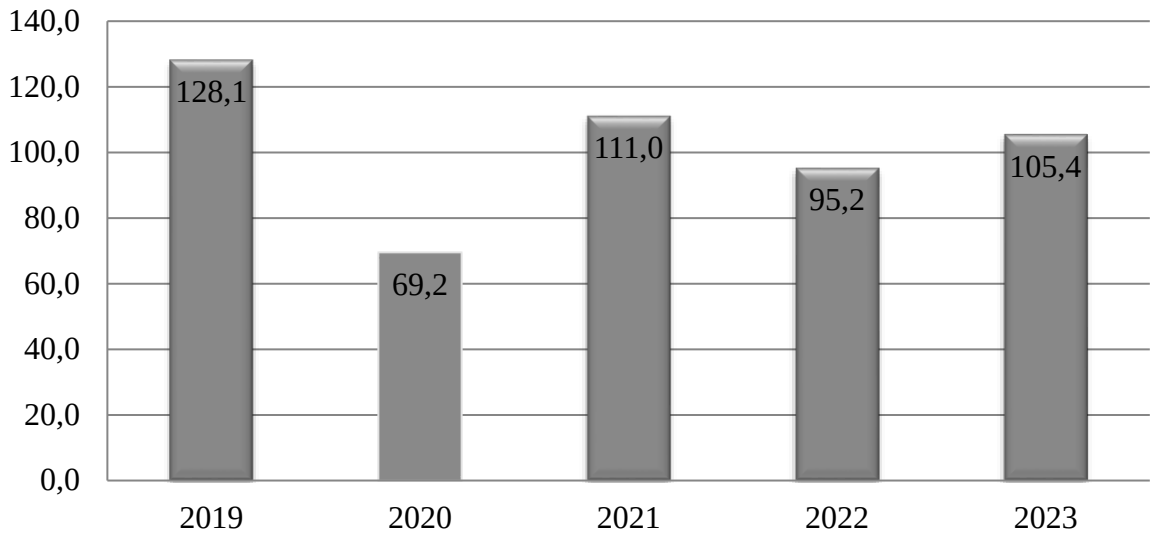


Рис. 4. Объемы пассажирских перевозок российскими авиакомпаниями[4]

В Дальневосточном федеральном округе наиболее развитой региональной АТС обладают такие регионы, как Приморский край, Хабаровский край, Сахалинская область, а также Республика Саха (Якутия). Исходя из приведенных данных, можно сказать, что крупным авиатранспортным хабом в ДФО является аэропорт федерального значения Кневичи (Владивосток). Также крупными аэропортами в ДФО являются Новый (Хабаровск), Хомутово (Южно-Сахалинск), Якутск (Якутск).

В Северо-Кавказском федеральном округе ключевую роль играют региональные авиатранспортные системы Ставропольского края, Республики Дагестан, а также Чеченской Республики и Северной Осетии-Алании.



Рис. 5. Распределение объема среднегодового пассажиропотока по регионам в Дальневосточном федеральном округе (сформировано авторами на основе данных Росавиации)

[4] https://mintrans.gov.ru

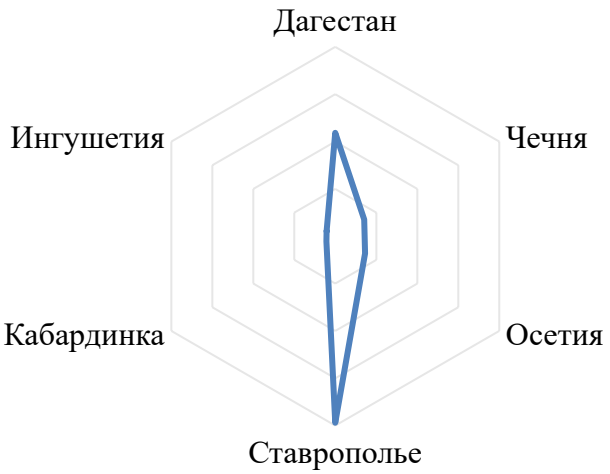


Рис. 6. Распределение среднегодового объема пассажиропотока по регионам в Северо-Кавказском федеральном округе (сформировано авторами на основе данных Росавиации)

Структура региональной АТС выстраивается на базе одного или нескольких ключевых аэропортов (аэропортов федерального значения, имеющих достаточные мощности и стабильные показатели среднегодового пассажиропотока) [9]. При этом необходимо учитывать, что обслуживание воздушных судов с 2022 года значительно затруднилось ввиду расторжения или приостановки существующих контрактов с иностранными производителями комплектующих и запчастей. В этой связи еще одним необходимым условием для функционирования региональной авиатранспортной системы становится фактор размещения на располагаемой территории авиапроизводства, способного регулярно и бесперебойно обеспечивать обслуживание воздушных судов [10].

Если рассматривать перспективу развития отечественной гражданской авиации, то наиболее перспективным проектом является МС-21. Проект данного воздушного судна рассматривается как флагман национального воздушного парка воздушных судов в целом по стране [11].

В настоящее время основные производственные мощности ПАО «Яковлев» расположены в 9 регионах страны. При условии оптимизации архитектуры бизнес-процессов, связанных с взаимодействием этих производств с аэропортами и местными воздушными перевозчиками, транспортное обеспечение таких регионов увеличит эффективность своей деятельности за счет сокращения логистических издержек и регулярных поставок комплектующих и запчастей, а также возможности регулярного технического обслуживания воздушных судов.

Таким образом, размещение федеральных производств в региональных центрах влияет на экономические и транспортные показатели отрасли. Производительные мощности данного проекта представлены в Москве, Московской области (Жуковский), Ростовской области (Таганрог), Ульяновской области (Ульяновск), Воронежской области (Воронеж), Республике Татарстан (Казань), Новосибирской области (Новосибирск), Иркутской области (Иркутск) и Хабаровском крае (Комсомольск-на-Амуре).

Согласно открытым данным Объединенной авиастроительной корпорации[5], МС-21 среднемагистральный узкофюзеляжный самолет вместимостью от 163 до 211

[5] https://uacrussia.ru/ru/aircraft/lineup/civil/ms-21/

пассажиров. При заявленных габаритах (размах крыла – 35,9 метра, длина – 42,3 метра), а также максимальной дальности полета при модульной двухклассной компоновке пассажирского салона (бизнес – 16 кресел и эконом – 147 кресел) до 3800 километров, его возможной маршрутной сетью могут быть межрегиональные перевозки как внутри федеральных округов, так и между ними. При этом оптимальным количеством членов экипажа представляется четыре человека.

Кроме того, разработчиками заявлена возможность эксплуатации воздушного судна в широком температурном диапазоне, что отвечает требованиям перевозок в условиях Дальневосточного федерального округа и большинства районов Крайнего Севера.

При этом эксплуатация воздушных судов возможна на аэродромах, расположенных на высоте до 4000 м над уровнем моря, то есть в условиях возвышенностей. Так эксплуатация воздушного судна допускается и в Северо-Кавказском федеральном округе.

Такие характеристики создают воздушному судну перспективу заменить собой значительную часть национального парка воздушных судов, которую в настоящее время составляют ВС иностранного производства, для которых в связи с введением экономических санкций со стороны недружественных стран нормальные условия технического обслуживания отсутствуют. В связи с вышесказанным следует рассматривать перспективы развития авиатранспортных систем страны, опираясь на эксплуатационные характеристики перспективных типов воздушных судов.

Выводы

Оценка эффективности функционирования региональных АТС может проводиться по следующим критериям:

- показатели пассажиропотока через аэропорты региона и его распределение по ним (количественные показатели с установленными порогами, исходя из динамики исторических данных);
- наличие в регионе базового перевозчика и условия его функционирования в нем (качественная оценка);
- наличие производственных мощностей и авиаремонтных заводов (количественная оценка соответствия производственных возможностей системы и трендов текущих показателей);
- эффективность построения архитектуры бизнес-процессов в системе (количественная оценка и выявление «узких мест»);
- уровень государственного регулирования и участия в развитии региональной АТС (качественная экспертная оценка);
- дополнительные факторы региона и их использование (туристический потенциал, развитие промышленности, экономическое развитие, уровень социального развития и т.д.)-количественная оценка.

Необходимо учитывать, что у каждого комплекса предприятий, как и у любой системы, существует внешняя среда, факторы которой влияют на него на протяжении всего жизненного цикла.

В определённых регионах АТС имеет потенциал роста, который может способствовать развитию регионов в целом, а также развитию внутри федерального округа. Таким образом, можно обозначить несколько стратегий развития АТС Российской Федерации:

- равномерное распределение мощностей по федеральным округам, в зависимости от динамики пассажиропотоков;

- развитие наиболее стратегически важных АТС и наиболее эффективных, согласно предварительной оценке.

На развитие и стабильное эффективное функционирование региональной авиатранспортной системы влияют факторы внешней среды. Каждый элемент региональной АТС имеет свою производительность и потенциально может ее увеличить, совершенствуя свою деятельность и (или) связи между собой. Следовательно, имеет смысл при развитии таких систем опираться на совершенствование технологических процессов обеспечения перевозок пассажиров, багажа, грузов и почты внутри системы путем формирования единой системы функционирования для ее составляющих предприятий. Таким образом, реинжиниринг региональных авиатранспортных систем возможен на основе оценки ключевых показателей эффективности.

Список литературы

1. Горшкова, И. В. Экономические факторы и закономерности развития больших технических систем (на примере авиатранспортных систем) / И. В. Горшкова, В. В. Клочков, А. Л. Русанова // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2012 : материалы шестой международной конференции, Москва, 01–03 октября 2012 года. Том 2. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. – С. 167-169. – EDN WKMLBD.

2. Шапкин, В. С. Развитие авиатранспортных систем: мировые тенденции и российские перспективы / В. С. Шапкин // Международный конгресс по аэронавтике : Сборник тезисов, Москва, 04–05 декабря 2023 года. – Москва: Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 2023. – С. 676-677. – EDN SRZXBH.

3. Охапкин, А. А. Анализ эффективности и обоснование приоритетов развития технологий индивидуального мониторинга и прогнозирования состояния элементов авиатранспортных систем / А. А. Охапкин // Технологическое развитие авиастроения: глобальные тенденции и национальные интересы России: Труды Второй научно-практической конференции, Москва, 10 ноября 2022 года. – Москва: НИЦ «Институт имени Н. Е. Жуковского», 2023. – С. 217-226. – EDN YHGDRU.

4. Горшкова, И. В. Планирование развития авиатранспортных систем в отдаленных, труднодоступных и малонаселенных регионах с использованием местных топливных ресурсов / И. В. Горшкова, Т. И. Попова // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2011) : материалы пятой международной конференции, Москва, 03–05 октября 2011 года / Общая редакция: С.Н. Васильев, А.Д. Цвиркун. Том 2. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2011. – С. 38-40. – EDN WHSRUZ.

5. Урюпин, И. В. Методика оценки качества пассажирской авиатранспортной системы Российской Федерации / И. В. Урюпин, А. А. Сухарев, А. О. Власенко // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2023. – № 3. – С. 79-92. – DOI 10.14357/20718632230309. – EDN SBYSPM.

6. Фридлянд, А. А. Анализ авиационной подвижности населения и ее дифференциация по регионам Российской Федерации / А. А. Фридлянд, А. П. Чубуков, Р. Р. Низаметдинов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2022. – № 40. – С. 100-110. – EDN RVTTFA.

7. Распоряжение Правительства Российской Федерации Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. - [URL]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (дата обращения 1 мая 2025 г.).

8. Сушко, О. П. Моделирование авиапассажирских перевозок России / О. П. Сушко // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20, № 6(103). – С. 64-71. – DOI 10.30932/1992-3252-2022-20-6-7. – EDN DKRGHV.

9. Степаненко, Е. В. Бизнес-процессы авиакомпании и аэропорта: общность и различия / Е. В. Степаненко, М. А. Шевердин, Р. Р. Низаметдинов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2020. – № 33. – С. 69-77. – EDN LNCAEW.

10. Сушко, О. П. Стратегирование деятельности авиакомпании / О. П. Сушко // Мир транспорта. – 2024. – Т. 22, № 4(113). – С. 84-93. – DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-4-11. – EDN EIINNB.

11. Фридлянд, А. А. Прогнозы развития структуры и состава самолётного парка и пассажирских перевозок по сети авиалиний отечественной гражданской авиации / А. А. Фридлянд, Р. Р. Низаметдинов, В. П. Горбунов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2024. – № 48. – С. 115-125. – EDN ORRPQJ.

References

1. Gorshkova, I. V. Economic Factors and Patterns of Development of Large Technical Systems (on the Example of Air Transport Systems) / I. V. Gorshkova, V. V. Klochkov, and A. L. Rusanova // Management of Large-Scale System Development MLSD'2012 : Proceedings of the Sixth International Conference, Moscow, October 1–3, 2012. Volume 2. – Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2012. – Pp. 167-169. – EDN WKMLBD.

2. Shapkin, V. S. Development of Air Transport Systems: Global Trends and Russian Prospects / V. S. Shapkin // International Congress on Aeronautics : Collection of Abstracts, Moscow, December 04–05, 2023. – Moscow: Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky, 2023. – Pp. 676-677. – EDN SRZXBH.\

3. Okhapkin, A. A. Analysis of the Effectiveness and Justification of Priorities for the Development of Technologies for Individual Monitoring and Forecasting of the State of Elements of Air Transport Systems / A. A. Okhapkin // Technological Development of the Aircraft Industry: Global Trends and National Interests of Russia: Proceedings of the Second Scientific and Practical Conference, Moscow, November 10, 2022. – Moscow: Nizhny Novgorod Institute named after N. E. Zhukovsky, 2023. – Pp. 217-226. – EDN YHGDRU.

4. Gorshkova, I. V. Planning the Development of Air Transport Systems in Remote, Hard-to-Access, and Sparsely Populated Regions Using Local Fuel Resources / I. V. Gorshkova, T. I. Popova // Management of Large-Scale System Development (MLSD'2011) : Proceedings of the Fifth International Conference, Moscow, October 3–5, 2011 / Edited by S. N. Vasilyev and A. D. Tsvirkun. Volume 2. – Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2011. – Pp. 38-40. – EDN WHSRUZ.

5. Uryupin, I. V. Methodology for Assessing the Quality of the Passenger Air Transport System of the Russian Federation / I. V. Uryupin, A. A. Sukharev, and A. O. Vlasenko // Information Technologies and Computing Systems. – 2023. – No. 3. – Pp. 79-92. – DOI 10.14357/20718632230309. – EDN SBYSPM.

6. Fridlyand, A. A. Analysis of the Population's Aviation Mobility and Its Differentiation by Regions of the Russian Federation / A. A. Fridlyand, A. P. Chubukov, and R. R. Nizametdinov // Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. – 2022. – No. 40. – Pp. 100-110. – EDN RVTTFA.

7. Order of the Government of the Russian Federation Order of the Government of the Russian Federation No. 3363-r dated November 27, 2021. - [URL]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (accessed on May 1, 2025).

8. Sushko, O. P. Modeling of Air Passenger Transportation in Russia / O. P. Sushko // World of Transport. – 2022. – Vol. 20, No. 6(103). – Pp. 64-71. – DOI 10.30932/1992-3252-2022-20-6-7. – EDN DKRGHV.

9. Stepanenko, E. V. Business processes of an airline and an airport: commonality and differences / E. V. Stepanenko, M. A. Sheverdin, R. R. Nizametdinov // Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. – 2020. – No. 33. – Pp. 69-77. – EDN LNCAEW.

10. Sushko, O. P. Strategizing the activities of an airline / O. P. Sushko // World of Transport. – 2024. – Vol. 22, No. 4(113). – Pp. 84-93. – DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-4-11. – EDN EIINNB.

11. Fridlyand, A. A. Forecasts of the Development of the Structure and Composition of the Aircraft Fleet and Passenger Transportation on the Domestic Civil Aviation Network / A. A. Fridlyand, R. R. Nizametdinov, and V. P. Gorbunov // Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. – 2024. – No. 48. – Pp. 115-125. – EDN ORRPQJ.

Stepanenko A.S., Safonova A.V.

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF RUSSIA'S REGIONAL AIR TRANSPORT SYSTEMS

Abstract. *This article presents a systemic and structural study of Russia's national air transport system (ATS). It analyzes the distribution of airports within the country's core network across federal districts and identifies the specific characteristics of each federal district in terms of the placement of air transport enterprises. The distribution of air passenger traffic volumes across federal districts and the structure of this distribution are examined using the Far Eastern and North Caucasus Federal Districts as examples. Conclusions are drawn regarding the performance of regional ATSs, identifying criteria for their development and growth potential. The structure of a regional air transport system is built around one or more key airports (federal airports with sufficient capacity and stable average annual passenger traffic), provided that there is demand for its services from the carrier. The structure of regional air transport system performance indicators, as well as criteria for assessing the impact of performance factors on the enterprises integrated into the system, is modeled. The study's results indicate an uneven distribution of enterprise capacity across the country, as well as an uneven distribution of growth potential for regional air transport systems, allowing for the proposal of key options for a state strategy for their development, such as the uniform distribution of system capacity across federal districts and the option of distributing capacity with an emphasis on leading regional air transport hubs.*

Keywords: *passenger traffic distribution, air transport systems, regional air transport systems, airports, and airlines.*

Сведения об авторах:

Степаненко Анастасия Сергеевна
Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)
г. Москва, Российская Федерация
доцент кафедры «Организация перевозок на воздушном транспорте», к.т.н.
e-mail: xumeraass@mail.ru

Сафонова Александра Викторовна
Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)
г. Москва, Российская Федерация

Аспирант 2-го года обучения кафедры «Организация перевозок на воздушном транспорте»
e-mail: safonovaa97@gmail.com

Information about the authors:

Stepanenko Anastasia Sergeevna
Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA), Moscow, Russia
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Organization of Air Transportation
e-mail: xumeraass@mail.ru
Safonova Alexandra Victorovna
Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA), Moscow, Russia
2nd year of study postgraduate student at the Department of Organization of Air Transportation
e-mail: safonovaa97@gmail.com

УДК 656.13

Цзян Ц., Феофилова А.А.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ДОРОГАХ С РАЗЛИЧНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Аннотация. *В работе проведен сравнительный анализ эффективности моделей прогнозирования транспортных потоков на дорогах с различной пропускной способностью. Исследуемые модели включают CNN-LSTM, SVM-LSTM, LSSVM и CNN-GRU. С использованием реальных данных детекторов транспорта, полученных в Париже и Турине, исследована эффективность моделей в условиях высокой, средней и низкой интенсивности движения. Экспериментальные результаты показывают, что эффективность моделей существенно зависит от пропускной способности дороги. Результаты показывают, что на дорогах с высокой пропускной способностью CNN-GRU дает наименьшую ошибку. На дорогах со средней пропускной способностью CNN-LSTM и SVM-LSTM наиболее эффективны. На дорогах с низкой пропускной способностью SVM-LSTM сохраняет стабильность в условиях разреженных данных. Эти результаты обеспечивают теоретическую основу для повышения точности прогнозирования транспортного потока в реальном времени в интеллектуальных транспортных системах (ИТС) в различных условиях эксплуатации.*

Ключевые слова: *прогнозирование характеристик транспортного потока, пропускная способность дорог, глубокое обучение, модели нейронных сетей, интеллектуальная транспортная система*

Постановка задачи

Модели глубокого обучения продемонстрировали превосходные результаты в задачах прогнозирования транспортного потока [1-3]. Однако существующие исследования, как правило, сосредоточены на улучшении структуры модели, уделяя меньше внимания влиянию пропускной способности дорог на точность прогнозирования [4]. В реальных дорожных сетях дороги с высокой пропускной способностью испытывают высокий и стабильный транспортный поток. Однако на дорогах с низкой пропускной способностью могут наблюдаться колебания транспортного потока, приводящие к заторам [5-6]. Это различие может привести к значительным расхождениям в производительности в прогнозировании изменения характеристик транспортных потоков одной и той же модели нейронной сети на разных типах дорог. Однако в настоящее время отсутствуют исследования, посвященные данной проблеме. Кроме того, точность прогнозирования характеристик транспортного потока определяет эффективность управления дорожным движением в сценариях интеллектуальной транспортной системы. Поэтому необходим сравнительный анализ моделей и методов глубокого обучения, ориентированный не только на архитектурные особенности модели, но и на чувствительность модели к пропускной способности дороги.

Анализ последних исследований

Исследования в области современного прогнозирования транспортных потоков характеризуются активной разработкой и применением гибридных архитектур глубокого обучения. Topilin и др. [7] предложили гибридную архитектуру CPO-CNN-LSTM с механизмом внимания, которая продемонстрировала высокую эффективность на сложных временных рядах. Rajha и др. [8] исследовали влияние пространственных

характеристик городской среды на точность прогнозирования. Xu [11] доказал преимущества сочетания вейвлет-преобразования с CNN-LSTM и SVM. Wang и др. [12] учли влияние погодных факторов в оптимизированной модели нейронной сети. Fan и др. [13] представили всесторонний обзор последних тенденций применения графовых нейронных сетей. Jiang и др. [14] разработали модель VMD-LSSVM с взвешиванием по вниманию для эффективного краткосрочного прогнозирования. Несмотря на значительный прогресс в разработке этих моделей нейронных сетей, большинство исследований сосредоточены на поиске архитектур или оптимизации существующих методов, без учета специфики дорожных условий. Взаимосвязь между производительностью модели и пропускной способностью дорог остается недостаточно изученной. Таким образом, данная статья призвана восполнить этот пробел путем сравнительного анализа моделей CNN-LSTM, SVM-LSTM, LSSVM и CNN-GRU на дорогах с высокой, средней и низкой пропускной способностью.

Цель работы

Целью настоящего исследования является проведение систематического сравнительного анализа эффективности гибридных моделей глубокого обучения (CNN-LSTM, SVM-LSTM, LSSVM и CNN-GRU) при прогнозировании транспортных потоков на дорогах с различной пропускной способностью, а также выявление закономерностей, определяющих применимость каждой модели в зависимости от характеристик дорожной инфраструктуры.

Основная часть

На рисунке 1 показана схема модели прогнозирования, необходимая для эксперимента. Модель CNN-LSTM объединяет сверточные слои для локального извлечения признаков и слои LSTM для моделирования долгосрочных временных зависимостей. Модель SVM-LSTM использует LSTM в качестве экстрактора признаков и выполняет окончательную регрессию на извлеченных векторах. LSSVM упрощает задачу оптимизации до решения системы линейных уравнений для повышения вычислительной эффективности. Модель CNN-GRU аналогична CNN-LSTM, но использует управляющий рекуррентный блок вместо LSTM, что уменьшает количество параметров и ускоряет обучение.

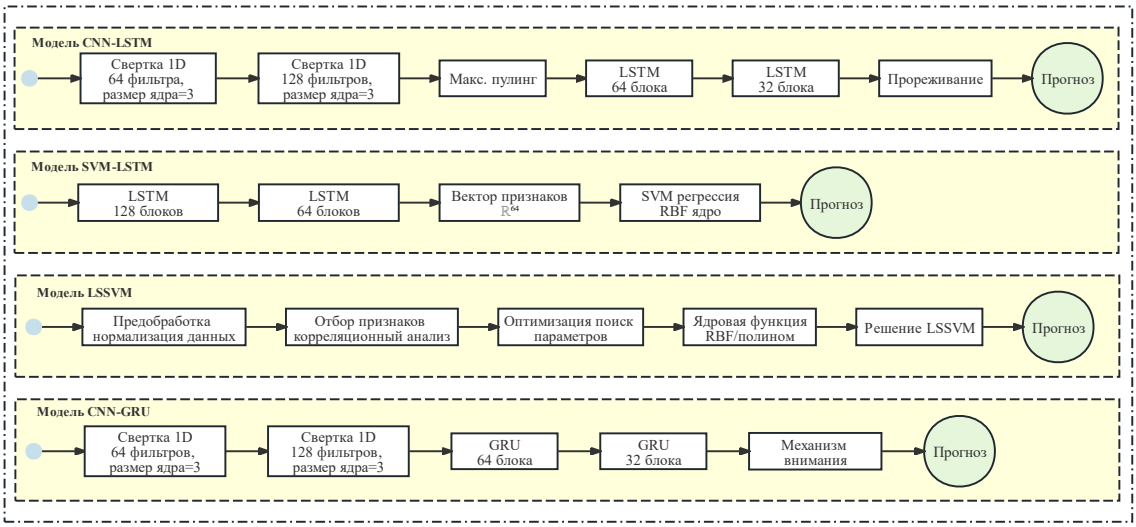


Рис. 1. Блок-схема модели прогнозирования, необходимой для эксперимента

Формула для моделирования извлечения сверточных признаков в модели CNN-LSTM выглядит следующим образом:

$$H_{CNN} = \mathrm{ReLU}(W_{CNN} * X + b_{CNN}), \quad (1)$$

где H_{CNN} – выход сверточного слоя;

ReLU – функция активации ReLU;

W_{CNN} – веса сверточного ядра, используемые для локального извлечения шаблонов;

X –исходные данные о транспортном потоке;

b_{CNN} – смещение сверточных слоев.

Операция обновления состояния ячейки LSTM представлена следующим образом:

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t, \quad (2)$$

где C_t – состояние ячейки в момент t;

f_t – выход вентиля забывания;

C_{t-1} – состояние ячейки в предыдущий момент;

i_t – выход входного вентиля;

$\odot$ – поэлементное умножение;

$\tilde{C}_t$ – новая информация, добавленная входным вентилем.

После извлечения сверточных признаков и обновления состояния блока LSTM, CNN-LSTM выдает результат прогнозирования. Процесс вывода представлен следующим образом:

$$\hat{y}_t = W_y \cdot h_t + b_y, \quad (3)$$

где $\hat{y}_t$ – прогнозируемое значение в момент t;

W_y – матрица весов выходного слоя;

h_t – выходное состояние скрытого слоя LSTM;

b_y – смещение выходного слоя.

Формула моделирования для извлечения признаков LSTM в модели SVM-LSTM выглядит следующим образом:

$$H_{LSTM} = \mathrm{LSTM}(x_t, h_{t-1}), \quad (4)$$

где x_t – входные данные в момент времени t;

h_{t-1} – скрытое состояние предыдущего момента.

Модель регрессии с использованием SVM представлена следующим образом:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} K(h_i, h) + b, \quad (5)$$

где n – количество обучающих выборок;

$K(h_i, h)$ – ядровая функция;

h_i – характеристики i-й обучающей выборки;

h – текущий входной образец;

b – смещение.

Для того чтобы SVM-LSTM мог находить нелинейные зависимости в транспортном потоке, необходимо ядро RBF, отображающее входные признаки в бесконечномерное пространство. Формула моделирования функции ядра RBF выглядит следующим образом:

$$\mathrm{RBF} = \min \frac{1}{2}\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{n} \xi_i, \quad (6)$$

где $\|w\|^2$ – квадрат нормы вектора весов;

C – параметр регуляризации;

ξ_i – неизбыточные переменные.

Чтобы гарантировать, что отклонение прогнозируемых значений от фактических не превышает ε, на модель накладываются следующие ограничения:

$$y_t - w^T \varphi(h_i) - b \le \varepsilon + \xi_i, \quad (7)$$

где y_t – фактическое значение в момент времени t;

w^T – транспонированный вектор весов;

φ – параметры отображения.

Суть модели LSSVM заключается в проецировании линейно неразделимых данных из низкоразмерного пространства в высокоразмерное пространство признаков посредством нелинейного преобразования. Процесс отображения с помощью ядерной функции показан ниже:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\tau^2}\right), \quad (8)$$

где x_i – вектор признаков i-го обучающего образца;

x_j – вектор признаков j-го обучающего образца;

τ – параметр ширины ядра LSSVM.

Для обеспечения стабильности модели LSSVM при подгонке данных и снижении вычислительной сложности мы вводим функцию оптимизации, формула которой выглядит следующим образом:

$$\min_J = \frac{1}{2}\|w\|^2 + \frac{\gamma}{2}\sum_{i=1}^{n} e_i^2, \quad (9)$$

где γ – параметры для балансировки сложности модели;

e_i – ошибка прогнозирования i-го образца.

Выходным инструментом модели LSSVM является функция прогнозирования, которая использует характеристики транспортного потока, полученные на этапе обучения, для прогнозирования новых образцов. Ее формула выглядит следующим образом:

$$\hat{y}_{(x)} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i K(x_i, x) + b, \quad (10)$$

где $\hat{y}_{(x)}$ – прогнозируемое значение, выдаваемое LSSVM;

α_i – вес ядра i-го образца;

$K(x_i, x)$ – значение ядерной функции между новым образцом и i-м образцом.

Вычисления стробирующего механизма составляют основу модели CNN-GRU. Этот механизм выполняет функцию динамического контроля над потоком и обновлением информации в временной последовательности, и его формула представлена ниже:

$$z_t = \sigma\left(W_z \cdot [h_{t-1}, H_{CNN}] + b_z\right), \quad (11)$$

$$r_t = \sigma\left(W_r \cdot [h_{t-1}, H_{CNN}] + b_r\right), \quad (12)$$

где z_t – вентиль обновления;

σ – сигмоидная функция активации;

W_z – матрица весов вентиля обновления;

b_z – смещение вентиля обновления;

r_t – вентиль сброса;

W_r – матрица весов вентиля сброса;

b_r – смещение вентиля сброса.

Скрытое состояние нового образца (кандидата) H является ключевым звеном в процессе генерации новой информации в модели CNN-GRU, и его формула выглядит следующим образом:

$$H = \tanh\left(W_H \cdot \left[r_t \odot h_{t-1}, H_{CNN}\right] - b_H\right), \quad (13)$$

где $\tanh$ – функция активации;

W_H – матрица весов для состояния кандидата;

b_H – смещение для состояния кандидата.

Обновление скрытого состояния и прогнозирование на выходе являются заключительным этапом работы модели CNN-GRU. Их роль заключается в динамическом слиянии исторической и новой информации для формирования прогноза. Соответствующая формула имеет следующий вид:

$$\hat{y}_t = W_y \cdot \left(\left(1 - z_t\right) \odot h_{t-1} + z_t \odot H\right) + b_y, \quad (14)$$

где W_y – матрица весов выходного слоя;

b_y – смещение выходного слоя.

По завершении построения моделей CNN-LSTM, SVM-LSTM, LSSVM и CNN-GRU были выполнены эксперименты по прогнозированию на реальных данных о характеристиках транспортного потока. В настоящем исследовании в качестве эмпирической базы использован открытый набор данных UTD19 [15]. Выбор зарубежных локаций обусловлен тем, что данный набор предоставляет детекторные данные достаточного объема, детализации и качества для проведения воспроизводимого сравнительного анализа моделей прогнозирования. В российских условиях на момент проведения исследования аналогичный по объему, структуре и степени открытости массив данных о транспортных потоках, пригодный для решения поставленной задачи, в открытом доступе отсутствовал. Дополнительным основанием выбора UTD19 стало то, что он содержит участки дорог с различной пропускной способностью, что позволяет корректно сопоставить эффективность моделей в условиях высокой, средней и низкой интенсивности движения. Это позволило исследовать корреляцию между свойствами дорог и эффективностью моделей. Характеристики дорог приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Сравнение характеристик дорог

Уровень дороги	Пропускная способность	Выбранные участки
Высокая	>2000 авт./час/полоса	Скоростные автомагистрали, шоссе
Средняя	1000-2000 авт./час/полоса	Городские магистрали
Низкая	<1000 авт./час/полоса	Второстепенные улицы, местные проезды

Выбор данных о транспортном потоке:

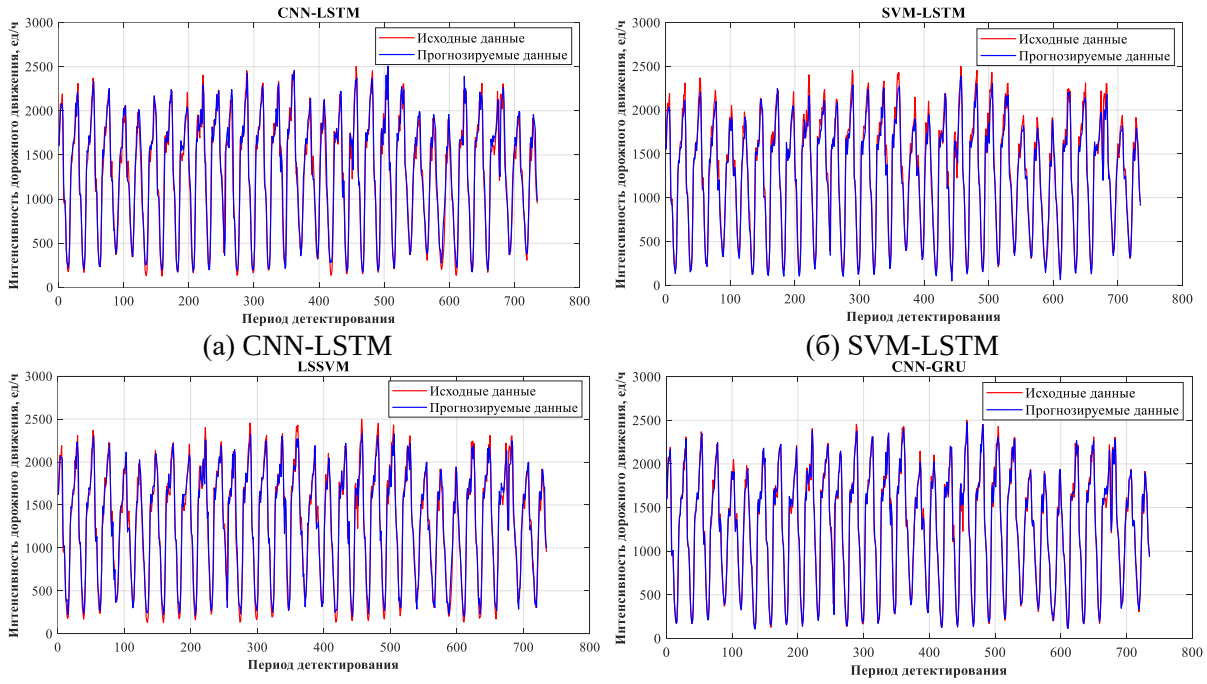
• Для эксперимента на дороге с высокой пропускной способностью были выбраны данные, которые регистрировались ежечасно, собранные детектором № 15 в Париже за март 2016 года. При этом значительная часть значений превышала 2000 автомобилей в час. Выборка является репрезентативной: она хорошо сглажена и наглядно фиксирует смену дневной и ночной интенсивности. Это делает её пригодной для проверки того,

насколько точно модели прогнозирования характеристик транспортного потока могут улавливать долгосрочные временные закономерности.

• Набор данных для дорог со средней пропускной способностью был получен на городских дорогах Парижа на основе записей детектора № 18 за март 2016 года с периодом регистрации в один час. Данный набор данных отражает характеристики транспортного потока на магистральных улицах города: интенсивность движения характеризуется умеренными колебаниями, обычно в пределах 1000-2000 автомобилей в час, и четко демонстрирует плавные переходы в межпиковые периоды. По сравнению с автомагистралями, городские дороги подвержены влиянию таких факторов, как светофоры и пересечения транспортных потоков, это придает данным определенную нерегулярность.

• Набор данных для дорог с низкой пропускной способностью включает данные о транспортном потоке с интервалом детектирования 5 минут. Характеристики транспортных потоков зафиксированы детектором № 2263 на второстепенной дороге в Турине 27 сентября 2016 года. Этот набор данных отличается значительной разреженностью и высокой степенью случайности. Это делает его пригодным для оценки устойчивости моделей прогнозирования характеристик транспортного потока к шумам и их способности к обобщению при работе с разреженными данными.

Подготовка входных данных в настоящем исследовании выполнялась в одномерной постановке по составу признаков. В качестве исходного параметра использовалась только интенсивность дорожного движения, зафиксированная соответствующим детектором. Параметры скорости потока, плотности движения, погодных условий и иные внешние факторы в данной работе не включались, что позволило изолированно оценить влияние пропускной способности дороги на точность прогнозирования. Эксперименты по прогнозированию характеристик транспортного потока на дорогах с высокой пропускной способностью проводились в среде MATLAB на основе данных детектора № 15. В эксперименте использовался метод скользящего окна для построения выборок с длиной входного окна 24 и шагом прогнозирования 6. Результаты прогнозирования четырех моделей показаны на рисунке 2.



(а) CNN-LSTM (б) SVM-LSTM

(в) LSSVM (г) CNN-GRU

Рис. 2. Результаты прогнозирования различных моделей

Как показано на Рисунке 2, модель CNN-GRU продемонстрировала наилучшую аппроксимацию прогнозных результатов, за ней следует CNN-LSTM, в то время как модель LSSVM показала наихудшие результаты. Данный результат тесно связан с архитектурными особенностями различных моделей. Хотя CNN-LSTM обладает мощными возможностями моделирования временных рядов, относительно сложная структура LSTM не дает ей явных преимуществ при работе со стационарными данными, из-за чего она незначительно уступает модели CNN-GRU. В свою очередь, LSSVM на масштабных стационарных данных не может конкурировать с глубинными моделями в способности извлекать глубинные признаки, что и обусловливает наибольшую ошибку прогнозирования.

Для проверки адаптивности моделей к различным транспортным сценариям в эксперименте была проведена валидация с использованием данных о транспортном потоке, полученных с двух оставшихся детекторов [16, 17]. С целью более наглядного сравнения эффективности каждой модели оценка прогнозных результатов производилась с помощью двух показателей: среднеквадратической ошибки (RMSE) и средней абсолютной процентной ошибки (MAPE). Результаты оценки представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Сравнение результатов оценочных индексов

Номер детектора	Тип модели	RMSE	MAPE
№ 15	CNN-LSTM	40,9035	42,2700
	SVM-LSTM	48,6211	48,5035
	LSSVM	72,3710	68,3001
	CNN-GRU	32,1703	35,3824
№ 18	CNN-LSTM	34,9527	32,7037
	SVM-LSTM	34,0230	31,2251
	LSSVM	45,0788	45,9230
	CNN-GRU	39,5122	36,8755
№ 2263	CNN-LSTM	54,3715	55,4728
	SVM-LSTM	37,7230	35,2719
	LSSVM	69,5018	65,1782
	CNN-GRU	40,2008	39,5037

Из таблицы 2 видно, что на дорогах с высокой пропускной способностью модель CNN-GRU демонстрирует наилучшие значения RMSE и MAPE. Это подтверждает её высокую способность к аппроксимации стационарных периодических данных. На дорогах со средней пропускной способностью модели CNN-LSTM и SVM-LSTM показывают близкие результаты и превосходят другие модели, что свидетельствует об их хорошей робастности при нестационарных колебаниях. На дорогах с низкой пропускной способностью модель SVM-LSTM имеет наименьшую ошибку, что отражает её преимущество в обобщении при работе с разреженными данными.

Выводы

В данном исследовании проведён сравнительный анализ четырёх моделей машинного обучения с целью оценки их эффективности на дорогах с различной пропускной способностью. В ходе исследования установлено, что на дорогах с высокой пропускной способностью модель CNN-GRU демонстрирует наилучшую точность прогнозирования. На дорогах со средней пропускной способностью модели CNN-LSTM и SVM-LSTM проявляют высокую адаптивность. На дорогах с низкой пропускной способностью модель SVM-LSTM показывает наилучшую устойчивость. Полученные результаты подтверждают, что при выборе оптимальной модели прогнозирования необходимо учитывать не только её архитектурные преимущества, но и степень её адаптации к конкретным дорожным условиям.

Однако в данном исследовании рассматривались только четыре модели машинного обучения, что не охватывает всё множество существующих моделей. Кроме того, в экспериментах не учитывалось влияние внешних факторов, таких как погодные условия и дорожно-транспортные происшествия, на точность прогнозирования. Поэтому в будущих исследованиях планируется интегрировать другие факторы, влияющие на транспортные потоки, в различные прогнозные модели. Помимо этого, мы планируем разработать адаптивные гибридные модели на основе алгоритмов оптимизации, что позволит повысить точность прогнозирования в условиях нестационарности транспортных потоков.

Список литературы

1. Пугачев Игорь Николаевич, Тормозов Владимир Сергеевич, Евтюков Станислав Сергеевич, Смокталь Николай Николаевич, & Золкин Александр Леонидович (2025). Многовидовая пространственно-временная свертка для повышения точности прогнозирования транспортных потоков. *T-Comm - Телекоммуникации и Транспорт*, *19*(2), 31-37. doi: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-31-37

2. Загидуллин Рамиль Равильевич, & Хайбуллин Алмаз Наилевич (2025). Прогнозирование транспортной загруженности с использованием методов машинного обучения. *International Journal of Advanced Studies*, *15*(2), 202-216. doi: 10.12731/2227-930X-2025-15-2-347

3. Цзян, Ц. Прогнозирование транспортных потоков на основе гибридной модели SVM-LSTM / Ц. Цзян, А. А. Феофилова // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2025. – № 2-4(89). – С. 127-135. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-2-4(89)-127-135. – EDN ASAMZM.

4. Jiang, J. (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

5. Журюкин А.С., & Муктепавел С.В. (2025). Прогнозирование пассажиропотока на железнодорожном транспорте с применением машинного обучения. Вестник науки, *3*(4 (85)), 751-761. doi: 10.24412/2712-8849-2025-485-751-761

6. Chen, J., Ye, H., Ying, Z., Sun, Y., & Xu, W. (2025). Dynamic trend fusion module for traffic flow prediction. *Applied Soft Computing*, *174*, Article 112979. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112979

7. 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

8. Rajha, R., Shiode, S., & Shiode, N. (2025). Improving Traffic-Flow Prediction Using Proximity to Urban Features and Public Space. *Sustainability*, *17*(1), 68. https://doi.org/10.3390/su17010068

9. Wang, J., Gao, Y., Qin, L., & Li, Y. (2025). Logistic-Gauss circle optimizer: Theory and applications. *Applied Mathematical Modelling*, *143*, Article 116052. https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.116052

10. Guan, D., Ren, N., Wang, K., & Meng, W. (2024). Checkpoint data-driven GCN-GRU vehicle trajectory and traffic flow prediction. *Scientific Reports*, *14*, Article 30409. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80563-3

11. Xu, Q. Incorporating CNN-LSTM and SVM with wavelet transform methods for tourist passenger flow prediction. *Soft Comput 28*, 2719–2736 (2024). https://doi.org/10.1007/s00500-023-09592-w

12. Wang, C., Huang, S., & Zhang, C. (2025). Short-Term Traffic Flow Prediction Considering Weather Factors Based on Optimized Deep Learning Neural Networks: Bo-GRA-CNN-BiLSTM. *Sustainability*, *17*(6), 2576. https://doi.org/10.3390/su17062576

13. Fan, G., Sabri, A. Q. M., Rahman, S. S. A., et al. (2025). Emerging trends in graph neural networks for traffic flow prediction: A survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *32*, 4811–4855. https://doi.org/10.1007/s11831-025-10286-9

14. Jiang, J., Feofilova, A., Topilin, I., & Liu, C. (2026). A novel attention-weighted VMD-LSSVM model for high-accuracy short-term traffic prediction. *IET Intelligent Transport Systems*, *20*(1), Article e70144. https://doi.org/10.1049/itr2.70144

15. UTD19 dataset [Экспериментальные данные], UTD19. URL: https://utd19.ethz.ch/index.html.

16. Liu, Z., Li, X., Lu, Z., & Meng, X. (2025). IWOA-RNN: An improved whale optimization algorithm with recurrent neural networks for traffic flow prediction. *Alexandria Engineering Journal*, *117*, 563–576. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.074

17. Topilin I.V., Han M., Feofilova A.A., Beskopylny N.A. (2025) Comparative Analysis of Neural Network and Machine Learning Models for Short-Term Traffic Flow Prediction on Shenzhen Expressway. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2025;25(4):350-362. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2215.

References

1. Pugachev, I. N., Tormozov, V. S., Evtyukov, S. S., Smoktal, N. N., & Zolkin, A. L. (2025). Multi-type spatiotemporal convolution for improving the accuracy of traffic flow forecasting. *T-Comm*, *19*(2), 31-37. https://doi.org/10.36724/2072-8735-2025-19-2-31-37

2. Zagidullin, R. R., & Khaibullin, A. N. (2025). Forecasting 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

3. Jiang, J., & Feofilova, A. A. (2025). Traffic flow forecasting based on a hybrid SVM-LSTM model. *World of Transport and Technological Machines*, 2-4(89), 127-135. https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-4(89)-127-135

4. Jiang, J. (2025). A study on the effectiveness of various neural network models for traffic flow prediction. *Transportation and Information Technologies in Russia*, *15*(4), 181-200. https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-382

5. Zhuryukin, A. S., & Muktepavel, S. V. (2025). Forecasting passenger traffic in railway transport using machine learning. *Bulletin of Science*, *3*(4(85)), 751-761. https://doi.org/10.24412/2712-8849-2025-485-751-761

6. Chen, J., Ye, H., Ying, Z., Sun, Y., & Xu, W. (2025). Dynamic trend fusion module for traffic flow prediction. *Applied Soft Computing*, *174*, Article 112979. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112979

7. 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

8. Rajha, R., Shiode, S., & Shiode, N. (2025). Improving Traffic-Flow Prediction Using Proximity to Urban Features and Public Space. *Sustainability*, *17*(1), 68. https://doi.org/10.3390/su17010068

9. Wang, J., Gao, Y., Qin, L., & Li, Y. (2025). Logistic-Gauss circle optimizer: Theory and applications. *Applied Mathematical Modelling*, *143*, Article 116052. https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.116052

10. Guan, D., Ren, N., Wang, K., & Meng, W. (2024). Checkpoint data-driven GCN-GRU vehicle trajectory and traffic flow prediction. *Scientific Reports*, *14*, Article 30409. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80563-3

11. Xu, Q. Incorporating CNN-LSTM and SVM with wavelet transform methods for tourist passenger flow prediction. *Soft Comput 28*, 2719–2736 (2024). https://doi.org/10.1007/s00500-023-09592-w

12. Wang, C., Huang, S., & Zhang, C. (2025). Short-Term Traffic Flow Prediction Considering Weather Factors Based on Optimized Deep Learning Neural Networks: Bo-GRA-CNN-BiLSTM. *Sustainability*, *17*(6), 2576. https://doi.org/10.3390/su17062576

13. Fan, G., Sabri, A. Q. M., Rahman, S. S. A., et al. (2025). Emerging trends in graph neural networks for traffic flow prediction: A survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32, 4811–4855. https://doi.org/10.1007/s11831-025-10286-9

14. Jiang, J., Feofilova, A., Topilin, I., & Liu, C. (2026). A novel attention-weighted VMD-LSSVM model for high-accuracy short-term traffic prediction. *IET Intelligent Transport Systems*, *20*(1), Article e70144. https://doi.org/10.1049/itr2.70144

15. UTD19 dataset [Experimental data] / UTD19. URL: https://utd19.ethz.ch/index.html.

16. Liu, Z., Li, X., Lu, Z., & Meng, X. (2025). IWOA-RNN: An improved whale optimization algorithm with recurrent neural networks for traffic flow prediction. *Alexandria Engineering Journal*, *117*, 563–576. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.074

17. Topilin I.V., Han M., Feofilova A.A., Beskopylny N.A. (2025) Comparative Analysis of Neural Network and Machine Learning Models for Short-Term Traffic Flow Prediction on Shenzhen Expressway. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2025;25(4):350-362. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2215.

Jiang J., Feofilova A.A.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF TRAFFIC FLOW PREDICTION MODELS ON ROADS WITH DIFFERENT CAPACITY

Abstract*. This paper compares and analyzes the performance of traffic flow prediction models on roads with different capacities. The models studied include CNN-LSTM, SVM-LSTM, LSSVM, and CNN-GRU. Using real traffic detector data from Paris and Turin, the model performance was tested under three operating conditions: high, medium, and low traffic volume. Experimental results show that model performance is significantly dependent on road capacity. The results indicate that CNN-GRU has the smallest error on high-capacity roads; CNN-LSTM and SVM-LSTM are the most effective on medium-capacity roads; and SVM-LSTM maintains stability even with sparse data on low-capacity roads. These results provide a theoretical basis for improving the prediction accuracy of real-time traffic flow prediction modules in Intelligent Transportation Systems (ITS) under various operating conditions.*

Keywords*: traffic flow prediction, road capacity, deep learning, neural network models, intelligent transportation system*

Сведения об авторах:

Цзян Цзисяо
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
аспирант,
аспирант кафедры Организация перевозок и дорожного движения,
e-mail: 3396945068@qq.com

Феофилова Анастасия Александровна
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия,
Кандидат технических наук,
доцент кафедры Организация перевозок и дорожного движения,
e-mail: feofilowa@mail.ru

Information about the authors:

Jixiao Jiang
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,
Postgraduate Student,
Postgraduate Student, Department of Transportation and Road Traffic Management,
e-mail: 3396945068@qq.com

Feofilova Anastasia Alexandrovna
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,
PhD in Engineering,
Associate Professor, Department of Transportation and Road Traffic Management,
e-mail: feofilowa@mail.ru

УДК 656.2.076.5

Цепаев Р.Е., Гришкова Д.Ю.

МЕТОДОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРКОМ ТЕПЛОВОЗОВ НА ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. *В статье рассматривается проблема оптимизации управления тяговым подвижным составом на железнодорожных путях необщего пользования крупных металлургических комбинатов. Выявлено, что классические методики расчета потребного парка, основанные на среднесуточных объемах перевозок, не учитывают высокую волатильность производственной программы и вероятностный характер возникновения пиковых нагрузок. На основе анализа факторов экономической нестабильности и технических отказов оборудования построена диаграмма разброса, подтверждающая сильную корреляционную связь между количеством сбоев в работе цехов и временем ожидания транспортного обслуживания. Научная новизна заключается в выявлении количественной корреляции между отказами оборудования и временем ожидания ТПС (r=0,962, p<0,001), разработке математической постановки задачи стохастического диспетчирования и создании имитационной модели с «гибким маневровым ядром». Оригинальные результаты подтверждены внедрением на металлургическом комбинате: оборачиваемость вагонов снижена на 10%, потребный парк тепловозов — на 2 единицы, годовая экономия топлива — 107 тонн (7%).*

Ключевые слова: *пути необщего пользования, металлургический комбинат, тяговой подвижной состав, парк тепловозов, производственная программа, имитационное моделирование, оперативное управление, сценарное планирование, экономическая эффективность, математическая постановка.*

Постановка задачи

Железнодорожный транспорт металлургических комбинатов выступает «кровеносной системой», обеспечивающей непрерывность производства. Ключевые функции и особенности такой системы включают: жесткую синхронизацию с технологическим циклом, работу со специфическими высокотемпературными грузами, высокие нагрузки на инфраструктуру, а также интеграцию диспетчеризации в общую систему управления предприятием.

В современных рыночных условиях потребность в тяговых ресурсах подвержена значительным колебаниям под влиянием макро- и микроэкономических факторов. Классические методики расчета потребного парка тепловозов, основанные на среднесуточных объемах перевозок и нормативных коэффициентах использования, не позволяют адекватно реагировать на часовые пиковые нагрузки, возникающие вследствие сбоев в производственном цикле или изменений логистических цепочек. Это приводит к росту времени ожидания транспортного обслуживания, увеличению простоев вагонов и неоправданному содержанию избыточного парка локомотивов.

Таким образом, задача исследования заключается в разработке методологии оперативного управления парком тепловозов на путях необщего пользования металлургических предприятий, учитывающей стохастический характер производственных процессов и позволяющей обеспечить заданный уровень ритмичности перевозок при минимальных эксплуатационных затратах.

Анализ последних исследований

Проблемам оптимизации парка тягового подвижного состава на промышленном транспорте посвящены работы ряда авторов. В трудах Ефимова А.В. и Горелова А.С. [1] рассмотрены особенности эксплуатации тепловозов в условиях металлургических комбинатов, однако предлагаемые подходы базируются на усредненных показателях и не учитывают высокую стохастичность производственных программ. Ковалев В.И. и Щелоков И.Д. [2] предложили методы управления парком локомотивов при неравномерности грузопотоков, но их решения ориентированы преимущественно на магистральный транспорт.

Значительный вклад в развитие методов имитационного моделирования для промышленного транспорта внесли Козлов А.С. и Михайлов Е.В. [3], а также Иванов А.В. и Петров С.К. [7]. В их работах показана эффективность цифровых двойников для оценки пропускной способности путей и оптимизации числа локомотивов, однако вопросы интеграции имитационных моделей в системы оперативного диспетчерского управления остаются актуальными.

Смирнова Е.Л. [8] и Редькин А.Г. [13] предложили использовать методы целочисленного программирования и генетические алгоритмы для календарного планирования маневровой работы. Эти подходы обеспечивают высокую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и сложны для оперативного применения в реальном времени.

Вопросы цифровизации и внедрения автоматизированных систем управления (АСУ) на промышленном транспорте рассмотрены в работах Григорьева М.Н. [4] и Козлова Д.А. [9]. Однако предлагаемые решения часто ориентированы на учетные функции, а не на активное управление парком в условиях пиковых нагрузок.

Несмотря на значительное количество научных работ, комплексная методология, объединяющая математическую постановку, имитационное моделирование, сценарное планирование, интеллектуальные алгоритмы диспетчеризации и организационные меры применительно к путям необщего пользования металлургических предприятий, отсутствует.

Научная новизна и оригинальные результаты исследования

В отличие от известных работ [1–4, 7–9, 13], в которых предлагаются либо детерминированные методы расчёта парка тепловозов на основе усреднённых показателей, либо имитационные модели без интеграции в оперативное управление, в настоящей статье впервые:

1. Выявлена и количественно оценена корреляционная связь между количеством отказов технологического оборудования и временем ожидания транспортного обслуживания на путях необщего пользования металлургического комбината ($r=0{,}962$, $p<0{,}001$) на основе анализа эксплуатационных данных.

2. Разработана математическая постановка задачи оперативного управления парком тепловозов как задачи стохастического динамического диспетчирования с приоритетами, учитывающая ограничения по времени ожидания для высокотемпературных грузов и вероятностный характер поступления заявок.

3. Предложена блок-схема имитационной модели, интегрирующей сценарное планирование, алгоритмы диспетчеризации и прогнозную диагностику локомотивов, что позволяет в отличие от аналогов [3, 7] не только оптимизировать потребный парк, но и управлять им в реальном времени.

4. Сформулирован принцип «гибкого маневрового ядра» (20–30% универсальных тепловозов), позволяющий оперативно перераспределять тяговые ресурсы между участками при пиковых нагрузках без содержания избыточного парка.

5. В условиях действующего предприятия подтверждена эффективность предложенной методологии: сокращение времени оборота вагона на 10%, снижение потребного парка на 2 единицы, уменьшение расхода топлива на 7%, что подтверждено расчётом экономического эффекта.

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка и обоснование методологии оперативного управления парком тепловозов на путях необщего пользования металлургических комбинатов, позволяющей минимизировать время ожидания транспортного обслуживания и снизить потребный парк локомотивов за счет учета факторов экономической нестабильности, технических отказов и внедрения гибких механизмов планирования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Выявление и количественная оценка факторов, влияющих на неравномерность потребности в тяговом подвижном составе.

2. Анализ корреляционных связей между отказами оборудования и ростом времени ожидания транспортных средств.

3. Обобщение и систематизация методов оперативного управления парком тепловозов.

4. Формирование комплексной методологии, интегрирующей детерминированные, стохастические и организационные подходы.

5. Апробация предложенной методологии на примере промышленного предприятия с расчётом экономической эффективности.

Математическая постановка задачи

Пусть на железнодорожных путях необщего пользования металлургического комбината имеется парк тепловозов $L=\{L_1,L_2,...,L_m\}$. В дискретные моменты времени $t \in T=\{1,2,...,\tau\}$ (с шагом 15–30 минут) поступает множество заявок на транспортное обслуживание $Z(t)=\{Z_1,Z_2,...,Z_{k(t)}\}$. Каждая заявка Z_j характеризуется:

- ✓ типом операции $oj \in O$ (подача сырья, уборка шлака, перестановка составов и т.д.);
- ✓ требуемым временем выполнения δ_j;
- ✓ допустимым временем ожидания w_j^{max};
- ✓ приоритетом p_j (например, для высокотемпературных грузов);
- ✓ местом возникновения (цех, склад, станция).

Состояние тепловоза L_i в момент времени t описывается вектором:

$$S_i(t)=\{loc_i(t), status_i(t), task_i(t), fuel_i(t)\},$$

где $loc_i(t)$ – местоположение,

$status_i(t) \in$ {свободен, занят, ремонт},

$task_i(t)$ – текущее задание,

$fuel_i(t)$ – остаток топлива.

Целевая функция (минимизация суммарных потерь):

$$F = \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{J=1}^{k(t)} \left(c_w \cdot \max\left(0, w_j(t) - w_j^{\max}\right) + c_{idle} \cdot idie(t) + c_{fuel} \cdot \Delta fuel(t) \right),$$

где $w_j(t)$ — фактическое время ожидания выполнения заявки Z_j;

$idle(t)$ — суммарное время холостого пробега всех тепловозов;

$\Delta fuel(t)$ — сверхнормативный расход топлива;

c_w, c_{idle}, c_{fuel} — весовые коэффициенты (стоимостные эквиваленты).

Ограничения задачи:

1. Баланс мощностей – в каждый момент времени количество занятых локомотивов не может превышать их общего исправного числа:

$$\sum_{i=1}^{m} 1\{statusi(t) = \text{занят}\} \leq m - mrepair(t).$$

2. Технологическая синхронизация – для операций с высокотемпературными грузами время ожидания не должно превышать технологически допустимого предела:

$$w_j(t) \leq w_j^{\max}, \ \forall_j \in Z_{hot}(t).$$

3. Ресурсные ограничения – локомотив не может выполнять более одной операции одновременно; между операциями требуется время на маневровые передвижения.

4. Стохастичность – моменты поступления заявок и продолжительность операций описываются вероятностными распределениями, оцениваемыми по историческим данным.

Задача относится к классу стохастического динамического диспетчирования с приоритетами. Ввиду высокой размерности и нестационарности входных потоков решение в реальном времени достигается методами имитационного моделирования и эвристических алгоритмов (генетические алгоритмы, жадные стратегии с прогнозом).

Блок-схема имитационной модели

Разработанная имитационная модель (AnyLogic / Tecnomatix Plant Simulation) реализует следующий алгоритм (рисунок 1):

1. Инициализация – загрузка профилей путей (длина участков, пропускная способность), параметров тепловозов (мощность, скорость, расход топлива), расписания плановых операций и распределений вероятностей для случайных событий (отказы, внеплановые заявки).

2. Генерация событий – в каждом такте моделирования (например, 1 минута) генерируются: плановые заявки согласно технологическому графику; аварийные заявки с заданной интенсивностью (пуассоновский поток); отказы тепловозов и восстановления после ремонта.

3. Диспетчеризация – на основе текущего состояния и приоритетов заявок выбирается локомотив для назначения задания (жадный алгоритм: свободный + ближайший + минимальное время ожидания).

4. Движение – расчёт времени перемещения по путям с учётом занятости перегонов, стрелок и ограничений скорости.

5. Выполнение – фиксация начала и окончания операции, расчёт расхода топлива, обновление состояния локомотива.

6. Сбор статистики – накопление данных о времени ожидания, простоях, пробегах, загрузке локомотивов.

7. Останов – после заданного количества суток (или числа событий) вывод агрегированных показателей.



Рис. 1. Схема модели

Основная часть

Потребность в тяговых ресурсах на путях необщего пользования металлургических комбинатов подвержена значительным колебаниям под влиянием как внешних экономических факторов, так и внутренних технологических сбоев. В таблице 1 представлены основные факторы экономического влияния и соответствующие вызовы для системы управления парком тепловозов.

Для количественной оценки значимости этих факторов был проведен опрос экспертов (5 руководителей управления железнодорожного транспорта металлургического комбината). Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что наибольшее влияние оказывают волатильность цен на сырье и энергоносители (средняя оценка 4,8 из 5) и цикличность спроса (3,6 из 5).

Таблица 1

Влияние факторов экономической нестабильности на парк тепловозов

№ п/п	Фактор влияния	Проблема	Вызов для парка
1	Цикличность спроса на металлопродукцию	Резкие колебания заказов приводят к «пилообразной» загрузке	Содержание избыточного парка в периоды спада или дефицит мощностей в пики
2	Волатильность цен на сырье и энергоносители	Скачки цен на уголь, ЖРС, лом, дизельное топливо	Необходимость ежедневного пересчета экономической целесообразности маршрутов
3	Санкционное давление и изменение логистических цепочек	Переориентация на новые рынки и поставщиков	Быстрая перенастройка системы расстановки, закупка специализированных локомотивов
4	Дефицит квалифицированных кадров	Рост ФОТ и простои из-за нехватки машинистов	Минимизация человеческого фактора, автоматизация
5	Ограниченность инвестиционных ресурсов	Осторожный подход к крупным капитальным затратам	Эффективное использование существующего изношенного парка

Таблица 2

Оценки значимости влияния экономических факторов на парк тепловозов

Фактор	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Эксперт 4	Эксперт 5	Итого
Цикличность спроса	4	3	3	4	4	3,6
Волатильность цен	5	4	5	5	5	4,8
Санкционное давление	3	5	4	2	2	3,2
Дефицит кадров	2	2	1	3	3	2,2
Ограниченность инвест. ресурсов	1	1	2	1	1	1,2

Результаты опроса экспертов о значимости экономических факторов приведены на рисунке 2.

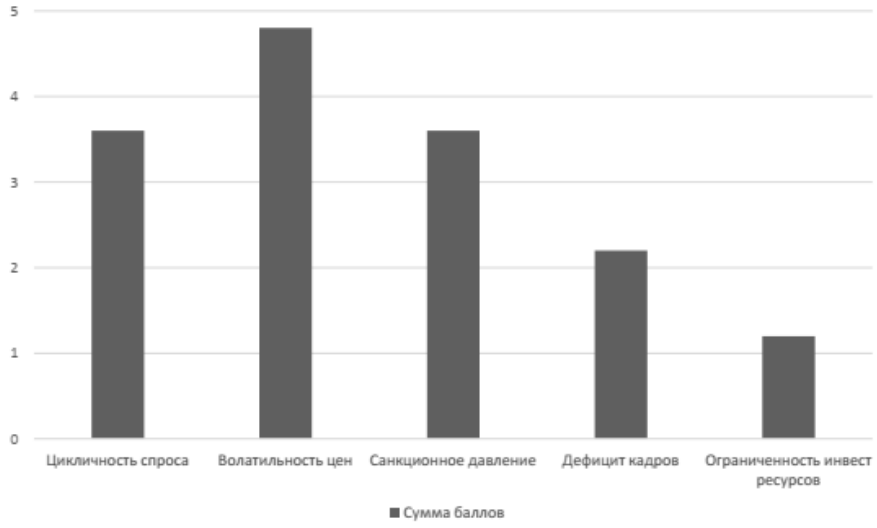


Рис. 2. Результаты опроса экспертов о значимости экономических факторов

Помимо экономических факторов, значительное влияние на работу транспорта оказывают технические отказы металлургических агрегатов и самого подвижного

состава. Для количественной оценки влияния внеплановых ситуаций была проведена выборка данных по одному из металлургических комбинатов за квартал. Анализировалась зависимость между количеством событий (X), вызывающих дисбаланс (отказы цехового оборудования и внеплановые ремонты тепловозов), и средним временем ожидания обслуживания (Y) в часы пиковых нагрузок (таблица 3).

Таблица 3

Исходные данные для построения диаграммы разброса

Период (сутки)	Кол-во отказов/событий (X)	Среднее время ожидания, мин (Y)
1	2	15
2	5	42
3	1	10
4	3	25
5	4	38
6	6	55
7	2	18
8	7	60
9	3	28
10	5	45

Построенная диаграмма разброса (рисунок 3) демонстрирует положительную корреляционную зависимость.

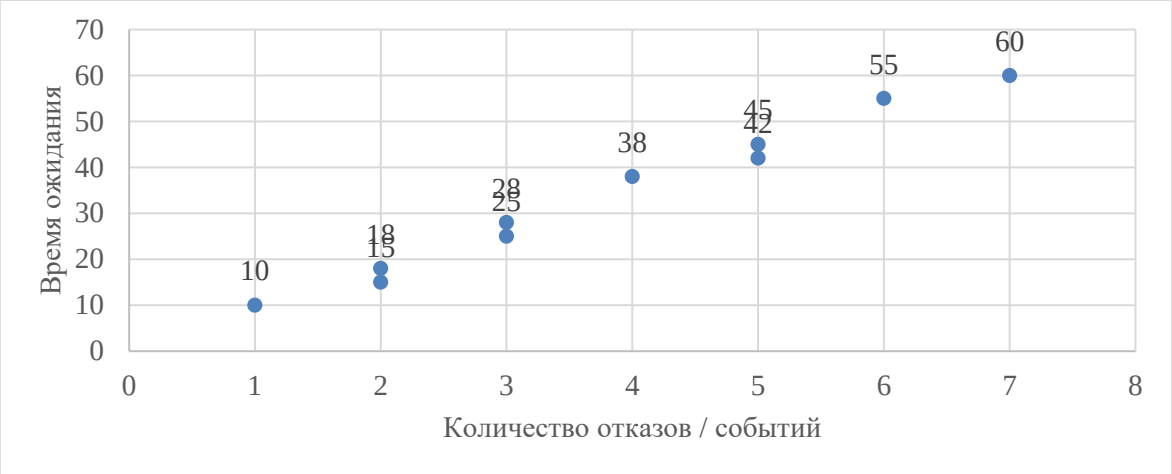


Рис. 3. Диаграмма разброса влияния количества отказов (X) на время ожидания ТПС (Y)

Для количественной оценки связи между количеством сбоев (X) и средним временем ожидания транспортного обслуживания (Y) был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона. По данным таблицы 3 получено значение r=0,962. Проверка статистической значимости выполнена с помощью t-критерия:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0{,}962 \cdot \sqrt{8}}{\sqrt{1-0.925}} \approx 9{,}93,\ \text{df}=8.$$

Соответствующее двустороннее значение $p \approx 7.6 \times 10{-}6$, что значительно ниже принятого уровня значимости 0,001. Следовательно, нулевая гипотеза об отсутствии корреляции отвергается. Доверительный интервал 95% для коэффициента корреляции, построенный с помощью *z*-преобразования Фишера, составляет [0,847; 0,992].

Для оценки устойчивости результата проведён анализ влияния отдельных наблюдений методом последовательного исключения (jackknife). Удаление любой точки

из выборки не приводит к снижению r ниже 0,93, что подтверждает отсутствие критических выбросов. Наибольшее влияние оказывает наблюдение №8 (7 отказов, 60 мин), однако и без него r=0,934.

Ввиду небольшого объёма выборки (n=10) представленные данные носят иллюстративный характер. Для окончательных выводов о силе и форме связи между отказами оборудования и временем ожидания транспортных средств требуется расширенный статистический анализ на большем массиве данных. Тем не менее, полученные результаты указывают на наличие сильной положительной корреляции, что обосновывает необходимость учёта данного фактора в методологии оперативного управления парком тепловозов.

Данная зависимость объясняется эффектом «накопления»: в период простоя цеха локомотивы отвлекаются на второстепенные работы, а при запуске возникает дефицит исправных единиц, что приводит к образованию очередей заявок.

Классический расчет потребного парка (через производительность или коэффициент потребности) дает среднесуточную цифру, но не работает в условиях часовых пиковых нагрузок. Для обеспечения ритмичности необходимы следующие методы оперативного реагирования, объединенные в комплексную систему управления (таблица 4).

Таблица 4

Методы и принципы оптимизации парка тепловозов

Направление	Принцип реагирования	Недостатки	Преимущества
На основе технологического графика (детерминированный подход)	Применяется для базовых, регулярных операций: подача сырья в доменный цех, уборка шлака, перестановка составов между цехами по жесткому расписанию. На основе регламентов технологических процессов строится почасовой график работы каждого локомотива. Потребное количество (Nт) рассчитывается как количество одновременно необходимых единиц для обеспечения всех плановых операций в «час пик» графика [2].	Не учитывает незапланированные работы, простои из-за несвоевременной подачи вагонов с ПОП, аварийные ситуации в цехах.	Обеспечивает базовую устойчивость технологического процесса.
Имитационное моделирование (стохастический подход).	Наиболее современный и адекватный метод для условий нестабильности. В специальном программном комплексе (AnyLogic, Tecnomatix Plant Simulation) создается цифровая модель всей транспортной сети предприятия: пути, стрелки, станции, грузопотоки, график поступления заданий. Моделирование выполняется для различных сценариев производственной нагрузки (план-максимум, плановый режим, ремонтные дни) [3,7].	Требует значительных затрат на разработку и валидацию модели.	Позволяет определить не только оптимальное количество тепловозов, но и логистику их перемещения, выявить «узкие места» инфраструктуры, оценить влияние случайных событий (поломка, задержка).
Использование алгоритмов целочисленного программирования и генетических алгоритмов.	Исследования (напр., Смирнова Е.Л. в «Вестнике ИрГУПС») предлагают формализовать задачу как задачу календарного планирования с критерием минимизации суммарного времени простоя вагонов и локомотивов [8, 13].	Ограничениями выступают мощность тяги, вместимость путей, технологические окна.	Генетические алгоритмы позволяют найти близкое к оптимальному решение для крупномасштабных задач в приемлемое время, адаптируя план расстановки под изменяющиеся входящие заявки от цехов.

Продолжение таблицы 4

Метод расчета по коэффициенту использования и пиковой нагрузке (практический компромисс).	Широко применяется на практике как баланс между сложностью и точностью. • Определяется суммарное время маневровой работы за сутки (ΣТм) на основе плановых заданий и статистики незапланированных работ. • Рассчитывается среднестатистическое время выполнения одного задания с учетом простоев. • Устанавливается нормативный коэффициент использования тепловоза за смену (Ки). Для ПНП металлургических комбинатов он редко превышает 0.6-0.7 из-за технологических пауз и ожидания. • Потребное количество вычисляется по формуле: N = ΣТм / (Тсм * Ки * m), где *Тсм* — продолжительность смены, *m* — число смен. • Корректировка на пик: Полученное значение увеличивается на 15-25% (эмпирический «коэффициент резервирования») для покрытия пиковых нагрузок.	Данный коэффициент в условиях металлургического комбината сложен к учету.	Коэффициент использования (Ки) — ключевой показатель эффективности, отражающий долю времени полезной работы в общем времени наряда. Его повышение напрямую снижает потребность в парке.
Внедрение интеллектуальных систем диспетчерского управления (АСУ «Локомотив»).	Как отмечено в статье Козлова Д.А. (журнал «Наука и транспорт»), современные АСУ позволяют в реальном времени отслеживать местоположение всех тепловозов и вагонов, их состояние и загрузку. Система на основе актуальных данных и плановых заданий может автоматически формировать рекомендации по оптимальной передислокации локомотивов, предупреждать диспетчера о возникновении дисбаланса или рекомендовать использовать метод «скользящего резерва», когда часть локомотивов не закреплена жестко за участком, а оперативно перенаправляется на участки с наибольшей нагрузкой.	Зависит от качества данных и интеграции с другими системами.	Позволяет управлять в реальном времени, повышает гибкость и оперативность реагирования.
Принцип «тяговых плеч» и специализация локомотивов	Для крупных комбинатов, занимающих обширную территорию, эффективна организация работы по принципу магистральных «тяговых плеч» между ключевыми станциями (напр., от сырьевого склада до доменного цеха) с закрепленными за ними мощными тепловозами. Для маневровой работы внутри цехов используются менее мощные, но более маневренные локомотивы.	Может привести к снижению универсальности парка.	Такой подход, описанный в отраслевых публикациях, позволяет снизить межучастковые издержки и повысить ответственность бригад.

Окончание таблицы 4

Организационные меры	Внедрение единого диспетчерского центра (ЕДЦ) логистики. Интеграция диспетчеризации ПНП с производственными диспетчерами цехов и приемосдатчиками ПОП.		Позволяет прогнозировать грузопотоки, упреждать формирование заданий, минимизировать время ожидания локомотивов.
	Консолидация и оптимизация маршрутов. Замена разрозненных мелких заданий на кольцевые или челночные маршруты, обслуживающие несколько технологических точек за один рейс.		
	Гибкий график работы локомотивных бригад, привязанный не к жестким сменам, а к «волнам» производственной нагрузки.		
	Аутсорсинг пиковых нагрузок. Вместо содержания собственных резервных мощностей – заключение рамочных соглашений с локомотивными компаниями на предоставление тепловозов и экипажей по требованию (модель "Транспорт как услуга" - TaaS).	Зависимость от поставщика услуги.	
	Создание "гибкого ядра" парка. Часть парка (20-30%) должна состоять из универсальных, многофункциональных тепловозов, способных выполнять широкий спектр задач.		Дает возможность оперативно перебрасывать мощности между участками.
	Сценарное моделирование. Разработка не одного "оптимального" плана расстановки, а пакета альтернативных сценариев ("базовый", "кризисный", "пиковый").		Можно активировать одним кликом при наступлении определенных условий.
Технологические и инфраструктурные меры	Развитие путевой инфраструктуры: Увеличение числа съездов и обгонных путей для пропуска встречных составов, модернизация стрелочных переводов для повышения скоростей маневров.	Высокие капитальные затраты.	
	Внедрение систем GPS/ГЛОНАСС-мониторинга и бортовых терминалов на тепловозах. [4]		Дает реальную картину расположения и состояния подвижного состава, позволяет оперативно перенаправлять технику под вновь возникшие задачи.
	Стандартизация и ускорение вспомогательных операций.		Оптимизация процессов сцепки/расцепки, оформления документов.
Кадровые и мотивационные меры	Кросс-обучение локомотивных и локомотиво-составительских бригад		Универсальное использование на различных участках.
	Внедрение KPI для локомотивных бригад и диспетчеров, напрямую связанных с Ки, выполнением графика и рациональным планированием маршрутов.	Требуют изменения организационной культуры.	Повышение вовлеченности линейного персонала.

На основе предложенной методологии на одном из крупных металлургических комбинатов была внедрена комбинированная система управления, включающая:

- математическую модель и имитационную модель для суточного планирования;
- мобильный клиент АСУ для оперативного управления;
- систему прогнозной диагностики локомотивов для перевода ремонтов в плановый режим.

Внедрение позволило достичь следующих эксплуатационных результатов:

- сокращение среднего времени оборота вагона на 10 %;
- уменьшение потребного парка тепловозов на 2 единицы при сохранении объемов перевозок;
- снижение расхода дизельного топлива за счет минимизации холостых пробегов на 7 %.

Оценка экономической эффективности

Для количественной оценки экономического эффекта от внедрения предложенной методологии использованы следующие исходные данные (предоставлены службой главного инженера комбината):

- Среднесуточный расход дизельного топлива до внедрения: 4,2 т/сут.
- Годовой фонд рабочего времени: 365 сут.
- Цена дизельного топлива (средневзвешенная за 2024 г.): 68 000 руб./т.
- Стоимость содержания одного тепловоза (ремонт, амортизация, ФОТ бригад): 4,5 млн руб./год.
- Затраты на внедрение (имитационная модель + бортовые терминалы): 3,5 млн руб. (разовые).

Результаты расчёта представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты расчета экономической эффективности

Показатель	Базовое значение	После внедрения	Экономия
Расход дизельного топлива, т/год	1533	1380–1426	107 т (7%)
Затраты на топливо, млн руб./год	104,2	93,8–96,9	7,3–10,4
Потребный парк тепловозов, ед.	12	10	2 ед.
Затраты на содержание парка, млн руб./год	54,0	45,0	9,0
Суммарные эксплуатационные затраты, млн руб./год	158,2	138,8–141,9	16,3–19,4

Срок окупаемости инвестиций:

$$T_{ок}=16{,}3\ldots19{,}4 \text{ млн руб./год} 3{,}5 \text{ млн руб.} \approx 0{,}18–0{,}21 \text{ года} \approx 2–2{,}5 \text{ месяца.}$$

Таким образом, внедрение методологии обеспечивает положительный экономический эффект уже в первом году эксплуатации. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного комплексного подхода, сочетающего детерминированные методы расчета со стохастическим моделированием и современными средствами диспетчеризации.

Вывод

Определение потребного количества тягового подвижного состава на путях необщего пользования металлургического комбината не может базироваться

исключительно на классических формулах магистрального транспорта. Ключевым фактором выступает высокая стохастичность производственной программы, вызванная как экономическими причинами, так и техническими отказами агрегатов и локомотивов.

Построенная диаграмма разброса с учётом статистической проверки (r=0,962, p<0,001, 95% ДИ: [0,847; 0,992]) подтверждает наличие сильной корреляционной связи между количеством сбоев в работе цехов и ТПС и ростом времени ожидания перевозочных услуг, что требует внедрения методов, учитывающих пиковые нагрузки. Приведённый анализ выполнен на иллюстративной выборке; для производственного внедрения необходима верификация на большем объёме данных.

Для компенсации колебаний основным методом должно стать гибкое сценарное планирование, включающее наличие маневренного резерва, жесткую систему приоритетов и внедрение прогнозной диагностики локомотивов.

Максимальный эффект достигается при синтезе всех направлений: математическая постановка задачи, имитационное моделирование для стратегического планирования, АСУ для оперативного управления и организационные меры для повышения эффективности использования парка.

Список литературы

1. Ефимов А.В., Горелов А.С. Особенности эксплуатации тягового подвижного состава на промышленном транспорте металлургических предприятий // Транспорт Урала. — 2021. — № 3. — С. 45-50.

2. Ковалев В.И., Щелоков И.Д. Управление парком локомотивов промышленного транспорта в условиях неравномерности грузопотоков // Известия вузов. Черная металлургия. — 2022. — Т. 65, № 5. — С. 356-362.

3. Козлов А.С., Михайлов Е.В. Имитационное моделирование работы транспортного узла пути необщего пользования металлургического завода // Транспортные системы и технологии. — 2021. — Т. 7, № 4. — С. 112-127.

4. Григорьев М.Н. Цифровизация как инструмент повышения эффективности эксплуатации подвижного состава на промышленном железнодорожном транспорте // Логистика и управление цепями поставок. — 2022. — № 1(108). — С. 34-45.

5. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. приказом Минтранса России от 21.12.2010 № 286.

6. Фролов Д.П. Логистика промышленного транспорта на предприятиях черной металлургии // Транспорт Урала. — 2019. — № 3(62). — С. 85-91.

7. Иванов А.В., Петров С.К. Имитационное моделирование работы подъездного пути металлургического предприятия для оптимизации парка локомотивов // Транспорт: наука, техника, управление. — 2021. — № 5. — С. 34-41.

8. Смирнова Е.Л. Оптимизация маневровой работы на промышленном железнодорожном транспорте методами целочисленного программирования // Вестник Иркутского государственного университета путей сообщения. — 2022. — Т. 26, № 2. — С. 245-256.

9. Козлов Д.А., Сидоров Н.П. Повышение эффективности управления локомотивным парком промышленного транспорта на основе АСУ // Наука и транспорт. — 2020. — № 3(42). — С. 18-25.

10. Акулиничев В.М., Кузнецов В.Г. Организация вагонопотоков на промышленном транспорте. — М.: Транспорт, 2018. — 240 с.

11. Пахомова Л.А., Рыжиков А.В. Статистический анализ влияния отказов технологического оборудования на ритмичность перевозок // Металлургические процессы и оборудование. — 2023. — № 2. — С. 62-68.

12. Фомин В.Г., Семенов А.И. Методика расчета парка для внутризаводских перевозок // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16, № 3. — С. 456-465.

13. Редькин А.Г. Гибридный алгоритм календарного планирования маневровых локомотивов на сетях промышленного транспорта // Информационные технологии. — 2023. — Т. 29, № 1. — С. 52-60.

References

1. Efimov, A.V., Gorelov, A.S. (2021). Operational features of traction rolling stock in industrial transport of metallurgical enterprises. *Transport of the Urals*, (3), pp. 45-50.

2. Kovalev, V.I., Shchelokov, I.D. (2022). Fleet management of industrial transport locomotives under conditions of uneven cargo flows. *University Proceedings. Ferrous Metallurgy*, Vol. 65, (5), pp. 356-362.

3. Kozlov, A.S., Mikhailov, E.V. (2021). Simulation modeling of a non-public railway transport hub operation at a metallurgical plant. *Transport Systems and Technologies*, Vol. 7, (4), pp. 112-127.

4. Grigoriev, M.N. (2022). Digitalization as a tool for improving the operational efficiency of rolling stock in industrial railway transport. *Logistics and Supply Chain Management*, (1(108)), pp. 34-45.

5. Ministry of Transport of the Russian Federation. (2010). *Rules for the Technical Operation of the Railways of the Russian Federation* (Order No. 286, December 21, 2010).

6. Frolov, D.P. (2019). Logistics of industrial transport in ferrous metallurgy enterprises. *Transport of the Urals*, (3(62)), pp. 85-91.

7. Ivanov, A.V., Petrov, S.K. (2021). Simulation modeling of a metallurgical plant's industrial siding operation to optimize the locomotive fleet. *Transport: Science, Technology, Management*, (5), pp. 34-41.

8. Smirnova, E.L. (2022). Optimization of shunting operations in industrial railway transport using integer programming methods. *Bulletin of Irkutsk State University of Railway Engineering*, Vol. 26, (2), pp. 245-256.

9. Kozlov, D.A., Sidorov, N.P. (2020). Improving the efficiency of industrial transport locomotive fleet management based on automated control systems. *Science and Transport*, (3(42)), pp. 18-25.

10. Akulinichev, V.M., Kuznetsov, V.G. (2018). *Organization of Wagon Flows in Industrial Transport*. Moscow: Transport, 240 p.

11. Pakhomova, L.A., Ryzhikov, A.V. (2023). Statistical analysis of the impact of process equipment failures on traffic rhythm. *Metallurgical Processes and Equipment*, (2), pp. 62-68.

12. Fomin, V.G., Semenov, A.I. (2019). Methodology for calculating the fleet for in-plant transportation. *Proceedings of Petersburg Transport University*, Vol. 16, (3), pp. 456-465.

13. Redkin, A.G. (2023). Hybrid algorithm for calendar scheduling of shunting locomotives in industrial transport networks. *Information Technologies*, Vol. 29, (1), pp. 52-60.

Tsepaev R.E., Grishkova D.Y.

METHODOLOGY FOR OPERATIONAL MANAGEMENT OF A DIESEL LOCOMOTIVE FLEET ON NON-PUBLIC RAILWAY TRACKS OF METALLURGICAL ENTERPRISES

Abstract. *The article addresses the problem of optimizing the management of traction rolling stock on non-public railway tracks of large metallurgical plants. It is revealed that classical methods for calculating the required fleet size, based on average daily transportation volumes, do not account for the high volatility of the production program and the probabilistic nature of peak load occurrences. Based on an analysis of economic instability factors and technical equipment failures, a scatter diagram was constructed, confirming a strong correlation between the number of shop floor disruptions and the waiting time for transport services. Scientific novelty lies in identifying a quantitative correlation between equipment failures and waiting time.*

Keywords: *non-public railway tracks, metallurgical plant, traction rolling stock, diesel locomotive fleet, production program, simulation modeling, operational management, scenario planning.*

Сведения об авторах:

Цепаев Роман Евгеньевич
Сибирский государственный индустриальный университет
Российская Федерация, 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Аспирант
Кафедра транспорта и логистики
E-mail: Tsepaev_RE@outlook.com

Гришкова Диана Юрьевна
Сибирский государственный индустриальный университет
Российская Федерация, 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
К.т.н., доцент
Кафедра транспорта и логистики
E-mail: Raigas@inbox.ru

Information about the Authors:

Roman E. Tsepaev
Siberian State Industrial University
Russian Federation, 654007, Novokuznetsk, Kirova St., 42
Postgraduate Student
Department of Transport and Logistics
E-mail: Tsepaev_RE@outlook.com

Diana Yu. Grishkova
Siberian State Industrial University
Russian Federation, 654007, Novokuznetsk, Kirova St., 42
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
Department of Transport and Logistics
E-mail: Raigas@inbox.ru

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

УДК 656.13:628.4.4

Маврин В.Г., Зайнутдинова А.Р.

ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ОТХОДОВ

Аннотация. *Эффективность системы обращения с отходами во многом определяется работой транспортно-логистического комплекса, материальную основу которого составляют мусоровозы. Для региональных операторов выбор новой техники является сложной многокритериальной задачей, требующей одновременного учета технических, технологических и экономических параметров. Существующие методики либо узко ориентированы на экономические показатели, либо не адаптированы к специфике коммунальной техники. Производители также нуждаются в инструменте оценки конкурентоспособности проектируемых моделей. Статья посвящена разработке методики оценки конкурентоспособности специализированного автотранспортного средства для сбора и транспортировки отходов. Авторами разработан программный продукт, реализующий математическую модель для расчета интегрального показателя конкурентоспособности. Метод апробирован на примере сравнения двух моделей мусоровозов. Инструмент предназначен для поддержки решений производителей специализированных автотранспортных средств при проектировании и эксплуатантов при выборе автотехники для сбора и транспортировки отходов.*

Ключевые слова*: транспортировка отходов, специализированное автотранспортное средство для сбора и транспортировки отходов, оценка конкурентоспособности, многокритериальный анализ, квалиметрическая оценка.*

Постановка задачи

В Стратегии национальной безопасности Российской Федерации, принятой Указом Президента РФ от 02.07.2021 № 400, отмечено, что в последние десятилетия интенсивный рост производства и потребления в мире и стране сопровождается увеличением антропогенной нагрузки на окружающую среду и ухудшением ее состояния, что влечет существенное изменение условий жизни на Земле. Одной из важнейших задач является снижение объемов образования отходов производства и потребления, развитие индустрии их утилизации и вторичного использования [1]. В России и во всем мире, несмотря на проведение реформ в секторе управления отходами и принятие ключевых нормативных актов, проблема обостряется [2,3]. Эффективность системы обращения с отходами в значительной степени определяется работой транспортно-логистического комплекса. Именно эта стадия обеспечивает связь между всеми звеньями цепи: от мест образования отходов до объектов сортировки, переработки и захоронения. Материальной основой данного процесса выступают автотранспортные

средства для сбора и транспортирования отходов, парк которых в Российской Федерации требует постоянного обновления и модернизации.

Для региональных операторов и специализированных автопредприятий задача выбора новой техники является сложной многокритериальной задачей. Приобретателю необходимо одновременно учитывать множество факторов: грузоподъемность и вместимость кузова, надежность и расход топлива, стоимость приобретения и последующего обслуживания, а также специальные технологические характеристики (коэффициент уплотнения, тип загрузки, приспособленность к городским условиям). Существующие методики выбора либо узко ориентированы на экономические показатели (совокупная стоимость владения), либо требуют привлечения дорогостоящих экспертов и не всегда адаптированы к специфике коммунальной техники.

С другой стороны, производители специализированных автотранспортных средств на этапе проектирования новых моделей сталкиваются с необходимостью оценки их потенциальной конкурентоспособности. Им требуется инструмент, позволяющий количественно сравнить проектные параметры с характеристиками существующих на рынке аналогов и выявить направления для улучшения конструкции.

Анализ последних исследований

Под системой транспортировки и логистики отходов понимается совокупность взаимосвязанных операций, обеспечивающих перемещение отходов от источников образования к пунктам обработки, утилизации или захоронения. Ее ключевая задача — гарантировать эффективное управление отходами на всех стадиях. В структуру данной системы входят: сбор, транспортировка, обработка, утилизация и размещение отходов, а также информационное обеспечение каждого из перечисленных этапов. Грамотно выстроенная логистика в этой сфере позволяет снизить нагрузку на окружающую среду, минимизировать объемы захоронения, повысить результативность транспортировки и обеспечить рациональное использование ресурсов.

Транспортная составляющая присутствует на всех стадиях обращения с отходами. Ее материальную базу, как правило, составляют автотранспортные средства для сбора и транспортирования отходов, которые сталкиваются с теми же проблемами, что и автомобильный транспорт в целом. Так, в работе [4] для повышения эффективности использования мусоровозов предлагается математическая модель, позволяющая оперативно оценивать целесообразность закрепления конкретных маршрутов за определенной машиной в автопарке. Если фактический расход топлива превышает средние показатели, модель рекомендует либо заменить мусоровоз на данном маршруте, либо скорректировать график вывоза отходов.

Важнейшим логистическим условием эффективного управления отходами является формирование четкой и хорошо структурированной системы, способной обеспечить слаженную работу всех элементов процесса. В исследовании [5] предложен вариант такой структуры, целью которой является сортировка отходов и транспортировка вторсырья к удаленным объектам переработки. Оптимизация логистического процесса позволит увеличить эффективность сбора и утилизации отходов, снизить негативное влияние на окружающую среду и обеспечить устойчивое развитие экономики.

Совершенствование конструкции автотранспортных средств является одним из способов повышения эффективности работы автопарка, используемого для транспортировки отходов, и, как следствие, всей системы обращения с отходами. Современные тренды при разработке конструкции специализированных автотранспортных средств связаны с электрификацией, автоматизацией процессов,

роботизацией и повышением экологичности [6]. Эти тенденции направлены на минимизацию экологического воздействия и повышение эффективности сбора мусора.

Одним из узких мест действующей системы управления отходами выступает дефицит территорий, пригодных для их захоронения. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка научно обоснованных методов выбора площадок под размещение объектов инфраструктуры обращения с твердыми отходами. Так, в статье [7] размещение объектов системы обращения с отходами предлагается производить в соответствии с минимизацией транспортно-логистической функции, учитывающей объемы образования отходов, грузоподъемность используемого транспорта и расстояния от места образования отходов до места их переработки. Также разработана модель, которая для выбранной территории рассчитывает оптимальное число мусоровозов и определяет рациональные маршруты движения автотранспорта.

Процесс оценки конкурентоспособности автотранспортного средства играет ключевую роль на стадии его проектирования и разработки. Это позволяет своевременно выявить сильные стороны, определить потенциальные преимущества перед аналогичными моделями конкурентов, а также выявить слабые места и недостатки конструкции. Грамотно проведенная оценка может помочь производителям оптимизировать параметры автомобиля, повысить его эксплуатационные характеристики и увеличить эффективность деятельности эксплуатанта транспортного средства. Так, в статье [8] предлагается использовать специальный инструмент оценки конкурентоспособности автомобиля, основанный на общей стоимости владения. Результаты показывают, что электромобили с аккумуляторными батареями характеризуются самой низкой общей стоимостью владения среди анализируемых силовых установок в сегментах A (мини-автомобили) и C (средние автомобили). В исследовании [9] конкурентоспособность автотранспортного средства предлагается оценивать с точки зрения оценки его качества потребителем с учетом справедливости стоимости автомобиля. Авторы статьи [10] отмечают, что на конкурентоспособность автомобиля, прежде всего влияют расходы производителя на НИОКР и экологические инновации.

Цель работы

Таким образом, эффективность системы обращения с отходами напрямую зависит от технического уровня и экономических характеристик используемых специализированных автотранспортных средств для сбора и транспортирования отходов. Целью настоящей работы является разработка методики и программного средства для количественной оценки конкурентоспособности автотранспортных средств для транспортировки отходов на основе многокритериального анализа их технико-экономических параметров.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в адаптации методов квалиметрической оценки к специфике специализированных автотранспортных средств с возможностью гибкой настройки состава оцениваемых параметров и их весовых коэффициентов в зависимости от решаемых задач (проектирование или эксплуатация) и условий использования.

Практическая значимость работы состоит в создании программного продукта, который может служить инструментом поддержки принятия решений как для производителей, так и для эксплуатантов специализированной техники.

Основная часть

В настоящее время для оценки конкурентоспособности транспортных средств применяется широкий спектр методов: от классического сравнительного анализа

параметров до сложных алгоритмов на основе больших данных. К числу наиболее распространённых относятся метод взвешенных баллов (мультикритериальный анализ), анализ совокупной стоимости владения, а также инструменты бизнес-аналитики для обработки данных о продажах, рыночных позициях и потребительских предпочтениях. Однако применительно к специализированной технике, такой как автомобили для транспортировки отходов, данные подходы требуют существенной адаптации, поскольку ключевыми факторами конкурентоспособности становятся не потребительские, а эксплуатационно-технические и экономические критерии в рамках строго регламентированной отрасли. Кроме того, в силу относительно низких объемов производства данного вида техники необходимо учитывать баланс между адекватностью оценки конкурентоспособности и стоимостью разработки программного обеспечения.

С учётом специфики объекта исследования в данной работе было принято решение разработать программный продукт на языке Python с использованием бесплатных библиотек и СУБД, который предназначен для оценки конкурентоспособности существующего или разрабатываемого производителем специализированного автотранспортного средства. Функциональные возможности включают возможность создания справочников, оцениваемых и сравниваемых параметров транспортных средств, условий эксплуатации, расчёта относительного значения конкурентоспособности, а также оптимизации параметров автомобиля.

Алгоритм работы с программой формализует процесс сравнения спецтехники-конкурентов по иерархической системе критериев. Для расчёта интегрального показателя и проведения сценарного анализа разработано ядро, математическая модель которого позволяет автоматизировать обработку входных данных и варьировать весовые коэффициенты критериев в зависимости от требований конкретного заказчика или условий эксплуатации. Для каждого транспортного средства оценивается набор из n параметров. Каждый параметр имеет определенное направление предпочтения: либо максимизация (например, объем кузова, топливная экономичность), либо минимизация (например, стоимость приобретения, стоимость технического обслуживания): значение конкурентоспособности автомобиля определяется по формуле (1):

$$I = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{I_i}{a_i}\right) \cdot 10 \cdot (I_{\max} - I_{\min}) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где I_i– значение конкурентоспособности i-го параметра;

$$I_i = \begin{cases} \left(\frac{x_i - z_i}{z_i - y_i}\right) \cdot \frac{a_i}{10} & | x_i \to \max \cap x_i < z_i \\ \frac{a_i}{10} & | (x_i \to \max \cap x_i \geq z_i) \cup (x_i \to \min \cap x_i < z_i) \\ \left(\frac{y_i - x_i}{y_i - z_i}\right) \cdot \frac{a_i}{10} & | x_i \to \min \cap x_i \geq z_i \end{cases} \quad (2)$$

где a_i - значимость i-го параметра, $a_i \in [1,10]$;

n - количество параметров.

Для каждого i-го параметра определяем следующие значения:

y_i - значение i-го параметра;

z_i - идеальное допустимое значение i-го параметра;

x_i - наихудшее допустимое значение i-го параметра.

Значения значимости a_i для каждого параметра присваиваются на основе экспертной оценки, отражающей относительную важность различных характеристик специализированного автотранспортного средства. В данном исследовании весовые коэффициенты были определены путем консультаций со специалистами регионального экологического оператора и специализированного производителя транспортных средств. При присвоении весовых коэффициентов руководствовались следующими критериями: (1) эксплуатационные параметры, влияющие на суточную производительность

(например, объем кузова, вес отходов), получили более высокие весовые коэффициенты; (2) экономические параметры (например, цена, расход топлива) были приоритезированы на основе соображений общей стоимости владения; (3) параметрам, оказывающим незначительное влияние на эффективность эксплуатации (например, максимальная скорость, крутящий момент), был присвоен меньший вес.

Программа также позволяет оптимизировать параметры, то есть определять оптимальные значения характеристик в пределах допустимых диапазонов. Задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$I = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{I_i}{a_i}\right) \cdot 10 \cdot (I_{\max} - I_{\min}) \cdot 100\% \rightarrow I^*, \quad (3)$$

где I^* – оптимальное значение параметра.

$$\begin{cases} y_i \le x_i \le z_i \ \ |x_i \rightarrow \max \\ z_i \le x_i \le y_i \ \ |x_i \rightarrow \min \end{cases} \cup \begin{cases} y_i^* \le x_i \le z_i^* \ \ |x_i \rightarrow \max \\ z_i^* \le x_i \le y_i^* \ \ |x_i \rightarrow \min \end{cases} \quad (4)$$

где $[\forall i : x_i \in Z_{\ge 0}]$ – целочисленность переменной x_i.

Здесь x_i представляет собой оптимизированное значение параметра, ограниченное между наихудшим допустимым y_i и идеальным z_i значениями. Цель состоит в максимизации интегрального индекса конкурентоспособности путем выбора оптимальных значений параметров с учетом целочисленных ограничений для таких параметров, как, например, объем кузова, коэффициент уплотнения отходов и т.п.

Для обеспечения целостности, непротиворечивости и эффективного управления данными, используемыми в процессе оценки, в составе программы реализована реляционная база данных. Её структура, отражающая ключевые сущности и их взаимосвязи, представлена на рисунке 1.

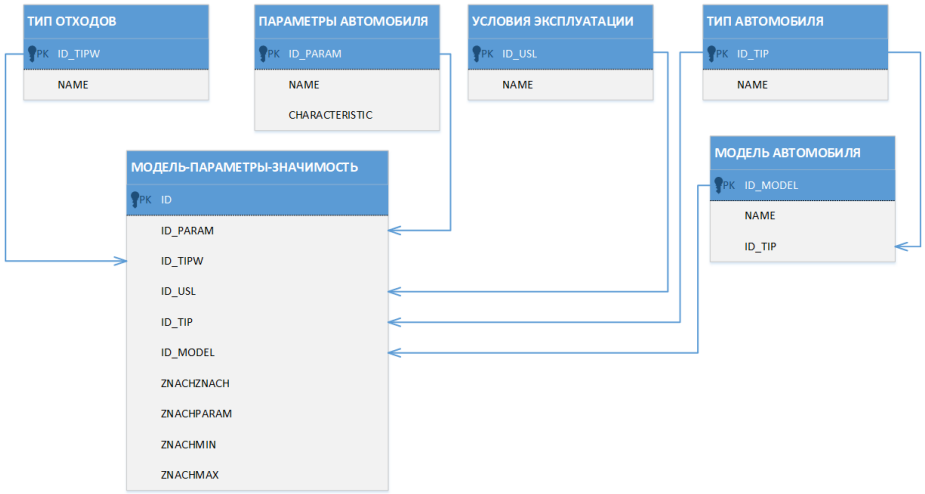


Рис. 1. Схема базы данных

База данных состоит из нормализованных таблиц, предназначенных для хранения справочной информации (типы отходов, условия эксплуатации специализированного автотранспортного средства, типы и модели, параметры оцениваемых автотранспортных средств, система критериев и их весовых коэффициентов), а также для записи и последующего анализа результатов расчетов (значения нормализованных показателей, интегральные оценки, сценарии сравнения). Такая организация данных позволяет гибко конфигурировать модель оценки, дополнять список сравниваемых объектов и критериев, а также сохранять историю расчетов для проведения сравнительного анализа.

Расчёт конкурентоспособности производился на примере двух моделей специализированных автотранспортных средств. В таблице 1 перечислены ключевые

параметры оцениваемых мусоровозов и их значимость. Лицо, принимающее решения, может изменить этот список параметров.

Таблица 1

Параметры оцениваемых специализированных автотранспортных средств и их значимость

Наименование параметра	Значимость	КАМАЗ КО-440В	МАЗ МКМ-3403
Мощность двигателя	5	301	280
Масса отходов	9	6695	7,000
Объем кузова	9	21	16
Коэффициент уплотнения мусора	5	6	8
Расход топлива	8	25	26
Максимальная скорость	3	60	60
Цена	9	6500000	5,000,000
Крутящий момент	4	1087	1160
Срок гарантии	5	1	1
Наличие манипулятора	5	0	1

Набор параметров, использованный в данном исследовании, приведен в качестве примера; программное средство позволяет лицам, принимающим решения, изменять набор параметров, их значения и значимость в соответствии со своими конкретными приоритетами. Результаты расчета конкурентоспособности рассматриваемых моделей специализированных автотранспортных средств представляются в виде лепестковых диаграмм в интерфейсе программного обеспечения (рисунок 2).

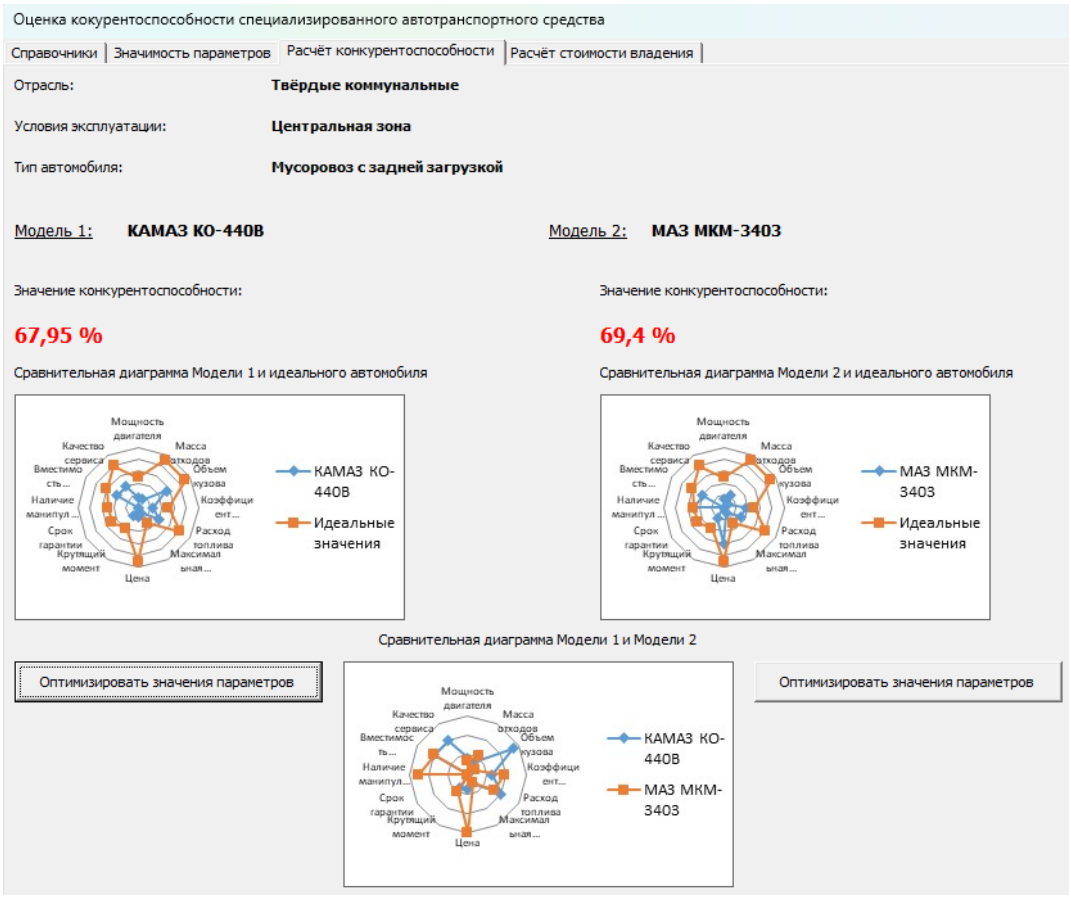


Рис. 2. Результаты оценки конкурентоспособности спецтехники

Рассчитанный индекс конкурентоспособности показывает, что модель МАЗ МКМ-3403 немного конкурентоспособнее (69,4%), чем модель КАМАЗ КО-440В (67,95%). Последняя модель имеет лучшие ключевые эксплуатационные параметры, но первое специализированное автотранспортное средство значительно дешевле, что является важным фактором для специализированной техники.

Предложенный подход позволяет оперативно выполнить предварительную количественную оценку конкурентоспособности специализированного автотранспортного средства, учитывая как технические, так и экономические аспекты. Данная методика и программное обеспечение могут использоваться как производителями специализированных автотранспортных средств на этапе их разработки, так и эксплуатантами (экологическими операторами, осуществляющими транспортировку отходов).

Выводы

В статье разработана методика количественной оценки конкурентоспособности специализированных автотранспортных средств для транспортировки отходов. В отличие от существующих подходов, ориентированных преимущественно на экономические показатели или общетехнические характеристики автомобилей, предложенная методика позволяет учитывать разные группы параметров: общетехнические, специализированные (технологические) и экономические. Это позволяет комплексно оценивать специализированные автотранспортные средства как сложные технические системы, выполняющие специфические функции сбора, уплотнения и транспортировки отходов.

Разработанный программный продукт позволяет автоматизировать расчет интегрального индекса конкурентоспособности, выполнять сценарный анализ (варьирование весов и целевых значений), а также решать оптимизационную задачу подбора параметров проектируемой модели. Архитектура программы обеспечивает гибкость: перечень моделей и критериев может дополняться без изменения программного кода.

Таким образом, разработанная методика и программное обеспечение представляют собой готовый инструмент поддержки принятия решений, способствующий повышению эффективности выбора и проектирования специализированного автотранспортного средства. Это вносит вклад в решение задач, стоящих перед транспортной отраслью в рамках стратегических направлений научно-технологического развития.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение от 22.12.2025 № 12/2025-ПД-КФУ).

Список литературы

1. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации : утв. Указом Президента Рос. Федерации от 02.07.2021 № 400 // Совет Безопасности Российской Федерации : [сайт]. – URL: http://www.scrf.gov.ru/security/docs/document133/ (дата обращения: 26.01.2026).

2. Fedotkina O., Gorbashko E., Vatolkina N. Circular Economy in Russia: Drivers and Barriers for Waste Management Development // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, Iss. 20. – Art. 5837. – URL: https://doi.org/10.3390/su11205837.

3. Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa / Z. Zhang, Z. Chen, J. Zhang [et al.] // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 957. – Art. 117682. – URL: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.117682.

4. Генсон Е. М. Оптимизация работы парка специализированных автомобилей для сбора и транспортирования твердых коммунальных отходов // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2020. – № 3 (53). – С. 48–52. – URL: https://sciup.org/148319969 (дата обращения: 22.01.2026).

5. Toward a cleaner and more sustainable world: A framework to develop and improve waste management through organizations, governments and academia / R. G. Anuardo, M. Espuny, A. C. F. Costa, O. J. Oliveira // Heliyon. – 2022. – Vol. 8, Iss. 4. – Art. e09225. – URL: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09225.

6. Современные тренды в развитии мусоровозной техники: инновации и экологичность // GarbageTruck.ru : [сайт]. – 2025. – URL: https://garbagetruck.ru/news/sovremennye-trendy-v-razvitii-musorovoznoy-tekhniki-innovatsii-i-ekologichnost-/ (дата обращения: 26.01.2026).

7. Транспортно-логистическое обоснование выбора мест размещения объектов системы обращения с твёрдыми коммунальными отходами (на примере Приморского края) / И. Н. Волкова, П. М. Крылов, И. А. Семина [и др.] // Географическая среда и живые системы. – 2020. – № 2. – С. 6–21. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/transportno-logisticheskoe-obosnovanie-vybora-mest-razmescheniya-obektov-sistemy-obrascheniya-s-tvyordymi-kommunalnymi-othodami-na (дата обращения: 22.01.2026).

8. Franzò S., Nasca A., Chiesa V. Factors affecting cost competitiveness of electric vehicles against alternative powertrains: A total cost of ownership-based assessment in the Italian market // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 363. – Art. 132559. – URL: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132559.

9. Klentak A. S., Kozlovskii V. N. Predicting the Competitiveness of New Models in the Auto Industry // Russian Engineering Research. – 2025. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 842–843. – URL: https://doi.org/10.3103/S1068798X25700984.

10. Anna N., Patrucco P. P. International competitiveness and innovation dynamics in the European automotive industry: a creative, self-reinforcing and greening relation // Economics of Innovation and New Technology. – 2025. – URL: https://doi.org/10.1080/10438599.2025.2464593.

References

1. Strategiya natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: utv. Ukazom Prezidenta Ros. Federatsii ot 02.07.2021 № 400 [National Security Strategy of the Russian Federation: Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 400 dated 02.07.2021]. Sovet Bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii [Security Council of the Russian Federation]. Available at: http://www.scrf.gov.ru/security/docs/document133/ (accessed 26.01.2026) (in Russian).

2. Fedotkina O., Gorbashko E., Vatolkina N. Circular Economy in Russia: Drivers and Barriers for Waste Management Development. Sustainability, 2019, vol. 11, iss. 20, art. 5837. Available at: https://doi.org/10.3390/su11205837

3. Zhang Z., Chen Z., Zhang J., et al. Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa.

Science of the Total Environment, 2024, vol. 957, art. 117682. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.117682

4. Genson E. M. Optimizatsiya raboty parka spetsializirovannykh avtomobiley dlya sbora i transportirovaniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Optimization of the fleet of specialized vehicles for the collection and transportation of municipal solid waste]. Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa [Technical and Technological Problems of Service], 2020, no. 3 (53), pp. 48–52. Available at: https://sciup.org/148319969 (accessed 22.01.2026) (in Russian).

5. Anuardo R. G., Espuny M., Costa A. C. F., Oliveira O. J. Toward a cleaner and more sustainable world: A framework to develop and improve waste management through organizations, governments and academia. Heliyon, 2022, vol. 8, iss. 4, art. e09225. Available at: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09225

6. Sovremennye trendy v razvitii musorovoznoy tekhniki: innovatsii i ekologichnost' [Modern trends in the development of garbage trucks: innovations and environmental friendliness]. GarbageTruck.ru, 2025. Available at: https://garbagetruck.ru/news/sovremennye-trendy-v-razvitii-musorovoznoy-tekhniki-innovatsii-i-ekologichnost-/ (accessed 26.01.2026) (in Russian).

7. Volkova I. N., Krylov P. M., Semina I. A., et al. Transportno-logisticheskoe obosnovanie vybora mest razmeshcheniya ob"ektov sistemy obrashcheniya s tvyordymi kommunal'nymi otkhodami (na primere Primorskogo kraya) [Transport and logistics justification for the selection of locations for municipal solid waste management facilities (on the example of Primorsky Krai)]. Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy [Geographical Environment and Living Systems], 2020, no. 2, pp. 6–21. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/transportno-logisticheskoe-obosnovanie-vybora-mest-razmescheniya-obektov-sistemy-obrascheniya-s-tvyordymi-kommunalnymi-othodami-na (accessed 22.01.2026) (in Russian).

8. Franzò S., Nasca A., Chiesa V. Factors affecting cost competitiveness of electric vehicles against alternative powertrains: A total cost of ownership-based assessment in the Italian market. Journal of Cleaner Production, 2022, vol. 363, art. 132559. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132559

9. Klentak A. S., Kozlovskii V. N. Predicting the Competitiveness of New Models in the Auto Industry. Russian Engineering Research, 2025, vol. 45, iss. 8, pp. 842–843. Available at: https://doi.org/10.3103/S1068798X25700984

10. Anna N., Patrucco P. P. International competitiveness and innovation dynamics in the European automotive industry: a creative, self-reinforcing and greening relation. Economics of Innovation and New Technology, 2025. Available at: https://doi.org/10.1080/10438599.2025.2464593

Mavrin V. G., Zainutdinova A. R.

EVALUATION OF THE COMPETITIVENESS OF A SPECIALIZED WASTE TRANSPORT VEHICLE

Abstract. *The efficiency of a municipal solid waste management system is largely determined by the operation of the transport and logistics system, the material basis of which is garbage trucks. For regional operators, selecting new equipment is a complex, multi-criteria task requiring simultaneous consideration of technical, technological, and economic parameters. Existing methodologies are either narrowly focused on economic indicators or are not adapted to the specifics of municipal equipment. Manufacturers also need a tool for assessing the competitiveness of their designs. This article focuses on the development of a*

methodology for assessing the competitiveness of specialized waste transportation vehicles. The authors developed a software product implementing a mathematical model for calculating an integrated competitiveness indicator. The method was tested using a comparison of two garbage truck models. The tool is intended to support decision-making by specialized equipment manufacturers during design and by operators when selecting waste collection and transportation vehicles.

***Keywords**: waste transportation, garbage trucks, competitiveness assessment, multicriteria analysis, qualimetric assessment.*

Сведения об авторах:

Маврин Вадим Геннадьевич
Набережночелнинский институт Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны, Российская Федерация,
доцент,
к.т.н., доцент,
e-mail: vadim_mmite@rambler.ru
Зайнутдинова Айгель Рафисовна
Набережночелнинский институт Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны, Российская Федерация,
магистрант 1-го года обучения
e-mail: aigelka14@gmail.com

Information about the authors:

Mavrin Vadim Gennadyevich
Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation,
Associate Professor,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: vadim_mmite@rambler.ru
Zainutdinova Aigel Rafisovna
Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation,
1st-year Master's Student,
e-mail: aigelka14@gmail.com

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 656.025

Глинский В.А.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИНХРОМОДАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПРИ СТРУКТУРИЗАЦИИ МЕТАЭВРИСТИК В ЗАДАЧАХ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА

Аннотация. *В статье рассматривается кодовая система классификации динамических транспортно-терминальных сетей (ТТС) при мульти/синхромодальных перевозках (Multi/Synchromodal transportation - ST). Разработанный классификатор основан на многокритериальном учете ключевых показателей эффективности (KPI - Key Performance Indicators) трех направлений (кластеров): прогнозирующего управления и сетевой организации; топологии; динамической маршрутизации. Методика учитывает технологические, экономические и качественные аналоговые («мягкие») параметры взаимодействия участников сети через процедуру присвоения приоритетов узловым терминальным агентам ST-сети с учётом текущих условий. На основе классификатора могут формироваться гибридные структуры метаэвристик ТТС ST требуемого уровня эмерджентности, а также осуществляться количественный контроль оптимальной платформенной структуры синхромодальной сети.*

Ключевые слова: *сетецентрическое управление (СЦУ); синхромодальные перевозки (ST); динамическая задача маршрутизации транспорта (ЗМТ); мультиагентные системы (MAS); уровень эмерджентности (LoE); адаптивная динамическая приоритезация (АДП).*

Постановка задачи, актуальность и научная новизна

В решении задачи классификации динамических транспортно-терминальных сетей (ТТС) при мульти/синхромодальных перевозках (Multi/Synchromodal transportation – MT/ST) должна применяться уровневая многофакторная классификация, которую целесообразно формировать на основе наиболее значимых признаков, отмеченных в терминологических исследованиях [1 – 6]. В статье поставлена задача по разработке кодовой системы классификации на основе многокритериального учета ключевых показателей эффективности (KPI) [2]. Показатели KPI предполагается определять на базе содержательных характеристик ТТС ST, концепции интеграции усиленной логистики и распределенных логистических сетей [1-3]. Анализ выявил отсутствие четкого разграничения классов и гибридность классификационных признаков динамических MT/ST-сетей, как в части метаэвристик, так и в системах их сетевой оптимизации. Еще более проблематичным при классификации является учет масштабируемости конкретной сетевой системы. В этих условиях для упрощения анализа и классификации наиболее продуктивны рейтинговые оценки методом адаптивной динамической приоритезации (АДП) с использованием эвристических правил для управления процессом поиска решения с учётом конкретных условий задачи в режиме реального

времени. Метод учитывает экспертную оценку конкретики взаимодействия участников ТТС [2].

В современных транспортно-терминальных сетях (ТТС) при синхромодальных перевозках (ST) формируется единое информационное пространство (ЕИП) нового качества, наделенное свойствами проактивности интеллектуальных узловых агентов сети, что, в свою очередь, приводит к возникновению синергического эффекта [1 – 3]. Анализ и классификация совокупности (гибридного набора) свойств ST-сети, приводящих к возникновению нового качества сети, как и описание характеристик самого нового синергического состояния («уровня эмерджентности» - level of emergence), представляет собой актуальную задачу сетевой логистики.

Отражение диалектики мульти/синхромодальных сетей (изменчивость, синергия, самоорганизация и пр.) в части количественного накопления параметров и фиксация возникающих новых мерных качественных классификационных свойств эволюционирующей сети представляется важной и актуальной задачей [1 - 6].

Научная новизна разработки классификатора ST-сетей состоит в возможности формирования и изучения синергических сетевых параметров (эмерджентность), которые преобразуют традиционные для терминалов сети функции хранения и переработки в форматы кросс-докинга (cross docking) и консолидации.

Внешними свойствами ТТС ST является связанность сетевых подсистем в интересах всех участников логистической операции, что обусловлено эффективностью распределенного сетецентрического управления (СЦУ) [2]. СЦУ обеспечивается информационным взаимодействием всех элементов терминальной системы (интероперабельность) через многофункциональные телематические, экспертные, диспетчерские комплексы и цифровые платформы [2, 6, 7]. Логистические параметры сети (адаптивность, проактивность, интероперабельность, эмерджентность и пр.) нуждаются в научном обобщении и классификации (приоритезации) в части влияния на формирование новых качественных результатов транспортной деятельности: ранее конкурирующих, а ныне взаимовыгодных и партнерских инструментов - таких как, например, логистические сетевые альянсы; коммерческие соглашения; пулинг; клиентоцентризм [2].

Специфика многокритериальных связей (и их параметров) в ST ТТС существенно усложняет решение этой актуальной задачи [2, 3], подразумевая агрегирование параметров в обобщённые критерии эвристических моделей ST для упрощения анализа и классификации. Совместное применение нескольких критериев приводит к необходимости использования оптимизационного алгоритма класса сложности NP (Nondeterministic Polynomial time). Задачи транспортной маршрутизации (ЗТМ) класса NP почти исключают возможность нахождения точного решения и требуют поиска гибридных эвристических алгоритмов. Такие задачи входят в сферу концепции TBL (Time-based logistics) [4, 5, 8 - 10] и относятся к нечетким ЗМТ (FVRP - Fuzzy Vehicle Routing Problem [2, 5, 10]).

Сложность структуры логистических систем (гибридность) распространяется на две составные (и взаимосвязанные) области задач NP при анализе ST-сетей (NP ST):

1) многоэлементность структуры метаэвристических гибридных алгоритмов ЗТМ (фасетная классификация параметров, временные окна, кластеризация объектов при зонировании ТТС, методы верификации баз данных KPI ST и пр.) [2];

2) многоэлементность структуры оптимизационных решений, сочетающая разнородные логистические стратегии (комбинация видов транспорта; использование искусственного интеллекта, цифровых платформ, блокчейн-технологий, инструментов управления адаптивными стратегиями и пр.).

Наблюдается двухэтапная гибридизация задачи NP ST для конкретного класса ТТС ST: т.е. гибридизация метаэвристик с последующей интеграцией в гибридную модель оптимизации ST-сети.

Польза от избыточности верификационной базы данных (ВБД) и излишней многофункциональности высокоинтегрированных логистических платформ (ВИ ЛП) является кажущейся и основана на недопонимании требуемого уровня меры (уровня эмерджентности – LoE) для реализации бизнес-проекта конкретного уровня сложности, что требует анализа актуальных возможностей и потребностей ТТС ST, ее ресурсов, необходимых для разработки и поддержки ВИ ЛП. Многофункциональность ЛП помогает в сложных масштабных проектах формата генеративного искусственного интеллекта (ИИ) и излишня в ресурсоограниченных задачах.

Практическая значимость создания классификатора параметров ST несомненна, поскольку на его базе формируются гибридные структуры требуемого уровня эмерджентности, как алгоритмов задачи маршрутизации транспорта (ЗМТ) - Vehicle Routing Problem (VRP), так и функционала цифровых интеллектуальных высокоинтегрированных логистических платформ и экосистем (ВИ ЛП/ ВИ ЛЭ**)** сетевых способов доставки грузов [2, 4 - 11]. Создание эффективных унифицированных систем управления сетевой логистикой связано с внедрением многопрофильных модульных высокоинтегрированных цифровых платформ (ВИ ЦП), как варианта требуемых цифровых решений.

Классификатор предназначен для количественного контроля требуемого уровня сложности, структуры ТТС ST, исходя из логистического принципа «ровно, сколько надо» в отношении уровня эмерджентности ТТС ST.

Анализ последних исследований

Продолжающиеся попытки структурировать терминологию сетевой логистики (СЦУ, интероперабельность, эмерджентность, проактивность, преадаптационность, синергия и т.п.), связанную с решением сложных задач класса NP, сталкиваются с многочисленными трудностями [1 - 3, 12], анализ которых иллюстрирует рисунок 1.

Трудности классификации ST связаны с противоречивым взаимодействием и интеграцией технологических, информационных, экономических, инфраструктурных и правовых факторов. Труднее всего алгоритмизации и классифицированию поддаются системы класса сложности NP (Nondeterministic Polynomial time). Эвристические алгоритмы**,** основанные на опыте и интуиции, заведомо упрощают объект. Чем большей сложностью обладает адаптивная система ST-сети, тем масштабнее когнитивные искажения при ее эвристическом описании или классификации (рисунок.1).

Таким образом, классификация ST, требующая многофакторного подхода (при определении комплексных критериев), должна сочетать различные экспертные подходы, базироваться на отдельных приоритетных свойствах определения логистической системы ST, ее ключевых факторах (KPI) и комплексных критериях (рейтинговых оценках).

Проведенный анализ современных научных публикаций [1-15] позволяет на основании развернутого определения ST и учета специфики алгоритмических подходов для решения ЗМТ [4 - 12] выявлять перечень ключевых показателей эффективности ST, которые предстоит заложить в основу планируемой классификации (Таблица 1) в каждом конкретном проекте. Анализ исследований подтверждает наличие многообразия как свойств ST, так и информационного инструментария ТТС, что отражается в многопараметрической структуре верификации баз данных ST и функционала платформенных решений [2, 7], в том числе уровня ВИ ЛП / ВИ ЛЭ. Конкретная избранная структура верификации баз данных сети фиксирует такой универсальный

классификационный параметр, как «уровень эмерджентности», который может быть использован при прогнозировании и контроле требуемого уровня сложности исследуемой структуры ТТС ST.



Рис.1. Трудности классификации синхромодальных сетей, выявленные на основе анализа научных исследований (разработано автором)

Основная часть. Классификация параметров транспортной сети

Проблемы терминологии ST. В концепции синхромодальных перевозок (Synchromodal transportation - ST) отсутствует единое определение, отраженное в нормативных документах, что позиционировало бы ST как подкласс смешанных перевозок [1-3]. Ныне смысл определения ST отражен в двух частях их наиболее признанных динамических свойств: 1) выбор транспорта осуществляется в режиме реального времени; 2) акцент на актуальные рыночные условия и текущие параметры логистических цепей [1, 2]. Данное определение, умалчивая о синергической направленности ST-сети, и, не отмечая целый ряд показателей эффективности (KPI) конкретной сети, одинаково подходит, как для иерархического (централизованного), так и распределенного сетецентрического управления (СЦУ). Вместе с тем ТТС ST, несомненно, относится к мультиагентным системам (MAS), представляя собой распределённую сеть автономных агентов, которые работают совместно для достижения общей цели в режиме реального времени. В таких системах каждый агент использует свою модель для прогнозирования поведения ТТС ST в своей зоне ответственности, а координация действий осуществляется в ЕИП сети. Т.е. недостаток приведенного выше определения состоит в том, что оно применимо как к сетям MPC (Model Predictive Control) с модельным прогнозирующим управлением (а это «классические» мультимодальные перевозки), так и к сетям DMPC (Distributed Model Predictive Control) с распределенным модельным прогнозирующим управлением ST [2].

Первый подход (MPC) реализует свойства синергии сети в едином правовом пространстве договора смешанной перевозки (ДСП) в части возможной консолидации по формуле «домашняя накладная – интеллектуальный грузовой агент – мастер-накладная» [2, 3]. Во втором подходе (DMPC) синергический эффект консолидации усиливается за счет нового формата сотрудничества в сети на принципах СЦУ [2, 12], т.е. более высоких «уровней эмерджентности», что должно быть отражено в определении ST.

В определении ST также нет упоминания свойств KPI, связанных со степенью многоканальности топологии сети интеллектуальных транспортных взаимодействующих сетевых подсистем MAS (Multi-Agent Systems) на базе распределенного СЦУ [1 - 3]. Серьезным упущением приведенного выше определения ST-сети является также отсутствие такого параметра, как интероперабельность (способность членов сети к обмену и использованию информации), что является основой формирования единого информационного пространства (ЕИП), как источника синергии.

Классификация с позиции KPI ST предполагает изучение как многосистемной ST-сети, так и параметров отдельных ее элементов (метаэвристик ЗМТ).

Классификация ТТС ST через ключевые показатели эффективности KPI

Качество синергических эффектов ТТС зависит от конкретных параметров сетевой организации, динамической маршрутизации, топологии сети и пр. [1 – 3, 12], когда сложная система ST из-за возникновения нового качества не может быть сведена к простой сумме своих отдельных элементов (свойство сетевой эмерджентности).

Эмерджентность ST (переход количественных изменений сети в новое качество) - это возникновение новых качеств сети (таких как консолидация, динамическая маршрутизация, масштаб, инструментарии формирования ЕИП и пр.) по сравнению с ее отдельными структурными элементами (узловыми агентами) [1 - 3, 12]. Для количественной многокритериальной оценки эффективности конкретной ТТС ST применяются интегральные наиболее информативные параметры - ключевые показатели эффективности KPI (Key Performance Indicators).

Малоинформативные, с точки зрения экспертов, KPI конкретной сети исключаются из рассмотрения [2]. При этом учет специфики исследуемой ТТС ST производится через ее KPI по трем [2, 12] взаимосвязанным областям: ЕИП (сетевая организация и СЦУ - I), многоканальная топология - II и динамическая маршрутизация - III (см. Таблицу1).

Синергию сети отражают KPI, которые обусловлены такими ее свойствами, как: адаптивность; способность мультиагентов MAS самостоятельно инициировать действия в интересах всех членов ТТС (проактивность); интероперабельность мультиагентов [2].

Состав KPI_i и их информативность γ_i соотносятся со свойствами конкретных ТТС ST с указанием классификационного подкода $\gamma_1(KPI_1)/ \dots / \gamma_i (KPI_i) /\dots / \gamma_n (KPI_n)$, где KPI_i - обозначение *i*-го подкода классификации. Эти KPI_i представлены в крайнем правом столбце Таблицы 1.

Для того чтобы определить информативность γ_i (удельный вес) каждого критерия, составляют таблицу (матрицу попарных сравнений), в которую вносят коэффициенты относительной важности a_{ij} одного критерия по сравнению с другим, используя избранную экспертами шкалу степени превосходства одного KPI над другим.

Таблица 1

Классификация ключевых показателей эффективности KPI кластеров

KPI ЕИП (сетевая организация и СЦУ) I		KPI многоканальной топологии II		KPI для оценки динамической маршрутизации III		KPI для оценки синергии
A, название	B, способ оценки	A, название	B, способ оценки	A, название	B, способ оценки	Подкод KPI_i классификации
Точность обработки данных	Доля ошибок в информационных системах, связанных с логистикой	Своевременность доставки (On-Time Delivery, OTD)	Процент заказов, доставленных в обещанные сроки	OTD	Количество доставок в срок / Общее количество доставок) 0%.	Соблюдение (соглашения об уровне обслуживания) SLA
Скорость обмена информацией SIE	Время передачи данных между участниками логистической цепочки	Затраты на транспортировку на единицу товара	Логистическая эффективность между регионами, ассортимент и т. д.	Затраты на транспортировку на единицу товара	Логистическая эффективность между регионами, ассортимент и т. д.	Сокращение времени цикла доставки SIE
Уровень интеграции информационных систем	Совместимость ERP, WMS, TMS и других систем, обеспечивающих ЕИП	Процент возвратов по причине транспортных повреждений или ошибок	Влияет на репутацию и издержки	Уровень отклонений от маршрута или графика	Стабильность исполнения планов и системы планирования	Интеграция данных и автоматизация процессов DIA
Прозрачность логистических операций и процессов	Доля информации, понятной для всех членов сети о состоянии логистических операций	Уровень удовлетворённости клиентов (NPS — Net Promoter Score)	Оценивается через опросы и обратную связь	Среднее время в пути (Transit Time)	Качество логистических процессов NPS	Снижение количества ошибок и возвратов NPS
Индекс совершенного заказа (Perfect Order Index, POI)	Своевременность доставки и полнота комплектации, корректность оформления документов	Уровень отклонений от маршрута или графика	Показывает стабильность исполнения планов	Доставка в срок и в полном объёме (On-Time In-Full, OTIF)	Более строгий показатель, чем OTD - в полном объёме всех позиций	OTIF (On Time In Full) Perfect Order Index POI
Уровень утилизации (загрузки) транспорта	Насколько эффективно используется грузовое пространство	Коэффициент загрузки транспорта TLF	Уровень использования грузового объёма или тоннажа	Коэффициент загрузки транспорта Transport load factor	Уровень использования грузового объёма или тоннажа	Уровень утилизации ресурсов TLF

Для таблицы характерно свойство обратной симметричности. На основе проведенного сравнения осуществляют расчет искомых весов (информативностей) критериев KPI. Для этого сначала определяем среднюю геометрическую из чисел в строках матрицы:

$$b_i = \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \ldots \cdot a_{in}}, \quad i = 1,n \tag{1}$$

Используя полученные данные, определяем удельные веса по формуле:

$$\gamma_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i}, \quad i = 1,n \tag{2}$$

Чем большей сложностью обладает эволюционирующая система ST, тем весомее становятся ее неустойчивость (например, через масштабный эффект) и уязвимость в части прогнозов и классификации.

Степень масштабируемости сети учитывается через ее рейтинг:

$$R = \sum \gamma_i \ z_i , \quad (3)$$

где z_i – нормированное значение i-го критерия (подкода) для ST-сети (здесь. γ_i – информативность i-го подкода).

При расчете рейтинга учет масштабируемости заложен в нормированных значениях z_i конкретной ST-сети [2].

Классификация с позиции KPI ST предполагает возможность изучения как многосистемной ST-сети MAS, так и параметров отдельных ее элементов, к примеру, «уровня эмерджентности» LoE (level of emergence) узловых терминальных агентов в задаче транспортной маршрутизации «Лазертаг» [2].

Структуризация динамической метаэвристики ЗМТ «Лазертаг»

Продуктивность описанной выше методики классификации иллюстрируется на примере метаэвристики «Лазертаг» при решении динамической ЗМТ с учётом конкретных условий в режиме реального времени. Метаэвристическая модель маршрутизации «Лазертаг» для синхромодальной ТТС [2] представляет собой вариант алгоритма адаптивной динамической приоритезации (АДП) при построении маршрута. Алгоритм АДП основан на последовательном многокритериальном избрании узлов с использованием взвешенных ключевых показателей эффективности KPI ST-сети.

В гибридной метаэвристике ЗМТ «Лазертаг» в работе [2] выделено десять простых метрик узлового агента ST-сети, которые отражают предпочтение его выбора при последовательных шагах оптимизируемого маршрута.

Рейтинг терминального узла формируется на основе этих показателей, преобразуемых по формуле (3) в единый показатель R, который отражает «уровень эмерджентности» LoE (level of emergence) конкретной структуры ST ТТС и ее метаэвристики.

Определение ST для распределённых систем, как основа ее классификации

Основа классификатора ST ТТС (Таблица 1) базируется на уточненном определении ST для распределённых систем при управлении DMPC:

ST-сеть формата DMPC – это сетевая мультимодальная система, реализуемая в ЕИП ST-сети, с тремя отличительными элементами расширения мультимодальной концепции:

- СЦУ в ТТС (сетевая организация) [2, 13];
- многоканальной топологии сети [12];
- динамической маршрутизации в сети, когда параметры оптимальной перевозки определяются в оперативном режиме [1 - 3].

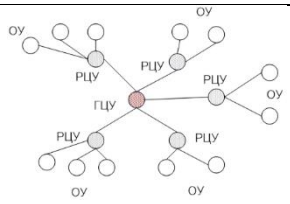
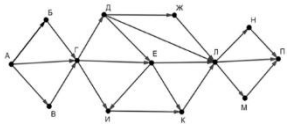
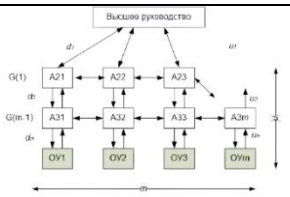
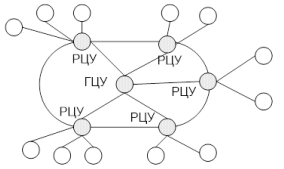
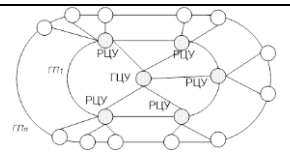
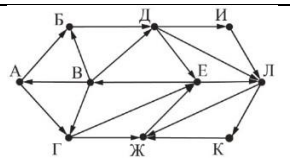
В сетях с сетецентрическим управлением взаимодействующие элементы MAS равноправны в отличие от иерархических сетевых структур концепции «классических» мультимодальных перевозок (отражено в Таблице 2).

Mesh-модель (ST- DMPC в Таблице 2) позволяет наиболее гибко адаптировать маршруты к текущим многокритериальным условиям, включая возникновение свободного тоннажа для возможной консолидации. Пример ее структурного классификационного кода: ST- DMPC/ TNM// γ_1(KPI$_1$)/ … / γ_i (KPI$_i$) /… / γ_n (KPI$_n$) / R,
где γ_i - информативность (удельный вес) каждого критерия KPI$_i$ (i-го подкода классификации из Таблицы 1).

Таким образом, классификация ST-сетей предполагает учет как их гибридного структурного многообразия, так и многообразия структур избранных метаэвристик ЗТМ, что отражено в Таблицах 1 и 2 кодификатора.

Таблица 2

Подходы к классификации планировочного каркаса терминальной сети

Код классификатора ST-TTC	Код формы управления	Топология	Сетевой график	Свойства организации
ST-MPC ST-сеть реализуется в рамках концепции «классических» ММП [1 - 3]	РИУ Distributed hierarchical management DHM	Главный центр управления (ГЦУ) Объекты управления (ОУ) Распределенные центры управления (РЦУ)		Высокая оперативность сети DHM
ST- MPC ST-сеть реализуется в рамках «классических» ММП [1 - 3]	Терминальная сеть Hub-and-Spoke Terminal network Hub-and-Spoke NHS	Периферийные спицы (Spoke) соединяются с центральными хабами (Hub)		NHS (все периферийные узлы соединяются с одним или несколькими хабами)
ST- MPC ST-сеть реализуется в рамках концепции «классических» ММП [1 - 3]	Матричная схема управления МСУ Matrix control scheme MCS	МСУ содержит регулирующие горизонтальные потоки *G* одного уровня матрицы.		*n* - число уровней, *m* - максимальное число элементов на нижнем уровне. Разгрузка органов управления MCS
ST- DMPC	субсидиарное управление ОСУ Single-circuit subsidiary management SSM	Модификация РИУ (контур управления замыкается) *Субсидиарность* в делегировании части функций из ГЦУ в РЦУ		Субсидиарность (делегирование), как модификация ОСУ и переход к сетецентрическому субсидиарному управлению (СЦУ) SSM
ST- DMPC	СЦУ Network-centric management NCM	Основой распределенного управления является сетецентрическое управление (СЦУ)		Это модификация матричного МСУ с внешним и внутренним уровнями NCM
ST- DMPC	Терминальная сеть Mesh-графа Terminal network Mesh-graph TNM	Принцип полносвязанной сети		Отсутствие централизованной иерархии в маршрутизации TNM

Мониторинг показателей эффективности KPI. Уровень эмерджентности

Алгоритм АДП (адаптивной динамической приоритизации) – это процедура динамического (изменяющегося во времени) присвоения приоритетов ST-сети (или ее узловым терминальным агентам [2]) с учётом текущих условий (масштабируемость). Такая система адаптируется к новым обстоятельствам, обновляя приоритеты в реальном времени, привлекая возможности методов верификации баз данных KPI ST. В системах с машинным обучением динамическая приоритизация может опираться на модели, которые обучаются на основе многофункциональной верификации баз данных (рисунок 2) и формируют многофакторные приоритеты R [2, 14, 15].

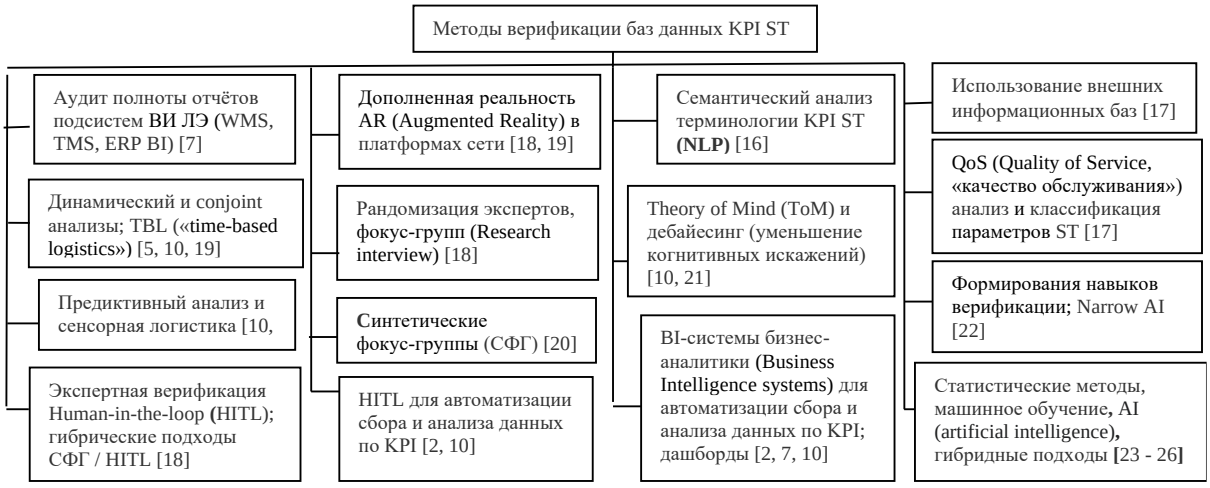


Рис.2. **Методы верификации баз данных синхромодальных сетей**

Автоматизация процессов верификации позволяет ускорить сбор данных, снизив риск ошибок, и повысить репрезентативность итоговых оценок в процессе управления KPI, подключая гибридный инструментарий синтетических фокус-групп в сочетании с Human-in-the-loop (HITL) и системой промптов.

Верификационная база эвристики ЗМТ повышает соответствие реальных условий динамической ST-сети принятым архитектурным и функциональным допущениям. Цель верификации баз данных при многокритериальном учёте KPI обеспечить их корректность и полноту, что особенно критично в сложных системах (формата Nondeterministic Polynomial time), где требуется анализ множества взаимосвязанных показателей KPI [27]. Учет разнообразия и сохранение сложности - это ресурс развития сложной ST-системы. Парадигма NOS (nonequilibrium open systems) [28] позволяет сформулировать эвристику "Lazertag NOS", акцентируя внимание на источниках синергии - разнообразии и функциональной избыточности сложных сетевых ST-систем. Эвристика требуемого уровня эмерджентности (LoE) класса NOS имитируется заданными проектировщиком блоками верификационной базы (рисунок 2), отражая временную эволюцию ST-сети. Таким образом, эвристика NOS может стать первоначальной основой для направления дальнейших исследований стимулов к самоорганизации ST-сети [28, 29].

Метаэвристика "Lazertag NOS" сетевой логистической системы синхромодальных перевозок в терминальной динамической сети выступает как набор методов, облегчающих поиск приемлемого решения в условиях ограниченной информации, или вычислительных ресурсов. Метаэвристика представляет собой метод получения приближённого решения задачи с усложненную высокоуровневую стратегию поиска приближённых решений с приобретёнными способностями и дополнительным функционалом.

Классификация основана на комплексном анализе изменения формата ST в рамках концепции мультимодализма с учетом таких новых элементов, как СЦУ и TBL (Time-based logistics) через экспертизу KPI и верификационную базу эвристики ЗМТ ST (индикаторы таблицы 1 и рисунок 2).

Выводы:

1. В статье рассматриваются принципы классификации динамических транспортно-терминальных сетей при мульти/синхромодальных перевозках. Разработанная система классификации основана на многокритериальном учете

параметров узлов терминальной сети с ориентацией на три возможных объединения (кластера) однородных параметров: прогнозирующего управления и сетевой организации (иерархических MPC или распределенных DMPC); топологии многоканальной сети; динамической маршрутизации в режиме реального времени. ЕИП DMPC в интегрированной системе данных, технологий и инструментов, которая обеспечивает обмен информацией между участниками логистических процессов, синхронизацию процессов и повышение эффективности управления цепями поставок в совокупности с СЦУ, формирует в режиме реального времени новые синергические свойства ST-сети.

2. В качестве параметров (набора критериев) каждого кластера использованы ключевые показатели эффективности KPI конкретной сети. Методика учитывает технологические, экономические и качественные аналоговые («мягкие») KPI. Итоговый состав KPI с указанием их информативности формирует структурный классификационный код конкретного объекта с рейтинговым учетом масштабируемости (уровня эмерджентности).

3. Создание верифицированных баз данных классификатора для устранения когнитивных искажений - сложная задача, которая требует комплексного подхода, сочетающего методы анализа данных (рисунок 2), машинного обучения, экспертного контроля. Верификация баз данных в контексте многокритериального учёта KPI служит основой для надёжного анализа, проектирования и платформенного управления сложными сетевыми системами ST, обеспечивая точность учета данных и адекватность решений. Верификация гарантирует пригодность допущений эвристики для анализа и помогает убедиться, что система KPI соответствует полноте установленных свойств классификации ST.

4. Разработана структура классификационного кода ST-сети, введено понятие уровня эмерджентности, отражающее временную эволюцию ТТС ST. Классификация основана на комплексном анализе изменения формата ST в рамках концепции мультимодализма с учетом таких новых элементов, как СЦУ и TBL (Time-based logistics) через экспертизу KPI и верификационную базу эвристики ЗМТ ST (индикаторы таблицы 1 и рисунок 2).

Список литературы

1.Ларин О.Н. Особенности терминологии по перевозкам с участием нескольких видов транспорта // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. №2. С. 107-114.URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-terminologii-po-perevozkam-s-uchastiem-neskolkih-vidov-transporta (дата обращения: 19.04.2026).

2. Глинский В.А. Эвристическая модель маршрутизации в синхромодальной терминальной сети // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2026. – № 1. – С. 196-213. eLIBRARY ID: 89221260 EDN: ZLYRRV

3.Куренков П.В., Преображенский Д.А. Экономика и логистика синхромодальных перевозок. Транспорт в интеграционных процессах мировой экономики // Материалы Международной научно-практической конференции. Издательство: «Белорусский государственный университет транспорта» 2020. С.172-174. LIBRARY ID: 48676867 EDN: ILVSKU

4. Аннабаева Н.Р. Решения задачи коммивояжёра // Наука и мировоззрение. 2025. №59. С. 43-48. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/resheniya-zadachi-kommivoyazhyora (дата обращения: 18.04.2026).

5. Антонов А.А., Дук Г.В., Чернышев С.А. Фреймворк для создания мультиагентных систем Вестник российского нового университета. серия: сложные

системы: модели, анализ и управление Номер: 2, Год: 2022. С. 109-118. eLIBRARY ID: 49056493 EDN: ZTNHJM DOI: 10.18137/RNU.V9187.22.02. С.109 – 117.

6. Яшин С.Н., Яшина Н. И., Кошелев Е.В., Иванов А.А. Метаэвристические алгоритмы в управлении инновациями: монография. Нижний Новгород: ООО «Печатная Мастерская РАДОНЕЖ», 2023. — 200 с.

7. Глинский В.А., Елисеева А.В., Иванов А.П. Тренажер оператора транспортно-терминальной сети на базе фреймворка Multitransglobal // В сборнике: Логистика - Евразийский мост. Материалы XX Международной научно-практической конференции. Красноярск, 2025. С. 94-98.

8. Габдулхаков А.А., Завалищин Д.С. Динамическая оптимизация сложных маршрутов в транспортной логистике // Современные наукоемкие технологии. — 2021. — №5. — С. 33-38. eLIBRARY ID: 46122276 EDN: KAXNOY DOI: 10.17513/snt.38654.

9. Завалищин Д.С., Тимофеева Г.А. Транспортная сеть с неопределенными параметрами: оптимизация маршрута // Транспорт Урала. — 2023. — №3. — С. 3–6. eLIBRARY ID: 20351134 EDN: RDIYHF.

10 -38. Чернышев Ю.О., Кубил В.Н. Обзор динамических задач маршрутизации транспорта // Программные продукты и системы. 2020. №3. С.491-501. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-dinamicheskih-zadach-marshrutizatsii-transporta (дата обращения: 25.04.2026).

11. Полупанова Е.Е., Рыбалко А.А. Алгоритм последовательной гибридизации для решения задачи коммивояжера // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. №3 (233). С. 108-118. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-posledovatelnoy-gibridizatsii-dlya-resheniya-zadachi-kommivoyazhera (дата обращения: 19.12.2025).

12. Глинский В.А., Зимирева А.Д. Сравнительный анализ топологий и алгоритмов маршрутизации в терминальных логистических сетях // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2025. – № 3. – С. 51-62. eLIBRARY ID: 83016301 EDN: XHLVKS

13. Глинский В.А. Ключевые элементы терминально-сетевой концепции синхромодальных перевозок // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2025. – № 1. – С. 52-67. EDN VHAWON.

14. Журавлев В.В. Обзор различных алгоритмов машинного обучения в задачах обнаружения и исправления ошибок данных // Universum: технические науки. 2024. №8 (125). С. 21-29. doi:10.32743/UniTech.2024.125.8.18127URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-razlichnyh-algoritmov-mashinnogo-obucheniya-v-zadachah-obnaruzheniya-i-ispravleniya-oshibok-dannyh (дата обращения: 17.04.2026).

15. Кущенко Р. Р., Соколов О. А. Интеллектуальная автоматизация логистических процессов на складе с применением гибридных алгоритмов управления // Вестник науки. 2025. №6 (87). с.1967- 1972 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-avtomatizatsiya-logisticheskih-protsessov-na-sklade-s-primeneniem-gibridnyh-algoritmov-upravleniya (дата обращения: 14.04.2026).

16. Чурилов А.А. NLP для анализа и классификации поисковых запросов // Universum: технические науки. 2026. №2 (143). С.43-48. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nlp-dlya-analiza-i-klassifikatsii-poiskovyh-zaprosov (дата обращения: 23.04.2026).

17. Белозерцева Н.П., Блюдик А.Р., Несповитый А.В. Перспективы применения цифровых логистических платформ в мультимодальных перевозках // Финансовые рынки и банки. 2024. №12. С.540-547 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-tsifrovyh-logisticheskih-platform-v-multimodalnyh-perevozkah (дата обращения: 23.04.2026).

18. Квале С. Исследовательское интервью. - М.: Смысл, 2003. --301 с. ISBN 5-89357-145-2.

19. Кузьминская А.Д., Тарасова Т.А. Методы оценки эффективности транспортной логистики // в сборнике трудов конференции ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского 2024. С 381-384 eLIBRARY ID: 67343866 EDN: ENRZQZ.

20. Филипова А.Г., Абросимова Е.Е., Зубова О.Г. Метод синтетических фокус-групп в контексте цифровой трансформации социологического исследования // Социодинамика. 2025. №5. С.1-7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-sinteticheskih-fokus-gruC-v-kontekste-tsifrovoy-transformatsii-sotsiologicheskogo-issledovaniya (дата обращения: 25.04.2026).

21. Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science, 185*(4157), 1124–1131.

22. Хорошилова Т. Н. Роль искусственного интеллекта в логистике: эффективность, вызовы и решения // Universum: технические науки. 2024. №11 (128). С.41-45 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-iskusstvennogo-intellekta-v-logistike-effektivnost-vyzovy-i-resheniya (дата обращения: 25.04.2026).

23. Иваев М.И., Акунишникова В.В., Кузнецова Я.В. Применение искусственного интеллекта и методов машинного обучения для решения транспортно-логистических задач // Индустриальная экономика. 2026. С. 47-52. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-iskusstvennogo-intellekta-i-metodov-mashinnogo-obucheniya-dlya-resheniya-transportno-logisticheskih-zadach (дата обращения: 26.04.2026).

24. Иванова Л.Н., Иванов С.Е. Методы оптимизации и алгоритм маршрутизации в транспортной логистике // ЭПИ. 2024. №4. С. 21-29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-optimizatsii-i-algoritm-marshrutizatsii-v-transportnoy-logistike (дата обращения: 26.04.2026).

25. Судоргин Р.О., Акиньшин Н.С., Никитин Д.В., Соловьев Н. В. Гибридный подход к робастной оптимизации грузопотоков на основе синергии машинного обучения и аппарата теории принятия решений // Вестник Донецкой академии транспорта. 2025. №4. С.147 -166. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/gibridnyy-podhod-k-robastnoy-optimizatsii-gruzopotokov-na-osnove-sinergii-mashinnogo-obucheniya-i-aCarata-teorii-prinyatiya (дата обращения: 26.04.2026).

26. Шарантаев А.Г., Морозова И.А. Система управления перевозками (TMS). Перспективы внедрения в России // The Scientific Heritage. 2023. №107. С. 20-23. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-upravleniya-perevozkami-tms-perspektivy-vnedreniya-v-rossii (дата обращения: 26.04.2026).

27. Седая М. О., Сараев Л. А. Теоретические аспекты разработки системы KPI: подходы и классификация // Экономика и бизнес: теория и практика. 2024. №12-1 (118). С. 201-205. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-razrabotki-sistemy-kpi-podhody-i-klassifikatsiya (дата обращения: 26.04.2026).

28. Асмолов А. Г., Шехтер Е. Д., Черноризов А. М.Преадаптация к неопределенности как стратегия навигации развивающихся систем: маршруты эволюции (Методология и теория). // Вопросы психологии. - 2017. - № 4. - С. 3-26. - Библиогр.: с. 19-26 (100 назв.). - ISSN 0042-8841.

29. Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами - Самара: Офорт, 2015. — 290 с. ISBN 978-5-473-01010-7.

References

1. Larin O.N. Features of terminology on transportation involving several modes of transport // Intellect. Innovations. Investments. 2020. No. 2. pp. 107-114.URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-terminologii-po-perevozkam-s-uchastiem-neskolkih-vidov-transporta (date of access: 04/19/2026).

2. Glinsky V.A. Heuristic routing model in a synchromodal terminal network // Bulletin of the Donetsk Academy of Motor Transport. – 2026. – No. 1. – Pp. 196-213. eLIBRARY ID: 89221260 EDN: ZLYRRV.

3. Kurenkov P.V., Preobrazhensky D.A. Economics and Logistics of Synchronous Transportation. Transport in the Integration Processes of the Global Economy // Materials of the International Scientific and Practical Conference. Publishing House: Belarusian State University of Transport, 2020. Pp. 172-174. LIBRARY ID: 48676867 EDN: ILVSKU

4. Annabaeva N.R. SOLVING THE COMMERCIALIST'S PROBLEM // Science and Worldview. 2025. No. 59. Pp. 43-48. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/resheniya-zadachi-kommivoyazhyora (accessed: 18.04.2026).

5. Antonov A.A., Duk G.V., Chernyshev S.A. Framework for Creating Multi-Agent Systems. Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, and Control Number: 2, Year: 2022. Pages: 109-118. eLIBRARY ID: 49056493 EDN: ZTNHJM DOI: 10.18137/RNU.V9187.22.02. Pages: 109-117.

6. Yashin S.N., Yashina N.I., Koshelev E.V., and Ivanov A.A. Metaheuristic Algorithms in Innovation Management: A Monograph. Nizhny Novgorod:LLC "Printing Workshop RANONEZ", 2023. — 200 p.

7.Glinsky V.A., Eliseeva A.V., Ivanov A.P. Simulator of the operator of the transport-terminal network based on the framework Multitransglobal // In the collection: Logistics - the Eurasian Bridge. Materials of the XX International scientific and practical conference. Krasnoyarsk, 2025. P. 94-98.

8. Gabdulkhakov A.A., Zavalishchin D.S. Dynamic Optimization of Complex Routes in Transport Logistics // Modern Science-Intensive Technologies. — 2021. — No. 5. — pp. 33-38. eLIBRARY ID: 46122276 EDN: KAXNOY DOI: 10.17513/snt.

9. Zavalishchin D.S., Timofeeva G.A. Transport Network with Uncertain Parameters: Route Optimization // Transport of the Urals. — 2023. — No. 3. — Pp. 3–6. eLIBRARY ID: 20351134 EDN: RDIYHF.

10. Chernyshev Yu.O., Kubil V.N. OVERVIEW OF DYNAMIC TRANSPORT ROUTING TASKS // Software products and systems. 2020. No. 3. Pp. 491-501. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-dinamicheskih-zadach-marshrutizatsii-transporta (accessed: 25.04.2026).

11. Polupanova E.E., Rybalko A.A. Sequential hybridization algorithm for solving the traveling salesman problem. Izvestiya SFU. Technical Sciences. 2023. No. 3 (233). Pp. 108-118 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-posledovatelnoy-gibridizatsii-dlya-resheniya-zadachi-kommivoyazhera (дата обращения: 19.12.2025).

12. Glinsky V.A., Zimireva A.D. Comparative Analysis of Topologies and Algorithms of Routing in Terminal Logistics Networks // Bulletin of the Donetsk Academy of Motor Transport. – 2025. – No. 3. – Pp. 51-62. eLIBRARY ID: 83016301 EDN: XHLVKS

13. Glinsky V.A. Key Elements of the Terminal-Network Concept of Synchronous Transportation // Bulletin of the Donetsk Academy of Motor Transport. – 2025. – No. 1. – Pp. 52-67. EDN VHAWON.

14. Zhuravlev V.V. Overview of Various Machine Learning Algorithms in Data Error Detection and Correction Tasks // Universum: Technical Sciences. 2024. No. 8 (125). Pages: 21-29. doi:10.32743/UniTech.2024.125.8.18127URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-razlichnyh-algoritmov-mashinnogo-obucheniya-v-zadachah-obnaruzheniya-i-ispravleniya-oshibok-dannyh (accessed: 17.04.2026).

15. Kushchenko R.R., Sokolov O.A. Intelligent automation of logistics processes in a warehouse using hybrid control algorithms // Bulletin of Science. 2025. No. 6 (87). pp. 1967-

1972. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-avtomatizatsiya-logisticheskih-protsessov-na-sklade-s-primeneniem-gibridnyh-algoritmov-upravleniya (accessed: 14.04.2026).

16.Churilov A.A. NLP for Analysis and Classification of Search Queries // Universum: Technical Sciences. 2026. No. 2 (143). Pp. 43-48. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nlp-dlya-analiza-i-klassifikatsii-poiskovyh-zaprosov (accessed: 23.04.2026).

17. Belozertseva N.P., Bludik A.R., Nespovity A.V. Prospects for the Use of Digital Logistic Platforms in Multimodal Transportation // Financial Markets and Banks. 2024. No. 12. Pp. 540-547 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-tsifrovyh-logisticheskih-platform-v-multimodalnyh-perevozkah (accessed: 23.04.2026).

18. Kvale S. Research interview. Moscow: Smysl, 2003.301 p. ISBN 5-89357-145-2

19. Kuzminskaya A.D., Tarasova T.A. Methods for Assessing the Efficiency of Transport Logistics // Proceedings of the Conference of the Vernadsky Crimean Federal University, 2024. Pp. 381-384. eLIBRARY ID: 67343866 EDN: ENRZQZ.

20. Filippova A. G., Abrosimova E.E., Zubova O.G. The method of synthetic focus groups in the context of digital transformation of sociological research // Sociodynamics. 2025. No.5. pp.1-7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-sinteticheskih-fokus-gruC-v-kontekste-tsifrovoy-transformatsii-sotsiologicheskogo-issledovaniya (date of access: 04/25/2026).

21. Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science, 185*(4157), 1124–1131.

22. Khoroshilova T. N. The Role of Artificial Intelligence in Logistics: Efficiency, Challenges, and Solutions // Universum: Technical Sciences. 2024. No. 11 (128). Pp. 41-45. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-iskusstvennogo-intellekta-v-logistike-effektivnost-vyzovy-i-resheniya (accessed: 25.04.2026).

23. Ivaev M.I., Akunishnikova V.V., Kuznetsova Ya.V. Application of Artificial Intelligence and Machine Learning Methods for Solving Transport and Logistics Problems // Industrial Economics. 2026. pp. 47-52. No. 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-iskusstvennogo-intellekta-i-metodov-mashinnogo-obucheniya-dlya-resheniya-transportno-logisticheskih-zadach (date of access: 04/26/2026).

24. Ivanova L.N., Ivanov S.E. Optimization methods and routing algorithm in transport logistics // EPI. 2024. №4. pp. 21-29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-optimizatsii-i-algoritm-marshrutizatsii-v-transportnoy-logistike (date of request: 04/26/2026).

25. Sudorgin R.O., Akinshin N.S., Nikitin D.V., Solovyov N.V. Hybrid Approach to Robust Optimization of Freight Flows Based on the Synergy of Machine Learning and Decision Theory // Bulletin of the Donetsk Academy of Transport. 2025. No. 4. pp.147-1166. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/gibridnyy-podhod-k-robastnoy-optimizatsii-gruzopotokov-na-osnove-sinergii-mashinnogo-obucheniya-i-aCarata-teorii-prinyatiya (date of reference: 26.04.2026).

26. Sharantaev A. G., Morozova I. A. Transportation Management System (TMS). Prospects for Implementation in Russia // The Scientific Heritage. 2023. No. 107. Pp. 20-23. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-upravleniya-perevozkami-tms-perspektivy-vnedreniya-v-rossii (accessed: 26.04.2026).

27. Sedaya M. O., Saraev L. A. Theoretical Aspects of Developing a KPI System: Approaches and Classification // Economics and Business: Theory and Practice. 2024. No. 12-1 (118). Pp. 201-205. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-razrabotki-sistemy-kpi-podkhody-i-klassifikatsiya (accessed: 26.04.2026).

28. Asmolov A. G., Shekhter E. D., Chernorizov A. M. Pre-adaptation to uncertainty as a navigation strategy for developing systems: evolution routes (Methodology and theory). //

Voprosy Psikhologii. - 2017. - No. 4. - Pp. 3-26. - Bibliogr.: pp. 19-26 (100 titles). - ISSN 0042-8841.

29. Rzhevsky, G.A., and Skobelev, P.O. How to Manage Complex Systems. Samara: Ofort, 2015. 290 p. ISBN 978-5-473-01010-7.

Glinskiy V.A.

CLASSIFICATION OF SYNCHROMODAL NETWORKS IN THE STRUCTURING OF METAHEURISTICS IN TRANSPORT ROUTING PROBLEMS

Abstract. The article considers a code system for classifying dynamic transport and terminal networks (TTN) in multi/synchromodal transportation (Multi/Synchromodal transportation - ST). The developed classifier is based on a multi-criteria account of key performance indicators (KPI) in three areas (clusters): predictive management and network organization; topology; and dynamic routing. The methodology takes into account the technological, economic, and qualitative analog ("soft") parameters of the network participant's interaction through the procedure of assigning priorities to the ST-networks node terminal agents, taking into account the current conditions. Based on the classifier, hybrid structures of the required level of ST TTN metaheuristics can be formed, and the optimal platform structure of the synchronous network can be quantitatively controlled.

Keywords: network-centric management (NCM); synchronous transportation (ST); dynamic transportation routing task (TRT); multi-agent technologies (MAS); level of emergence (LoE); adaptive dynamic prioritization (ADP).

Сведения об авторе:

Глинский Владимир Анатольевич
Санкт-Петербургский Государственный Университет Гражданской Авиации им. А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Россия,
Доцент, кандидат технических наук,
vglinskiy@yandex.ru

Information about the author:

Glinskiy Vladimir Anatolyevich
St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov, St. Petersburg, Russia,
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,
vglinskiy@yandex.ru

УДК 656.1.07:711.4

Коржова А.В., Мозалевский Д.В.

АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКОГО СПРОСА НА МАШИНО-МЕСТА В СОВРЕМЕННОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКЕ

Аннотация. *В статье рассматривается проблема несоответствия действующих градостроительных норм Республики Беларусь фактическому уровню автомобилизации в новых жилых микрорайонах. На примере натурных исследований, проведенных в микрорайонах, авторами проанализирована заполняемость парковочных пространств в дневное и ночное время. Установлено, что при нормативном требовании обеспечения 100% парковочных мест (1 место на 1 квартиру), фактическое владение автомобилями составляет 0,61–0,65 единиц на квартиру. Выявлено, что избыточное предложение машино-мест в платных паркингах при наличии свободных бесплатных зон ведет к нерациональному использованию городских территорий. В работе обосновывается необходимость снижения расчетного коэффициента обеспеченности парковками до 0,7 для перспективной застройки. Рассматриваются факторы изменения транспортного поведения населения, такие как развитие шеринговой экономики и удаленной работы, влияющие на снижение темпов автомобилизации.*

Ключевые слова*: организация дорожного движения, парковочное пространство, автомобилизация, жилая застройка, машино-место, транспортное поведение, мониторинг парковок.*

Постановка задачи

Обеспечение жилой застройки местами для хранения автомобилей является одной из наиболее острых задач городского планирования. Действующий технический нормативный правовой акт СН 3.01.03-2020 «Планировка и застройка населенных пунктов» устанавливает жесткое требование: проектирование автостоянок и парковок для хранения 100% расчетного парка автомобилей, но не менее одного машино-места на одну квартиру [1]. Однако наблюдаемые тенденции в крупных агломерациях указывают на изменение транспортных привычек населения и стабилизацию уровня автомобилизации [2,3]. Создание избыточного парковочного пространства не только увеличивает финансовую нагрузку на застройщиков и конечных потребителей, но и вступает в противоречие с концепциями устойчивой мобильности [4,5].

Анализ последних исследований

Вопросы планирования парковочного пространства в структуре жилой застройки являются предметом дискуссий в транспортной науке на протяжении десятилетий [6]. Классический подход к нормированию, основанный на принципе «прогнозирование и обеспечение», в последние годы подвергается серьезной критике [7-9]. Некоторые исследования доказывают, что установление минимальных требований к количеству машино-мест приводит к искусственному занижению стоимости владения автомобилем и, как следствие, к неоправданному росту уровня автомобилизации [7]. Также

установлено, что избыточное предложение парковок увеличивает стоимость строительства жилья и способствует расползанию городов.

В некоторых работах рассматривается баланс между общественным и личным транспортом [10]. Многие авторы подчеркивают, что избыток парковочных мест в жилых зонах дестимулирует использование систем массового транзита и вступает в противоречие с принципами устойчивого развития городов, а управление парковочным пространством является наиболее эффективным рычагом регулирования транспортного спроса [11-13].

Отечественная школа транспортного планирования традиционно уделяла внимание расчетным показателям вместимости стоянок в зависимости от категорий жилья [14,15]. Однако современные исследования в условиях Минска указывают на трансформацию транспортного поведения населения. Исследования некоторых ученых подтверждают, что в условиях высокой плотности застройки и развития мультимодальных транспортных систем (MaaS – Mobility as a Service) происходит стабилизация уровня индивидуального владения ТС при росте интенсивности использования альтернативных видов мобильности [16-17]. Влияние цифровизации и шеринговой экономики на потребность в стационарных парковочных местах рассматривается в работах зарубежных исследователей (например, влияние каршеринга на снижение индивидуального автопарка в соотношении 1:11). Кроме того, пандемия COVID-19 и последующий массовый переход на дистанционные формы занятости существенно изменили суточную динамику занятости машино-мест.

Жёсткое нормирование «1 квартира = 1 место» в ряде случаев приводит к эффекту индуцированного спроса, стимулируя избыточное использование личного транспорта. Зарубежный опыт (концепция Vision Zero, принципы TOD-застройки) также подтверждает эффективность гибкого регулирования количества машино-мест в зависимости от транспортной доступности района и уровня развития общественного транспорта. Несмотря на наличие значительного объема теоретических изысканий, существует дефицит прикладных натурных исследований, фиксирующих фактический разрыв между требованиями ТНПА (в частности, СН 3.01.03-2020), а также и реальным спросом в новых типах жилой застройки, характеризующихся «пешеходоцентричным» дизайном.

Цель работы

Целью работы является проведение сравнительного анализа фактической занятости машино-мест и нормативных требований в современных жилых районах г. Минска и пригорода, а также научное обоснование возможности снижения расчетных коэффициентов парковочной обеспеченности.

Основная часть

Методика исследования базировалась на проведении натурных обследований в три этапа: определение инвентарного количества существующих мест, фиксация фактического количества припаркованных ТС в периоды «пикового» (ночное время с 23:00 до 05:00) и «дневного» спроса, а также сопоставление полученных данных с количеством квартир.

Объектами исследования выступили три района: микрорайоны 8 и 9 «Новой Боровой», ЖК «Пирс» и ЖК «Уручский-2». Общая выборка составила более 5000 квартир и соответствующее им парковочное пространство.

По результатам проведенных исследований были построены диаграммы, отражающие количество транспортных средств, припаркованных на машино-местах и вне размеченных машино-мест, а также загруженность существующих стоянок и

парковок с учетом времени проведения исследования. Следует отметить, что только часть транспортных средств, которые припаркованы вне размеченных мест, расположена с нарушением Правил дорожного движения. В данной работе специально они не выделяются в отдельную группу, поскольку целью является определение реальной потребности в машино-местах, а не количество нарушений.

Диаграммы фактического количества транспортных средств и машино-мест для исследуемых районов в дневной и ночной периоды соответственно приведены на рисунках:

- для жилого района «Новая Боровая» на рисунках 1 – 3;
- для жилого района «Пирс» на рисунках 4 – 5;
- для жилого района «Уручский-2» на рисунках 6 – 8.

Для каждого характерного участка указано количество машино-мест (верхнее число) и фактическое количество припаркованных на них транспортных средств (нижнее число), а также дополнительно в соседнем столбце указано количество транспортных средств вне размеченных машино-мест. Таким образом, на диаграммах показана фактическая загруженность парковок (стоянок).

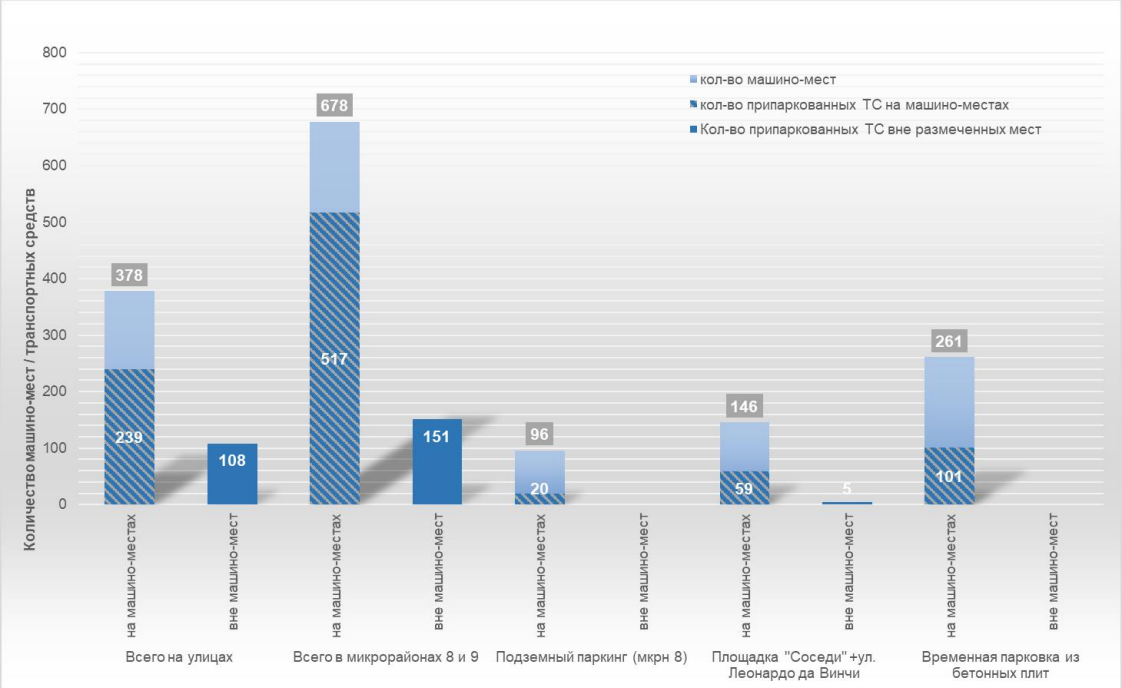


Рис. 1. Количество машино-мест и припаркованных транспортных средств в исследуемом районе «Новая Боровая» в дневной период

В микрорайоне «Новая Боровая» в дневной период машино-места, расположенные на улицах и внутри микрорайона, заняты на 65-75%, машино-места на временной парковке и парковке магазина «Соседи» загружены на 40%. Вне парковочных мест размещаются примерно 260 автомобилей, что составляет около 22% от всех припаркованных автомобилей.

В ночной период загрузка парковок вдоль улиц вырастает и достигает практически 100%, загрузка некоторых парковок внутри микрорайона превышает 100% за счет изменения способа парковки на машино-местах (не вдоль бортового камня, а под углом 90 градусов) и несанкционированной парковки на машино-местах для инвалидов. Количество припаркованных автомобилей вне парковочных мест возрастает до 554 единиц (29% от всех припаркованных автомобилей, рисунок 3). Однако временная

парковка и парковка магазина «Соседи» заполнены менее чем наполовину – загрузка составляет около 30 - 45%. Загрузка парковки магазина «Соседи» снизилась по сравнению с дневным периодом.

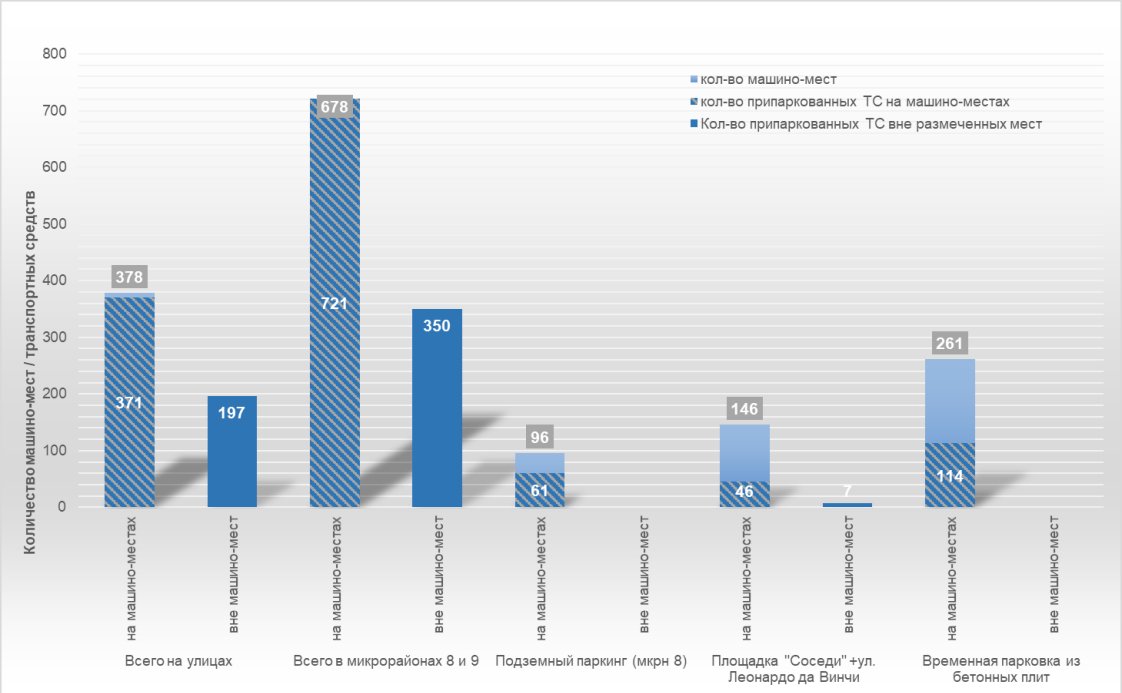


Рис. 2. Количество машино-мест и припаркованных транспортных средств в исследуемом районе «Новая Боровая» в ночной период

На рисунке 3 показаны соотношение количества припаркованных транспортных средств по способу и месту парковки в ночной период.

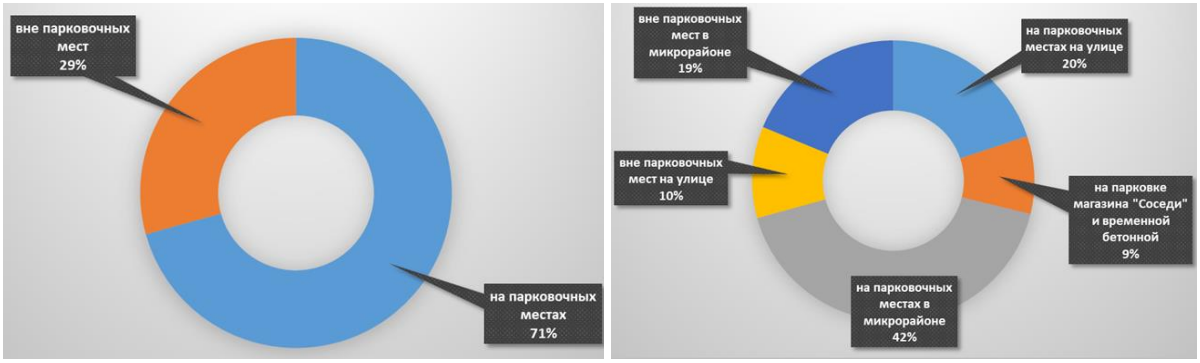


Рис. 3. Распределение припаркованных транспортных средств по способу и месту парковки в исследуемом районе «Новая Боровая» в ночной период

Результаты исследований показывают, что в ночной период около 29% автомобилей (554 ед.) припаркованы вне выделенных машино-мест. Автомобили расположены вдоль проезжей части, на проездах у жилых домов, но не на свободной наполовину парковке из бетонных плит, расположенной вне жилой застройки.

Также результаты исследований показывают, что из 71% автомобилей, припаркованных на предусмотренных машино-местах, 42% расположены в границах жилой застройки, а остальные 29% расположены на машино-местах за пределами жилой застройки – на улицах (20%) и специализированных парковках (9%).

Из рисунка видно, что 10% автомобилей (197 ед.) припаркованы вдоль края проезжей части улиц вне специальных мест, а 19% (350 ед.) вне специальных мест внутри кварталов (на проездах у жилых домов).

В микрорайоне «Пирс» в дневной период машино-места, расположенные внутри микрорайона заняты в среднем на 30%, но локально возле многоэтажной застройки загруженность составляет 60% (рисунок 4). На парковках и стоянках вне огороженной территории загруженность составляет около 20%, кроме мест у дома по ул. Морской Риф, 1 (парковка, ближайшая к подъездам также загружена на 65%, примерно так же, как и возле многоэтажной застройки). Вне парковочных мест размещаются примерно 50 автомобилей.

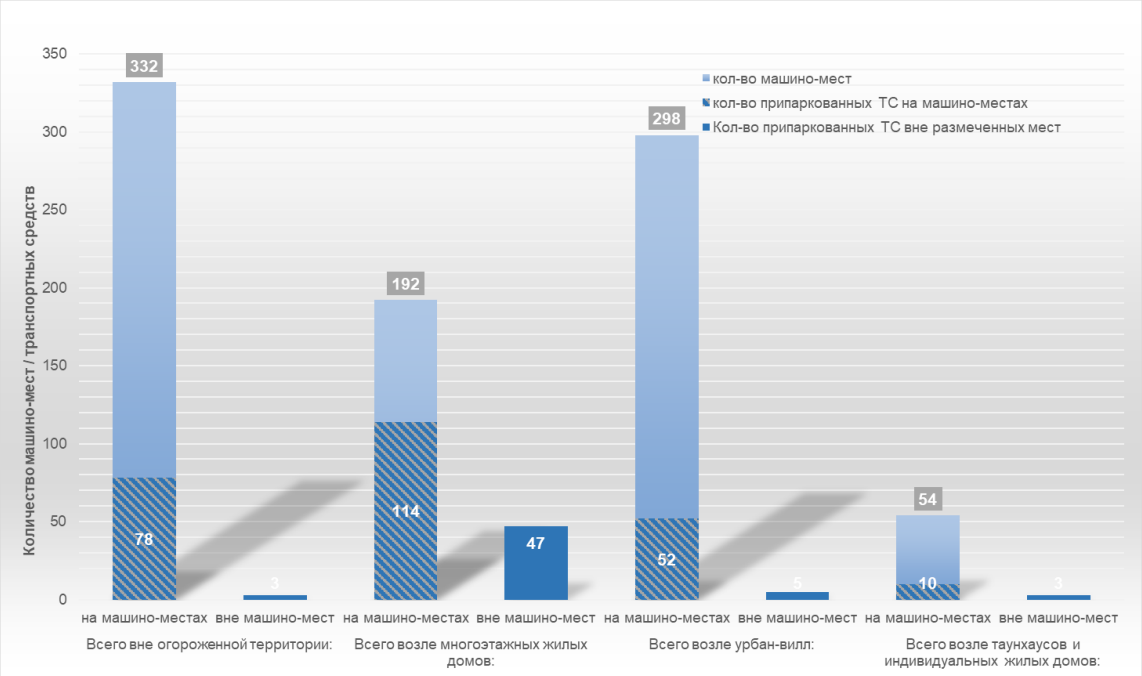


Рис. 4. Количество машино-мест и припаркованных транспортных средств в исследуемом районе «Пирс» в дневной период

В ночной период загрузка парковок внутри микрорайона возрастает и достигает в среднем 60%, но локально возле многоэтажной застройки загруженность достигает 85% (рисунок 5). Количество припаркованных автомобилей вне парковочных мест незначительно возрастает до 70 единиц, однако парковки вне огороженной территории заполнены менее чем наполовину – загрузка составляет в среднем около 30%. Причем наиболее загружена по-прежнему парковка, ближайшая к подъездам дома по ул. Морской Риф, 1 (на 90%).

В микрорайоне «Уручский-2» в дневной период (рисунок 6) машино-места, расположенные вдоль улиц и внутри микрорайона, заняты на 60%, машино-места на парковке с общим доступом около ул. Подгорной загружены на 35%. Парковки в северной части ул. Лопатина с ограничением доступа загружены на 10%. Вне парковочных мест размещаются примерно 150 автомобилей, что составляет около 39% от всех припаркованных автомобилей.

В ночной период (рисунок 7) загрузка парковок вдоль улиц и внутри микрорайона вырастает и превышает 100% за счет более плотной расстановки транспортных средств, парковки транспортных средств на машино-местах для инвалидов (как правило с нарушением Правил дорожного движения). Парковка с общим доступом около ул.

Подгорной загружена более чем на 100%. Количество припаркованных автомобилей вне парковочных мест на улицах (в основном ул. Михайлашева и ул. Подгорная) и внутри микрорайона возрастает до 352 единиц (42% от всех припаркованных автомобилей, рисунок 8). Однако парковки с ограничением доступа, которые являются платными, остаются заполнены только на 20% (парковки, предусмотренные для микрорайона) и 5% на ул. Лопатина возле автодороги Н-9031.

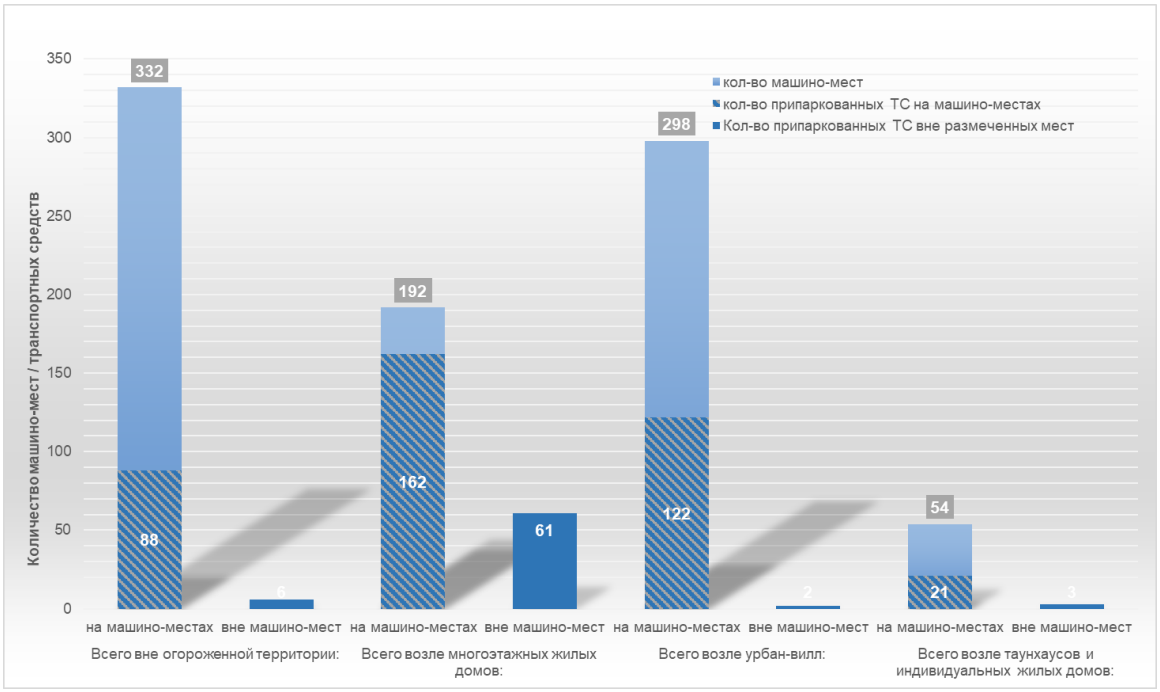


Рис. 5. Количество машино-мест и припаркованных транспортных средств в исследуемом районе «Пирс» в ночной период

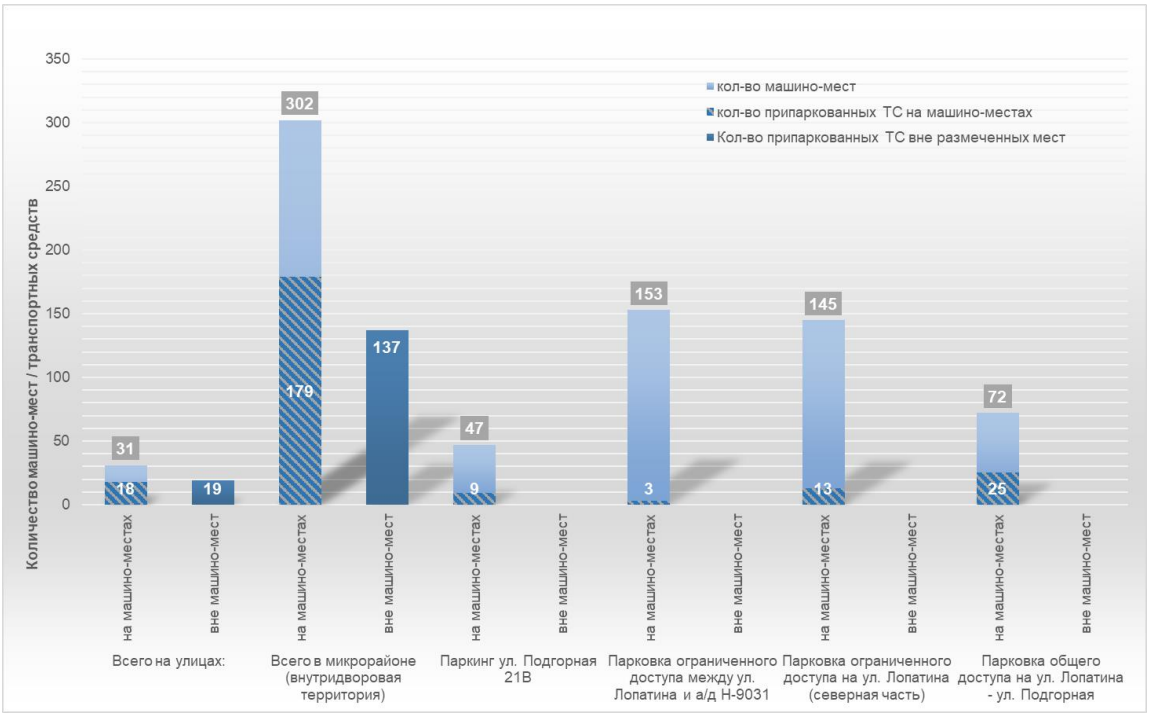


Рис. 6. Количество машино-мест и припаркованных транспортных средств в исследуемом районе «Уручский-2» в дневной период

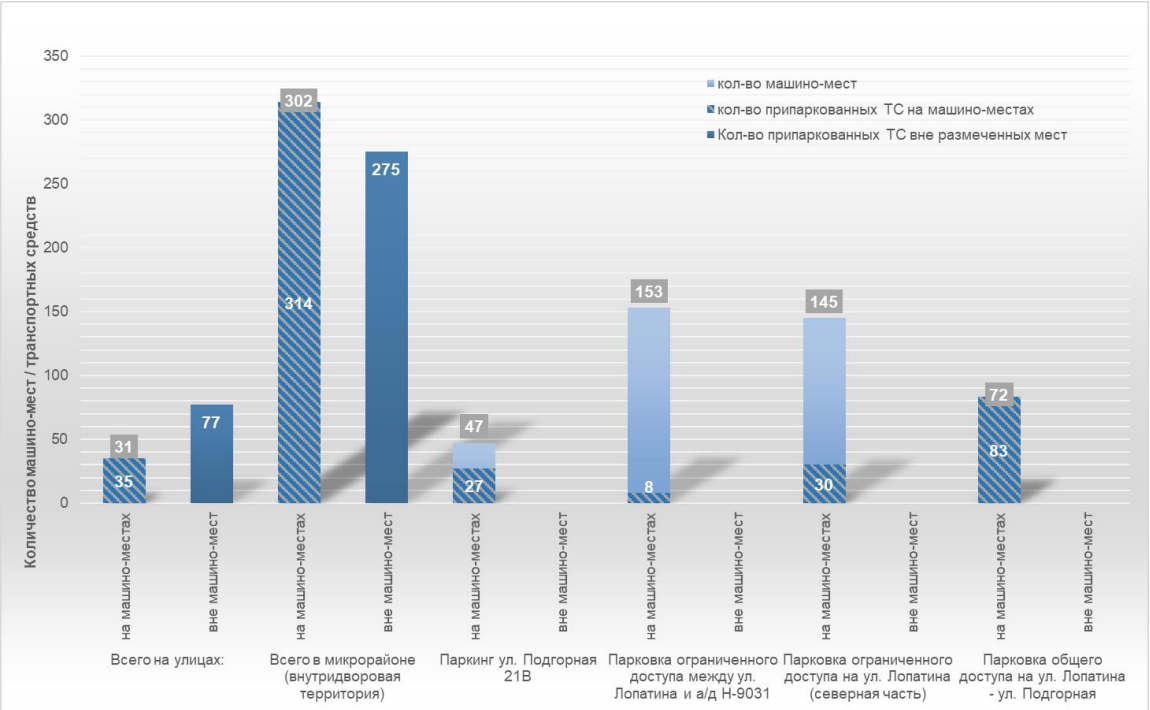


Рис. 7. Количество машино-мест и припаркованных транспортных средств в исследуемом районе «Уручский-2» в ночной период

На рисунке 8 показаны соотношение количества припаркованных транспортных средств по способу и месту парковки.

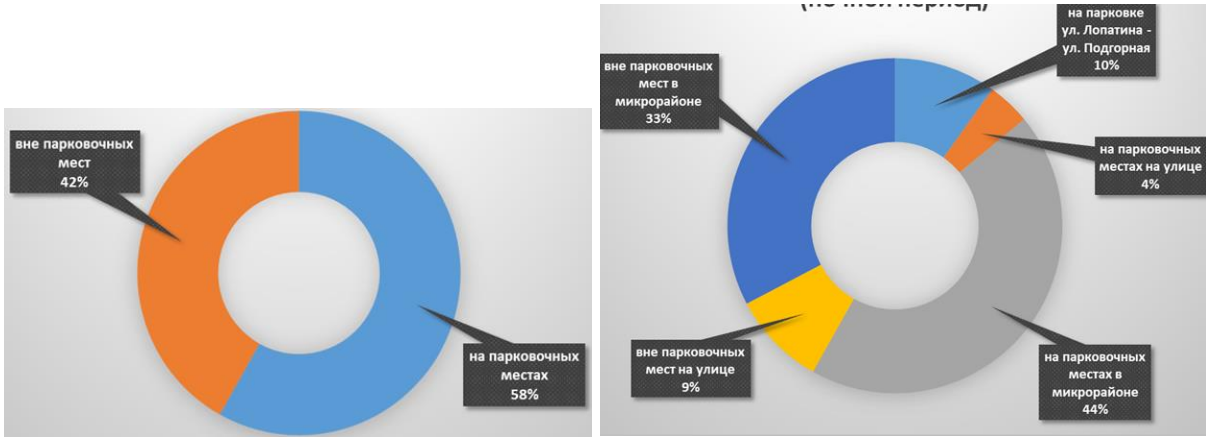


Рис. 8. Распределение припаркованных транспортных средств по способу и месту парковки в исследуемом районе «Уручский-2» в ночной период

Результаты исследований показывают, что в ночной период около 42% автомобилей (352 ед.) припаркованы вне выделенных машино-мест. Автомобили расположены вдоль проезжей части, на проездах у жилых домов, но не на свободных платных стоянках, расположенных внутри и вне жилой застройки. Также результаты исследований показывают, что из 58% автомобилей, припаркованных на предусмотренных машино-местах, 44% расположены в границах жилой застройки, а остальные 14% расположены на машино-местах за пределами жилой застройки – на улицах (4%) и на бесплатной парковке вне исследуемого жилого района (10%). Из рисунка видно, что 9% автомобилей (77 ед.) припаркованы вдоль края проезжей части

улиц вне специальных мест, а 33% (275 ед.) вне специальных мест внутри кварталов (на проездах у жилых домов).

Таким образом, в микрорайоне «Новая Боровая» (2887 квартир) в ночное время зафиксировано 1867 автомобилей. Таким образом, фактическое соотношение составило 0,65 автомобиля на одну квартиру. При этом наблюдается неравномерность распределения: внутриквартальные проезды и уличная сеть загружены на 95–110%, в то время как удаленные плоскостные стоянки и платные паркинги имеют значительный резерв (загруженность 35–45%). В ЖК «Уручский-2» (1378 квартир) ситуация аналогична: припаркован 841 автомобиль в ночное время, что соответствует коэффициенту 0,61. Исследование показало, что жители стремятся парковать транспорт максимально близко к подъездам, игнорируя организованные места хранения, если они расположены на расстоянии более 300–400 метров или являются платными. Это подтверждает, что физическое наличие машино-места в отрыве от его доступности и стоимости не решает проблему ОДД.

Сводные данные по фактической обеспеченности представлены в таблице 1.

Таблица 1

Соотношение фактического количества припаркованных транспортных средств и количества квартир

Микрорайон	Количество квартир	Количество припаркованных автомобилей		Соотношение факт. количества а/м к количеству квартир	
		день	ночь	день	ночь
Новая Боровая					
- микрорайон 8	1390	636	909	0,46	0,65
- микрорайон 9	1497	564	958	0,38	0,64
Суммарно «Новая Боровая»	2887	1200	1867	0,42	0,65
Пирс*					
- многоэтажная застройка	532	242	317	0,45	0,60
- урбан-виллы	210	57	124	0,27	0,59
- таунхаусы и индивидуальные жилые дома	27	13	24	0,48	0,89
Суммарно «Пирс»	769	312	465	0,41	0,60
ЖК «Уручский-2»	1378	400	841	0,29	0,61

* Примечание. Поскольку в микрорайоне «Пирс» размещены различные типы жилой застройки, то для сравнения следует рассматривать те параметры, которые относятся к зоне многоэтажной жилой застройки – без учета урбан-вилл, таунхаусов и индивидуальных жилых домов. Но в целом показатели по району «Пирс» и для многоэтажной застройки несколько отличаются только в дневной период (0,45 для многоэтажной застройки и 0,41 в среднем по микрорайону), а в вечернее время сопоставимы (0,6 как для высокоэтажной застройки, так и для всего микрорайона). Отчасти это связано с тем, что все машино-места за границей территории отнесены условно к многоэтажной застройке.

На рисунке 9 в графическом виде представлено соотношение фактического количества транспортных средств в исследуемых районах к количеству квартир, а также показано соотношение требуемого количества машино-мест для жителей района по СН 3.01.03-2020 к количеству квартир. Нормативное минимальное соотношение количества машино-мест и количества квартир по п. 11.7.1 СН 3.01.03-2020 принято 1,0 по критерию 1 машино-место на 1 квартиру.

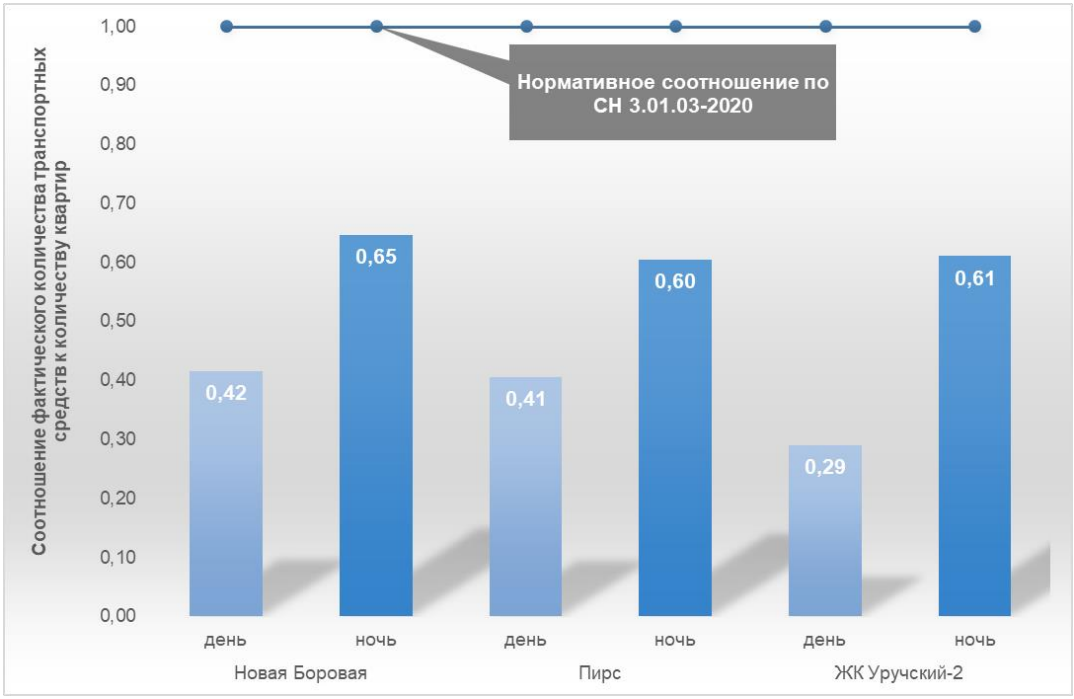


Рис. 9. Фактическое и нормативное соотношение машино-мест к квартирам в исследуемых районах

Как видно из диаграммы, даже в ночное время фактическое количество автомобилей меньше нормативного на 35-40%. На данный момент нормативное требование для исследуемых районов избыточно и принято со значительным запасом в целом.

Для оценки долгосрочных трендов был проведен анализ динамики уровня автомобилизации в Республике Беларусь. Согласно данным ГУ ГАИ МВД, период бурного роста (2004–2011 гг.) со средним темпом 6–8% в год сменился стадией насыщения. Снижение прироста уровня автомобилизации связано с развитием городского пассажирского транспорта, распространением новых технологий в сфере транспортного и бытового обслуживания (сервисы доставок, каршеринг, развитие сервисов такси (яндекс-такси и пр.)), увеличением стоимости содержания и обслуживания личного автомобиля (рост цен на топливо и запчасти, налоги), снижением стоимости перевозок в сфере такси и увеличением доли лиц, работающих удаленно. Все эти факторы постепенно изменяют транспортное поведение людей и уменьшают необходимость использования и важность владения личным автомобилем. В период 2015–2022 гг. ежегодный прирост парка в г. Минске стабилизировался на уровне 0,84%. Используя формулу прогноза:

$$N_{прогн} = N_{2022} (1+\Delta k)^t, \quad (1)$$

где $N_{прогн}$ – количество автомобилей в районе к расчетному году;

N_{2022} – количество автомобилей в районе в 2022 г. (по результатам исследований) за период t (срок реализации ПДП – 10 лет);

Δk – среднегодовой прирост;

можно рассчитать потребность на 1 квартиру к 2032 году при сохранении текущих трендов: $0,63 \cdot (1+0,0084)^{10} \approx 0,685$. Таким образом, расчетная величина 0,7 машино-места на одну квартиру является научно обоснованной и содержит необходимый резерв на десятилетнюю перспективу.

Экономические и социальные факторы. Снижение норматива с 1,0 до 0,7 имеет глубокое экономическое обоснование. Стоимость возведения одного машино-места в

подземном паркинге составляет существенную часть стоимости квартиры. При текущей востребованности таких мест на уровне 60–65%, застройщики несут убытки, которые перекладываются на стоимость жилой площади. Изменение транспортного поведения горожан также играет ключевую роль. Появление сервисов такси с алгоритмами оптимизации цен и развитие каршеринга делает владение вторым (а зачастую и первым) автомобилем в семье экономически невыгодным. В исследуемых районах обеспеченность общественным транспортом и близость к станции метро дополнительно дестимулируют использование личных автомобилей.

Выводы

1) Натурные исследования подтвердили, что фактическая потребность в машино-местах в современных жилых комплексах Минского региона на 35–40% ниже установленных нормативов.

2) Текущее требование обеспечения 100% парковочными местами парка личных автомобилей (1:1) является избыточным для районов с развитой транспортной инфраструктурой и альтернативными видами мобильности.

3) Обоснована возможность отступления от норм п. 11.7.1 СН 3.01.03-2020 и снижения расчетного критерия до 0,7 машино-места на 1 квартиру для жилой застройки в конкретных новых микрорайонах.

4) Предложенная корректировка позволит снизить неоправданные затраты на капитальное строительство подземных и многоуровневых стоянок, востребованность которых остается низкой (на уровне 60–65%) (снизит финансовую нагрузку не только на застройщиков, но и на граждан данного района и в перспективе на объекты коммунального хозяйства).

5) Направлением дальнейших исследований является проведение периодического мониторинга ситуации потребности в машино-местах в жилых районах каждые два года с последующим направлением на Министерство архитектуры и строительства для контроля разработанных предложений по отступлению от норм с целью их принятия в качестве нормативных и изменения действующих строительных норм.

Список литературы

1. СН 3.01.03-2020. Планировка и застройка населенных пунктов : утв. Постановлением Министерством архитектуры и строительства Республики Беларусь 27.11.2020 № 94. – Минск : МАиС РБ, 2020. – 58 с.

2. Донченко, В. В. Оценка качества функционирования городских транспортных систем / В. В. Донченко, С. А. Андреев, В. В. Калинина // Вестник Донецкой академии транспорта. – 2026. – № 1. – С. 99-128. – EDN TRJNIS.

3. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития / А. О. Лобашов, Е. Н. Кот, Д. В. Капский [и др.]. – Вологда : Издательство "Инфра-Инженерия", 2023. – 236 с. – ISBN 978-5-9729-1491-3. – EDN ADEWPO.

4. Планирование устойчивой городской мобильности / И. Н. Пугачев, А. О. Лобашов, С. С. Семченков [и др.]. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2023. – 147 с. – ISBN 978-5-262-00939-8. – EDN DOUXSG.

5. Михайлов, А. Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов / А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. – Новосибирск : Наука, 2004. – 267 с.

6. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2006. – 239 с. – EDN SPGLSP.

7. The High Cost of Free Parking Donald C. Shoup Department of Urban Planning University of California, Los Angeles Los Angeles, CA 90095-1656 Reprinted from Journal of Planning Education and Research vol. 17, pp. 3-20 (1997) URL: https://gruene-dieburg.de/download/stellplatzsatzung-20100430/2b-the_high_costs_of_free_parking.pdf

8. Юрченко Д.А. Совершенствование методов транспортного планирования за счет обследования придомовых территорий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Юрченко Дмитрий Алексеевич. - Орел, 2020. - 24 с.

9. Валиева, А. Р. Анализ существующих мест хранения транспорта в Г. Воронеж и способы организации парковочных пространств в мировой практике / А. Р. Валиева, А. Е. Енин, В. Н. Салько // Архитектурные исследования. – 2023. – № 1(33). – С. 92-99. – EDN TFAXZE.

10. Бояршинов М. Г., Щукин Ю. А. Особенности функционирования придорожного парковочного пространства // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 6. – С. 89–108. – https://doi. org/10.25198/2077-7175-2024-6-89.

11. Д. А. Пичугина, И. А. Антипин ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА РАЗВИТИЕ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ И ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ // Экономика и бизнес: теория и практика. 2025. №6 (124), pp. 173-179. doi:10.24412/2411-0450-2025-6-173-179.

12. Скоробогатых И. И., Сидорчук Р. Р., Мусатов Б. В., Мешков А. А. Нормативный подход в маркетинговых исследованиях по оценке обеспеченности жителей парковочными местами в городе Москве // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. 2020. №3-1, pp. 931-934.

13. Устойчивые транспортные системы городов : учебник / Д. В. Капский, А. О. Лобашов, И. Н. Пугачев [и др.]. – Вологда : «Инфра-Инженерия», 2025. – 128 с. – ISBN 978-5-9729-2405-9. – EDN TWGCFU.

14. Шештокас, В.В. Гаражи и стоянки / В.В. Шештокас, В.П. Адамавичюс, П.В. Юшкявичус - Москва: Стройиздат, 1984 -214 с.

15. Транспортная планировка городов: [учебник для вузов по специальности "Организация дорожного движения"] / Е.М. Лобанов. – Москва: Транспорт, 1990. – 240 с.

16. Alyavina, Elena & Nikitas, Alexandros & Njoya, Eric Tchouamou, 2024. "Mobility-as-a-Service and unsustainable travel behaviour: Exploring the car ownership and public transport trip replacement side-effects of the MaaS paradigm," Transport Policy, Elsevier, vol. 150(C), pages 53-70. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.03.001

17. Narayanan, Santhanakrishnan & Antoniou, Constantinos, 2023. "Shared mobility services towards Mobility as a Service (MaaS): What, who and when?," Transportation Research Part A: Policy and Practice, Elsevier, vol. 168(C). https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103581

References

1. SN 3.01.03-2020. Planirovka i zastrojka naselennyh punktov [Planning and development of populated areas] : utv. Postanovleniem Ministerstvom arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' 27.11.2020 № 94. – Minsk: MAiS RB, 2020. – 58 s. (in Russian).

2. Donchenko, V. V. Ocenka kachestva funkcionirovanija gorodskih transportnyh sistem [Assessment of the performance quality of urban transport systems] / V. V. Donchenko, S. A. Andreev, V. V. Kalinina / Vestnik Doneckoj akademii transporta. – 2026. – № 1. – S. 99-128. – EDN TRJNIS. (in Russian).

3. Ustojchivaja gorodskaja mobil'nost': teorija i praktika razvitija [Sustainable urban mobility: theory and practice of development] / A. O. Lobashov, E. N. Kot, D. V. Kapski [i dr.]. – Vologda : Izdatel'stvo "Infra-Inzhenerija", 2023. – 236 s. – ISBN 978-5-9729-1491-3. – EDN ADEWPO. (in Russian).

4. Planirovanie ustojchivoj gorodskoj mobil'nosti [Sustainable Urban Mobility Planning] / I. N. Pugachev, A. O. Lobashov, S. S. Semchenkov [i dr.]. – Habarovsk : Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2023. – 147 s. – ISBN 978-5-262-00939-8. – EDN DOUXSG. (in Russian).

5. Mihajlov, A. Ju. Sovremennye tendencii proektirovanija i rekonstrukcii ulichno-dorozhnyh setej gorodov [Modern Trends in the Design and Reconstruction of Urban Street and Road Networks] / A. Ju. Mihajlov, I. M. Golovnyh. – Novosibirsk : Nauka, 2004. – 267 s. (in Russian).

6. Vrubel', Ju. A. Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii [Definition of Losses in Road Traffic] / Ju. A. Vrubel', D. V. Kapski, E. N. Kot. – Minsk : Belorusskij nacional'nyj tehnicheskij universitet, 2006. – 239 s. – EDN SPGLSP. (in Russian).

7. The High Cost of Free Parking Donald C. Shoup Department of Urban Planning University of California, Los Angeles Los Angeles, CA 90095-1656 Reprinted from Journal of Planning Education and Research vol. 17, pp. 3-20 (1997) URL: https://gruene-dieburg.de/download/stellplatzsatzung-20100430/2b-the_high_costs_of_free_parking.pdf

8. Jurchenko D.A. Sovershenstvovanie metodov transportnogo planirovanija za schet obsledovanija pridomovyh territorij [Improvement of Transport Planning Methods Through Survey of Adjacent Territories] : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk : 05.22.08 / Jurchenko Dmitrij Alekseevich. - Orel, 2020. - 24 s. (in Russian).

9. Valieva, A. R. Analiz sushhestvujushhih mest hranenija transporta v G. Voronezh i sposoby organizacii parkovochnyh prostranstv v mirovoj praktike [Analysis of existing transport storage locations in Voronezh and methods of organizing parking spaces in world practice] / A. R. Valieva, A. E. Enin, V. N. Sal'ko / Arhitekturnye issledovanija. – 2023. – № 1(33). – S. 92-99. – EDN TFAXZE. (in Russian).

10. Bojarshinov M. G., Shhukin Ju. A. Osobennosti funkcionirovanija pridorozhnogo parkovochnogo prostranstva [Features of the functioning of roadside parking space] / Intellekt. Innovacii. Investicii. – 2024. – № 6. – S. 89–108. – https://doi. org/10.25198/2077-7175-2024-6-89. (in Russian).

11. D. A. Pichugina, I. A. Antipin Vlijanie transportnoj infrastruktury na razvitie gorodskoj zastrojki i zemlepol"zovanija [THE IMPACT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE ON THE DEVELOPMENT OF URBAN DEVELOPMENT AND LAND USE] / Jekonomika i biznes: teorija i praktika. 2025. №6 (124), pp. 173-179. doi:10.24412/2411-0450-2025-6-173-179. (in Russian).

12. Skorobogatyh I. I., Sidorchuk R. R., Musatov B. V., Meshkov A. A. Normativnyj podhod v marketingovyh issledovanijah po ocenke obespechennosti zhitelej parkovochnymi mestami v gorode Moskve [Normative Approach in Marketing Research to Assess the Provision of Residents with Parking Spaces in the City of Moscow] / Bol'shaja Evrazija: razvitie, bezopasnost', sotrudnichestvo. 2020. №3-1, pp. 931-934. (in Russian).

13. Ustojchivye transportnye sistemy gorodov [Sustainable Urban Transport Systems] : uchebnik / D. V. Kapski, A. O. Lobashov, I. N. Pugachev [i dr.]. – Vologda : «Infra-Inzhenerija», 2025. – 128 s. – ISBN 978-5-9729-2405-9. – EDN TWGCFU. (in Russian).

14. Sheshtokas, V.V. Garazhi i stojanki [Garages and Parking Lots] / V.V. Sheshtokas, V.P. Adamavichjus, P.V. Jushkjavichus - Moskva: Strojizdat, 1984 -214 s. (in Russian).

15. Transportnaja planirovka gorodov [Urban Transport Planning]: [uchebnik dlja vuzov po special'nosti "Organizacija dorozhnogo dvizhenija"] / E.M. Lobanov. – Moskva: Transport, 1990. – 240 s. (in Russian).

16. Alyavina, Elena & Nikitas, Alexandros & Njoya, Eric Tchouamou, 2024. "Mobility-as-a-Service and unsustainable travel behaviour: Exploring the car ownership and public transport trip replacement side-effects of the MaaS paradigm," Transport Policy, Elsevier, vol. 150(C), pages 53-70. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.03.001

17. Narayanan, Santhanakrishnan & Antoniou, Constantinos, 2023. "Shared mobility services towards Mobility as a Service (MaaS): What, who and when?," Transportation Research Part A: Policy and Practice, Elsevier, vol. 168(C). https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103581

Korzova A.V., Mozalevsky D. V.

ANALYSIS OF ACTUAL DEMAND FOR PARKING SPACES IN MODERN RESIDENTIAL DEVELOPMENT

Abstract*. The article addresses the discrepancy between current urban planning norms in the Republic of Belarus and the actual level of car ownership in new residential districts. Using the examples of field studies conducted in residential complexes, the authors analyzed the occupancy of parking spaces during daytime and nighttime periods. It was established that while the regulatory requirement mandates 100% parking provision (1 space per 1 apartment), actual car ownership ranges from 0.61 to 0.65 units per apartment. The study reveals that an oversupply of parking spaces in paid parking lots, combined with the availability of free zones, leads to irrational use of urban land. The paper justifies the necessity of reducing the design coefficient of parking provision to 0.7 for future developments. Factors such as changes in public transport behavior, the growth of the sharing economy, and remote work are considered as drivers for the declining rate of car ownership growth.*

Keywords*: road traffic management, parking space, car ownership, residential development, parking spot, transport behavior, parking monitoring.*

Сведения об авторах:

Коржова Антонина Владимировна
Филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск, Республика Беларусь,
заведующая сектором дорожного движения НИИЦ ТС,
e-mail: kittonika@gmail.com

Мозалевский Дмитрий Владимирович
Филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск, Республика Беларусь,
главный научный сотрудник сектора дорожного движения НИИЦ ТС,
e-mail: dmitrij.m@gmail.com

Information about the authors:

Antonina Vladimirovna Korzova
Branch of the Belarusian National Technical University «Research Polytechnic Institute», Minsk, Republic of Belarus,
Head of the Road Traffic Sector, Research Center of Transport Systems,
e-mail: kittonika@gmail.com

Dmitry Vladimirovich Mozalevsky
Branch of the Belarusian National Technical University «Research Polytechnic Institute», Minsk, Republic of Belarus,
Chief Researcher, Road Traffic Sector, Research Center of Transport Systems,
e-mail: dmitrij.m@gmail.com

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА»

1 Материалы статей представляются в двух видах, содержание которых должно полностью совпадать.

Печатный экземпляр (1 шт.): текст отформатирован, распечатан с высоким качеством (пригодным для сканирования) на лазерном или струйном принтере на белой бумаге формата А4 (210 × 297 мм).

Электронная версия (файл): единый файл в формате Microsoft Word с расширением .docx (предпочтительно) или .doc. Рекомендуемый объем рукописи — 10–20 страниц включая аннотации, рисунки, таблицы и список литературы.

Параметры оформления текста:

Шрифт: Times New Roman.

Кегль: 12 pt (для основного текста, аннотаций и списка литературы).

Межстрочный интервал: одинарный (1.0).

Выравнивание: по ширине.

Абзацный отступ: 1 см (устанавливается через параметры абзаца, а не с помощью пробелов или табуляции).

Поля страницы: верхнее – 25 мм, нижнее – 20 мм, левое – 25 мм, правое – 25 мм.

Отступы для колонтитулов: от верхнего края – 12.5 мм, от нижнего края – 22 мм.

Колонтитулы и номера страниц не добавляются.

2. Структура рукописи (последовательность на первой и последующих страницах). Элементы должны располагаться строго в указанном порядке:

1) **УДК** — указывается в левом верхнем углу первой страницы.
2) **Пропуск строки.**
3) **Авторы:** Фамилии и инициалы авторов на языке оригинала статьи (например, *И.И. Иванов, П.П. Петров*) — по центру, курсивом.
4) **Пропуск строки.**
5) **Название статьи** на языке оригинала — по центру, **ПОЛУЖИРНЫМИ ЗАГЛАВНЫМИ БУКВАМИ**, без переносов.
6) **Пропуск строки.**
7) **Аннотация** на языке оригинала статьи (объем 100–150 слов). Должна быть структурированной и отражать цель, методы, основные результаты и выводы работы.
8) **Ключевые слова** на языке оригинала (5–10 слов или словосочетаний).
9) **Пропуск строки.**
10) **Основной текст статьи** — без расстановки переносов. Обязательная структура: Постановка задачи, Анализ последних исследований и публикаций, Цель работы, Основная часть (с подразделами), Выводы. Между разделами — пропуск строки.
11) **Благодарность/Финансирование** (при наличии)
12) **Пропуск строки**
13) **Acknowledgments/Funding** (при наличии)
14) **Пропуск строки**
15) **Список литературы (References).** Объем — 20 - 30 источников. Оформляется **по ГОСТ Р 7.0.100-2018 (Библиографическая запись)**. Ссылки в тексте — в квадратных скобках, арабскими цифрами, например [1], [2, с. 15]. **Обязательно указывать DOI** для всех источников, где он присвоен.
16) **Пропуск строки.**

17) **Метаданные на английском языке** (если статья на русском) или на русском (если статья на английском):
   - Фамилии и инициалы авторов (курсив, по центру).
   - Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру).
   - **Abstract** (объем 100–150 слов).
   - **Keywords** (5–10 слов).
18) **Сведения об авторах (на русском и английском языках):** ФИО полностью, место работы (полное официальное название в именительном падеже), должность, ученая степень, ученое звание, ORCID (при наличии), E-mail для контактов.

3. Статья должна содержать такие разделы: постановка задачи, анализ последних исследований, цель работы, основная часть и выводы. Между разделами ставится интервал. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки Вестника на компьютере.

4. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы lim, ln, arg, const, sin, cos, min, max и т.д. набираются прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5. Формулы. Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word, отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстрированный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6. Рисунки и фотографии, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисуночная подпись обязательны.

7. Таблицы следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8. Список литературы приводится общим списком в конце статьи и составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначаются арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно. Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9. Материалы, прилагаемые к статье, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):
- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Занимаемая должность.
- Ученая степень, ученое звание.
- E-mail.
- Аннотация.
- Ключевые слова.

УСЛОВИЯ И ПОРЯДОК ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА»

1. Статья должна быть оформлена в соответствии с приведенными выше требованиями.

2. Автор имеет право опубликовать в номере не более двух статей.

3. Автор может прислать статью в адрес редакции:

- по почте;
- по электронной почте;
- передать лично ответственному секретарю.

4. Статья должна соответствовать тематике журнала. Публикуются результаты фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований по направлениям:

- системный анализ, управление и обработка информации, статистика;
- наземные транспортно-технологические средства и комплексы;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- эксплуатация автомобильного транспорта;
- логистические транспортные системы.

5. Редакционная коллегия принимает статьи к публикации после тщательной научной экспертизы. Отбираются статьи, представляющие научный интерес и вносящие новый вклад в разработку проблематики. Статьи публицистического характера не принимаются.

6. Решение о возможности публикации статьи принимается на заседании редколлегии только при наличии положительной рецензии.

7. Все расходы по подготовке и изданию журнала несет академия.

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА»

Вестник Донецкой академии транспорта зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-89466 от 06 мая 2025 г.

С 24 июня 2025 включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». Тематические направления журнала соответствуют следующим научным специальностям:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки);

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки);

2.9.5 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки);

2.9.9 – Логистические транспортные системы (технические науки).

Учредителем и издателем Вестника Донецкой академии транспорта является Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Донецкая академия транспорта».

Главный редактор журнала – доктор технических наук, доцент И.П. Энглези.

В состав редакционной коллегии журнала входят ведущие ученые России и ближнего зарубежья.

Научный журнал выходит с периодичностью 4 номера в год.

Вестник Донецкой академии транспорта зарегистрирован в национальном центре ISSN Российской Федерации и имеет номер ISSN 3034-6681; бесплатно рассылается центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации и включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и входит в Единый государственный перечень научных изданий (ЕГПНИ).

Почтовый адрес редакции:

283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7.

Донецкая академия транспорта.

Редакция Вестника Донецкой академии транспорта.

Телефон: +7 (949)3076242.

E-mail: rector@dat-dn.ru.

Архив Вестника и требования по оформлению статей размещены на сайте https://journal.dat-dn.ru/.

Научное издание

ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА

№ 2
2026

(на русском и английском языках)

Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайте Российской научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования РИНЦ и Science Index
Входит в Единый государственный перечень научных изданий (ЕГПНИ)

Требования к оформлению статей размещены на сайте
https://journal.dat-dn.ru/

Ответственный за выпуск – Н.В. Володарец

Компьютерная верстка – А.С. Маренич

Литературная обработка – Н.И. Бочарова, Е.М. Загороднова

Формат 60x84⅛. Усл. печ. л. 33,48. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Знак информационной продукции 16+
Подписано в печать 25.06.2026.
Дата выхода в свет 26.06.2026.

Учредитель:
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Донецкая академия транспорта»

Адрес учредителя и редакции:
283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7, тел. +7 (949) 3076242;
e-mail: rector@dat-dn.ru

Издатель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Майкопский государственный технологический университет»
385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Донецкая академия транспорта»
283086, Донецкая Народная Республика, г.о. Донецк, г. Донецк, пр-кт Дзержинского, д. 7