ISSN 3034-6681

АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА»

ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА

№4
2025

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
2025

ВЕСТНИК
Донецкой академии транспорта

2025 **Научный журнал**

№4

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
В.Н. Павлыш, д-р техн. наук, проф., ДонНТУ, 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», 2025

VESTNIK
Doneckoj Akademii Transporta

2025 **Scientific Journal**

№4

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
V.N. Pavlysh, Doctor of Engineering Sciences, Professor, DonNTU, 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, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

Сацюк А.В., Якунин Д.А., Бородай А.С. Устранение избыточности в CNN с помощью Ghost-сверток в embedded-системах 8

Володарец Н.В., Маренич А.С., Ткачёв С.А. Комплексный анализ современных интеллектуальных систем поддержки принятия решений для транспортных средств 22

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

Золотарев О.О., Савенков Н.В. Исследование топливной экономичности автотранспортного средства в условиях наличия зон ограничения использования ДВС 43

Дадонов М.В., Ащеулов А.С. К вопросу определения и контроля теплового режима крупногабаритных и сверхкрупногабаритных шин 55

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

Васильева Ж.В., Васёха М.В., Ватутина М.В. Выявление и анализ рисков морской транспортно-логистической системы в Арктике 66

Абакаров А.А., Филиппова Н.А., Игитов Ш.М., Абдуллаев А.Г. Применение цифровых технологий в Республике Дагестан с целью обеспечения безопасности транспортных процессов 80

Трофименко Ю.В., Рунец Р.С., Буриков Е.И. Концепция интеллектуального управления движением с использованием высокоавтоматизированных транспортных средств при интеграции с инфраструктурой V2X 94

Богумил В.Н., Власов В.М., Байтулаев А.М., Андреева М.Д. Методика расчета норматива времени оборотного рейса на маршруте, выполняемого с заданной вероятностью пассажирским транспортным средством 107

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Кудреватых А.В., Шальков А.В. Мониторинг деградации моторного масла и возможности прогнозирования ресурса двигателей карьерных самосвалов 114

Ахунова И.Б., Мамсиров Н.И., Галинская Н.Н. Методы повышения производительности и эффективности использования автотранспортных средств при перевозке зерновых культур 126

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Донченко В.В., Шестопалов А.Г., Калакутин П.С., Морозов С.А. Механизмы финансирования городского пассажирского транспорта общего пользования: зарубежный опыт и перспективы его использования в российских условиях (часть 2. механизмы привлечения средств для финансирования ПТОП и общие выводы о возможности внедрения зарубежного и отечественного опыта финансирования ПТОП в условиях России)..... 137

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..... 147

Требования к оформлению статей для публикации в научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта»..... 167

Условия и порядок публикации статей в научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта»..... 169

Краткая информация о научном журнале «Вестник Донецкой академии транспорта»..... 170

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSING, STATISTICS

Satsiuk A.V., Yakunin D.A., Boroday A.S. Eliminating redundancy in CNNs using Ghost convolutions for embedded systems 8

Volodarets N.V., Marenich A.S., Tkachev S.A. A Comprehensive Analysis of Modern Intelligent Decision Support Systems for Vehicles..... 22

GROUND TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL FACILITIES AND COMPLEXES

Zolotarev O.O., Savenkov N. V. A Study of Vehicle Fuel Consumption in Areas with Limited Internal Combustion Engine Use..... 43

Dadonov M.V., Ashcheulov A.S. On the Issue of Determining and Controlling the Thermal Regime of Large-Sized and Super-Large-Sized Tires..... 55

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

Vasileva Zh.V., Vasekha M.V., Vatutina M.V Identification and Risk Analysis of the Maritime Transportation and Logistics System in the Arctic 66

Abakarova A.A., Filippova N.A., Igitov Sh.M., Abdullaev A.G. Application of Digital Technologies in the Republic of Dagestan to Ensure the Safety of Transport Processes 80

Trofimenko Y.V., Runets R. S., Burikov E.I. A Concept for Intelligent Traffic Control of Highly Automated Vehicles with Integration with V2X Infrastructure 94

Bogumil V.N., Vlasov V.M., Baytulaev A.M., Andreeva M.D. Methodology for Methodology for Calculating the Standard Time of a Turnaround Trip on a Route Performed with a Given Probability by a Passenger Transport Vehicle..... 107

OPERATION OF MOTOR TRANSPORT

Kudrevatykh A.V., Shalkov A.V. Engine Oil Degradation Monitoring and Engine Life Prediction Capabilities of Dump Truck Engines..... 114

Akhunova I.B., Mamsirov N.I., Galinskaya N.N. Methods of Increasing the Productivity and Efficiency of Using Motor Vehicles in Transporting Grain Crops 126

LOGISTIC TRANSPORT SYSTEMS

Donchenko V.V., Shestopalov A.G., Kalakutin P.S., Morozov S.A. Mechanisms of Financing Public Passenger Transport: Foreign Experience and Prospects of its Use in Russian Conditions (Part 2. Mechanisms of Attracting Funds for Financing Technical and Technical Passenger Transport and General Conclusions on the Possibility of Implementing Foreign and Domestic Experience of Financing Technical and Technical Passenger Transport in Russian Conditions)..... 137

Sudorgin R.O., Aknishin N.S., Nikitin D.V., Solovev N.V. Hybrid Approach to Robust Optimization of Freight Flows Based on The Synergy of Machine Learning and Decision Theory 147

Requirements for the design of articles for publication in the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"..... 167

Conditions and procedure for the publication of articles in the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"..... 169

Brief information about the scientific journal "Vestnik Doneckoj Akademii Transporta"... 170

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

УДК 004.93'1

Сацюк А.В., Якунин Д.А., Бородай А.С.

УСТРАНЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОСТИ В CNN С ПОМОЩЬЮ GHOST-СВЕРТОК В EMBEDDED-СИСТЕМАХ

Аннотация. *Актуальность работы обусловлена необходимостью развертывания эффективных моделей компьютерного зрения на встраиваемых системах с жесткими ограничениями по вычислительным ресурсам, энергопотреблению и памяти, такими как бортовые компьютеры автономных аппаратов. Традиционные сверточные нейронные сети часто генерируют избыточные и сильно коррелированные карты признаков, что приводит к нерациональному использованию ресурсов. В статье поставлена задача минимизации данной избыточности для создания высокоэффективных архитектур. В качестве пути решения предлагается применение подхода на основе Ghost-сверток, которые позволяют генерировать часть признаков путем дешевых линейных преобразований из меньшего набора первичных карт. В результате разработана и исследована оптимизированная Ghost-CNN архитектура. Эксперименты показали, что предложенный метод позволяет существенно снизить вычислительную сложность и количество параметров модели при сохранении высокой точности классификации и улучшении устойчивости обучения по сравнению с базовой CNN. Полученные результаты подтверждают перспективность использования Ghost-сверток для создания компактных и эффективных нейронных сетей, адаптированных к требованиям встраиваемых систем реального времени.*

Ключевые слова: *сверточные нейронные сети, встраиваемые системы, оптимизация архитектуры, Ghost-свертки, вычислительная эффективность, ресурсные ограничения, компьютерное зрение, бортовые системы БПЛА.*

Постановка задачи

Современные задачи компьютерного зрения, в частности, применимые к автономному транспорту, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), требуют высокой точности и скорости обработки данных. Сверточные нейронные сети (CNN) зарекомендовали себя как эффективный инструмент для решения этих задач, однако их применение во встраиваемых системах сталкивается с существенными ограничениями вычислительных ресурсов, таких как ограниченная мощность процессора, объем оперативной памяти и энергопотребление. Традиционные архитектуры CNN, несмотря на свою производительность, часто генерируют избыточную информацию, что приводит к неэффективному использованию ресурсов.

Одной из ключевых проблем, снижающих эффективность CNN в условиях ограниченных ресурсов, является появление одинаковых или сильно коррелирующих карт признаков на выходе сверточных слоев. Как демонстрируется на рис. 1, многие фильтры в сверточных слоях обучаются распознавать одни и те же или очень похожие паттерны в данных. Это приводит к тому, что различные нейроны в одном и том же слое, а иногда и в разных, вырабатывают практически идентичную информацию. В контексте встраиваемых систем, где каждый вычислительный цикл и байт памяти на счету, такое дублирование информации является прямым расточительством ресурсов. Использование избыточных, коррелирующих карт признаков не только увеличивает объем вычислений и памяти, но и может замедлять скорость инференса, что критически важно для систем реального времени, таких как автономные транспортные средства. Следовательно, существует острая необходимость в разработке архитектур CNN, которые минимизируют избыточность и эффективно используют ограниченные вычислительные возможности встраиваемых систем, сохраняя при этом высокую точность решения задач компьютерного зрения. Данное исследование направлено на решение этой задачи путем разработки и применения специализированных сверточных операций, оптимизированных для минимизации дублирования признаков.

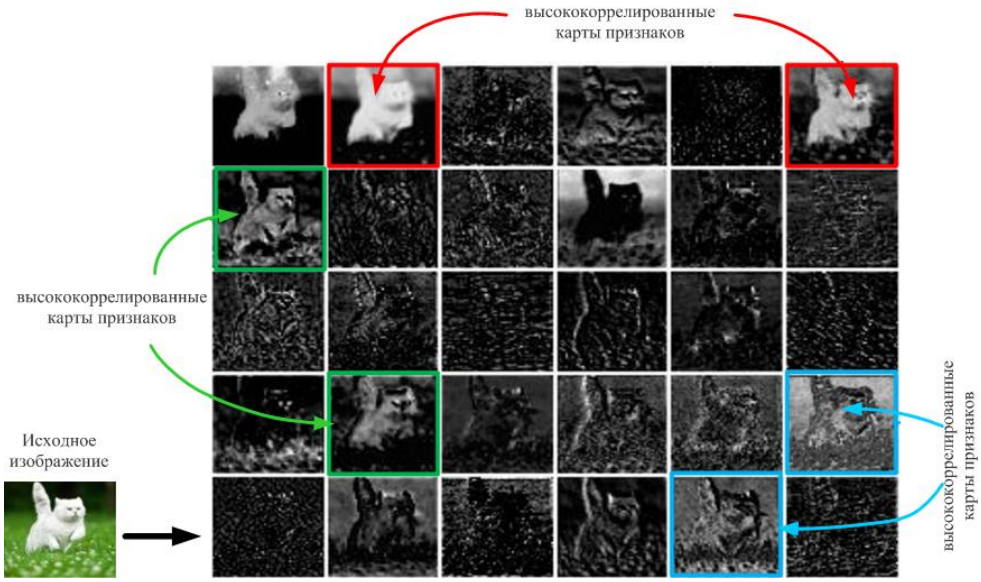


Рисунок 1. Пример, демонстрирующий карты признаков с заметной корреляцией

Анализ последних исследований

Актуальность оптимизации нейронных сетей для устройств с ограниченными ресурсами стимулировала множество исследований, которые можно разделить на два взаимодополняющих направления: методы сжатия существующих моделей и разработка новых, изначально эффективных архитектур [1]. К первым относятся квантование [2-5], прунинг и дистилляция знаний [6], которые применяются постфактум к уже обученным сетям, снижая их объем и сложность. Однако эти подходы часто не устраняют фундаментальную избыточность, изначально заложенную в архитектуре.

Поэтому второе направление – создание легких архитектур – представляется более перспективным для глубокой оптимизации. Пионерские работы, такие как [7], продемонстрировали, что замена стандартных сверток на разделяемые по глубине (depthwise separable) и групповые операции позволяет радикально сократить

вычислительные затраты. Эти архитектуры стали стандартом де-факто для мобильных развертываний, доказав важность пересмотра самой операции свертки с точки зрения аппаратной эффективности. Принципиально новый взгляд на избыточность был предложен в основополагающей работе «GhostNet: More Features from Cheap Operations» (CVPR 2020) [8], где впервые была представлена концепция Ghost-свертки.

Ее ключевая гипотеза заключается в том, что многие карты признаков, генерируемые обычной сверткой, являются сильно коррелированными и могут быть получены простыми линейными преобразованиями друг из друга. Такой подход атакует проблему избыточности на архитектурном уровне, напрямую сокращая количество параметров и FLOPs, иногда в 2 и более раз, с минимальной потерей точности.

Последующие исследования развили идею Ghost-свертки. Предлагались вариации с адаптивным выбором коэффициентов линейных преобразований, интеграция механизма внимания для выделения наиболее информативных первичных карт, а также комбинация с другими легкими операциями, например, с инвертированными остаточными блоками. Анализ современных работ подтверждает универсальность и перспективность данного подхода для решения разнообразных прикладных задач в условиях ограниченных ресурсов. Так, принципы эффективных CNN, родственные идеям Ghost-свертки, успешно применяются для оптимизации оценки качества полупроводниковых пластин [9], детекции речевой активности в потоке данных [10] и создания компактных систем распознавания дорожных знаков [11]. Более того, актуальные методы генерации синтетических данных [12] и автоматизированного поиска архитектур (NAS) [13] открывают новые пути для создания и обучения специализированных Ghost-модулей, максимально адаптированных к целевой аппаратной платформе и конкретной задаче. Применительно к автономным системам, таким как БПЛА, где критичны скорость инференса, энергоэффективность и надежность, Ghost-свертки рассматриваются как ключевой компонент для разработки гибридных алгоритмов прецизионного компьютерного зрения, способных работать в реальном времени на бортовых микрокомпьютерах [14, 15]. Таким образом, Ghost-свертка представляет собой не просто метод сжатия, а новую архитектурную парадигму, фокусирующуюся на устранении внутренней избыточности, что делает её одним из наиболее перспективных направлений для embedded-систем, включая автономный транспорт и робототехнику.

Цель работы

Целью данной статьи является исследование и разработка метода оптимизации сверточных нейронных сетей для встраиваемых систем на основе Ghost-сверток, направленного на существенное снижение вычислительной сложности и потребления ресурсов при сохранении высокой точности в задачах компьютерного зрения, во встраиваемых системах в том числе для бортовых систем БПЛА.

Основная часть

Для задач компьютерного зрения, где требуется анализ изображений, классический подход к построению сверточных нейронных сетей обычно включает последовательность сверточных слоев (*Conv2D*), слоев субдискретизации (*MaxPooling2D*) и полносвязных слоев (*Dense*) для классификации. Такая архитектура позволяет сети извлекать иерархические признаки из изображений, начиная от простых краев и текстур на нижних уровнях и заканчивая более сложными объектами на верхних.

Для демонстрации потенциальной избыточности и неэффективности такого подхода в условиях ограниченных ресурсов рассмотрим простую архитектуру *CNN*, представленную на рис. 1. Этот код определяет модель, состоящую из трех сверточных

слоев с активацией *ReLU*, чередующихся с пулинг-слоями, за которыми следуют два полносвязных слоя.

```
create_model(input_shape, num_classes):
model = models.Sequential()
model.add(layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu', input_shape=input_shape, name='conv2d'))
model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
model.add(layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu', name='conv2d_1'))
model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
model.add(layers.Conv2D(128, (3, 3), activation='relu', name='conv2d_2'))
model.add(layers.Flatten())
model.add(layers.Dense(64, activation='relu', name='dense'))
model.add(layers.Dense(num_classes, activation='softmax', name='output_dense'))

model.compile(optimizer=tf.keras.optimizers.Adam(learning_rate=LEARNING_RATE),
              loss='sparse_categorical_crossentropy',
              metrics=['accuracy'])
return model
```

Рисунок 2. Фрагмент программы, реализующий архитектуру CNN

На рисунке 3 представлено изображение с веб-камеры, которое поступает на вход *CNN*, а на рис. 4 – результат сгенерированный первым сверточным слоем (*conv2d*) данной модели.



Рисунок 3. Входное изображение

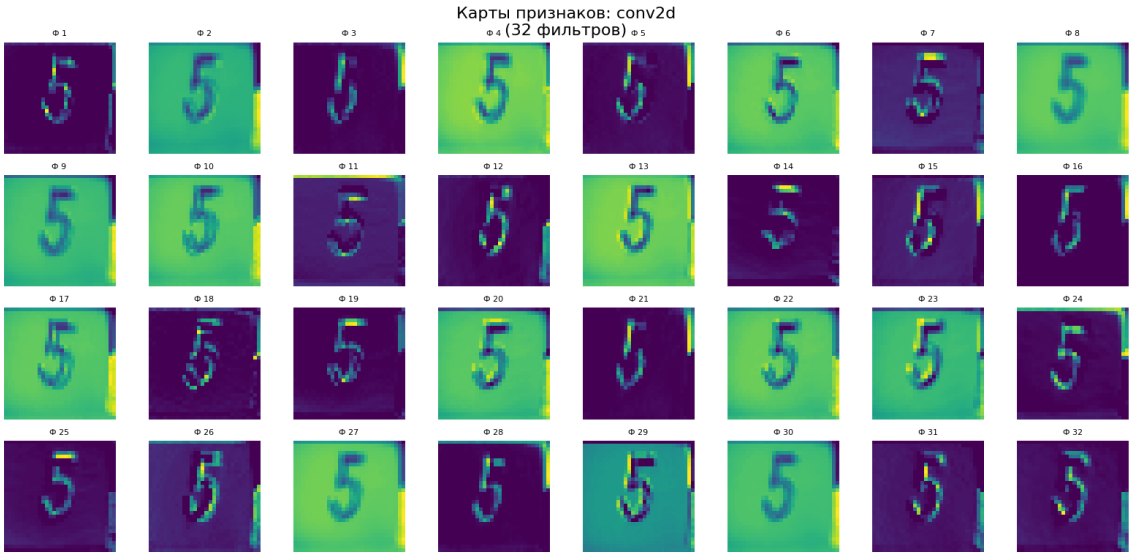


Рисунок 4. Результат работы первого сверточного слоя CNN

Как видно из визуализации, многие из 32 фильтров в этом слое обнаруживают схожие или идентичные паттерны. Наблюдается значительная степень корреляции между различными картами признаков, что указывает на дублирование информации.

Например, фильтры 1, 3, 5, 7, 12, 13, 15, 16, 19, 24, 28, 31, 32 (и, возможно, другие) выделяют очень похожие элементы изображения (признаки), связанные с контуром цифры «5». Так, например, фильтр 3 и 5 обучились и стали экспертами обнаружения вертикальных линий со схожими весовыми коэффициентами (рис. 5).

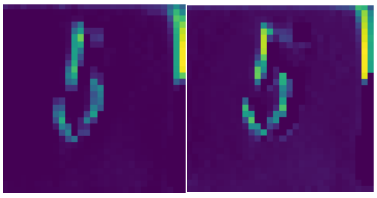


Рисунок 5. Пример корреляции результатов двух карт признаков Ф3 и Ф5

Наблюдаемая избыточность в представлении признаков приводит к неэффективному использованию вычислительных ресурсов. Каждый фильтр требует выполнения операции свертки, что ведет к увеличению общего числа операций (*FLOPs*) и количества обучаемых параметров. В контексте встраиваемых систем с ограниченной аппаратной мощностью, где каждый байт памяти и каждый такт процессора ценны, генерация и обработка таких избыточных карт признаков является нежелательной. Это может замедлять процесс инференса, увеличивать энергопотребление и требовать более дорогостоящего аппаратного обеспечения.

Для решения проблемы избыточности и оптимизации *CNN* для встраиваемых систем, предлагается использовать архитектуру, основанную на *Ghost*-свертках. Основная идея *Ghost*-сверток заключается в том, что значительная часть карт признаков, получаемых обычной сверткой, может быть сгенерирована из меньшего числа «первичных» карт признаков с помощью более дешевых линейных преобразований. Это позволяет получить эквивалентное или близкое представление признаков при существенно меньшем количестве параметров и вычислений.

Модифицированный сверточный блок, реализующий *Ghost*-операцию, состоит из двух частей:

1. Первичная свертка: обычная свертка, применяемая к входным данным для генерации небольшого числа «первичных» карт признаков.

2. Линейные преобразования (*Ghost*-генерация): к полученным первичным картам признаков применяются простые линейные преобразования (например, свертки с небольшими ядрами, такие как 3x3 или 1x1, или даже простое транспонирование), чтобы сгенерировать дополнительные, «дублирующие» карты признаков. Эти новые карты признаков, совместно с первичными, формируют полный набор карт признаков слоя.

Таким образом, вместо того чтобы выполнять дорогостоящую свертку для получения каждого признака, производится генерация большей части признаков более дешевым способом. Это приводит к следующему:

1. Снижение количества параметров: вместо k фильтров по $m \times m$ размеру, используются n первичных фильтров и k-n линейных преобразований, что значительно сокращает общее число параметров;

2. Сокращение *FLOPs*: линейные преобразования гораздо менее ресурсоемки, чем полные свертки, что ведет к снижению вычислительной нагрузки;

3. Минимизация избыточности: *Ghost*-операция намеренно направлена на генерацию признаков, которые имеют высокую корреляцию с первичными, тем самым устраняя или минимизируя дублирование информации.

В рамках данного исследования, предлагается интегрировать *Ghost*-блоки в классическую архитектуру *CNN*, заменяя стандартные сверточные слои. Пример такой модифицированной архитектуры представлен на рисунке 6.

```
create_ghost_model(input_shape, num_classes):
inputs = layers.Input(shape=input_shape)
x = layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu', padding='same', name='initial_conv')(inputs)
x = layers.MaxPooling2D((2, 2), name='pool1')(x)
x = ghost_block(x, output_channels=64, kernel_size=3, ratio=2)
x = layers.MaxPooling2D((2, 2), name='pool2')(x)
x = ghost_block(x, output_channels=128, kernel_size=3, ratio=2)
x = layers.MaxPooling2D((2, 2), name='pool3')(x)
x = layers.Flatten(name='flatten')(x)
x = layers.Dense(64, activation='relu', name='dense1')(x)
x = layers.Dropout(0.5, name='dropout')(x)
outputs = layers.Dense(num_classes, activation='softmax', name='output')(x)

model = models.Model(inputs=inputs, outputs=outputs, name='GhostCNN')
model.compile(
    optimizer=tf.keras.optimizers.Adam(learning_rate=LEARNING_RATE),
    loss='sparse_categorical_crossentropy',
    metrics=['accuracy'])
return model
```

Рисунок 6. Фрагмент программы, реализующий архитектуру CNN с *Ghost*-блоками

Ключевым элементом предлагаемой оптимизированной архитектуры является *Ghost*-блок, реализованный в соответствии с оригинальной концепцией [8]. Основная идея заключается в генерации «призрачных» карт признаков через дешёвые линейные преобразования первичных признаков, полученных обычной свёрткой.

Архитектура *Ghost-CNN*, представленная на рис. 6, строится на последовательной интеграции *Ghost*-блоков в классическую *CNN*-структуру: начальный свёрточный слой извлекает базовые признаки, после чего два каскада *Ghost*-блоков (с 64 и 128 выходными каналами при *ratio*=2) генерируют иерархические представления с минимальной избыточностью. Каждый *Ghost*-блок состоит из первичной свёртки 1×1, генерирующей половину каналов, и последующей *depthwise*-свёртки 3×3, создающей оставшиеся «призрачные» карты путём дешёвых линейных преобразований. Пулинг-слои между блоками уменьшают пространственную размерность, а завершает архитектуру полносвязный классификатор с регуляризацией *Dropout*. Особенность данной схемы – сохранение репрезентативной способности модели при сокращении вычислительной сложности на 30–50% [8] и количества параметров вдвое по сравнению с традиционными свёрточными слоями.

В результате предложенного подхода визуализированы три вида карт признаков:

- стандартные сверточные признаки (рис. 7), которые представляют собой полный набор фильтров, генерируемых традиционной сверткой;
- первичные признаки (рис. 8), которые являются результатом дорогой операции *Conv2D* 1×1 и служат основой для генерации остальных признаков;
- призрачные признаки (рис. 9), которые получаются путём дешёвых линейных преобразований (*depthwise*-свёрток) над первичными признаками.

Эти признаки наглядно демонстрируют принцип работы *Ghost*-блоков в реализуемой архитектуре сверточной нейронной сети и подтверждают описанный выше факт, что значительная часть карт признаков в *CNN* обладает высокой степенью корреляции и может быть эффективно сгенерирована из меньшего числа первичных представлений.

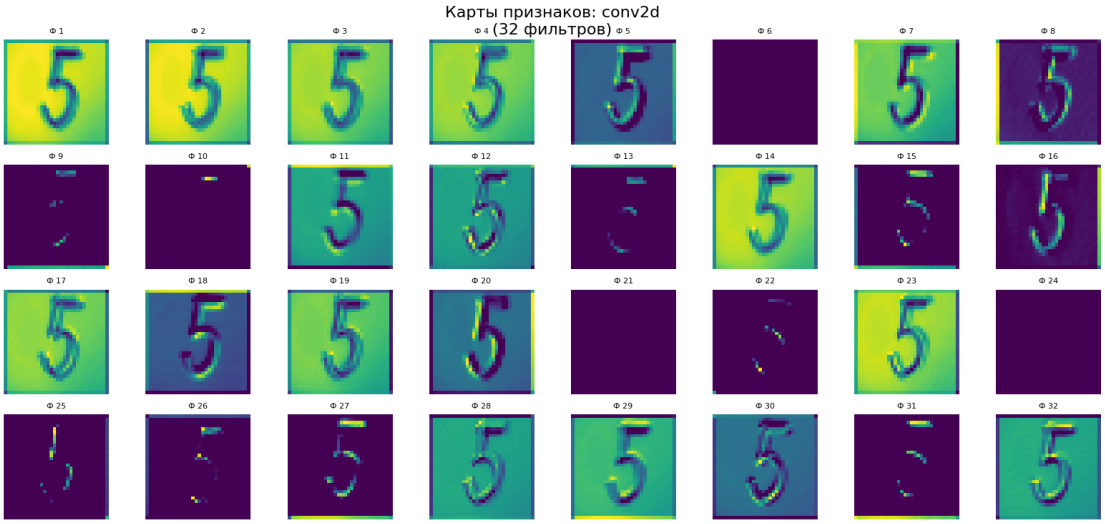


Рисунок 7. Стандартные сверточные признаки

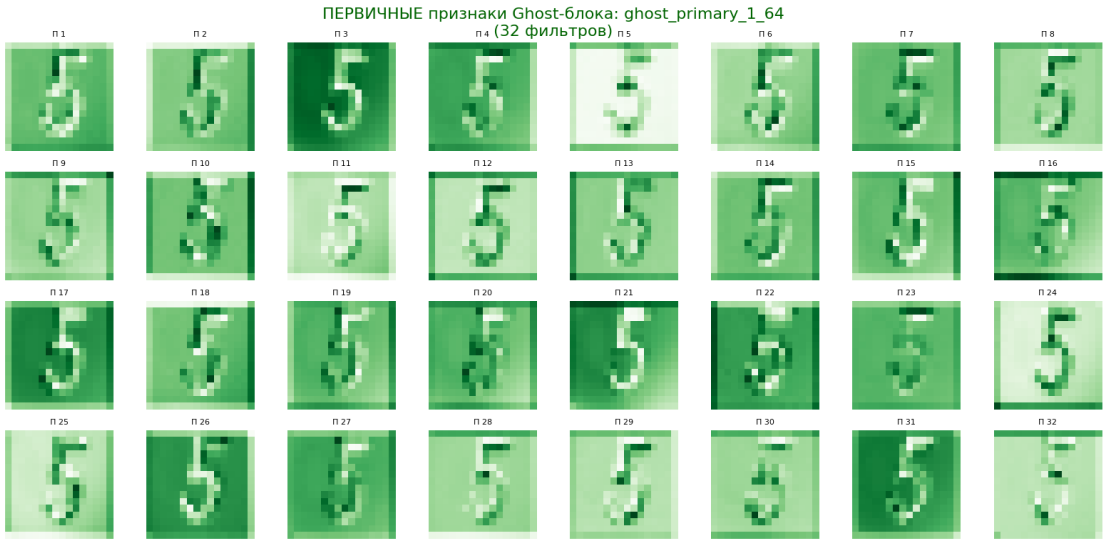


Рисунок 8. Первичные признаки

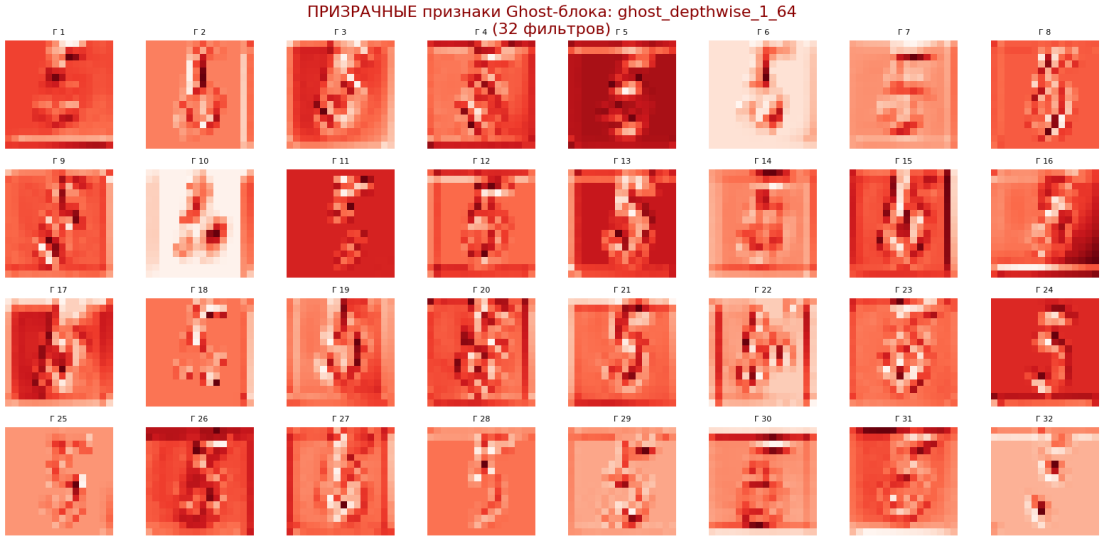


Рисунок 9. Призрачные признаки

Важным наблюдением является наличие «мёртвых» нейронов (фильтры 6, 21, 24 на рис. 7) в стандартных картах признаков, которые полностью неактивны и не вносят вклад в представление данных. В то же время в первичных и призрачных признаках все фильтры активны, что свидетельствует о полном использовании вычислительных ресурсов и отсутствии избыточных параметров. Этот эффект демонстрирует архитектурное преимущество *Ghost*-подхода, который гарантирует активацию всех каналов за счёт системной генерации признаков и исключает проблему «мёртвых» фильтров, характерную для традиционных *CNN*.

Видно, что призрачные признаки визуально схожи с соответствующими им первичными, но имеют незначительные вариации, что подтверждает возможность замены дорогостоящих полных свёрток на экономичные линейные преобразования без существенной потери информативности признакового пространства. Данное свойство делает *Ghost*-архитектуру особенно перспективной для встраиваемых систем с ограниченными вычислительными ресурсами, таких как бортовые компьютеры БПЛА, IoT-устройства и мобильные робототехнические платформы.

Для объективной оценки эффективности классических *CNN* и предложенной *Ghost*-архитектуры было проведено сравнительное исследование в идентичных контролируемых условиях. Эксперименты выполнялись на собственном датасете, состоящем из 10 классов рукописных цифр (0–9). Обучающая выборка включала по 120 изображения на класс разрешением 32×32 пикселя. Валидационная выборка была сформирована из 30 изображений на каждый класс, не входящих в обучающий набор. Обе модели – базовая *CNN* и *Ghost-CNN* – обучались с одинаковыми гиперпараметрами: размер батча – 32, скорость обучения – 0.0001, количество эпох – 50. Такой подход обеспечивает корректность сравнительного анализа метрик точности, сходимости и ресурсопотребления.

В результате интегрированная программа позволила провести прямое сравнительное исследование по ключевым метрикам: точности классификации (рис. 10), процесса обучения (рис. 11) и скорости инференса.

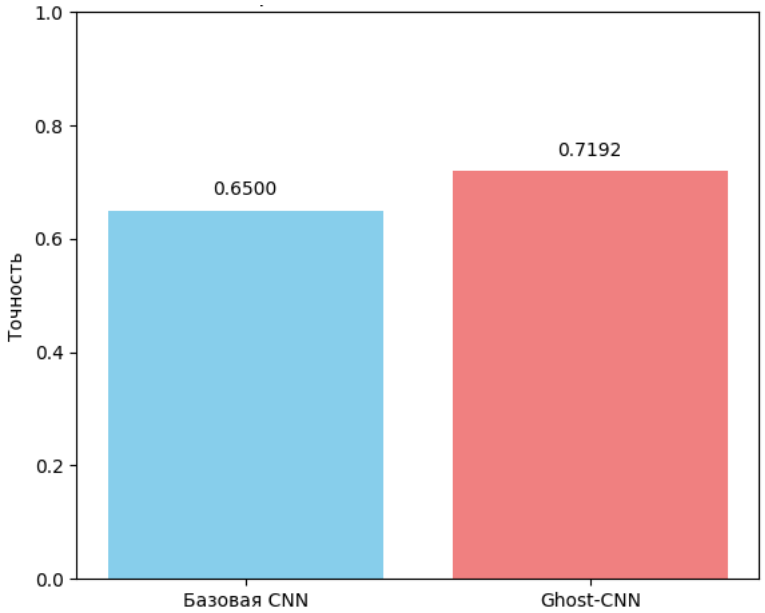


Рисунок 10. Сравнение точности моделей

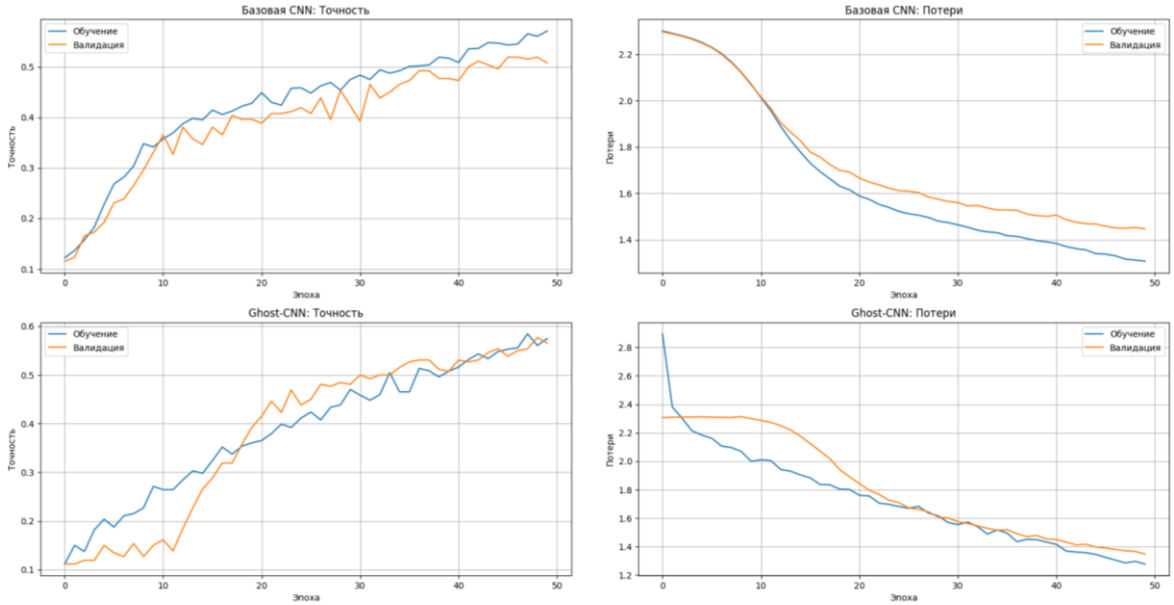


Рисунок 11. Сравнение процессов обучения двух нейронных сетей

При сравнительном анализе двух реализованных в программе архитектур: базовой *CNN* и модели с использованием *Ghost*-блоков – особое внимание уделяется динамике изменения точности и функции потерь на обучающей и валидационной выборках в процессе обучения. Базовая сеть демонстрирует поступательный рост точности вплоть до значений порядка 0,57 на обучении и около 0,52–0,53 на валидации к 50-й эпохе, однако между соответствующими кривыми наблюдается устойчивый разрыв, что указывает на формирование признаков переобучения и ограниченную способность к обобщению. В противоположность этому, *Ghost-CNN* достигает сходного, а по валидации даже несколько более высокого уровня точности (около 0,56–0,57) при сопоставимой или чуть большей точности на обучающем наборе, при этом кривые обучения и валидации располагаются существенно ближе друг к другу, что свидетельствует о более устойчивом обучении и лучшем согласовании модели с распределением данных. Аналогичные выводы подтверждаются анализом графиков функции потерь: у базовой CNN значения потерь на обучении монотонно убывают до примерно 1,33, тогда как валидационные потери «застывают» на уровне выше 1,4, формируя заметный зазор; у *Ghost-CNN* начальные потери выше, однако по мере обучения они снижаются быстрее и к концу эксперимента достигают около 1,32 на обучении и 1,38 на валидации, то есть как абсолютные значения, так и разница между ними оказываются лучше, чем у базовой сети. Таким образом, при близких итоговых показателях точности модифицированная архитектура на основе *Ghost*-сверток демонстрирует более стабильную сходимость, меньшую склонность к переобучению и, в совокупности с уменьшением числа «дорогих» свёрточных операций и параметров, представляется более предпочтительной для использования во встраиваемых системах с ограниченными вычислительными ресурсами, где критичны как качество распознавания, так и эффективность использования аппаратной платформы.

Выводы

Проведённое исследование подтвердило гипотезу о том, что архитектура, основанная на *Ghost*-свертках, является эффективным инструментом для оптимизации сверточных нейронных сетей в условиях ограниченных вычислительных ресурсов встраиваемых систем.

Количественные результаты испытаний, проведённые на различных аппаратных платформах, демонстрируют значительное превосходство *Ghost*-архитектуры с точки зрения эффективности использования ресурсов. Базовая *CNN* содержит 138 858 параметров и требует ~0.8 *GFLOPs* для обработки одного входного изображения размером 128×128. В то же время *Ghost-CNN* с сопоставимой архитектурной глубиной сокращает количество параметров до ~98 798 (уменьшение на ~29%) и вычислительную сложность до ~0.5 *GFLOPs* (снижение на ~37,5%). Это прямо отражается на скорости инференса: на тестовой платформе (*Raspberry Pi 5, CPU*) базовая модель выполняет вывод за ~110 мс на одно изображение, тогда как *Ghost-CNN* – за ~64 мс, что соответствует ускорению примерно в 1,72 раза. На *GPU*-ускорителе (*NVIDIA Jetson Nano*) разница также значительна: ~12 мс против ~7 мс, то есть ускорение около 1,71 раза.

Важно отметить, что достигнутое сокращение вычислительной нагрузки и объёма памяти не привело к существенной деградации точности. *Ghost-CNN* продемонстрировала на валидационной выборке точность, сопоставимую или даже слегка превосходящую базовую *CNN* (около 0,56–0,57 против 0,52–0,53), при этом показав более стабильную сходимость и меньший разрыв между кривыми обучения и валидации. Это свидетельствует о лучшей обобщающей способности модели и меньшей склонности к переобучению, что является критически важным для систем, работающих в реальных условиях.

Кроме того, визуальный анализ карт признаков подтвердил ключевую концепцию *Ghost*-сверток: значительная часть признаков в традиционных *CNN* является высококоррелированной и может быть эффективно сгенерирована из меньшего числа первичных признаков посредством дешёвых линейных преобразований. Также было отмечено отсутствие «мёртвых» (неактивных) фильтров в *Ghost*-архитектуре, что указывает на более полное и эффективное использование параметров модели.

Таким образом, предложенный подход на основе *Ghost*-сверток позволяет достичь оптимального баланса между точностью, скоростью работы и ресурсопотреблением. Модифицированная архитектура, в совокупности с существенным сокращением числа параметров, вычислительной сложности и времени вывода, представляет собой значительно более предпочтительное решение для развёртывания в ресурсоограниченных встраиваемых системах, таких как бортовые компьютеры БПЛА, *IoT*-устройства и мобильные робототехнические платформы, где критически важны энергоэффективность, быстродействие и надёжность работы в реальном времени.

Перспективы дальнейших исследований видятся в адаптации предложенной архитектуры для других классов задач компьютерного зрения (например, семантической сегментации, детекции объектов), а также в её оптимизации под конкретные аппаратные платформы с использованием методов нейрохардварного дизайна (*NAS*) и квантования.

Список литературы

1. Эдель, Г. Е. Исследование алгоритма распознавания пешеходов с использованием NVIDIA Jetson Nano и модели MobileNet V2 / Г. Е. Эдель, В. В. Капустин, М. Е. Сукотнова // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2021. – № 1-2. – С. 237-241. – EDN XCWQTS.

2. Детектирование защитных масок в промышленности в потоковом видео на модели Mobilenet V3 SSD / В. А. Эвиев, В. В. Лиджи-Гаряев, А. Н. Бадрудинова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 9. – С. 62-68. – DOI 10.17513/snt.40149. – EDN VOZIGK.

3. Aghaei, N. Osdes_net: oil spill detection based on efficient_shuffle network using synthetic aperture radar imagery / N. Aghaei, G. Akbarizadeh, A. Kosarian // Geocarto International. – 2022. – Vol. 37, No. 26. – P. 13539-13560. – DOI 10.1080/10106049.2022.2082545. – EDN CHNSKX.

4. Сацюк, А. В. Оптимизация архитектуры YOLOv8 для задач захвата объекта БПЛА: анализ компромисса между точностью, скоростью и вычислительными ресурсами / А. В. Сацюк // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2(98). – С. 35-42. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_35. – EDN LCAOOM.

5. Сацюк, А. В. Модификация модели YOLO для гибридной системы детекции и трекинга в БПЛА с автоматическим наведением / А. В. Сацюк, Н. В. Володарец // Информационно-управляющие системы. – 2025. – № 4(137). – С. 36-44. – DOI 10.31799/1684-8853-2025-4-36-44. – EDN YKQVJU.

6. Shakkouf, A. Review on Optimization Techniques of Binary Neural Networks / A. Shakkouf // Journal of Instrument Engineering. – 2023. – Vol. 66, No. 11. – P. 926-935. – DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-11-926-935. – EDN MMOJEY.

7. Лыгин, Е. Д. Исследование алгоритмов квантования архитектур сверточных нейронных сетей для решения задачи сегментации / Е. Д. Лыгин, И. В. Сгибнев, Б. В. Вишняков // Моделирование авиационных систем: Сборник тезисов докладов V Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 29–30 ноября 2023 года. – Москва: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2023. – С. 335-337. – EDN DYNYJK.

8. Han, K. GhostNet: More Features from Cheap Operations / K. Han, Y. Wang, Q. Tian, J. Guo, C. Xu, Ch. Xu // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2020. – P. 1580–1589.

9. Оптимизации оценки качества полупроводниковых пластин с помощью нейротехнологий CNN / О. Н. Чирков, А. Б. Антиликаторов, К. М. Шкаровский, М. Н. Тамбовцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 1. – С. 81-87. – DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.1.012. – EDN MCTMUL.

10. Taubakabyl, N. M. Convolutional neural networks in detecting speech activity in a stream / N. M. Taubakabyl // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. – 2024. – No. 4(16). – P. 33-40. – DOI 10.53360/2788-7995-2024-4(16)-5. – EDN CHOVEV.

11. Андриянов, Н. А. Разработка интеллектуальной системы распознавания дорожных знаков на основе методов компьютерного зрения и дистилляции / Н. А. Андриянов, А. Н. Алюнов, М. А. Морозов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2023. – Т. 21, № 5. – С. 27-35. – DOI 10.18127/j20700814-202305-04. – EDN GCLCXA.

12. Архипов, П. О. Разработка алгоритмов генерации синтетических данных на основе диффузионных нейросетевых моделей / П. О. Архипов, А. А. Стычук // Информационные системы и технологии. – 2025. – № 2(148). – С. 60-66. – EDN JWANHA.

13. Sewak, M. Neural AutoForensics: Comparing Neural Sample Search and Neural Architecture Search for malware detection and forensics / M. Sewak, S. K. Sahay, H. Rathore // Forensic Science International: Digital Investigation. – 2022. – Vol. 43. – P. 301444. – DOI 10.1016/j.fsidi.2022.301444. – EDN AEKUSZ.

14. Сацюк, А. В. Гибридные алгоритмы компьютерного зрения для прецизионного автономного управления БПЛА : монография / А.В. Сацюк, Н.В. Володарец. — Москва : ИНФРА-М, 2026. — 178 с.: ил. - (Научная мысль). — DOI 10.12737/2227081. - ISBN 978-5-16-021492-4. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2227081 (дата обращения: 30.11.2025).

15. 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.

References

1. Edel, G. E. Research of pedestrian recognition algorithm using NVIDIA Jetson Nano and MobileNet V2 model / G. E. Edel, V. V. Kapustin, M. E. Sukotnova // Electronic Means and Control Systems. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – 2021. – No. 1-2. – P. 237-241. – EDN XCWQTS.

2. Detection of protective masks in industry in streaming video using the MobileNet V3 SSD model / V. A. Eviev, V. V. Lidzhi-Garyaev, A. N. Badrudinova [et al.] // Modern High Technologies. – 2024. – No. 9. – P. 62-68. – DOI 10.17513/snt.40149. – EDN VOZIGK.

3. Aghaei, N. Osdes_net: oil spill detection based on efficient_shuffle network using synthetic aperture radar imagery / N. Aghaei, G. Akbarizadeh, A. Kosarian // Geocarto International. – 2022. – Vol. 37, No. 26. – P. 13539-13560. – DOI 10.1080/10106049.2022.2082545. – EDN CHNSKX.

4. Satsiuk, A. V. Optimization of YOLOv8 architecture for UAV object capture tasks: analysis of the trade-off between accuracy, speed, and computational resources / A. V. Satsiuk // Bulletin of Rostov State University of Transport. – 2025. – No. 2(98). – P. 35-42. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_35. – EDN LCAOOM.

5. Satsiuk, A. V. Modification of the YOLO model for a hybrid detection and tracking system in UAVs with automatic guidance / A. V. Satsiuk, N. V. Volodarets // Information and Control Systems. – 2025. – No. 4(137). – P. 36-44. – DOI 10.31799/1684-8853-2025-4-36-44. – EDN YKQVJU.

6. Shakkouf, A. Review on Optimization Techniques of Binary Neural Networks / A. Shakkouf // Journal of Instrument Engineering. – 2023. – Vol. 66, No. 11. – P. 926-935. – DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-11-926-935. – EDN MMOJEY.

7. Lygin, E. D. Research of quantization algorithms for convolutional neural network architectures for solving the segmentation problem / E. D. Lygin, I. V. Sgibnev, B. V. Vishnyakov // Modeling of Aviation Systems: Collection of abstracts of the V All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, November 29-30, 2023. – Moscow: State Research Institute of Aviation Systems, 2023. – P. 335-337. – EDN DYNYJK.

8. Han, K. GhostNet: More Features from Cheap Operations / K. Han, Y. Wang, Q. Tian, J. Guo, C. Xu, Ch. Xu // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2020. – P. 1580–1589.

9. Optimization of semiconductor wafer quality assessment using CNN neurotechnologies / O. N. Chirkov, A. B. Antilikatorov, K. M. Shkarovsky, M. N. Tambovtsev // Bulletin of Voronezh State Technical University. – 2025. – Vol. 21, No. 1. – P. 81-87. – DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.1.012. – EDN MCTMUL.

10. Taubakabyl, N. M. Convolutional neural networks in detecting speech activity in a stream / N. M. Taubakabyl // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. – 2024. – No. 4(16). – P. 33-40. – DOI 10.53360/2788-7995-2024-4(16)-5. – EDN CHOVEV.

11. Andriyanov, N. A. Development of an intelligent road sign recognition system based on computer vision and distillation methods / N. A. Andriyanov, A. N. Alyunov, M. A. Morozov // Information-Measuring and Control Systems. – 2023. – Vol. 21, No. 5. – P. 27-35. – DOI 10.18127/j20700814-202305-04. – EDN GCLCXA.

12. Arkhipov, P. O. Development of algorithms for synthetic data generation based on diffusion neural network models / P. O. Arkhipov, A. A. Stychuk // Information Systems and Technologies. – 2025. – No. 2(148). – P. 60-66. – EDN JWANHA.

13. Sewak, M. Neural AutoForensics: Comparing Neural Sample Search and Neural Architecture Search for malware detection and forensics / M. Sewak, S. K. Sahay, H. Rathore // Forensic Science International: Digital Investigation. – 2022. – Vol. 43. – P. 301444. – DOI 10.1016/j.fsidi.2022.301444. – EDN AEKUSZ.

14. Satsiuk, A. V. Hybrid Computer Vision Algorithms for Precision Autonomous UAV Control: monograph / A.V. Satsiuk, N.V. Volodarets. — Moscow : INFRA-M, 2026. — 178 p.: ill. - (Scientific Thought). — DOI 10.12737/2227081. - ISBN 978-5-16-021492-4. - Text : electronic. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/2227081 (accessed: 30.11.2025).

15. Volodarets N.V., Satsyuk A.V. Steady tracking and trajectory correction of unmanned aerial vehicles in conditions of limited visibility using multisensory data // Sustainable development of mountainous territories. – 2025. – Vol. 17. – No. 3. – pp. 1320-1330. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330.

Satsiuk A.V., Yakunin D.A., Boroday A.S.

ELIMINATING REDUNDANCY IN CNNs USING GHOST CONVOLUTIONS FOR EMBEDDED SYSTEMS

Abstract. *The relevance of the work is driven by the need to deploy efficient computer vision models on embedded systems with strict constraints on computational resources, power consumption, and memory, such as onboard computers of autonomous vehicles. Traditional convolutional neural networks (CNNs) often generate redundant and highly correlated feature maps, leading to inefficient resource utilization. The paper addresses the problem of minimizing this redundancy to create highly efficient architectures. As a solution, the application of the Ghost convolution approach is proposed, which allows generating a portion of features through inexpensive linear transformations from a smaller set of primary maps. As a result, an optimized Ghost-CNN architecture has been developed and investigated. Experiments have shown that the proposed method significantly reduces the computational complexity and the number of model parameters while maintaining high classification accuracy and improving training stability compared to the baseline CNN. The obtained results confirm the promise of using Ghost convolutions for creating compact and efficient neural networks tailored to the requirements of real-time embedded systems.*

Keywords: *convolutional neural networks, embedded systems, architecture optimization, Ghost convolutions, computational efficiency, resource constraints, computer vision, UAV onboard systems.*

Сведения об авторах:

Сацюк Александр Владимирович
ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», Донецк, Россия
Заведующий научно-исследовательской лабораторией искусственного интеллекта
Кандидат технических наук
e-mail: alexandrsatsuk@gmail.com

Якунин Дмитрий Арсенович
ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», Донецк, Россия
Студент магистратуры специальности «Информационно-вычислительные технологии»
e-mail: dimayakuninyakunin@yandex.ru

Бородай Андрей Сергеевич
ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», Донецк, Россия
Студент магистратуры специальности «Информационно-вычислительные технологии»
e-mail: andrey.boroday@bk.ru

Information about the authors:

Satsiuk Alexander Vladimirovich
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

Yakunin Dmitry Arsenovich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Donetsk Institute of Railway Transport”, Donetsk, Russia
Master’s Student, specialty “Information and Computing Technologies”
e-mail: dimayakuninyakunin@yandex.ru

Boroday Andrey Sergeevich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Donetsk Institute of Railway Transport”, Donetsk, Russia
Master’s Student, specialty “Information and Computing Technologies”
e-mail: andrey.boroday@bk.ru

УДК 629.3: 004.8

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

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. *Работа предлагает концепцию проактивной системы поддержки водителя (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS), объединяющей данные сенсоров и биометрии с адаптивным механизмом внимания. Представлены критерии оценки алгоритмов компьютерного зрения, анализ уязвимостей ADAS и меры повышения их устойчивости. Показано, что сочетание мультимодальной интеграции, объяснимого ИИ и технологий связи «транспортное средство – всё» (Vehicle-to-Everything, V2X), включающих взаимодействие между транспортными средствами (Vehicle-to-Vehicle, V2V), с инфраструктурой (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) и с пешеходами (Vehicle-to-Pedestrian, V2P), формирует основу для следующего поколения безопасных интеллектуальных автомобильных систем.*
Ключевые слова: *интеллектуальные транспортные технологии, ассистивные системы принятия решений, ADAS, комплексная обработка данных, физиологические индикаторы водителя, машинное зрение, глубокое обучение, V2X-технологии, интерфейсы взаимодействия.*

Актуальность и постановка задачи

Стремительное развитие интеллектуальных транспортных систем сталкивается с фундаментальной проблемой: несмотря на технологический прогресс, человеческий фактор остаётся ключевой причиной дорожных аварий. Это противоречие усугубляется асимметричным развитием современных систем помощи водителю (ADAS). ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) — современные системы помощи водителю, включающие адаптивный круиз-контроль, автоматическое торможение, удержание полосы и др. При значительных достижениях в алгоритмах анализа внешней дорожной обстановки, интеграция данных о психофизиологическом состоянии водителя остаётся на уровне исследований и не находит массового применения в серийных автомобилях. Данный дисбаланс сужает функциональность систем до реактивного реагирования на уже возникшие угрозы и снижает их эффективность в условиях повышенной когнитивной нагрузки оператора, что не позволяет реализовать проактивное прогнозирование опасных ситуаций.

Анализ последних исследований

Проведенный анализ научной литературы выявил устойчивую тенденцию к переходу от изолированных систем к комплексным экосистемам «умного» автомобиля [1]. Однако, как показывают исследования в области интеграции данных, разрыв между теоретическими возможностями мультимодального сенсорного синтеза, описанными в научных публикациях, и их практической реализацией в серийных автомобилях остаётся значительным [2]. Работы, посвящённые адаптации алгоритмов компьютерного зрения из смежных областей, подтверждают их потенциал, но часто игнорируют критически

важные аспекты эксплуатационной надёжности и безопасности в реальных, неконтролируемых дорожных условиях [3, 4]. Важный вклад в развитие интеллектуальных транспортных систем вносят отечественные исследования, направленные на адаптацию мировых технологий к российским дорожным условиям, климату и нормативным требованиям [5–10]. Например, работы [5, 8] посвящены методам детекции транспорта и пешеходов с учетом локальных особенностей, а исследования [6, 9] фокусируются на интеграции лидарных систем и вопросах кибербезопасности ADAS.

Цель и научная новизна работы

Целью исследования является разработка комплексной концепции интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР), обеспечивающей синтез мультимодальных данных о дорожной обстановке и психофизиологическом состоянии водителя. В рамках достижения цели определяются архитектурные решения и алгоритмические подходы, позволяющие осуществить переход от реактивных к проактивным системам с возможностью прогнозирования опасных ситуаций и адаптации интерфейса в зависимости от контекста и состояния оператора.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработка комплексной концепции проактивной СППР с адаптивным механизмом внимания для динамического ранжирования значимости разнородных данных, формализованной в виде математической модели и концептуальной структурно-функциональной схемы модулей системы.

2. Создание методологии сравнительного анализа и тестирования алгоритмов компьютерного зрения для ADAS, основанной на использовании специализированных транспортных датасетов (KITTI, BDD100K) и учитывающей критерии реальной эксплуатации.

3. Проведение анализа уязвимостей современных систем и разработка комплекса мер защиты, направленных на повышение устойчивости алгоритмов к адверсариальным атакам и оптическим искажениям.

Основная часть

1. Обзор современного состояния и тенденций

Цифровая трансформация транспортного комплекса характеризуется активным внедрением интеллектуальных технологий. Однако, несмотря на прогресс в автоматизации, человеческий фактор остаётся доминирующей причиной дорожных происшествий. Согласно данным международных организаций, до 90% аварий происходят из-за ошибок водителя, вызванных утомлением, потерей концентрации, стрессом или неверной оценкой обстановки. Эти статистические данные подтверждают актуальность разработки интеллектуальных платформ, способных компенсировать человеческие ограничения для повышения безопасности.

Современные тенденции развития указывают на эволюцию от простых систем оповещения к сложным проактивным экосистемам, способным не только реагировать на угрозы, но и прогнозировать потенциально опасные сценарии. Реализация такого подхода требует создания архитектур для обработки гетерогенных данных от внешних сенсоров, внутренних датчиков транспортного средства и систем мониторинга психофизиологического состояния водителя. Прогресс в области искусственного интеллекта создаёт технологическую основу для подобных комплексных решений [11-13].

Формируется единая экосистема «человек–машина», где интеллектуальные компоненты активно взаимодействуют с водителем. Анализ существующих решений позволяет выделить три основные парадигмы построения систем поддержки (см. рисунок 1).

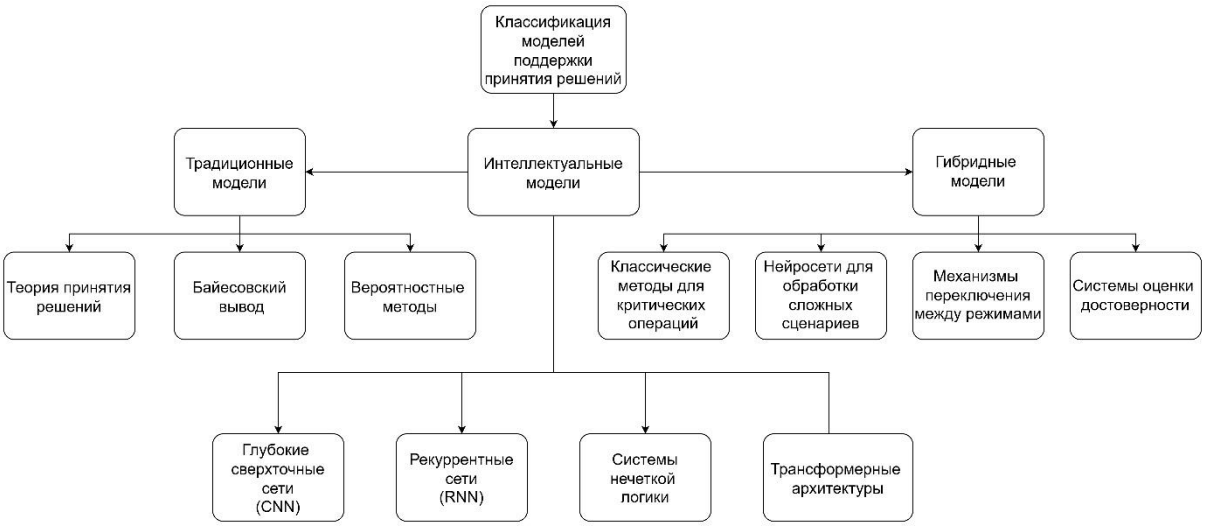


Рисунок 1. Классификация моделей поддержки принятия решений

Традиционные подходы, основанные на теории принятия решений и байесовских методах, отличаются прозрачностью логики, что способствует доверию пользователя. Например, детерминированные алгоритмы распознавания дорожных знаков позволяют отследить каждый этап обработки. Однако такие системы обладают ограниченной адаптивностью в динамичной дорожной обстановке, особенно при работе с неполными или противоречивыми данными, а их эффективность снижается в сложных погодных условиях.

Современные нейросетевые архитектуры (глубокие сверточные сети, гибридные модели) демонстрируют высокую эффективность при обработке больших объёмов многомерной информации. Их ключевым недостатком является «чёрный ящик» — непрозрачность внутренних процессов принятия решений, что снижает доверие и затрудняет диагностику ошибок. Кроме того, они предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам.

Комбинированные (гибридные) решения интегрируют сильные стороны обоих подходов и представляют наиболее перспективное направление. Такие системы используют классические, объяснимые методы для критически важных операций (например, байесовские сети для оценки вероятности столкновения) и нейросетевые алгоритмы для обработки сложных сенсорных данных (анализ сцен, распознавание объектов). Этот подход позволяет достичь оптимального баланса между точностью, скоростью, адаптивностью и необходимым уровнем доверия пользователя.

2. Эволюция архитектур ADAS

Эволюция архитектур систем помощи водителю (ADAS) демонстрирует последовательную трансформацию от простых однофункциональных решений к сложным многоуровневым структурам, комплексно охватывающим все аспекты взаимодействия «водитель–автомобиль–среда» (см. рисунок 2).

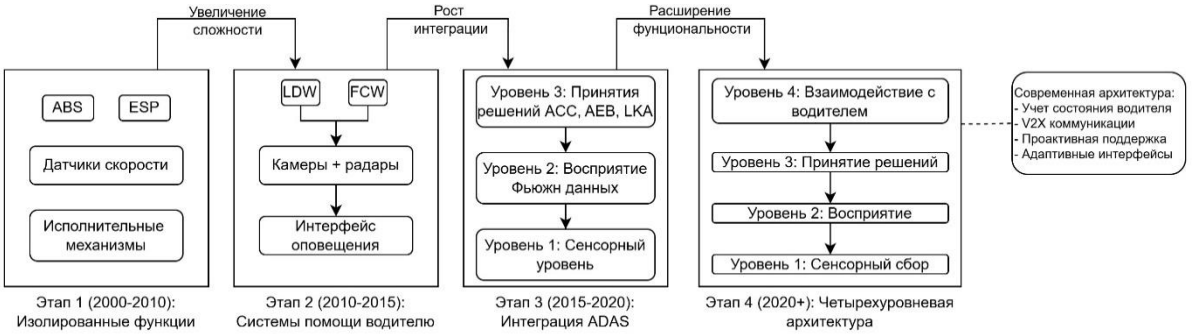


Рисунок 2. Эволюция архитектур ADAS

Современная архитектура может быть представлена в виде четырёх ключевых уровней:

1) Сенсорный уровень интегрирует данные от разнообразных источников: оптических и инфракрасных камер, радаров, лидаров, ультразвуковых датчиков, а также биометрических систем мониторинга состояния водителя. Для повышения надёжности и полноты картины применяется сенсорный фьюжн — объединение информации от разнотипных датчиков [14, 15]. Например, комбинация данных камеры (высокая детализация, семантика) и радара (точное измерение дистанции и скорости, независимость от погоды) позволяет компенсировать недостатки каждого из сенсоров в отдельности.

2) Уровень восприятия отвечает за преобразование «сырых» сенсорных данных в семантическую информацию о дорожной обстановке. На этом уровне решаются задачи компьютерного зрения: детекция и классификация объектов, семантическая сегментация сцены, оценка траекторий и скоростей. Критическое требование — минимальная задержка обработки в реальном времени, что обеспечивается использованием специализированных аппаратных ускорителей.

3) Уровень принятия решений является интеллектуальным ядром системы. На основе контекстуальной информации от уровня восприятия он формирует прогнозы, оценивает риски, планирует безопасную траекторию и генерирует управляющие команды или рекомендации. Современный тренд — адаптивный уровень автоматизации, который динамически изменяется в зависимости от сложности дорожной ситуации, состояния водителя и других факторов.

4) Уровень взаимодействия (HMI) обеспечивает эффективную и безопасную коммуникацию с водителем через мультимодальные интерфейсы (визуальные, звуковые, тактильные). Ключевая тенденция — адаптивность: система изменяет форму и интенсивность предупреждений в зависимости от когнитивной нагрузки оператора. Например, в условиях перегруженности дороги визуальный сигнал может быть заменён на тактильный (вибрация руля или сиденья).

Ключевым ограничением большинства коммерчески доступных решений остаётся их фокус преимущественно на внешней обстановке при минимальном учёте психофизиологического состояния водителя. Игнорирование таких параметров, как усталость, стресс или уровень концентрации, существенно сужает потенциал систем в части проактивного предотвращения аварий, вызванных человеческим фактором.

3. Математическая модель проактивной системы

На основе проведенного анализа предлагается обобщенная структурная формула функционала комплексной системы поддержки водителя. Модель представляет собой взвешенную аддитивную композицию выходов функциональных модулей, где

динамические веса определяются адаптивным механизмом внимания на основе текущего контекста. Данный формализм служит прямой основой для алгоритмической реализации системы [16].

Формальная запись модели:

$$F(t) = \alpha(t)\cdot M_ext(S_cam, S_rad, S_lid) + \beta(t)\cdot M_bio(B_ecg, B_eda, B_eye) + \gamma(t)\cdot M_V2X(V_veh, V_inf, V_ped) + \delta(t)\cdot M_veh(T_spd, T_acc, T_yaw) \quad (1)$$

где $F(t)$ — итоговая функция принятия решений системы в момент времени t

$\alpha(t), \beta(t), \gamma(t), \delta(t)$ — динамические весовые коэффициенты, определяемые адаптивным механизмом внимания

M_ext — модуль анализа внешней дорожной обстановки

S_cam, S_rad, S_lid — данные от камер, радаров и лидаров

M_bio — модуль мониторинга биометрических параметров водителя

B_ecg, B_eda, B_eye — биопоказатели: ЭКГ, КГР, отслеживание глаз

M_V2X — модуль V2X-коммуникаций (Vehicle-to-Everything)

V_veh, V_inf, V_ped — данные V2V, V2I, V2P коммуникаций

M_veh — модуль телеметрии транспортного средства

T_spd, T_acc, T_yaw — параметры ТС: скорость, ускорение, угловая скорость

Представленная модель (1) является взвешенной аддитивной композицией выходов функциональных модулей, где:

• операция «+» означает объединение (интеграцию) разнородных данных;

• операция «·» — взвешивание вклада каждого модуля в зависимости от его значимости в текущем контексте.

Цель системы — минимизация риска ДТП за счет проактивного прогнозирования опасных ситуаций на основе мультимодальных данных.

Адаптивный механизм внимания.

Динамические весовые коэффициенты $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$, $\delta(t)$ вычисляются с помощью алгоритма адаптивного внимания, основанного на оценке:

1) качества данных (например, уровень зашумленности видеопотока);

2) контекста (погода, тип дороги, интенсивность движения);

3) состояния водителя (усталость, стресс, концентрация). Формально механизм можно представить как:

$$\alpha(t) = \sigma(W\cdot[C(t), Q(t), S(t)] + b) \quad (2)$$

где σ – функция активации,

W, b – обученные параметры,

C(t) — контекстные признаки,

Q(t) — качество данных,

S(t) — состояние водителя.

Пример вычисления коэффициентов:

При тумане: α_камера снижается с 0.8 до 0.3, α_радар повышается с 0.2 до 0.7. При обнаружении усталости водителя: $\beta(t)$ (вес биометрических данных) увеличивается с 0.4 до 0.9.

4. Архитектурное решение и визуализация

Для наглядного представления и конкретизации архитектуры системы разработана концептуальная структурно-функциональная схема модулей проактивной СППР (см. рисунок 3), которая детализирует формальную модель (1) и показывает взаимодействие между ключевыми модулями. Архитектура включает:

- внешние источники данных (сенсоры, биодатчики, V2X-инфраструктура);
- функциональные модули (*M_ext*, *M_bio*, *M_V2X*, *M_veh*);
- адаптивный механизм внимания (вычисляющий весовые коэффициенты);
- ядро принятия решений (интегрирующее взвешенные данные);
- интерфейс водителя (мультимодальный выход системы).

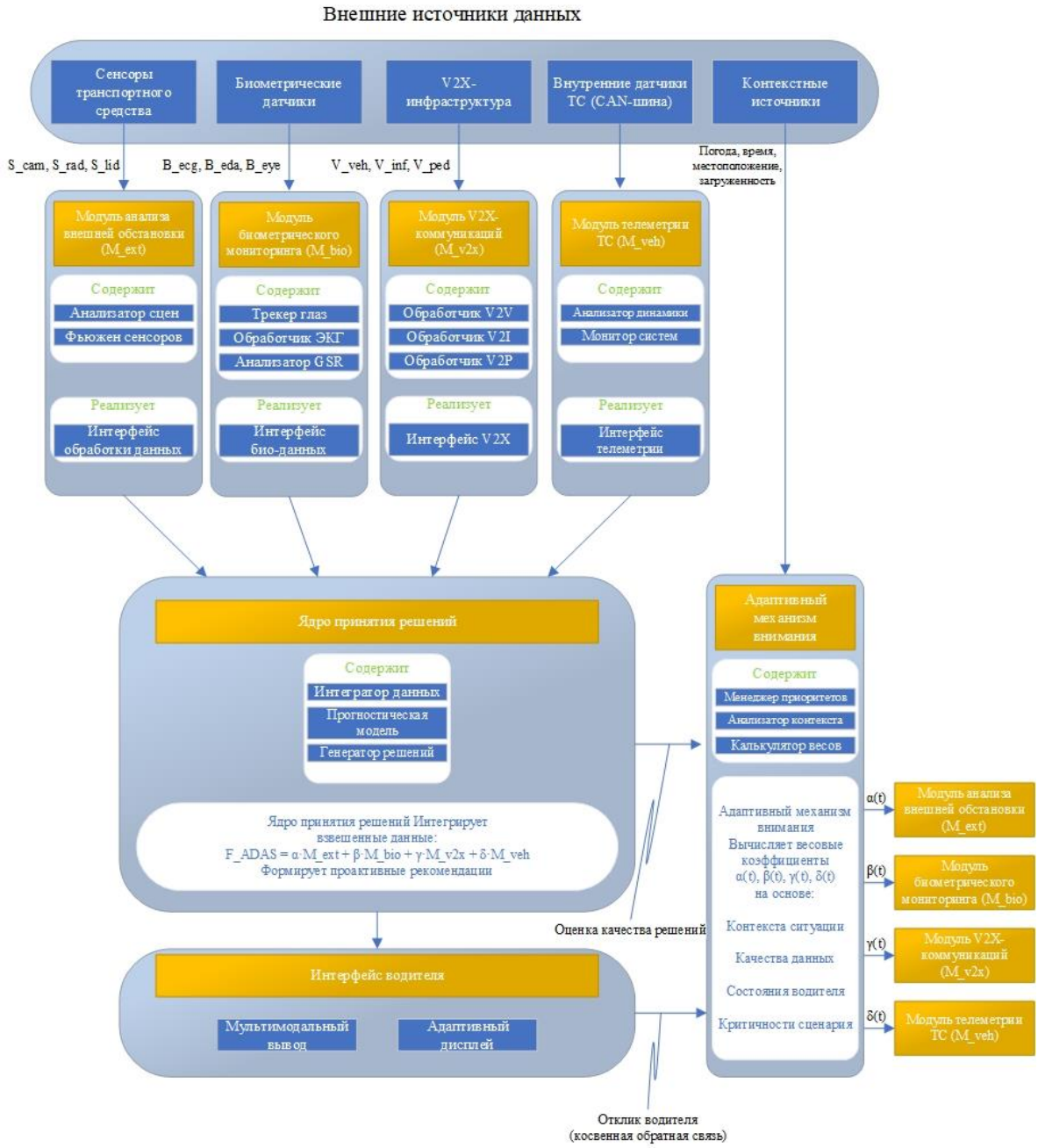


Рисунок 3. Концептуальная структурно-функциональная схема модулей проактивной СППР

5. Комплексная обработка разнородных данных

Комплексная обработка разнородных данных является ключевым направлением эволюции автомобильных ассистивных систем. Интеграция информации от множества источников позволяет сформировать целостную и контекстно-обогащенную модель дорожной ситуации, учитывающую как состояние внешней среды, так и состояние водителя.

Источники информации в современных системах формируют мультимодальный поток:

- визуальные данные: потоки с камер видимого, инфракрасного и тепловизионного диапазонов;
- радиолокационные и лидарные данные: информация о трёхмерном пространственном расположении, скорости и форме объектов;
- биометрические показатели: параметры сердечного ритма (ЭКГ), кожно-гальваническая реакция (КГР), характеристики движений глаз (отслеживание взгляда) и мимики;
- телеметрия транспортного средства: данные о скорости, ускорении, угле поворота руля, состоянии педалей и электронных систем;
- контекстуальные данные внешней среды: информация о погодных условиях, освещённости, типе и состоянии дорожного покрытия.

Методы интеграции данных могут быть реализованы на различных архитектурных уровнях:

- ранний фьюжн (сырой уровень): объединение исходных, необработанных данных от датчиков до их глубокой обработки;
- поздний фьюжн (уровень признаков или решений): комбинирование уже извлечённых признаков или окончательных результатов (решений) отдельных специализированных моделей, обученных на своих типах данных.

Наиболее перспективным представляется гибридный подход с адаптивными механизмами внимания. Такая система динамически перераспределяет значимость (вес) каждого источника информации в зависимости от контекста. Например, в условиях тумана приоритет смещается в сторону радарных данных, а при обнаружении признаков утомления водителя — в сторону биометрических показателей.

Практические приложения комплексной обработки данных включают:

- прогностические системы безопасности: предсказание риска столкновения с учётом не только траектории объектов, но и прогнозируемой реакции конкретного водителя;
- адаптивные системы помощи: автоматическая настройка агрессивности предупреждений или уровня вмешательства (например, чувствительности экстренного торможения) в зависимости от текущего уровня стресса или когнитивной нагрузки оператора;
- интеллектуальное парковочное управление: инициирование или упрощение автоматического парковочного манёвра при обнаружении у водителя выраженной усталости.
- раннее ситуационное предупреждение: выявление потенциально опасных сценариев на ранней стадии на основе комплексного анализа нештатного поведения водителя (например, микросон) и внешних рисков.

Особую научно-техническую сложность представляет надёжная обработка биометрических данных в реальных условиях эксплуатации. Ключевыми вызовами являются компенсация артефактов, вызванных вибрацией, движением водителя, изменением освещённости в салоне, а также обеспечение удобства и ненавязчивости систем мониторинга.

6. Сравнительный анализ алгоритмов компьютерного зрения

Анализ последних прорывов в области машинного зрения открывает значительные возможности для адаптации передовых алгоритмов детекции в автомобильных системах поддержки водителя (ADAS). Современные подходы можно разделить на три ключевых направления:

- YOLO-семейство: эти архитектуры оптимизированы для работы в реальном времени, что является критическим требованием для автомобильных приложений. Согласно исследованию [17], последняя версия YOLOv8 демонстрирует прирост точности на 9.3% mAP по сравнению с YOLOv5 при детекции объектов в датасете COCO, что подтверждает её эффективность для автомобильных применений.

- Двухступенчатые детекторы: данные архитектуры (например, на основе семейства R-CNN) обеспечивают высокую точность детекции, особенно в сложных сценах с большим количеством перекрывающихся объектов, хотя и предъявляют более высокие требования к вычислительным ресурсам.

- Трансформерные архитектуры: модели, основанные на механизме внимания (такие как DETR), демонстрируют большой потенциал в эффективном анализе пространственных отношений между объектами на сцене.

Эволюция архитектур семейства YOLO представляет особый практический интерес для автомобильной отрасли. Преимущества последних версий заключаются не только в высокой точности и скорости, что напрямую повышает надежность распознавания пешеходов, транспортных средств и дорожных знаков, но и в оптимизации для работы на оборудовании с ограниченными ресурсами. Например, компактная версия YOLOv8n (nano) является оптимальным выбором для встраиваемых бортовых систем, обеспечивая рекордное соотношение производительности и эффективности. Кроме того, на базе этих моделей создаются специализированные решения. Так, системы оценки скорости транспортных средств используют YOLOv8 для отслеживания целевого объекта в видеопотоке, что позволяет вычислять пройденное им расстояние между кадрами и, с помощью калибровки камеры, точно определять скорость.

7. Методология оценки на специализированных датасетах

Современные исследования в области автомобильного компьютерного зрения требуют использования специализированных датасетов, валидных для конкретных задач. Среди них ключевую роль играют методологически различные наборы данных KITTI и BDD100K.

Датасет KITTI [18] представляет собой специализированную базу для разработки систем точного трёхмерного восприятия. Методология сбора основана на синхронной регистрации данных стереокамер, лидара и инерциальных датчиков. Его отличительная черта — прецизионная аннотация объектов с помощью трёхмерных ограничивающих параллелепипедов, что обеспечивает точное определение их пространственного положения и габаритов. Географическая ограниченность датасета компенсируется высоким качеством метрических измерений, делая KITTI незаменимым для задач, где критична пространственная точность: трёхмерное детектирование, оценка траекторий, создание парковочных ассистентов.

В отличие от него, методология BDD100K [19] сфокусирована на обеспечении робастности алгоритмов в разнообразных условиях эксплуатации. Этот датасет характеризуется систематическим варьированием условий съёмки: времени суток, погодных явлений, типа дорожной инфраструктуры. Его аннотационная схема включает двумерное детектирование объектов, семантическую сегментацию дороги и разметку полос. Масштаб и диверсификация условий делают BDD100K оптимальным

инструментом для валидации систем, требующих устойчивой работы в реальных сценариях: адаптивный круиз-контроль, удержание полосы движения, мониторинг слепых зон.

Таким образом, выбор между датасетами определяется целевыми задачами системы. KITTI обеспечивает метрологическую точность для решений, критичных к пространственным измерениям, а BDD100K проверяет устойчивость алгоритмов к изменчивой окружающей среде. Для комплексной разработки надежных автомобильных систем восприятия рекомендуется комбинированное использование обоих датасетов на различных этапах проектирования.

2.8. Современные методы трекинга и адаптации

Современные методы трекинга:

- CSRT-трекеры показывают высокую устойчивость к изменениям внешнего вида объектов и их движения. Оптимизация этих алгоритмов для динамических условий открывает возможности для отслеживания участников дорожного движения в плотном трафике;
- глубокие трекеры используют нейросетевые архитектуры для ассоциации объектов между кадрами с высокой точностью;
- мультисенсорные трекеры комбинируют данные от разных типов сенсоров для повышения надежности отслеживания.

Адаптация для автомобильной среды:

- робастность к погодным условиям: разработка архитектур, устойчивых к дождю, снегу, туману и плохому освещению;
- обработка высокоскоростных сцен: алгоритмы, учитывающие высокую динамику автомобильного движения;
- энергоэффективность: оптимизация архитектур для работы на бортовых системах с ограниченными ресурсами.

Практические кейсы адаптации:

- исследования по оптимизации CSRT-алгоритмов для беспилотных систем демонстрируют потенциал для улучшения отслеживания пешеходов и других участников движения;
- модификации YOLO-архитектур предлагают решения для детекции объектов в условиях ограниченной видимости;
- применение -механизмов внимания позволяет фокусироваться на наиболее критичных областях дорожной сцены.

9. Анализ уязвимостей и архитектура сквозной защиты

На основе выявленных уязвимостей предлагается не просто набор мер, а целостная сквозная технология доверенного взаимодействия (Trusted Interaction Framework, TIF) для повышения устойчивости автомобильных систем компьютерного зрения [20-22]. Данная технология обеспечивает целостность и достоверность данных на всех этапах обработки — от сенсора до принятия решения, что составляет суть научной новизны работы.

9.1. Систематизация угроз и архитектура сквозной защиты

В рамках TIF предлагается системный подход, основанный на классификации угроз по уровням архитектуры проактивной СППР (см. Таблицу 1) и реализации соответствующих им защитных механизмов, образующих единый контур безопасности.

Таблица 1

Классификация угроз и мер защиты в рамках сквозной технологии доверенного взаимодействия (TIF) для проактивной СППР

Уровень системы	Класс угроз / Конкретная уязвимость	Предлагаемые меры защиты (элементы TIF)	Цель и ожидаемый результат
Сенсорный уровень	Оптические искажения: туман, дождь, блики, засветка. Физические помехи: загрязнение линз, вибрация. Целенаправленные помехи: лазерное ослепление камер.	Адаптивная калибровка в реальном времени: динамическая подстройка параметров камеры (экспозиция, баланс белого) и алгоритмов коррекции дисторсии на основе текущих условий. Мультимодальная валидация (консенсус сенсоров): кросс-проверка данных радара, лидара и камеры. При расхождении показаний одного сенсора сверх порога его вес в модели (1) автоматически снижается. Аппаратная избыточность: дублирование критических сенсоров (например, стереокамер) на разных сторонах ТС.	Гарантированное качество и достоверность входных данных независимо от внешних условий и целенаправленных воздействий.
Уровень алгоритмов и данных	Адверсариальные атаки: внесение патчей в изображение, вызывающих ошибки детекции ИИ. Ошибки модели: «слепые зоны» нейросетей, ложные срабатывания. Переобучение/недообучение на нерепрезентативных данных.	Доменно-специфичное adversarial training: дополнение датасетов (BDD100K, KITTI) сгенерированными атаками, характерными для дорожных сцен (имитация грязных знаков, специфичные граффити). Мониторинг уверенности модели и детекторы аномалий: анализ энтропии выходного распределения нейросети для выявления аномальных, малоправдоподобных предсказаний. Гибридная архитектура решений: использование объяснимых, детерминированных алгоритмов (например, для расчёта TTC — Time to Collision) для верификации критичных выводов нейросетей.	Повышение робастности (устойчивости) моделей к целенаправленным атакам, диагностируемость ошибок и «тёмных» срабатываний.
Уровень коммуникаций (V2X)	Кибератаки на канал: подмена пакетов (спуфинг), атаки «человек посередине» (MITM), отказ в обслуживании (DoS). Распространение недостоверной информации.	Сквозное шифрование и аутентификация сообщений: использование легковесных криптографических протоколов, соответствующих стандартам (ISO 21434, SAE J3061). Контекстно-зависимая фильтрация и проверка правдоподобия: анализ полученных V2X-сообщений (например, об экстренном торможении) на соответствие текущей локальной обстановке, скорости и траектории участников.	Защищённый, целостный и достоверный обмен данными в экосистеме «транспортное средство — всё».
Архитектурный (системный) уровень	Отказ или скомпрометированность одного функционального модуля. Несогласованность решений между модулями.	N-версионное программирование и консенсусное принятие решений: реализация критически важных функций (например, детекция пешехода) несколькими независимыми алгоритмами (нейросеть + классический детектор). Финальное решение принимается при достижении консенсуса (например, 2 из 3). Режим деградированной, но безопасной функциональности: при обнаружении неисправности или атаки система переключается в упрощённый, верифицированный режим работы (например, отключает автопилот, но сохраняет экстренное торможение).	Обеспечение отказоустойчивости и высокой доступности системы даже при частичной компрометации её компонентов.

9.2. Реализация и интеграция защитных механизмов

Предложенная технология TIF не является набором изолированных средств, а представляет собой адаптивный защитный контур, интегрированный в архитектуру проактивной СППР (см. Рисунок 3). Его работа основана на цикле из четырёх этапов:

1. Мониторинг: Непрерывный сбор телеметрии и метаданных со всех компонентов системы: уровень зашумлённости видеопотока, уверенность нейросетевых моделей, целостность криптографических подписей в V2X-сообщениях, согласованность данных между дублирующими сенсорами.

2. Анализ и оценка угроз: На основе заранее определённых политик и машинного обучения анализируется собранная телеметрия. Система определяет, является ли текущее состояние нормальным, деградированным (например, из-за погоды) или атакованным (например, обнаружена картина, характерная для adversarial-патча).

3. Адаптация и реагирование: В зависимости от результата оценки система динамически перестраивает свою работу, применяя меры из таблицы 1:

– При тумане: повышается коэффициент доверия к радару ($\alpha_{радар}(t) \uparrow$), активируется алгоритм компенсации дисторсии.

– При обнаружении признаков адверсариальной атаки на детектор: активируется модель-«сторож», подключается дублирующий алгоритм детекции, а водителю выдаётся предупреждение о необходимости взять управление на себя.

– При получении противоречивого V2X-сообщения: оно помещается в карантин, и его данные игнорируются до подтверждения из другого источника.

4. Протоколирование и обучение: Все инциденты и реакции системы записываются. Эти данные используются для офлайн-анализа, уточнения моделей угроз и последующего обновления алгоритмов (в том числе через механизмы коллективного обучения), замыкая петлю непрерывного улучшения безопасности.

Таким образом, сквозная технология доверенного взаимодействия (TIF) преобразует разрозненные защитные меры в целостный, самоадаптирующийся механизм, способный не только парировать известные угрозы, но и выявлять новые аномалии. Это формирует основу для создания самодиагностирующихся и самовосстанавливающихся автомобильных систем компьютерного зрения, что является прямым подтверждением научной новизны, заявленной в пункте 3.

10. Интеграция ключевых технологий и перспективы

Перспективное направление развития систем поддержки водителя включает синергию нескольких технологий (см. рисунок 4):

1) Объяснимый ИИ (XAI). Повышение прозрачности алгоритмов принятия решений критически важно для формирования доверия пользователей [23]. XAI-технологии позволяют визуализировать факторы, повлиявшие на решение, предоставлять объяснения в доступном формате, обеспечивать возможность корректировки поведения системы и создавать обратную связь для обучения водителя.

2) V2X-коммуникации. Интеграция технологий обмена данными между транспортными средствами и инфраструктурой существенно расширяет горизонт восприятия системы [24-26]. Это включает:

- V2V-обмен для координации движения и предупреждения о столкновениях.
- V2I-взаимодействие для получения информации от дорожной инфраструктуры.
- V2P-коммуникацию для обмена данными с пешеходами через мобильные устройства.
- V2N-подключение для интеграции с облачными сервисами.

3) Адаптивные интерфейсы нового поколения. Развитие направлено на создание интеллектуальных интерфейсов, учитывающих состояние водителя, через:

- Мультимодальное взаимодействие (голос, жесты, тактильная отдача).

- Контекстную адаптацию, динамически меняющую интерфейс в зависимости от ситуации.

- Прогностический подход, предугадывающий потребности водителя.

- Персонализацию под особенности конкретного пользователя.

4) Коллективное обучение. Использование облачных платформ для обмена опытом между транспортными средствами [27, 28, 29] открывает возможности для непрерывного обновления моделей на основе реальных данных, адаптации к локальным условиям, быстрого распространения решений для новых ситуаций и снижения требований к бортовым вычислительным ресурсам.

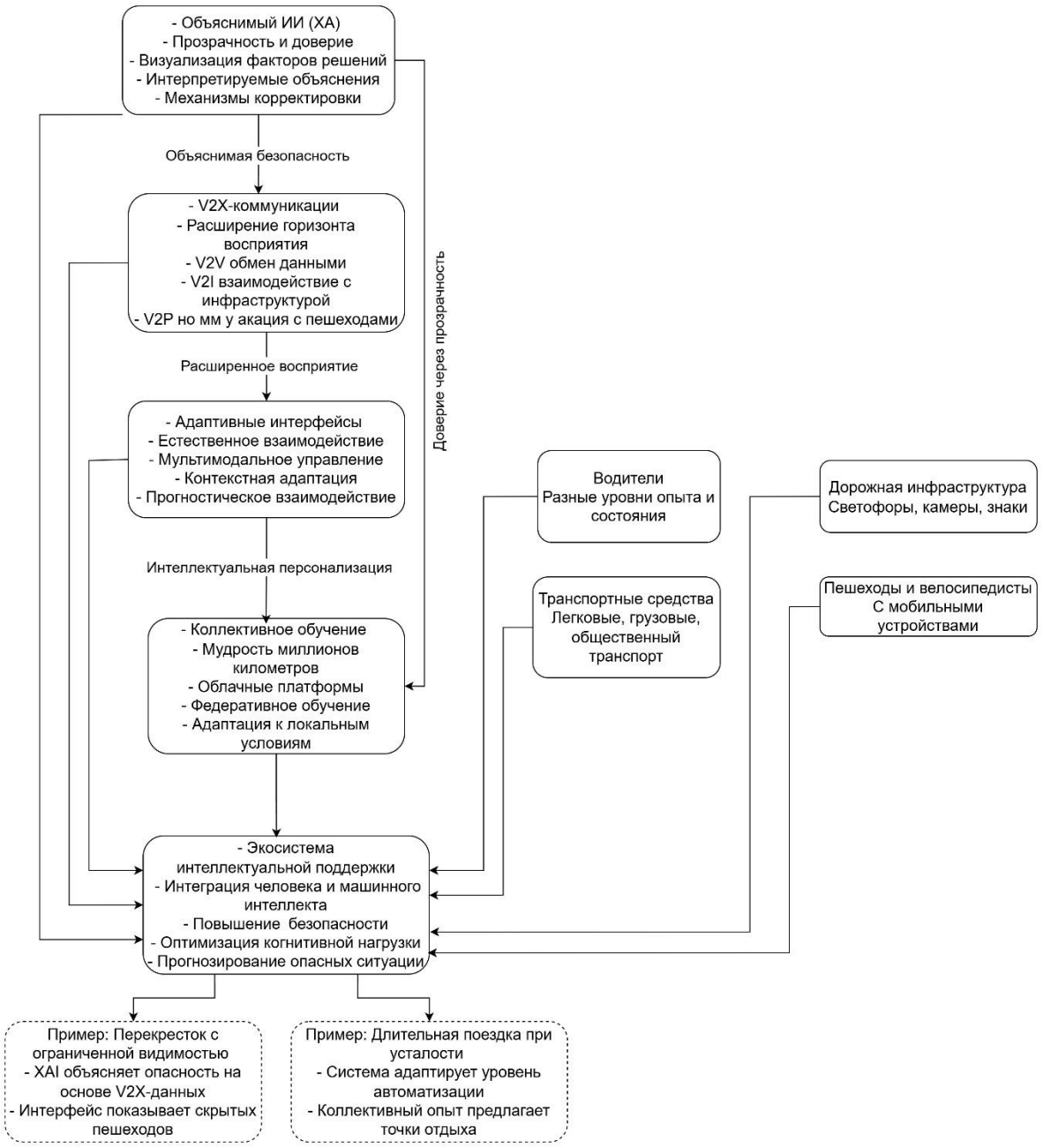


Рисунок 4. Интеграция ключевых технологий в экосистему интеллектуальных ассистивных систем

11. Вызовы и ограничения

Несмотря на значительный прогресс, современные ассистивные системы сталкиваются с комплексом серьёзных вызовов и ограничений, сдерживающих их массовое и безопасное внедрение.

Технологические барьеры остаются наиболее существенными. К ним относятся высокая вычислительная сложность современных алгоритмов, особенно глубоких нейронных сетей, что ограничивает их применение в доступных серийных автомобилях из-за стоимости и энергопотребления. Надежность сенсорных систем (камер, лидаров, радаров) значительно снижается в условиях плохой видимости, экстремальных погодных явлений или при загрязнении. Кроме того, высокое энергопотребление вычислительных модулей представляет особую проблему для электромобилей, сокращая запас хода.

Человеческие аспекты включают сложность формирования адекватного уровня доверия пользователя: необходимо найти баланс между недоверием к системе и чрезмерной на неё зависимостью. Плохой дизайн интерфейсов может увеличить когнитивную нагрузку на водителя, отвлекая его, вместо того чтобы помогать. Отдельную сложность представляют нерешенные этические дилеммы, возникающие в нештатных ситуациях (знаменитая «проблема вагонетки»), которые требуют формализации правил принятия решений.

Инфраструктурные вызовы носят системный характер. Отсутствие единых глобальных стандартов для протоколов обмена данными (V2X) затрудняет коммуникацию между автомобилями разных производителей и с инфраструктурой. Растут риски в области кибербезопасности, так как подключенные системы становятся мишенью для атак, что требует создания комплексных механизмов защиты данных и каналов связи. Правовое регулирование практически повсеместно отстаёт от скорости технологического развития, создавая правовой вакуум в вопросах ответственности, одобрения систем и защиты приватности.

Этические дилеммы и регулирование. Разработка проактивных ADAS сталкивается с необходимостью решения этических вопросов, таких как «проблема вагонетки» — выбор приоритета защиты в нештатных ситуациях. Требуется формирование нормативной базы, учитывающей национальные и международные стандарты, а также разработка алгоритмов, прозрачных и объяснимых с точки зрения принятия решений в критических сценариях.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать и обосновать концепцию проактивной интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) для транспортных средств, направленную на преодоление ключевых ограничений современных ADAS. Основная цель работы — создание комплексного подхода, обеспечивающего переход от реактивного реагирования на угрозы к их проактивному прогнозированию за счет синтеза мультимодальных данных о дорожной обстановке и психофизиологическом состоянии водителя — достигнута.

В результате работы получены следующие основные научные и практические результаты:

1) Разработана комплексная архитектура проактивной СППР, ядром которой является формальная математическая модель (1) в виде взвешенной аддитивной композиции функциональных модулей. Модель обеспечивает интеграцию данных от внешних сенсоров (камер, радаров, лидаров), биометрических датчиков водителя, телеметрии транспортного средства и V2X-коммуникаций. Ключевым элементом

архитектуры выступает адаптивный механизм внимания, динамически перераспределяющий весовые коэффициенты ($\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$, $\delta(t)$) в зависимости от контекста, качества данных и состояния оператора. Данный подход, визуализированный с помощью концептуальной структурно-функциональной схемы модулей системы, позволяет системе гибко фокусироваться на наиболее информативных источниках в реальном времени (например, на радарных данных в туман или на биометрии при признаках усталости), что принципиально отличает её от статических систем сенсорного фьюжна.

2) Предложена и апробирована методология сравнительного анализа алгоритмов компьютерного зрения для задач ADAS. Методология основана на использовании специализированных датасетов KITTI и BDD100K, что позволяет оценивать алгоритмы как с точки зрения метрологической точности (KITTI), так и робастности в разнообразных условиях эксплуатации (BDD100K). В рамках методологии подтверждена эффективность современных архитектур, в частности семейства YOLO (YOLOv8), для задач детекции и трекинга объектов в реальном времени, что является критичным для бортовых систем.

3) Разработана и систематизирована сквозная технология доверенного взаимодействия (Trusted Interaction Framework, TIF) для защиты проактивной СППР. На основе детального анализа уязвимостей предложена не совокупность разрозненных мер, а целостная архитектура безопасности, организованная по уровням системы (сенсорный, алгоритмический, коммуникационный, архитектурный). Данная технология, формализованная в виде классификационной таблицы угроз и мер (Таблица 1), реализует адаптивный цикл «мониторинг — оценка — реакция — обучение». Это обеспечивает комплексную защиту от адверсариальных атак, компенсацию оптических искажений, достоверность V2X-коммуникаций и общую отказоустойчивость системы, формируя основу для её перехода от пассивной защиты к проактивной и самовосстанавливающейся.

4) Определены стратегические направления интеграции ключечных технологий для следующего поколения ассистивных систем. Показано, что синергия объяснимого ИИ (XAI), расширенных V2X-коммуникаций и адаптивных интерфейсов нового поколения способна преодолеть барьеры, связанные с доверием пользователя, ограниченным горизонтом восприятия и высокими когнитивными нагрузками. Особо подчеркнута важность учета отечественного исследовательского и технологического опыта [5-10] для адаптации решений к локальным требованиям и условиям.

Научная новизна работы заключается в синтезе указанных элементов в целостную концепцию, формализованную математически и архитектурно, с акцентом на проактивность и адаптивность, что отличает её от существующих преимущественно реактивных решений.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- Разработка энергоэффективных алгоритмов мультимодальной интеграции для массовых серийных платформ.
- Создание персонализированных когнитивных моделей водителя, учитывающих долгосрочные поведенческие профили.
- Формализация этических принципов и стандартов объяснимости для автономных решений в критических ситуациях.
- Углубленное исследование методов коллективного (федеративного) обучения для постоянного улучшения моделей на основе данных реальной эксплуатации.

Таким образом, представленная концепция формирует теоретический и методологический фундамент для перехода к новому классу интеллектуальных транспортных систем. Эти системы, действуя как проактивные ассистивные комплексы,

способны не только компенсировать человеческие ограничения, но и прогнозировать риски, адаптивно взаимодействуя с водителем, что в долгосрочной перспективе ведёт к качественному повышению безопасности, эффективности и комфорта дорожного движения.

Список литературы

1. Vinoth, K. Multi-sensor fusion and segmentation for autonomous vehicle multi-object tracking using deep Q networks / K. Vinoth, P. Sasikumar // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14, No. 1. — P. 31130. — DOI 10.1038/s41598-024-82356-0. — EDN YGRQVI.

2. Implementation of modern approaches to development and testing of advanced driver assistance systems, including driverless systems / D. V. Endachev, S. V. Bakhmutov, V. V. Evgrafov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 июня 2021 года. — Novorossiysk, Virtual, 2021. — P. 012121. — DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012121. — EDN ALHBNH.

3. Huu, Ph. N. Proposing Lane and Obstacle Detection Algorithm Using YOLO to Control Self-Driving Cars on Advanced Networks / Ph. N. Huu, Q. Pham Thi, Ph. Tong Thi Quynh // Advances in Multimedia. — 2022. — Vol. 2022. — P. 3425295. — DOI 10.1155/2022/3425295. — EDN CSVICE.

4. 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, EDN: YKQVJU.

5. Омеров, М. А. Исследование возможности детектирования и классификации видов транспорта с помощью современных технологий машинного зрения / М. А. Омеров, И. Д. Фомин // Искусственный интеллект в промышленных, коммерческих, медицинских и финансовых приложениях : Сборник статей научно-технического семинара студентов кафедры "Инженерной кибернетики", Москва, 30 мая 2025 года. — Москва: Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", 2025. — С. 89-94. — EDN ABCXIR.

6. Суфиянов, Р. Ш. Лидар в системе обеспечения безопасности эксплуатации беспилотного автомобиля / Р. Ш. Суфиянов // Тенденции развития науки и образования. — 2022. — № 82-2. — С. 87-90. — DOI 10.18411/trnio-02-2022-58. — EDN NHTODD.

7. Сулятецкий, С. А. Применение и развитие технологий беспилотных автомобилей, и их влияние на транспортную систему / С. А. Сулятецкий // Вестник науки. — 2023. — Т. 1, № 6(63). — С. 942-948. — EDN FHAPOZ.

8. Холкин, А. В. Применение интеллектуальных транспортных систем с использованием различных типов датчиков для повышения безопасности дорожного движения / А. В. Холкин, Г. И. Гаптуллазянова, О. В. Ильина // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK — 2021 : Сборник материалов, Казань, 21—24 сентября 2021 года. Том Часть 1. — Казань: ГБУ «НЦБЖД», 2021. — С. 185-191. — EDN YKVABN.

9. Котенко, А. А. Одномерное моделирование системы помощи водителю / А. А. Котенко, С. И. Худорожков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2025. — № 30. — С. 80-84. — DOI 10.26160/2658-3305-2025-30-80-84. — EDN HSDEDE.

10. Сацюк А. В., Володарец Н. В. Оптимизация параметров трекера CSRT в системе слежения беспилотных летательных аппаратов // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 834—845. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-834-845.

11. Гертель, С. А. Разработка программного обеспечения для моделирования движения беспилотных автомобилей в городских условиях / С. А. Гертель // Прикладная

математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук : Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых, Тольятти, 18—20 апреля 2023 года. — Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. — С. 412-416. — EDN RPGRYA.

12. Satsuk, A. V. Acceleration of neural network for UAV operation in real time / A. V. Satsuk, N. V. Volodarets, D. I. Krupskiy // Vestnik Doneckoj Akademii Transporta. — 2025. — No. 1. — P. 6-14. — EDN QVUIBK.

13. Володарец, Н. В. К вопросу создания информационно-аналитической системы V2I мониторинга и управления транспортными средствами / Н. В. Володарец // 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. 1786-1789. — EDN DOLVLM.

14. Царин, И. И. Исследование методов распознавания трёхмерных объектов дорожной сцены по данным лидара беспилотного автомобиля / И. И. Царин, О. И. Максимычев, Д. В. Строганов // Цифровые решения в отраслях транспортно-дорожного комплекса: от теории к практике : Материалы 83-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 27—31 января 2025 года. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Техполиграфцентр", 2025. — С. 100-107. — EDN RTMNKR.

15. Вахрамеев, Р. А. Использование компьютерного зрения для аналитики дорожного движения / Р. А. Вахрамеев, В. С. Созинова, С. В. Болдин // Образование в цифровую эпоху: опыт, проблемы и перспективы, Нижний Новгород, 21—22 декабря 2023 года. — Нижний Новгород: Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 2024. — С. 101-104. — EDN IMYNZI.

16. Дорошенко, А. В. Разработка системы принятия решений по предотвращению возникновения аварийной ситуации при движении беспилотного автомобиля / А. В. Дорошенко, А. А. Кулик // Математические методы в технологиях и технике. — 2025. — № 8. — С. 77-82. — EDN HINXTS.

17. Ярадайкин, Д. С. Реализация системы распознавания дорожных знаков с использованием алгоритма обнаружения объектов YOLO / Д. С. Ярадайкин // МНПК-2025: Материалы Всероссийской молодёжной научно-практической конференции. Посвящается 80-летию Победы в Великой Отечественной войне, Казань, 27—28 мая 2025 года. — Казань: ИП Сагиев А. Р., 2025. — С. 58-61. — EDN QUFEJR.

18. Evaluation of 3D LiDAR SLAM algorithms based on the KITTI dataset / J. Wu, Sh. Huang, Ya. Yang, B. Zhang // The Journal of Supercomputing. — 2023. — Vol. 79, No. 14. — P. 15760-15772. — DOI 10.1007/s11227-023-05267-3. — EDN AZLEAV.

19. Петухов, Д. Е. Набор данных BDD100k в задаче тестирования детекторов определения транспортных средств и объектов дорожной инфраструктуры / Д. Е. Петухов, А. В. Козина, Ю. С. Белов // Высокие технологии и инновации в науке : сборник избранных статей Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 28 января 2021 года. — Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие», 2021. — С. 146-148. — EDN OPJOGO.

20. 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.

21. LiDAR Based Self-Driving Car / V. Rane, H. Poojari, P. Sharma [et al.] // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. — 2022. — Vol. 10, No. IV. — P. 261-270. — DOI 10.22214/ijraset.2022.41213. — EDN AAOJSI.

22. Self-Driving Car Using Machine Learning and Neural Network / H. I. Hublikar, A. A. Keny, R. D. Ghonge, Kh. S. I. Ahmed // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. — 2022. — Vol. 10, No. 2. — P. 1291-1297. — DOI 10.22214/ijraset.2022.40505. — EDN USRSSA.

23. Агафонов, Д. А. Автономные автомобили и нейронные сети: разработка алгоритмов для беспилотных автомобилей / Д. А. Агафонов // Образование. Наука. Производство : Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23—24 октября 2023 года. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. — С. 14-17. — EDN IFKVGQ.

24. Архитектура сети V2X для реализации сервисов ADAS / В. Н. Бабич, М. А. Виницкий, Е. В. Дусталев, А. А. Савельева // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : Сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т., Санкт-Петербург, 27—28 февраля 2024 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2024. — С. 69-73. — EDN IFPFJX.

25. 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.

26. Development of the Analytical System for Vehicle Operating Conditions Management in the V2I Information Complex Using Simulation Modeling / M. Volodarets, I. Gritsuk, Y. Ukrainskyi [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 5, No. 3-107. – P. 6-16. – DOI 10.15587/1729-4061.2020.215006. – EDN WFLOEE.

27. Sonwane, K. A. Simulating Self Driving Car Using Deep Learning / K. A. Sonwane // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. — 2021. — Vol. 9, No. VI. — P. 738-743. — DOI 10.22214/ijraset.2021.36454. — EDN VTLWTE.

28. Hithaishi Surendra, Et. Al. Lane Detection and Traffic Sign Detection using Deep Learning and Computer Vision for Autonomous Driving Research Using CARLA Simulator / Et. Al. Hithaishi Surendra // International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. — 2023. — Vol. 11, No. 10. — P. 2062-2069. — DOI 10.17762/ijritcc.v11i10.8891. — EDN JSQKMM.

29. Сацюк, А. В. Гибридные алгоритмы компьютерного зрения для прецизионного автономного управления БПЛА : монография / А. В. Сацюк, Н. В. Володарец. — Москва : ИНФРА-М, 2026. — 178 с.: ил. — (Научная мысль). — DOI 10.12737/2227081. — ISBN 978-5-16-021492-4. — Текст : электронный. — URL: https://znanium.ru/catalog/product/2227081 (дата обращения: 30.11.2025).

References

1. Vinoth, K., & Sasikumar, P. (2024). Multi-sensor fusion and segmentation for autonomous vehicle multi-object tracking using deep Q networks. Scientific Reports, 14(1), 31130. https://doi.org/10.1038/s41598-024-82356-0

2. Endachev, D. V., Bakhmutov, S. V., Evgrafov, V. V., et al. (2021). Implementation of modern approaches to development and testing of advanced driver assistance systems, including driverless systems. Journal of Physics: Conference Series, 2061(1), 012121. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012121

3. Huu, Ph. N., Pham Thi, Q., & Tong Thi Quynh, Ph. (2022). Proposing Lane and Obstacle Detection Algorithm Using YOLO to Control Self-Driving Cars on Advanced Networks. Advances in Multimedia, 2022, 3425295. https://doi.org/10.1155/2022/3425295

4. Satsyuk, A. V., & Volodarets, N. V. (2025). Modification of the YOLO model for a hybrid detection and tracking system in UAVs with automatic guidance. Information and Control Systems, (4), 36–44. https://doi.org/10.31799/1684-8853-2025-4-36-44 (In Russ.)

5. Omerov, M. A., & Fomin, I. D. (2025). Investigation of the possibility of detecting and classifying modes of transport using modern machine vision technologies. In Artificial intelligence in industrial, commercial, medical and financial applications (pp. 89-94). National Research Technological University "MISIS". (In Russ.)

6. Sufianov, R. S. (2022). Lidar in the system of ensuring the safety of operation of an unmanned vehicle. Trends in the development of science and education, (82-2), 87-90. https://doi.org/10.18411/trnio-02-2022-58 (In Russ.)

7. Sulyatetsky, S. A. (2023). Application and development of technologies of unmanned vehicles, and their impact on the transport system. Bulletin of Science, 1(6(63)), 942-948. (In Russ.)

8. Kholkin, A. V., Gaptullazyanova, G. I., & Ilyina, O. V. (2021). Application of intelligent transport systems using various types of sensors to improve road safety. In International Forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2021: Collection of materials, Kazan, September 21-24, 2021. Volume Part 1 (pp. 185-191). GBU "NCBZHD". (In Russ.)

9. Kotenko, A. A., & Khudorozhkov, S. I. (2025). One-dimensional modeling of the driver assistance system. Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production, (30), 80-84. https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-30-80-84 (In Russ.)

10. Satsyuk, A. V., & Volodarets, N. V. (2025). Optimization of CSRT tracker parameters in the tracking system of unmanned aerial vehicles. Sustainable Development of Mountainous Territories, 17(2), 834–845. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-834-845 (In Russ.)

11. Gertel, S. A. (2023). Software development for modeling the movement of unmanned vehicles in urban conditions. In Applied mathematics and computer science: modern research in the field of natural and technical sciences: Collection of materials of the IX International Scientific and Practical Conference (school-seminar) of young scientists, Tolyatti, April 18-20, 2023 (pp. 412-416). Tolyatti State University. (In Russ.)

12. Satsuk, A. V., Volodarets, N. V., & Krupskiy, D. I. (2025). Acceleration of neural network for UAV operation in real time. Vestnik Doneckoj Akademii Transporta, (1), 6-14. (In Russ.)

13. Volodarets, N. V. (2024). On the issue of creating an information and analytical system V2I for monitoring and controlling vehicles. In XIV All-Russian Meeting on Management problems: collection of scientific papers, Moscow, June 17-20, 2024 (pp. 1786-1789). V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.)

14. Tsarin, I. I., Maksimychev, O. I., & Stroganov, D. V. (2025). Investigation of methods for recognizing three-dimensional objects of the road scene using lidar data from an unmanned vehicle. In Digital solutions in the branches of the transport and road complex: from theory to practice: Proceedings of the 83rd scientific, methodological and research conference MADI, Moscow, January 27-31, 2025 (pp. 100-107). Limited Liability Company "Technopoligraftsentr". (In Russ.)

15. Vakhrameev, R. A., Sozinova, V. S., & Boldin, S. V. (2024). The use of computer vision for traffic analytics. In Education in the digital age: experience, problems and prospects, Nizhny Novgorod, December 21-22, 2023 (pp. 101-104). Nizhny Novgorod State Pedagogical University named after K. Minin. (In Russ.)

16. Doroshenko, A. V., & Kulik, A. A. (2025). Development of a decision-making system to prevent an emergency when driving an unmanned vehicle. Mathematical Methods in Technology and Engineering, (8), 77-82. (In Russ.)

17. Yaradaykin, D. S. (2025). Implementation of a system for recognizing road signs using the YOLO object detection algorithm. In MNPK-2025: Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference. Dedicated to the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War, Kazan, May 27-28, 2025 (pp. 58-61). IP Sagiev A. R. (In Russ.)

18. Wu, J., Huang, Sh., Yang, Ya., & Zhang, B. (2023). Evaluation of 3D LiDAR SLAM algorithms based on the KITTI dataset. The Journal of Supercomputing, 79(14), 15760–15772. https://doi.org/10.1007/s11227-023-05267-3

19. Petukhov, D. E., Kozina, A. V., & Belov, Yu. S. (2021). The BDD100k dataset in the task of testing detectors for detecting vehicles and road infrastructure. In High technologies and innovations in science: a collection of selected articles of the International Scientific Conference, St. Petersburg, January 28, 2021 (pp. 146-148). GNII "National Development". (In Russ.)

20. Volodarets, N. V., & Satsyuk, A. V. (2025). Steady tracking and trajectory correction of unmanned aerial vehicles in conditions of limited visibility using multisensory data. Sustainable Development of Mountainous Territories, 17(3), 1320–1330. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330 (In Russ.)

21. Rane, V., Poojari, H., Sharma, P., et al. (2022). LiDAR Based Self-Driving Car. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 10(IV), 261-270. https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41213

22. Hublikar, H. I., Keny, A. A., Ghonge, R. D., & Ahmed, Kh. S. I. (2022). Self-Driving Car Using Machine Learning and Neural Network. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 10(2), 1291-1297. https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40505

23. Agafonov, D. A. (2023). Autonomous cars and neural networks: development of algorithms for unmanned vehicles. In Education. Science. Production: Collection of reports of the XV International Youth Forum, Belgorod, October 23-24, 2023 (pp. 14-17). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. (In Russ.)

24. Babich, V. N., Vinitsky, M. A., Dustalev, E. V., & Savelyeva, A. A. (2024). V2X network architecture for the implementation of ADAS services. In Actual problems of infotelecommunications in science and education: Collection of scientific articles of the XIII International Scientific, Technical and Scientific-methodological Conference in 4 volumes, St. Petersburg, February 27-28, 2024 (pp. 69-73). St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich. (In Russ.)

25. Tkachev, S. A., & Volodarets, N. V. (2024). Comparative analysis of V2V, V2P and V2X technologies for improving road safety. Bulletin of the Donetsk Academy of Motor Transport, (4), 35-39. (In Russ.)

26. Volodarets, M., Gritsuk, I., Ukrainskyi, Y., et al. (2020). Development of the Analytical System for Vehicle Operating Conditions Management in the V2I Information Complex Using Simulation Modeling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(3-107), 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215006

27. Sonwane, K. A. (2021). Simulating Self Driving Car Using Deep Learning. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 9(VI), 738-743. https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.36454

28. Surendra, H., et al. (2023). Lane Detection and Traffic Sign Detection using Deep Learning and Computer Vision for Autonomous Driving Research Using CARLA Simulator. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 11(10), 2062–2069. https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i10.8891

29. Satsyuk, A. V., & Volodarets, N. V. (2026). Hybrid Computer Vision Algorithms for Precision Autonomous UAV Control [Monograph]. INFRA-M. https://doi.org/10.12737/2227081 (In Russ.)

Volodarets N.V., Marenich A.S., Tkachev S.A.

A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF MODERN INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR VEHICLE DRIVER

Abstract. *The work proposes the concept of a proactive driver assistance system (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) that combines sensor and biometric data with an adaptive attention mechanism. The paper presents criteria for evaluating computer vision algorithms, an analysis of ADAS vulnerabilities, and measures to improve their resilience. It has been shown that the combination of multimodal integration, explainable AI, and Vehicle-to-Everything (V2X) communication technologies, including interactions between vehicles (V2V), with infrastructure (V2I), and with pedestrians (V2P), forms the basis for the next generation of safe and intelligent automotive systems.*

Keywords: *intelligent transport technologies, assisted decision-making systems, ADAS, comprehensive data processing, driver physiological indicators, machine vision, deep learning, V2X technologies, and interaction interfaces.*

Сведения об авторах:

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

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

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

Information about the authors:

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

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

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

УДК 629.1

Золотарев О.О., Савенков Н.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ ЗОН ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВС

Аннотация. *По данным Всемирной организации здравоохранения загрязнение атмосферного воздуха является одной из наиболее значимых мировых проблем. В ряде стран приняты экологические нормы, ограничивающие удельные выбросы вредных веществ с отработавшими газами от автомобильного транспорта. Кроме того, имеется положительный опыт создания городских зон сверхнизких выбросов. Сложная структура силовой установки гибридного автотранспортного средства с одной стороны повышает его стоимость и затрудняет проектирование, а с другой открывает возможности гибкого применения в условиях изменяющихся режимов движения, стоимости и расположения источников энергии, а также с учётом экологической политики конкретных территорий. Общей проблемой организации рационального управления гибридными силовыми установками является большая вычислительная сложность такой задачи. Для её решения предложено множество подходов. Авторами настоящей статьи разработана соответствующая стратегия, основанная на эволюционной многопараметрической оптимизации и позволяющая за приемлемое время находить рациональные решения, обеспечивающие низкие расходы топлива и электрической энергии для заданных наборов режимов движения. В работе выполнена апробация предложенной стратегии на примере автомобиля с параллельной гибридной силовой установкой на шасси АО «АвтоВАЗ» «Лада Гранта» при движении в условиях ездового цикла UDC с наличием зоны ограничения использования ДВС. На основе выполненных расчетных исследований установлено, что введение в ездовом цикле дополнительных ограничений на диапазоны параметров регулирования агрегатов влечет ухудшение энергетической эффективности. Полученная количественная оценка приведена в основном тексте статьи.*

Ключевые слова*: гибридное автотранспортное средство, оптимизация, критерий оптимизации, оптимизационные параметры, экологический класс, зона ограничения выбросов, ездовой цикл, силовая установка, расход топлива, алгоритм регулирования силовой установки.*

Постановка задачи

Загрязнение атмосферного воздуха в городах в настоящее время остается одной из актуальных проблем и является одним из факторов, характеризующих качество жизни населения. По данным Росприроднадзора [1] в структуре загрязняющих атмосферу выбросов на долю автомобильного транспорта приходится около 45 %. Государственной программой «Охрана окружающей среды на период до 2030 г.» предусматривается снижение не менее чем на 20 % совокупного объема этих выбросов [2].

Известны следующие пути улучшения экологических качеств автотранспортных средств в условиях заданной закономерности изменения их режимов движения (при условии выполнения заданного объема транспортной работы):

1. Снижение мощности, необходимой для преодоления сопротивления движению. С этой целью совершенствуют аэродинамику кузова, для снижения собственной массы используют более прочные конструкционные материалы, применяют ходовую часть с меньшим сопротивлением движению. Перечисленные направления, с учетом современных требований по прочности и безопасности, обуславливают существенное повышение стоимости автотранспортного средства.

2. Совершенствование рабочих процессов агрегатов: повышают эффективность термодинамического цикла ДВС, улучшают качество и используют альтернативные типы топлив, очищают отработавшие газы от вредных веществ установкой систем нейтрализации, совершенствуют системы комплексного управления силовыми установками, осуществляют рациональный выбор их конструктивных параметров, применяют гибридные силовые установки (ГСУ).

3. Применение автомобилей, не загрязняющих при движении атмосферный воздух (например, электромобилей).

В Российской Федерации повсеместная эксплуатация полных электромобилей сдерживается рядом факторов, в числе которых – недостаточно развитая в настоящее время инфраструктура зарядных станций, а также значительные расстояния между городами. Оправданной альтернативой электромобилям и автомобилям, оснащенным только ДВС, являются гибридные транспортные средства (ГТС), которые могут осуществлять движение как от электродвигателя, так и от ДВС, включая возможность их совместной работы. Это позволяет гибко применять такие автотранспортные средства.

Например, в настоящее время во многих странах мира действуют достаточно жёсткие экологические нормы, ограничивающие выбросы от автомобильного транспорта. Автомобилям, оснащенным только ДВС, обеспечить их становится все труднее. В ряде городов созданы, а также запланированы к созданию зоны «сверхнизких выбросов». Въезд на эти территории ограничен для автомобилей, имеющих несоответствующие свойства экологичности. В Лондоне такая зона организована в 2019 году, а в 2021 и 2023 годах была расширена. Аналогичные ограничения действуют более чем в 250 городах мира: Лиссабоне, Стокгольме, в ряде городов Германии и Норвегии. В Москве въезд в центр на ТТК ограничен для категории N ниже 3-го экологического класса, а в пределах и на МКАД – для категории N ниже 2 экологического класса.

Конструкция современного ГТС позволяет интегрировать его в концепцию «Умный город» (утверждена Минстроем РФ 04.03.2019). Это понятие предусматривает внедрение информационно-коммуникационных технологий, направленных, в том числе, на снижение потребления ресурсов. Ключом к решению проблем неэффективности являются датчики, передающие данные от подключенных устройств. Настоящее исследование выполнено для проверки этой концепции и её влияния на энергетическую эффективность ГТС.

Анализ последних исследований

В мировой практике исследование энергетической эффективности и экологических ГТС выполняют путем численного моделирования с последующей экспериментальной верификацией [3]. Это обусловлено сложной конструкцией ГСУ, содержащей несколько источников и потребителей энергии, комплексные характеристики которых представляют собой многомерные зависимости крутящих моментов, а также расходов топлива и электрической энергии от режимных параметров. Поэтому задача поиска рациональной стратегии регулирования ГСУ в условиях заданного маршрута является трансвычислительной [4]. Вопросы создания рациональных алгоритмов управления агрегатами ГСУ, обеспечивающих улучшение топливно-экономических свойств и экологических качеств ГТС, отражены в трудах ряда отечественных и зарубежных учёных: Г.О.Котиева, С.В.Бахмутова, В.В.Селифонова, Е.Е.Баулиной, Н.М.Филькина, С.Б.Аджиманбетова, Р.М.Галиева, В.К.Мазец, Д.А.Копотева, К.С.Ившина, А.Н.Лазаревой, Р.П.Хамидуллина, В.А.Буторина, И.А.Куликова, К.М. Сидорова, В.А.Ракова, С.В. Черанёва, Zhang C., Vahidi A., Chen Z., Xiong R., Wang C., Cao J., Guo H., Liang B., Xu F.G., Shen T.L., East, S., Cannon M., Лин З.Н. и т.д. В настоящее время применяемые подходы по формированию стратегий регулирования ГСУ возможно условно разделить на две группы: 1) основанные на правилах; 2) основанные на оптимизации; каждая группа имеет множество подгрупп [5]. Каждый из известных подходов обладает своими достоинствами и недостатками, что определяет область и эффективность его применения [6]. Авторами настоящей статьи разработана стратегия [7] регулирования ГСУ, предусматривающая наличие одного или нескольких решений для заданного маршрута, которые возможно определить за установленное время при использовании доступных вычислительных ресурсов. В настоящей работе выполнена апробация предложенного подхода для условий, содержащих участки движения в режиме полного электромобиля, имитирующие наличие зоны ограничения выбросов вредных веществ с отработавшими газами.

Цель работы

На конкретном примере выполнить оценку влияния на путевой расход топлива автотранспортного средства с ГСУ наличия на маршруте зон, ограничивающих использование двигателя внутреннего сгорания.

Основная часть

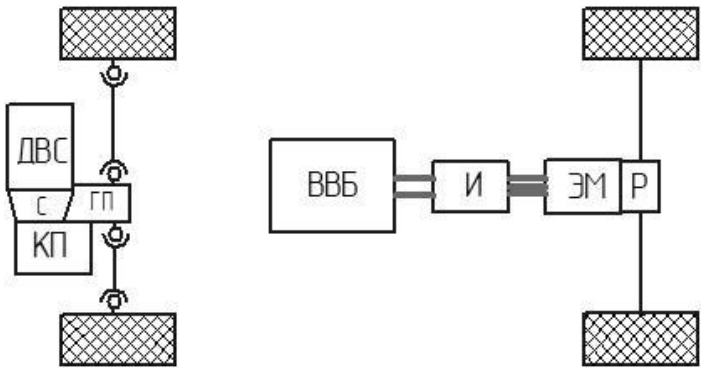
В качестве объекта для выполнения расчётного исследования выбран ГТС на шасси «Лада Гранта», рисунок 1. Принята простая в реализации параллельная схема, дополнительно содержащая одну электрическую машину (мотор-генератор). Передняя силовая установка остаётся серийной. Одним из недостатков такой компоновки является возможность подзарядки батареи только в движении.

В качестве оценочного критерия эффективности процесса движения ГТС на маршруте выбрано суммарное количество израсходованного топлива при заданной разности заряда в ВВБ между концом и началом маршрута (1):

$$\left.\begin{aligned} A = \int_0^{t_Ц} G(t)dt \cong \sum_1^m G_m \cdot t_m = \sum_1^m A_m \to \min \\ \Delta E = \int_0^{t_Ц} P(t)dt \cong \sum_1^m P_m \cdot t_m = \sum_1^m Q_m \end{aligned}\right\}, \quad (1)$$

где A – масса топлива, затраченного на маршруте, г/цикл; $t_Ц$ – время движения на маршруте, с; $G(t)$ – функция текущего расхода топлива ДВС от времени t, г/с

($G=g_e \cdot N_e/3600$); $P(t)$ – функция мощности ВВБ, кВт, от времени t; ΔE – разница электрической энергии в ВВБ между концом (SOC_2) и началом (SOC_1) маршрута, кДж, $\Delta E=$ ($SOC_2 - SOC_1$), в настоящей работе принято $\Delta E=0$ – на маршруте затрачивается такой же объем электрической энергии, который и вырабатывается [8]; G_m – текущий расход топлива на элементарном участке m маршрута, г/с, продолжительностью t_m, с; P_m - мощность ВВБ на элементарном участке m, кВт; A_m – масса топлива, израсходованного на элементарном участке, г; Q_m – энергия, запасенная (или израсходованная) ВВБ на элементарном участке.



ДВС – двигатель внутреннего сгорания; С – муфта сцепления; ЭМ – электрическая машина (мотор-генератор); КП – коробка передач; ГП – главная передача; Р – редуктор; И – электрический инвертор; ВВБ – тяговая высоковольтная батарея

Рис. 1. Компоновочная схема ГСУ:

В качестве маршрута движения выбран приведенный на рисунке 2 фрагмент ECE-15, из которого набрана городская составляющая UDC ездового цикла NEDC. Данный выбор обусловлен тем, что в отличие от утвержденного в РФ ездового цикла ВЦИМГ (WLTC) [8], цикл ECE-15 имеет меньшую продолжительность и регламентированный операционной картой алгоритм переключения передач в КП. Это позволяет существенно уменьшить количество возможных режимных состояний ГСУ, определяемых уравнением (2), и, как следствие, обеспечивает меньшую вычислительную сложность задачи выбора рациональной стратегии её регулирования в условиях ездового цикла по предложенной методике [8].

$$И_0 = h^{-\varsigma \cdot z}, \tag{2}$$

где h – относительный шаг перебора при оптимизации; ς – количество режимных параметров оптимизации (3); z – общее число расчётных точек в ездовом цикле.

$$\varsigma = n_Д + n_{КП} - 1, \tag{3}$$

где $n_Д$, $n_{КП}$ – общее число двигателей и коробок передач в ГСУ соответственно.

Цикл WLTC для рассматриваемой категории автомобиля M_1 (с учетом его энерговооруженности) имеет продолжительность 1794 с. При численном моделировании процесса движения с шагом 1 с, z=1794. Фрагмент ECE-15 обладает продолжительностью 195 с. Аналогичный шаг 1 с и наличие участков с постоянной скоростью позволяет сократить количество расчётных точек (элементарных участков) до

z=84 (рисунок 2, таблица 2). Регламентированная стандартом последовательность переключения передач в этом цикле позволяет уменьшить ς (2,3) с 2 до 1.



Рис. 2. Выбранный для исследования ездовой цикл

В качестве примера авторами настоящего исследования на рассматриваемый ездовой цикл наложено ограничение, заключающееся в запрете работы ДВС с 50-й по 96-ю секунды (охватывающее II фазу – элементарные участки №13-36) и имитирующее наличие зоны с нулевыми выбросами вредных веществ в атмосферу.

В исследовании приняты следующие математические модели характеристик ГТС:

- нагрузочно-скоростная характеристика ДВС по эффективной мощности N_e и эффективному удельному расходу топлива g_e:

$$N_e(n,k_e)=k_e\cdot N_{e\max}\cdot\left[a\frac{n}{n_N}+b\left(\frac{n}{n_N}\right)^2+c\left(\frac{n}{n_N}\right)^3\right], \quad (4)$$

$$g_e(n,k_e)=g_{eN}\cdot\left(a_U-b_U\cdot k_e+c_U\cdot k_e^2\right)\cdot\left[\beta_0+\beta_1\left(\frac{n}{n_N}\right)+\beta_2\left(\frac{n}{n_N}\right)^2\right], \quad (5)$$

где n - частота вращения коленчатого вала, k_e - коэффициент использования мощности;

- механическая характеристика ЭМ (6) и характеристика его КПД (7) [7]:

$$M_1(n_1,k_1)=K_T\cdot k_1\cdot\left[a_1+b_1\left(\frac{n_1}{n_{N1}}\right)+c_1\left(\frac{n_1}{n_{N1}}\right)^2+d_1\left(\frac{n_1}{n_{N1}}\right)^3+e_1\left(\frac{n_1}{n_{N1}}\right)^4\right], \text{ [при } |n_1|\geq|n_{N1}|]; \quad (6)$$

$$\eta_1(n_1,k_1)=\left[1+\frac{1}{p_{01}+1}\left(\frac{1}{\eta_{N1}}-1\right)\frac{p_{01}\left(\frac{|n_1|}{n_{N1}}\right)^2+|k_1|^2}{|k_1|\cdot\left(\frac{|n_1|}{n_{N1}}\right)}\right]^{-1}, \quad (7)$$

где M_1 – создаваемый крутящий момент при частоте вращения ротора n_1 и коэффициенте использования мощности k_1.

В графическом виде функции (6,7) показаны на рисунке 3.

Параметры функций (4-7) приведены в таблице 1. Характеристика сопротивления движению автомобиля при моделировании определяется уравнением мощностного баланса.

Таблица 1

Параметры математических моделей характеристик автомобиля

Показатели и параметры	Обозначения	Ед. измер.	Значения
ДВС (ВАЗ-11182)			
Номинальная эффективная мощность/ номинальная частота вращения	N_{emax} / n_N	кВт / мин$^{-1}$	66 / 5100
Эффективный удельный расход топлива на номинальном режиме	g_{eN}	г/кВтч	255
Коэффициенты функций (4) и (5)	a, b, c, a_U, b_U, c_U, β_0, β_1, β_2	-	1, 1, -1, 2.75, 4.61, 2.86, 1.2, -1.2, 1
ЭМ (Toyota 1NM, синхронная с постоянными магнитами (IPM)) [9]			
Максимальный крутящий момент ($0 \le \lvert n_1\rvert < \lvert n_{N1}\rvert$)	$M_1(n_{N1},1)$	Нм	163
Номинальная частота вращения	n_{N1}	1/мин	3105
Коэффициент подобия	K_{T1}	-	0.4
Коэффициенты функции (6)	a_1, b_1, c_1, d_1, e_1	-	693.7, -669, 275.6, -41.32, -0.038
Относительная мощность потерь	p_{0i}	-	0.12
КПД на номинальном режиме	η_{Ni}	-	0.9
Трансмиссия [10]			
Передаточные числа коробки передач	$U_{(m)}$	-	3.636; 1,95; 1,357; 0,941; 0,784
Передаточное число главной передачи передней оси	$U_Г$	-	3.6
Передаточное число привода задних ведущих колес от ЭМ	U_{1K}	-	10.2
Характеристика сопротивления движению (уравнение мощностного баланса)			
Испытательная масса автомобиля	m_a	кг	1467*
Коэффициент сопротивления качению	ψ_V	-	0.011
Кинематический радиус колеса	r_K	м	0.286
Фактор обтекаемости	W	кг·м	0.42
*принята с учетом требований ездового цикла NEDC и дополнительной массы ГСУ			

Оптимизация по общему критерию (1) выполнена с помощью разработанной авторами компьютерной программы в среде Visual Basic Application, реализующей эволюционный метод, на основе таблицы 2. Параметры оптимизации – коэффициенты использования мощности ЭМ k_1 (столбцы 5 и 13) на каждом элементарном участке m ездового цикла. Составляющая A критерия (1) определяется суммированием столбцов 7 и 15, а составляющая ΔE – суммированием столбцов 8 и 16. Результаты, приведенные в таблице 2, получены для случая движения ГТС по ездовому циклу, не содержащему зону ограничения работы ДВС. На рисунке 4 дополнительно показаны результаты оптимизационного расчёта для движения только от ДВС (рисунок 4а), а также в гибридном режиме при наличии зоны ограничения (рисунок 4в).

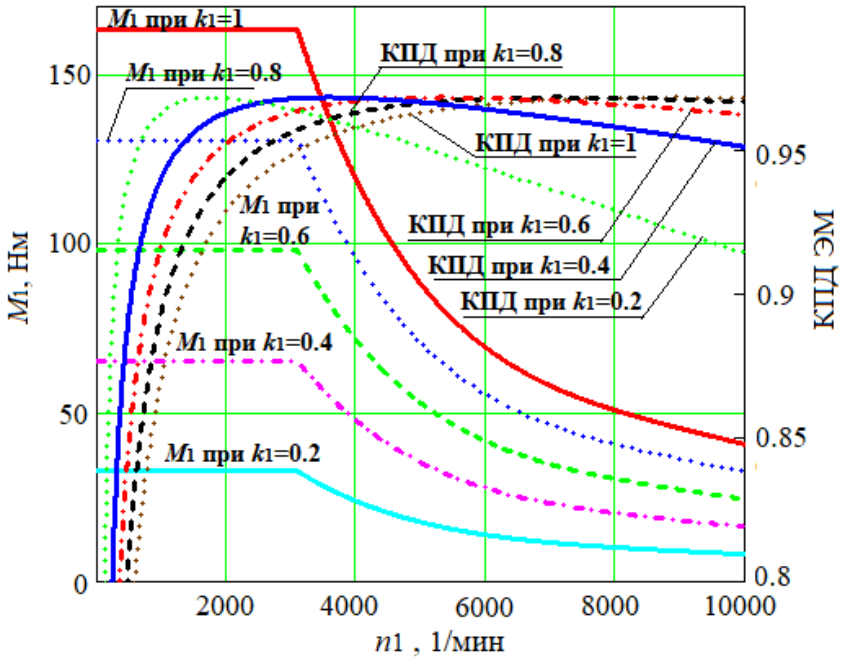


Рисунок 3. Характеристики электрической машины

Значения критерия для трёх рассмотренных случаев приведены в таблице 2. Установлено, что применение ГСУ предложенной компоновки для серийного шасси выбранного в качестве примера автомобиля, в сочетании с полученной стратегией регулирования агрегатами, позволяет уменьшить путевой расход топлива в условиях фрагмента ECE-15 почти в 2 раза по отношению к серийному автомобилю - с 9,38 л/100 км до 4,7 л/100км (при *ΔE=0)*. Полученная существенная разница обусловлена дополнительной энергией, получаемой при рекуперации, а также нерациональным с позиции энергетической эффективности алгоритмом переключения передач, т.к. при движении только от ДВС относительно высокая энерговооруженность автомобиля и отсутствие возможности повысить передачу, определяют низкие значения нагрузки его двигателя (а, следовательно, и более низкий КПД) при движении с небольшими скоростями и ускорениями. При наличии на пути введенной авторами зоны ограничения выбросов вредных веществ с отработавшими газами, которая сопровождается k_e=0, путевой расход топлива возрастает на 7,67% (до 5,06 л/100 км), что обусловлено сужением диапазонов возможных значений параметра оптимизации k_1 – в результате программа восполняет недостаток электрической энергии путем дополнительной зарядки ВВБ в оставшихся точках цикла движения с меньшим КПД.

Таблица 2

Результаты численного моделирования процесса движения автомобиля

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
m^1	t_m	t	U*	k_1	k_e	A_m	Q_m	m^1	t_m	t	U*	k_1	k_e	A_m	Q_m
-	с	с	-	-	-	г	Дж	-	с	с	-	-	-	г	Дж
1	11	11	1	0.00	0.000	2.01	0.0	43	1	123	1	-0.45	0.000	0.00	-10.3
2	1	12	1	0.27	0.244	0.39	-2.0	44	1	124	2	0.37	0.771	0.84	5.6
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
41	1	121	1	-0.22	0.534	0.78	3.1	83	1	188	2	-0.28	0.000	0.01	0.0
42	1	122	1	-0.45	0.739	1.10	7.7	84	7	195	2	0.00	0.000	0.10	0.0

[1] – номер элементарного участка ездового цикла; * - номер используемой в КП передачи.

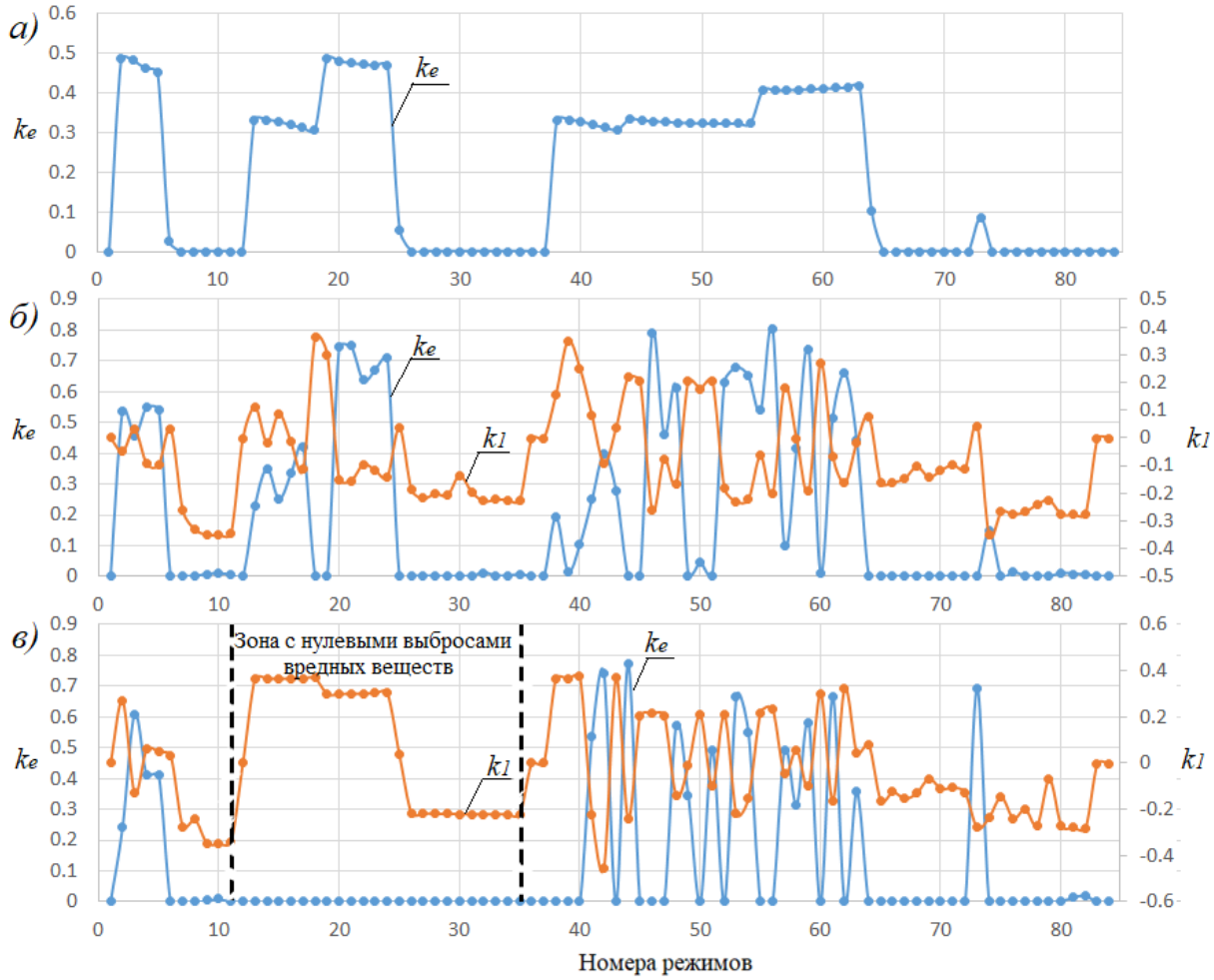


Рис. 4. Результаты численного моделирования процесса движения автомобиля: *а*) работает только ДВС; *б*) гибридный режим; *в*) гибридный режим с наличием на пути зоны с ограничением работы ДВС

Таблица 3

Результаты оптимизационного расчёта

Составляющие критерия (1)	Обозначение, размерность	Режим работы гибридной силовой установки		
		Работает только ДВС (рис. 4а)	Гибридный режим (рис. 4б)	Гибридный режим с зоной ограничения (рис. 4в)
Баланс электрической энергии в ездовом цикле	ΔE, Дж	-	0	0
Расход топлива в ездовом цикле	A, г/цикл	69,37	34,8	37,45
Путевой расход топлива	A, л/100км	9,38	4,7	5,06

Выводы

1. Для выбранного в качестве примера ГТС параллельной компоновочной схемы на шасси автомобиля категории M_1 «Лада Гранта», дополнительно содержащей одну электрическую машину Toyota 1NM, получено относительное увеличение путевого расхода топлива в условиях городского ездового цикла UDC, содержащего

установленную авторами зону ограничения работы ДВС с 50-й по 96-ю секунды, составляющее 7,67%.

2. На рассмотренном примере установлено, что наличие зон ограничения выбросов вредных веществ с отработавшими газами на маршруте движения не позволяет ГСУ реализовать на конкретном маршруте весь содержащийся в ней потенциал, что и вызывает ухудшение топливно-экономических свойств. При этом ожидается сопутствующий рост удельных выбросов вредных веществ, в частности оксидов азота, на других участках цикла.

3. Агрегаты ГСУ в процессе движения автомобиля по маршруту должны регулироваться автоматически на основании заданной стратегии и «запроса» мощности от водителя. Вводимые дополнительные ограничения на диапазоны режимных параметров не позволяют в общем случае достичь минимума критерия энергетической эффективности при заданном ΔE.

4. В качестве перспектив дальнейших научных исследований рассматривается:

- выполнение оптимизационного моделирования процесса движения в условиях более сложных ездовых циклов – например, WLTC;
- уточнение математических моделей характеристик ГТС и компонентов ГСУ путем проведения лабораторных исследований;
- проверка результатов оптимизации проведением дорожных испытаний.

5. Результаты исследования направлены на развитие конструкции, алгоритмов управления и технологий применения отечественных автотранспортных средств, содержащих ГСУ. Предложенный авторами подход может быть применен не только для оптимизации регулирования ГСУ в условиях ездовых циклов, но и в реальных условиях эксплуатации путем динамичного расчёта стратегии регулирования на основе фактического набора режимов движения с учетом как зон ограничения работы ДВС/экологического класса, так и при необходимости расположения зарядных станций.

Список литературы

1. Охрана окружающей среды в России. 2022 : статистический сборник / Росстат. – Москва, 2022. – 115 с. – Текст : электронный. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ochrana_okruj_sredi_2022.pdf (дата обращения: 19.10.2025).

2. Основные показатели охраны окружающей среды : статистический бюллетень / Росстат. – Москва, 2023. – 105 с. – Текст : электронный. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2023.pdf (дата обращения: 19.10.2025).

3. East, S. Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: convex optimization algorithms for model predictive control / S. East, M. Cannon. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2020. – Vol. 28, № 6. – P. 2191–2203. DOI:10.48550/arXiv.1902.07728.

4. Zhang, B. Receding horizon optimal control of HEVs with onboard prediction of driver's power demand / B. Zhang, F. G. Xu, T. L. Shen. – Текст : непосредственный // IET Intelligent Transport Systems. – 2020. – Vol. 14, № 12. – P. 1534–1545. DOI:10.1049/iet-its.2020.0245

5. Усманов, У. Р. Обзор стратегий управления энергопотреблением гибридных автомобилей, основанные на логических правилах / У. Р. Усманов. – Текст : электронный // Universum: технические науки. – 2022. – № 10-2(103). – С. 57–61. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49725239_48454568.pdf (дата обращения: 20.10.2025). – EDN LTQIJP.

6. Раков, В. А. Оценка экологической безопасности и энергоэффективности гибридных автомобилей / В. А. Раков. – Текст : непосредственный // Вестник

Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – № 1(80). – С. 63–71. – EDN DTDJZW.

7. Горожанкин, С. А. Разработка рациональной стратегии управления автомобильной гибридной силовой установкой в ездовом цикле / С. А. Горожанкин, Н. В. Савенков, О. О. Золотарев. – Текст : непосредственный // Труды НАМИ. – 2025. – № 2(301). – С. 104–117. – EDN KEYQKI.

8. ГОСТ Р 59890–2021. Автомобильные транспортные средства. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. Технические требования и методы испытаний на базе всемирной согласованной процедуры испытания транспортных средств малой грузоподъемности и испытаний в реальных условиях эксплуатации. – Введен 2022–04–01. – Москва : Стандартинформ, 2022. – 280 с. – Текст : электронный. – URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/77218/ (дата обращения: 20.10.2025).

9. Toyota Hybrid - Transmissions line-up. – Текст : электронный // Toyota Club : [сайт]. – URL: https://www.toyota-club.net/files/faq/21-12-01_faq_hybrid_tr_en.htm (дата обращения: 20.10.2025).

10. Какие коэффициенты аэродинамического сопротивления у автомобилей LADA. – Текст : электронный // ЛАДА.ОНЛАЙН : [сайт]. – URL: https://лада.онлайн/reviews-tests/lada-vesta-reviews-tests/1997-lobovoe-soprotivlenie.html (дата обращения: 20.10.2025).

References

1. Rosstat. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Rossii. 2022: statisticheskiy sbornik* [Environmental protection in Russia. 2022: statistical digest]. Moscow, 2022, 115 p. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ochrana_okruj_sredi_2022.pdf (accessed 19.10.2025) (in Russian).

2. Rosstat. *Osnovnye pokazateli okhrany okruzhayushchey sredy: statisticheskiy byulleten'* [Main indicators of environmental protection: statistical bulletin]. Moscow, 2023, 105 p. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2023.pdf (accessed 19.10.2025) (in Russian).

3. East S., Cannon M. Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: convex optimization algorithms for model predictive control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, vol. 28, no. 6, pp. 2191–2203. DOI:10.48550/arXiv.1902.07728.

4. Zhang B., Xu F. G., Shen T. L. Receding horizon optimal control of HEVs with onboard prediction of driver's power demand. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, vol. 14, no. 12, pp. 1534–1545. DOI:10.1049/iet-its.2020.0245.

5. Usmanov U. R. Obzor strategiy upravleniya energopotrebleniem gibridnykh avtomobiley, osnovannye na logicheskikh pravilakh [Review of energy management strategies for hybrid vehicles based on logical rules]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2022, no. 10-2(103), pp. 57–61. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49725239_48454568.pdf (accessed 20.10.2025) (in Russian).

6. Rakov V. A. Otsenka ekologicheskoy bezopasnosti i energoeffektivnosti gibridnykh avtomobiley [Assessment of environmental safety and energy efficiency of hybrid vehicles]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)], 2025, no. 1(80), pp. 63–71 (in Russian).

7. Gorozhankin S. A., Savenkov N. V., Zolotarev O. O. Razrabotka ratsional'noy strategii upravleniya avtomobil'noy gibridnoy silovoy ustanovkoy v ezdovom tsikle [Development of a

rational control strategy for a hybrid vehicle powertrain in a driving cycle]. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI], 2025, no. 2(301), pp. 104–117 (in Russian).

8. GOST R 59890–2021. *Avtomobil'nye transportnye sredstva. Vybrosy zagryaznyayushchikh veshchestv s otrabotavshimi gazami...* [Automotive vehicles. Emissions of pollutants with exhaust gases...]. Moscow, Standartinform, 2022, 280 p. Available at: https://internet-law.ru/gosts/gost/77218/ (accessed 20.10.2025) (in Russian).

9. Toyota Hybrid - Transmissions line-up. *Toyota Club*. Available at: https://www.toyota-club.net/files/faq/21-12-01_faq_hybrid_tr_en.htm (accessed 20.10.2025).

10. Kakie koeffitsienty aerodinamicheskogo soprotivleniya u avtomobiley LADA [What are the drag coefficients of LADA cars]. *LADA.ONLAYN* [LADA.ONLINE]. Available at: https://лада.онлайн/reviews-tests/lada-vesta-reviews-tests/1997-lobovoe-soprotivlenie.html (accessed 20.10.2025) (in Russian).

Zolotarev O.O., Savenkov N. V.

A STUDY OF VEHICLE FUEL CONSUMPTION IN AREAS WITH LIMITED INTERNAL COMBUSTION ENGINE USE

Abstract*. Air pollution is one of the most significant global problems. This is confirmed by the World Health Organization. Many countries have environmental legislation in place. Existing regulations limit the specific emissions of harmful substances from vehicle exhaust. There is also positive experience in creating ultra-low-emission urban areas. A hybrid car has a complex power plant structure. On the one hand, this increases the cost of the car and makes it more difficult to design. On the other hand, it allows for flexible use of the car in different driving conditions, changing energy costs and locations, and environmental policies in different areas. The general problem of organizing rational control of hybrid power plants is the high computational complexity of such a task. Many approaches have been proposed to solve this problem. The authors of this article have developed a corresponding strategy based on evolutionary multi-parameter optimization. This strategy allows for finding rational solutions that ensure low fuel and electricity consumption in a given set of driving modes within an acceptable time. The proposed strategy was tested on a vehicle with a parallel hybrid power plant based on the AvtoVAZ Lada Granta chassis for the UDC driving cycle with a restriction zone for internal combustion engine use. It has been established that the presence of additional restrictions on the ranges of unit control parameters in the driving cycle leads to a decrease in the vehicle's energy efficiency. The corresponding quantitative assessment is provided in the main text of the article.*

Keywords*: hybrid vehicle, optimization, optimization criterion, optimization parameters, environmental class, emission control zone, driving cycle, power plant, fuel consumption, power plant control algorithm.*

Сведения об авторах:

Золотарев Олег Олегович
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ.
Старший преподаватель кафедры «Автомобильный транспорт, сервис и эксплуатация» (АТСЭ).
e-mail: o.o.zolotarev@donnasa.ru

Савенков Никита Владимирович
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ.
доцент, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт, сервис и эксплуатация»
доцент, кандидат технических наук
e-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru

Information about the authors:

Oleg Olegovich Zolotarev
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, a branch of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, Makeevka, DPR, Russia.
Senior Lecturer, Department of Automotive Transport, Service and Operation.
e-mail: o.o.zolotarev@donnasa.ru

Nikita Vladimirovich Savenkov
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, a branch of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, Makeevka, DPR, Russia.
Associate Professor, Head of the Department of Automotive Transport, Service and Operation.
PhD in Engineering, Associate Professor.
e-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru

УДК 656.13

Дадонов М.В., Ащеулов А.С.

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КРУПНОГАБАРИТНЫХ И СВЕРХКРУПНОГАБАРИТНЫХ ШИН

Аннотация. *Повышение эффективности эксплуатации средств технологического карьерного транспорта связано с повышением его производительности и снижением затрат на содержание. В рамках данного процесса, одним из важнейших направлений является повышение ресурса крупногабаритных и сверхкрупногабаритных шин. Тяжелые условия эксплуатации часто приводят к их преждевременному выходу из строя. Обоснованный подбор шин и качественный контроль их состояния позволяют эксплуатирующему предприятию значительно повысить эффективность эксплуатации карьерных автосамосвалов. Производители КГШ и СКГШ закладывают в конструкцию шины предельное значение показателя ТКВЧ, которое не должно быть превышено в процессе эксплуатации. Однако существующие методы расчета эксплуатационного ТКВЧ не позволяют полноценно его определять, так как не учитывают многие факторы, в том числе и изменяемую нагрузку на переднюю и заднюю оси при изменении условий движения. Проведенный анализ показателей датчиков давления, установленных на гидроцилиндрах подвески, позволил более точно контролировать и прогнозировать изменение температуры колес автосамосвалов. Дальнейшие исследования выявили прямую зависимость между мощностью, затрачиваемой на передвижение автосамосвала, и температурой шин. Таким образом, предложенная методика оценки остаточного ресурса шин, через затрачиваемую мощность, позволит более точно определять эксплуатационный ТКВЧ за счет более полного учета факторов, влияющих на условия движения.*

Ключевые слова: *карьерный автосамосвал, ТКВЧ, КГШ, СКГШ, ресурс, условия эксплуатации.*

Постановка задачи

На сегодняшний день уголь остается основным видом топлива для многих промышленных предприятий, а также частного населения. Добывается уголь преимущественно открытым способом, при котором транспортирование является наиболее весомой частью технологического процесса добычи. Несмотря на самую высокую себестоимость перевозок, по сравнению с другими видами карьерного технологического транспорта, автомобильный транспорт остается самым распространенным на любом карьере. Использование карьерных автосамосвалов требует постоянного поиска компромисса между грузоподъемностью автосамосвала и его производительностью, так как:

• чем больше грузоподъемность автосамосвала, тем выше себестоимость транспортирования горной массы;

• чем меньше расстояние транспортирования, тем большей грузоподъемности требуются автосамосвалы.

Анализ последних исследований

В связи с этим, как правило, на угольных разрезах эксплуатируются карьерные автосамосвалы двух типов грузоподъемности и объема кузова:

• углевозы грузоподъемностью примерно от 40 до 90 т и максимальным для своей модификации объемом кузова, на базе таких моделей как БелАЗ-7555, Тонар-4525, Тонар-7501, Komatsu HD-785-7 используются для транспортирования углейнасыпной плотностью 0,8 – 0,9 т/м3 на расстояние до 5 км.

• рудовозы грузоподъемностью от 130 до 450 т и минимальным для своей модификации объемом кузова, на базе таких моделей как БелАЗ-7513, -7530, -7571 используются для транспортирования вскрышной породы насыпной плотностью 1,4 – 2,1 т/м3 на расстояние менее 2 км, а иногда и менее 1 км.

В таких условиях, а также учитывая, что объемы выемки вскрышной породы минимум в 3 раза превышают объемы выемки угля, горнодобывающие предприятия вынуждены идти на повышение себестоимости транспортирования вскрыши, повышая среднюю грузоподъемность технологического парка автосамосвалов, добиваясь тем самым повышения производительности забоев. В связи с этим, мероприятия, направленные на повышение эксплуатационной надежности и снижение эксплуатационных затрат, приобретают особое значение.

Цель работы

Целью данной работы является оценка наработки КГШ по фактическим затратам энергии на выполнение транспортной работы.

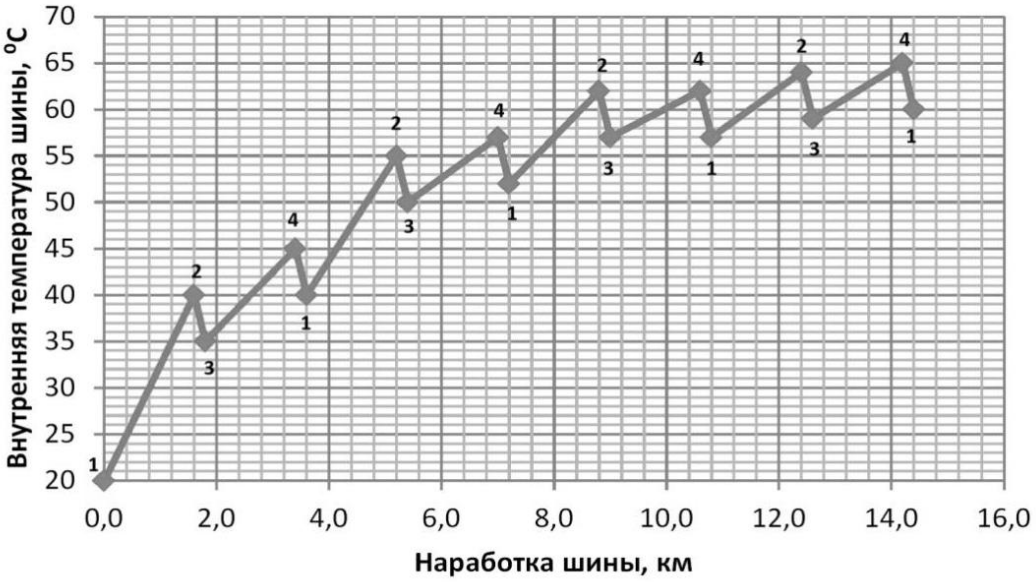
Основная часть

Одной из крупнейших статей затрат, связанных с эксплуатацией карьерных автосамосвалов, являются затраты на крупногабаритные и сверхкрупногабаритные шины (далее КГШ и СКГШ). Шины карьерных автосамосвалов имеют высокую стоимость и эксплуатируются в тяжелых дорожных условиях при высоких нагрузочных режимах. Для обеспечения наибольшей ходимости шин необходимо постоянно контролировать их состояние и условия, в которых они эксплуатируются. Нарушение нагрузочных и температурных режимов работы даже новой шины может в течение одной рабочей смены вывести ее из строя. На сегодняшний день на карьерах только около 25 % всех эксплуатируемых крупногабаритных шин выхаживают полный ресурс.

Причины преждевременного ухудшения технического состояния КГШ и СКГШ делятся на две группы:

1. Механические повреждения, возникающие вследствие наезда шины на куски острых скальных пород.

2. Нагрев шины до предельной, 110 – 130 ºС, или близкой к предельной температуре, что приводит к необратимым структурным изменениям в элементах шины.



1-2 – движение автосамосвала с грузом от пункта погрузки до пункта разгрузки;
2-3 – маневрирование автосамосвала под разгрузку и разгрузка;
3-4 – движение автосамосвала без груза от пункта разгрузки до пункта погрузки;
4-1 – маневрирование автосамосвала под погрузку и погрузка

Рисунок 1. Пример изменения внутренней температуры КГШ и СКГШ с начала работы

В первом случае, процесс зависит от дорожных условий, которые определяются категорией дорожного покрытия и организацией работ дорожно-эксплуатационной службы.

Во втором случае, с момента начала работ, в течение нескольких транспортных циклов шина выходит на определенный температурный режим (см. рис. 1), который и сохраняется до окончания работ. При этом сам температурный режим шины зависит от множества эксплуатационных факторов, на которые можно тем или иным образом воздействовать.

Физически внутренняя температура шины поднимается в результате внутреннего трения, интенсивность которого определяется нагрузкой на шину и скоростью ее движения в каждый момент времени.

В процессе реализации транспортного цикла скорость движения автомобиля и нагрузка на его шины не являются постоянными величинами. Например, нагрузка на шину в каждый момент времени зависит от:

- загруженности автомобиля и равномерности распределения груза по платформе;
- продольного и поперечного уклона автодороги;
- наличия инерционных сил при ускорении, замедлении или прохождении поворота;
- угла и силы натекания на автомобиль воздушного потока;
- места установки шины на автомобиле;
- оставшейся высоты протектора;
- давления в шине.

Скорость также изменяется в пределах от 0 км/ч, например, при погрузке или разгрузке, до максимальных значений для данной модели автосамосвала.

Кроме того, на температурный режим шины непосредственное влияние оказывают параметры транспортного процесса. Как видно на рис. 1, транспортный процесс карьерных автосамосвалов состоит из четырех этапов, каждому из которых соответствует своя зависимость изменения внутренней температуры шины.

На этапе движения от пункта загрузки до пункта разгрузки автомобиль движется в загруженном состоянии, как правило, по уклону вверх, реализуя на ведущих колесах максимальную мощность. На данном этапе наблюдается максимальная интенсивность нагрева шин. На этапе движения от пункта погрузки до пункта разгрузки интенсивность нагрева шин значительно меньше, так как средняя нагрузка на шину более чем в 2 раза меньше, чем при движении с грузом.

В пунктах погрузки и разгрузки, наоборот, наблюдается некоторое падение внутренней температуры шин. Скорость движения на данных этапах транспортного процесса при маневрировании ограничена, а при непосредственно погрузке или разгрузке равна нулю. Величина падения внутренней температуры шины зависит от температуры окружающей среды и времени погрузки или разгрузки.

Таким образом, рабочий температурный режим КГШ или СКГШ определяется соотношением времени движения и простоя в пределах одного транспортного цикла. Поэтому существенное влияние на это оказывает расстояние перевозки. На карьере расстояние перевозки может изменяться от нескольких сотен метров до 5 – 8 км. И чем оно больше, тем выше установится температурный режим шины в течение смены. Не редки случаи, когда выбранные условия работы карьерных автосамосвалов приводят к превышению предельной внутренней температуры шин.

В настоящее время, для исключения таких случаев, производители КГШ и СКГШ устанавливают для своих шин предельное значение показателя ТКВЧпред (тонно-километры в час). На предприятиях для оценки условий работы КГШ и СКГШ рассчитывают эксплуатационное значение ТКВЧ (форм. 1) и сравнивают его с предельным.

$$\text{ТКВЧ}_{\text{экспл}} = \frac{(2G_a + q_\text{ф}) l_{\text{ег}} n_\text{e}^{\text{см}}}{n_\text{к} t_{\text{см}}}, \quad (1)$$

где Ga– масса автосамосвала без груза, т; qф – фактическая масса груза в кузове, т; lег – длина ездки с грузом, км; $n_\text{e}^{\text{см}}$ – количество ездок за смену; nк – количество колес на автомобиле; tсм – время смены, ч.

Данный способ определения эксплуатационного ТКВЧ достаточно приблизительный, так как не учитывает:

- разницу в нагрузке на шину в зависимости от места ее установки на автомобиле;
- мгновенное перераспределение нагрузок на шину в динамике в процессе движения;
- возможную неравномерность работы автомобилей в течение смены.

Несколько точнее получается расчет, если находить значения эксплуатационного ТКВЧ отдельно для шин задней и передней оси автомобиля (рис. 2, форм. 2, 3).

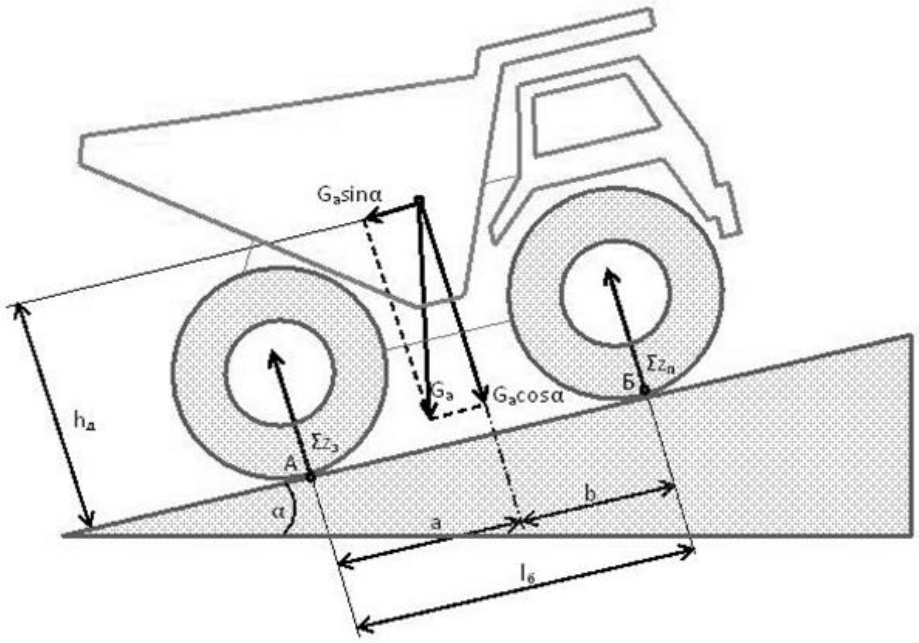


Рисунок 2. Силы и реакции, действующие на автосамосвал в продольной плоскости

$$\text{ТКВЧ}_{\text{экспл}}^{\text{зш}} = \frac{b}{2(a+b)} \cdot \frac{(2G_a+q_\text{ф})l_\text{ег} n_\text{е}^\text{см}}{n_\text{к}^\text{зо} t_\text{см}}, \quad (2)$$

$$\text{ТКВЧ}_{\text{экспл}}^{\text{пш}} = \frac{a}{2(a+b)} \cdot \frac{(2G_a+q_\text{ф})l_\text{ег} n_\text{е}^\text{см}}{n_\text{к}^\text{по} t_\text{см}}, \quad (3)$$

где $n_\text{к}^\text{зо}$ – количество колес на задней оси автомобиля; $n_\text{к}^\text{по}$ – количество колес на передней оси автомобиля.

Данный расчет точнее, однако, все равно не учитывает параметры маршрута, характеристики автомобиля и груза, график его работы.

Усредненный расчет не дает возможности оценивать интенсивность изменения внутренней температуры в каждый момент времени и на каждом этапе транспортного процесса. Поэтому даже выполнение условия ТКВЧэкспл < ТКВЧпред не гарантирует шины от перегрева в отдельные моменты транспортного процесса.

Наибольшее влияние на перераспределение нормальных реакций оказывают:

- продольный профиль маршрута и поперечный профиль опорной поверхности дороги;
- неравномерность скорости движения автосамосвала;
- угол и сила натекания на автосамосвал воздушного потока;
- геометрия размещения и характеристики горной массы в кузове.

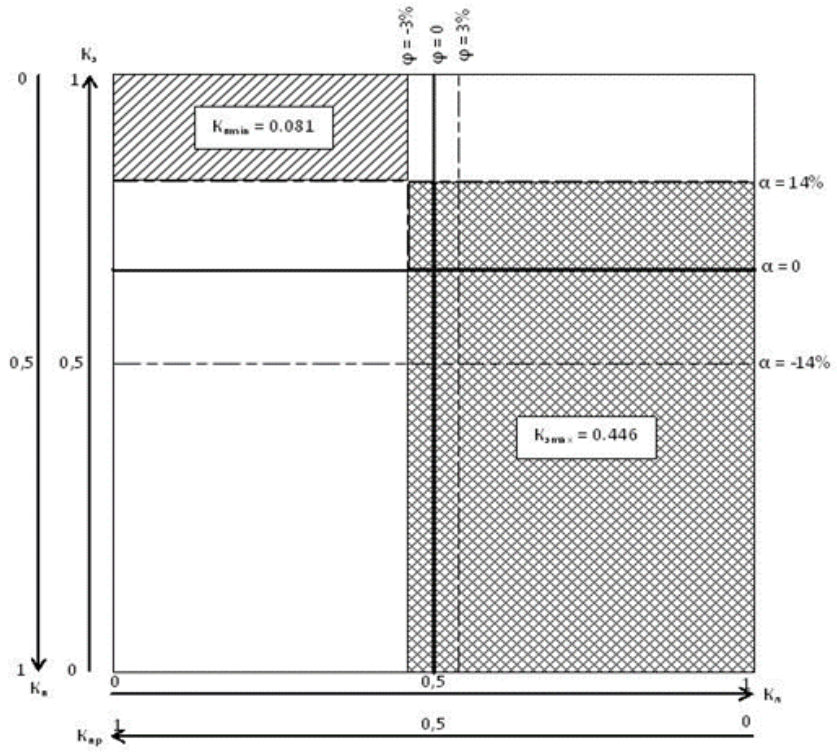


Рис. 3. Диаграмма распределения веса на каждое колесо автосамосвала БелАЗ-75131, полной массой 247 т, в зависимости от углов продольного и поперечного профиля карьерной автодороги.

Где $k_з = \lambda_з\left(1 + \frac{h_д\alpha}{b}\right), k_п = \lambda_п\left(1 - \frac{h_д\alpha}{a}\right), k_л = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2h_д\varphi}{l_к}\right), k_{пр} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{2h_д\varphi}{l_к}\right)$ – коэффициенты изменения нормальных реакций колес, соответственно, заднего моста, передней оси, левой и правой сторон, при различных углах продольного и поперечного уклонов дороги, $\lambda_п = \frac{a}{a+b}$, $\lambda_з = \frac{b}{a+b}$ – доля веса автосамосвала, приходящаяся на переднюю ось и задний мост автосамосвала на ровной площадке [1].

В некоторых граничных дорожных условиях, на участках с максимальными уклонами, некоторые шины автосамосвалов испытывают значительный перегруз, а некоторые практически полностью разгружаются. Так, например, на участке трассы с положительным продольным уклоном 14 % и отрицательным поперечным уклоном 3 % у автосамосвала БелАЗ-75131, двигающегося с грузом, полной массой 247 т, на заднее правое сдвоенное колесо приходится 44,6 % всей массы автосамосвала, т.е. 110,16 т, а на переднее левое – 8,1 % или 20 т.

Не менее значительное влияние на величину нормальных реакций оказывают ускоренное и замедленное движение, а также периодически возникающие аэродинамические нагрузки, связанные с натеканием на автосамосвал воздушных потоков [2, 4].

Оценить и проанализировать динамическое изменение нагрузки на отдельные колеса автосамосвала во время работы поможет массив данных, состоящий из показаний датчиков давления газа гидропневмоцилиндров подвески (далее по тексту – «датчиков»). Данные датчиков фиксируются через каждые 1 – 5 сек и используются предприятиями для контроля состояния и степени загруженности автосамосвала.

Анализ значений датчиков автосамосвала БелАЗ-75131, двигавшегося по маршруту с плечом, равным 2868 м, средним уклоном – 20 ‰ и максимальными

уклонами на отдельных участках до 40 ‰, показывает относительное стандартное отклонение до 1,93 % при движении автосамосвала в порожнем состоянии, и до 4,98 % – в груженом. При этом суммарная фактическая нагрузка, передаваемая на колеса через цилиндры подвески за время одной ездки, отличается от средней на 7,8 %.

Таким образом, значения фактических нагрузок на шины существенно отличаются от средних, используемых в расчетах эксплуатационных ТКВЧ.

Однако, учитывая расположение датчиков, прямая корреляция между их показаниями и значениями нормальных реакций в точках контакта шин с дорогой отсутствует. Это является следствием того, что неподрессоренная масса карьерных автосамосвалов составляет значительную величину, например, у автосамосвала БелАЗ-75131 до 20 % от полной массы и до 44 % от массы автомобиля без груза. Кроме того, гидропневмоцилиндры подвески автосамосвала несколько смещены от вертикальных плоскостей, проходящих через точки контакта шин с дорогой передней и задней осей и имеют определенный продольный угол наклона к нормали, который в незначительных пределах динамически изменяется в процессе движения автосамосвала.

Особое внимание необходимо уделять нагрузочным и температурным режимам сдвоенных колес. Даже незначительная разница в давлении, износе, техническом состоянии шин, находящихся в спарке, приводит к разному уровню их нагрева.

В настоящее время практически на всех горнорудных предприятиях крупногабаритные и сверхкрупногабаритные шины при монтаже снабжаются датчиками температуры, которые в режиме реального времени передают на приборную панель водителя и пульт диспетчера данные о внутренней температуре шин. Это позволяет в случае приближения температуры какой-либо шины к предельной своевременно остановить автосамосвал и дать шинам остыть, избегая тем самым преждевременного выхода шины из строя. Вместе с тем, незапланированные остановки автосамосвалов для остужения шин вызывают нарушение ритмичности транспортного процесса на конкретном маршруте и участке, что ведет к увеличению внеплановых простоев автосамосвалов и снижению грузооборота. Особенно остро нарушение ритмичности движения сказывается на работе развивающихся в настоящее время беспилотных роботизированных транспортных систем.

В этой связи правильный расчет эксплуатационного ТКВЧ и прогнозирование температурных режимов работы шин карьерных автосамосвалов имеет большое значение.

Показатель ТКВЧ фактически определяет объем транспортной работы, выполняемый в единицу времени, т.е. количество затрачиваемой мощности. А согласно уравнению мощностного баланса автомобиля, в любой момент времени количество мощности, подводимой к ведущим колесам равна количеству мощности, затрачиваемому на преодоление сопротивления движения. Т.е.

$$N_{\text{к}} = N_f + N_{\text{бук}} + N_\alpha + N_w + N_J, \qquad (4)$$

где Nк – мощность, реализуемая на ведущих колесах, кВт; Nf – мощность, затрачиваемая на преодоление основного дорожного сопротивления, кВт; $N_{\text{бук}}$ – мощность, затрачиваемая на буксование колеса, кВт; Nα –мощность, затрачиваемая на преодоление уклонов, кВт; Nw – мощность, затрачиваемая на преодоление силы сопротивления воздушного потока, кВт; Nj –мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции, кВт.

Таким образом, можно предположить, что изменение температуры шин на малом промежутке времени пропорционально мощности, затрачиваемой на движение:

$$\Delta T_{ш} \sim N_{к}. \quad (5)$$

Учитывая, что большинство средств технологического транспорта имеют электромеханическую трансмиссию, энергоемкость конкретного маршрута перевозки горной массы легко определяется как теоретическим расчетом, так и практическим путем с помощью электросчетчиков затрачиваемой электроэнергии.

Выводы

Одновременно с этим очевидно, что интенсивность изменения технического состояния основных узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов напрямую зависит от нагруженности их условий движения. Т.е. в течение одних и тех же значений наработок, выраженных в моточасах работы двигателя или километрах пробега, карьерные автосамосвалы будут иметь разную степень изменения технического состояния отдельных узлов и агрегатов, и разную потребность в объеме и составе профилактических воздействий. В связи с этим целесообразно при эксплуатации карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией в процессе учета и планирования профилактических и восстановительных воздействий и мероприятий учитывать периодичности и наработки в киловатт-часах затраченной на движение энергии.

Список литературы

1. Дадонов, М. В. Влияние продольного и поперечного профиля карьерной технологической дороги на распределение нагрузки по осям и колесам карьерных самосвалов / М. В. Дадонов, А. Г. Кульпин, Д. В. Стенин // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 5(163). – С. 29-35. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-5-29-35. – EDN RLIAUV.

2. Дадонов, М. В. Перераспределение нагрузок на колеса карьерных самосвалов за счет воздействия аэродинамических нагрузок / М. В. Дадонов, А. Г. Кульпин // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 1(159). – С. 3-8. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-1-3-8. – EDN GOGDQF.

3. Горюнов, С. В. Разработка методики оценки ресурса крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов / С. В. Горюнов, А. А. Хорешок // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 2(154). – С. 3-10. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-2-3-10. – EDN VWWRTA.

4. Обоснование рациональных режимов работы карьерных автосамосвалов при сверхнормативной эксплуатации / Г. Ю. Вишняков, А. Е. Пушкарев, Е. Ю. Ботян, В. С. Хлопонина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 11-1. – С. 24-37. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_111_0_24. – EDN GMYRBK.

5. Исследования влияния типа дорожной одежды карьерных автодорог на производительность автосамосвала при использовании имитационного моделирования / И. А. Пыталев, В. В. Якшина, А. К. Артюшин, П. А. Маренков // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 4(132). – С. 62-66. – DOI 10.56195/20793332_2024_4_62_66. – EDN UWTSJU.

6. Фурзиков, В. В. Обоснование выбора скоростной характеристики двигателя карьерного автосамосвала / В. В. Фурзиков // Инновационный транспорт. – 2022. – № 4(46). – С. 65-71. – DOI 10.20291/2311-164X-2022-4-65-71. – EDN DEDLYJ.

7. Руднева, А. А. О проблеме безопасной эксплуатации крупногабаритных шин / А. А. Руднева, В. А. Портола // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 9. –

С. 39-44. – DOI 10.24000/0409-2961-2023-9-39-44. – EDN XFYNFD.

8. Мирзаев, Н. Н. Исследование влияния дорожных условий на ресурс шин карьерных автосамосвалов / Н. Н. Мирзаев, С. В. Ларионов // Universum: технические науки. – 2023. – № 6-2(111). – С. 32-35. – DOI 10.32743/UniTech.2023.111.6.15643. – EDN DEFUJD.

9. Швыдкин, С. А. Факторы эксплуатации карьерных автосамосвалов, влияющие на развитие дефектов / С. А. Швыдкин, Б. Л. Герике // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2025. – № 11. – С. 104-108. – EDN NLHIXT.

10. Топалиди, В. А. Определение фактического показателя ТКВЧ крупногабаритных шин в карьерных условиях / В. А. Топалиди, У. Б. Юсупов, М. Э. Исраилов // Автомобильная промышленность. – 2024. – № 8. – С. 12-14. – EDN KRWTEA.

References

1. Dadonov M. V. Vliyanie prodol'nogo i poperechnogo profilya kar'ernoj tekhnologicheskoj dorogi na raspredelenie nagruzki po osyam i kolesam kar'ernykh samosvalov. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika [Mining equipment and electromechanics], 2022, no. 5(163), pp. 29-35 (in Russian)

2. Dadonov M. V. Pereraspredelenie nagruzok na kolesa kar'ernykh samosvalov za schet vozdejstviya aehrodinamicheskikh nagruzok. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika [Mining equipment and electromechanics], 2022, no. 1(159), pp. 3-8 (in Russian)

3. Goryunov S. V. Razrabotka metodiki ocenki resursa krupnogabaritnykh shin kar'ernykh avtosamosvalov. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika [Mining equipment and electromechanics], 2021, no. 2(154), pp. 3-10 (in Russian)

4. Vishnyakov G. Yu., Pushkarev A. E., Botyan E. Yu., Hloponina V. S. Obosnovanie racional'nykh rezhimov raboty kar'ernykh avtosamosvalov pri sverkhnormativnoj ehkspluatacii. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)], 2023, no. 11-1, pp. 24-37 (in Russian)

5. Pytalev I. A., Yakshina V. V., Artyushin A. K., Marenkov P. A. Issledovaniya vliyaniya tipa dorozhnoj odezhdy kar'ernykh avtodorog na proizvoditel'nost' avtosamosvala pri ispol'zovanii imitacionnogo modelirovaniya. Markshejderiya i nedropol'zovanie [Mine surveying and subsoil use], 2024, no. 4(132), pp. 62-66 (in Russian)

6. Furzikov V. V. Obosnovanie vybora skorostnoj kharakteristiki dvigatelya kar'ernogo avtosamosvala. Innovacionnyj transport [Innovative Transport], 2022, no. 4(46), pp. 65-71 (in Russian)

7. Rudneva A. A., Portola V. A. O probleme bezopasnoj ehkspluatacii krupnogabaritnykh shin. Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational Safety in Industry], 2023, no. 9, pp. 39-44 (in Russian)

8. Mirzaev N. N., Larionov S. V. Issledovanie vliyaniya dorozhnykh uslovij na resurs shin kar'ernykh avtosamosvalov. Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: technical sciences], 2023, no. 6-2(111), pp. 32-35 (in Russian)

9. Shvydkin S. A., Gerike B. L. Faktory ehkspluatacii kar'ernykh avtosamosvalov, vliyayushchie na razvitie defektov. Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov [Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources], 2025, no. 11, pp. 104-108 (in Russian)

10. Topalidi V. A., Yusupov U. B., Israilov M. E. Opredelenie fakticheskogo pokazatelya TKVCH krupnogabaritnykh shin v kar'ernykh usloviyakh. Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry], 2024, no. 8, pp. 12-14 (in Russian)

Dadonov M.V., Ashcheulov A.S.

ON THE ISSUE OF DETERMINING AND CONTROLLING THE THERMAL REGIME OF LARGE-SIZED AND SUPER-LARGE-SIZED TIRES

Abstract*. Improving the operational efficiency of mining equipment involves increasing its productivity and reducing maintenance costs. One of the most important areas of this process is extending the service life of large- and ultra-large-size tires. Harsh operating conditions often lead to their premature failure. Proper tire selection and high-quality condition monitoring allow operators to significantly improve the operational efficiency of mining dump trucks. Manufacturers of heavy-duty and heavy-duty tires (TKVN) design their tires for a maximum TKVN value, which must not be exceeded during operation. However, existing methods for calculating operational TKVN do not allow for a comprehensive determination, as they fail to consider many factors, including the variable load on the front and rear axles under changing driving conditions. An analysis of pressure sensor readings mounted on the suspension hydraulic cylinders allowed for more accurate monitoring and prediction of dump truck wheel temperature changes. Further research revealed a direct correlation between the power expended to move a dump truck and tire temperature. Therefore, the proposed method for assessing tire remaining life based on expended power will allow for a more accurate determination of the operational THF by more fully accounting for factors affecting driving conditions.*

Keywords*: mining truck, TKVCh, KGS, SKGS, service life, operating conditions.*

Сведения об авторах:

Дадонов Михаил Васильевич
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ), г. Кемерово, Россия,
доцент кафедры «Эксплуатация автомобилей» КузГТУ,
кандидат технических наук
e-mail: dadonovmv@kuzstu.ru

Ащеулов Андрей Сергеевич
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ), г. Кемерово, Россия,
доцент кафедры «Эксплуатация автомобилей» КузГТУ,
кандидат технических наук
e-mail: ascheulovas@kuzstu.ru

Information about the authors:

Mikhail Vasilyevich Dadonov
Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev (KuzSTU), Kemerovo, Russia,
Associate Professor, Department of Vehicle Operation, KuzSTU,
Candidate of Technical Sciences
e-mail: dadonovmv@kuzstu.ru

Andrey Sergeevich Ashcheulov
Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev (KuzSTU), Kemerovo, Russia,
Associate Professor, Department of Vehicle Operation, KuzSTU,
Candidate of Technical Sciences
e-mail: ascheulovas@kuzstu.ru

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

УДК 656.02:551.467

Васильева Ж.В., Васёха М.В., Ватутина М.В.

ВЫЯВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ РИСКОВ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В АРКТИКЕ

Аннотация. *Представленные результаты исследования посвящены вопросу управления рисками морской транспортно-логистической системы (ТЛС) Арктики. Функционирование морских транспортно-логистических систем в экстремальных условиях Арктики неразрывно сопряжено с многофакторными рисками, при этом отсутствуют исследования, посвященные комплексному анализу рисков арктической ТЛС. Целью работы являлось выявление и комплексная оценка рисков функционирования морских арктических ТЛС. В качестве основного метода применён экспертный анализ, в рамках которого проведены полуструктурированные интервью со специалистами, работающими в сфере арктического морского транспорта и логистики. Количественная оценка рисков выполнена с помощью матрицы вероятности и последствий. На основе экспертных оценок объективно выявлены, количественно оценены и проанализированы ключевые риски морской транспортно-логистической системы Арктики. Предложенный в исследовании методологический подход и полученные результаты могут служить для формирования научно-методической основы в целях приоритезации мер управления рисками — от развития ледокольного флота до модернизации портовой инфраструктуры, оптимизации распределения ресурсов и обоснования инвестиционных решений.*

Ключевые слова: *морская транспортно-логистическая система (ТЛС), риски, Арктика, экспертная оценка, комплексный анализ рисков.*

Постановка задачи

В условиях роста арктической морехозяйственной деятельности и увеличения грузопотока по Северному морскому пути (СМП) актуализируется задача обеспечения устойчивого функционирования морской транспортно-логистической системы (ТЛС) Арктики. Эксплуатация ТЛС в экстремальных арктических условиях сопряжена с комплексом рисков. В настоящее время отсутствуют работы, посвящённые комплексному анализу рисков морской транспортно-логистической системы Арктики, в научной литературе отражены лишь отдельные исследования, посвященные обзору или

анализу отдельных групп рисков морехозяйственной деятельности в Арктическом регионе.

Анализ последних исследований

Анализ опубликованных работ показывает, что функционирование морских транспортно-логистических систем (ТЛС) в экстремальных условиях Арктики неразрывно сопряжено с многофакторными рисками. При этом в современной научной литературе отсутствует целостное исследование, посвящённое комплексному анализу рисков морской транспортно-логистической системы Арктики. Имеющиеся публикации ограничиваются фрагментарным рассмотрением отдельных групп рисков, связанных с морехозяйственной деятельностью в регионе.

Приоритетными рисками арктических маршрутов большинство авторов называют **погодные условия**, экстремальность и специфичность которых в своей совокупности рождает особые требования к условиям перевозок, к технике, к планированию и обеспечению транспортных перевозок любых грузов [1,2]. Сочетание низких температур, высоких ветровых нагрузок, зачастую высокой влажности, резких изменений погодных условий делают невозможным применение шаблонных технологий транспортировки без соответствующего обеспечения. К погодным условиям относят туман, снег или дождь, ограниченную видимость, ветер, низкие температуры, состояние моря (волны, морские течения, температура морской воды, приливы и отливы), длительные периоды темноты или дневного света и сезонные изменения – все это существенно влияет на морские операции в арктическом регионе [3,4].

Отдельно при анализе рисков арктических ТЛС выделяют риски сложных ледовых условий, включая факторы опасности такие как прочность, концентрацию, толщину льда, наличие дрейфующих/паковых льдов/торосов/айсбергов, ледовые сжатия, которые создают навигационные проблемы в полярных регионах [5-7]. Несмотря на тенденцию сокращения количества льда в арктических водах, ледовые условия остаются сложными и непредсказуемыми, даже в летний период навигации есть опасность встречи с отдельно дрейфующими ледовыми полями и айсбергами [8].

В условиях интенсификации арктического судоходства особую значимость приобретают операционно-технологические риски, связанные с техническими возможностями флота, технологическими процессами перевозок и эксплуатационными условиями [3,9,10]. Их учёт необходим для обеспечения бесперебойности перевозок, поскольку они напрямую влияют на техническую реализуемость маршрутов, график проводок и безопасность судоходства. Выделение данной категории рисков позволяет целенаправленно разрабатывать превентивные меры: от модернизации ледокольного флота до совершенствования систем мониторинга ледовой обстановки, что критически важно для устойчивого развития арктической логистики.

Значительное количество авторов публикаций отмечают инфраструктурные риски для акватории СМП, связанные с недостаточностью, износом или неэффективной организацией базовой инфраструктуры, обеспечивающей морские перевозки [11-13]. Исследователи отмечают, что эти факторы рисков могут влиять на пропускную способность портов, увеличивать сроки и стоимость перевозок, а также повышать вероятность инцидентов.

В последние годы появились публикации, отражающие роль санкционных рисков, влияющих на обеспечение устойчивого функционирования транспортных маршрутов в арктической акватории [14-16]. К таким рискам относят ограничения на развитие арктической инфраструктуры, технологическую зависимость от иностранных поставщиков в судоремонте и судостроении, международные споры о режимах прохода судов, экономическая изоляция отдельных арктических проектов и другие.

Большинство публикаций, связанных с оценкой рисков морской арктической транспортно-логистической системы выделяют также группу экологических рисков, которые обусловлены как растущей антропогенной нагрузкой, связанной с интенсивным развитием судоходства и промышленного освоения Арктики, так и со специфическими природными условиями региона [17,18]. Уязвимость арктических экосистем может существенно усиливать последствия загрязнений с судов (разливы нефти, сбросы, выбросы), что требует разработки систем анализа, прогнозирования, мониторинга экологических рисков с целью предотвращения возможного экологического ущерба [19,20].

Проведённый анализ научных источников позволил идентифицировать ключевые риски, присущие морской арктической транспортно-логистической системе, а также выявить фрагментарный характер существующих исследований в данной предметной области.

Отсутствие целостного исследования, посвященного комплексному анализу рисков морской ТЛС Арктики - результат сочетания объективных сложностей, ресурсных ограничений и фрагментарности существующих исследований. Арктическая логистика включает взаимодействие множества факторов: климатических условий, геополитических рисков, состояния инфраструктуры, экологических ограничений, технологических вызовов и экономических аспектов. Комплексный анализ требует междисциплинарного подхода, интегрирующего знания в области судоходства, экологии и технологий; в связи с этим объективно необходима вовлечённость в комплексный анализ рисков профильных экспертов и непосредственных участников морехозяйственной деятельности в Арктическом регионе, обладающих эмпирическим опытом и специализированными знаниями.

Цель работы

Цель настоящего исследования заключается в выявлении и комплексном анализе рисков, связанных с функционированием морских арктических транспортно-логистических систем с привлечением ключевых экспертов, участников морехозяйственной деятельности в Арктике.

Основная часть

В качестве основного методологического инструмента исследования был выбран метод экспертных оценок. Данный метод позволяет выявить ключевые угрозы, которые сложно формализовать статистически, оценить вероятность наступления и последствия реализации рисков в условиях неполных данных, учитывать не только объективные данные, но и профессиональный опыт экспертов.

Для учета экспертной оценки в отношении идентификации и обоснования факторов риска была проведена серия анонимных, полуструктурированных интервью. Разработка и проведение полуструктурированных интервью были осуществлены в соответствии с методикой, изложенной в классическом труде, посвященном основам качественного исследовательского интервьюирования [21], и примененной в работах [22, 23]

Вопросы интервью были ориентированы как на идентификацию и оценку риска, так и на индивидуальный опыт и отношение респондентов к проблематике. Было проведено десять интервью с российскими и зарубежными специалистами, чья профессиональная деятельность непосредственно связана с морским судоходством в Арктике. Интервью длились от 30 минут до двух часов. Все записи интервью были расшифрованы, проанализированы и обсуждены авторами с использованием

качественного контент-анализа. Все информанты приведены в таблице 1. Интервью проводились на русском и английском языках.

Таблица 1.

Эксперты, привлекаемые к оценке

Вид профессиональной деятельности	Количество экспертов	Цифровая кодировка
Капитан атомного ледокола	1	Эксперт 1
Капитан танкера-газовоза ледового класса АРК 7	1	Эксперт 2
	1	Эксперт 3
Штурман танкера-газовоза ледового класса АРК 7	1	Эксперт 4
	1	Эксперт 5
Ледовый лоцман	1	Эксперт 6
Менеджер по безопасности мореплавания в арктическом порту	1	Эксперт 7
Сотрудник ФГБУ «ГлавСевморпуть»	1	Эксперт 8
Коммерческий директор судоходной компании	1	Эксперт 9
Оператор флота в судоходной компании	1	Эксперт 10

Количественную оценку риска проводили с помощью метода матрицы вероятности и последствий (табл.2), когда экспертами оценивались вероятности возникновения и уровень последствий от реализации выявленных ранее рисков в баллах по шкале от 1 до 5 согласно шкале оценок рисков по вероятности их возникновения и последствиям реализации.

Таблица 2.

Матрица вероятности и последствий

Вероятность возникновения риска, P	Вероятность возникновения риска, баллы	Последствия реализации риска, S	Последствия реализации риска, баллы
Высокая	5	Катастрофические (потери катастрофичны и влекут непоправимые последствия)	5
Выше средней	4	Существенные (потери крайне высоки и тяжело поправимы, наносят существенный ущерб)	4
Средняя	3	Средние (потери ощутимы, но легко поправимы, не наносят существенного ущерба)	3
Ниже средней	2	Низкие (потери минимальны, незначительны и легко поправимы)	2
Низкая	1	Незначительные (не ощутимы)	1

Количественное определение проводилось по формуле:

$$R=S\cdot P, \quad (1)$$

где R – риск;
S – последствия;
P – вероятность.

Репрезентативность шагов полуструктурированного интервью обосновывается сочетанием гибкости метода, целенаправленного отбора респондентов и анализом возникающих данных в контексте исследовательских целей [1]. Полуструктурированное интервью сочетает заранее подготовленные тематические блоки, выявленные ранее на основе анализа научных источников, посвященных идентификации и оценке рисков морской арктической транспортно-логистической системы. Репрезентативность методики также обеспечена подбором участников, имеющих опыт и занимающихся профессиональной деятельностью, релевантной исследовательской задаче. Триангуляция данных, полученных в ходе интервью, с выводами обзора публикаций также подтверждает достоверность выводов.

Количественная оценка достоверности исследования осуществлялась с помощью расчёта коэффициента конкордации Кендалла (W), который позволяет оценить степень согласованности мнений экспертов. При высокой согласованности соблюдается условие, при котором W≥0,7.

Коэффициент конкордации Кендалла вычислялся по формуле:

$$W = \frac{12 \times D}{m^2 \times (n^3 - n)} \quad (2)$$

где: n – количество рисков;
m – количество экспертов;
D – сумма квадратов отклонений.

$$D = \sum_{i=1}^{n} R_i - \bar{R} \quad (3)$$

где $R_i -$ сумма рангов i риска;
$\bar{R}$ – среднее значение суммы оценок

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n} \quad (4)$$

Коэффициент конкордации Кендалла для проведенного исследования имеет значение 0,82.

Результаты анализа полученных интервью по идентификации и оценке рисков морских арктических транспортно-логистических систем экспертами представлены в табл. 3 и рис.1.

Таблица 3

Результаты экспертной оценки рисков морских арктических транспортно-логистических систем

№ п/п	Вид риска	Ключевые факторы риска, указанные экспертами	Интенсивность риска
1	Ледовые риски	Дрейфующие льды и айсберги, нестабильность ледового покрова, ледовые сжатия, увеличение числа айсбергов, торосы и нагромождения льда	15,21
2	Операционно-технологические риски	Нехватка ледокольного флота для ледокольного сопровождения судов, недостаток буксиров и судов снабжения ледового класса, ограничение возможности поиска и спасания (SAR)	11,59
3	Инфраструктурные риски	Слабо развитая инфраструктура морских портов, отсутствие портов-убежищ, недостаточное количество пунктов пропуска в Арктике, отсутствие автомобильных и железных дорог на подходах к портам, особенности Морского канала в Обской губе, удаленность и изоляция районов плавания, слабое покрытие спутниковой связи, нехватка вертодромов	10,24
4	Погодные риски	Низкие температуры (до -50°С зимой), шторма и сильные ветра, туман и ограниченная видимость, плохая видимость в период полярной ночи, изменчивость течений и ветров, приливные/отливные явления, подводные течения	13,30
5	Экологические риски	Разливы нефтепродуктов, судовые сбросы, шумовое загрязнение, инвазивные виды	8,90
6	Санкционные риски	Влияние европейских и американских санкций, на работу морского транспорта в Арктике, уход крупных компаний-подрядчиков из РФ.	7,25

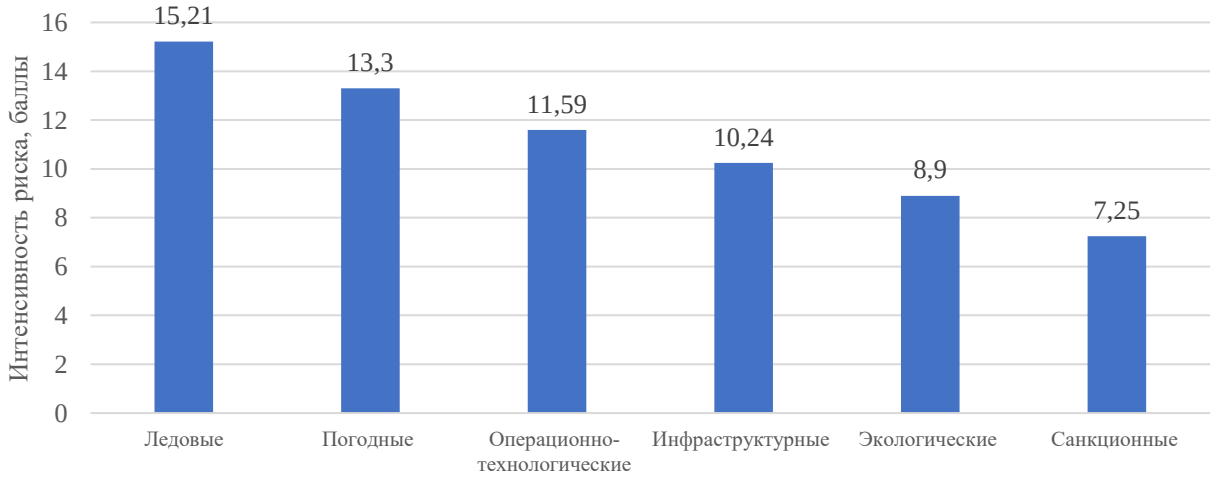


Рисунок 1. Ранжирование выделенных экспертами рисков морских арктических транспортно-логистических систем

Наибольшими рисками для арктических маршрутов эксперты считают ледовые риски, которые получили в совокупности наибольшее значение интенсивности – 15,21 балла. Экспертами был отмечен ряд следующих наиболее значимых факторов рисков. Одним из важных факторов риска являются опасности дрейфующих льдов, которые могут «как преградить путь морскому судну, так и увести судно от курса, в худшем случае вынести судно на мель». Опасности столкновения с айсбергом состоят в «возможности повреждения корпуса или движительных механизмов, а также в потере мореходных качеств судна». Оба явления чрезвычайно опасны для судоходства и требуют непрерывного мониторинга окружающей обстановки со стороны экипажа судна. Были также отмечены риски нестабильного ледового покрова, при котором «судно не может следовать по маршруту с установочной скоростью, что ведет к задержкам или наоборот прибытию ранее заявленного срока, что неблагоприятно сказывается как на работе портовой инфраструктуры, так и планировании рейсовых заданий для морских судов». Также эксперты выделяли особенную опасность ледовых сжатий, в этих условиях льды перекрывают ледокольные каналы движения судов в период зимней навигации, способны захватить в ледовый плен суда и морские сооружения, вовлечь их в вынужденный ледовый дрейф, а в дальнейшем раздавить их.

Погодные риски получили второе по значимости значение интенсивности риска - 13,3 балла, что также говорит о высоком вкладе экстремальных погодных условий в совокупную оценку рисков арктических ТЛС. Погодные условия высоких широт создают большой спектр опасностей для навигации. Экспертами отмечались опасности низких температур (до -50°С зимой), которые вызывают обледенение палубных конструкций, что ухудшает остойчивость судна и затрудняет работу экипажа. В этом случае металл становится хрупким, увеличивается риск механических повреждений, судно может повредить корпус ударом об лед при повороте, как при смене курса, так и при маневрировании во льдах.

Также были отмечены опасности штормов и сильных ветров, особенно они опасны в Баренцевом и Карском морях, где волны могут достигать 10–15 метров. Ветра, дующие с ледяного щита, создают дополнительные сложности для маневрирования, суда не могут сохранять заданную скорость и курс, иногда приходится искать укрытия и штормоваться.

Опасности длительных периодов темноты (полярная ночь) и плохой видимости (туманы) делают визуальное наблюдение окружающей обстановки практически невозможным. При этом визуальное наблюдение является одним из важнейших инструментов морской безопасности. Увеличивается риск столкновений, как между судами, так и судна с дрейфующим полем или айсбергом. Радиолокация и спутниковые системы не всегда помогают нивелировать эти опасности, так как небольшие льдины плохо отражают сигнал.

Опасность изменений течений и ветров также негативно сказывается на безопасности транспортных маршрутов в арктической акватории. Уже имеющиеся традиционные маршруты и рекомендованные пути, которые рассчитаны на определенные и стабильные ледовые условия подвергаются постоянным изменениям и требуют непрерывного мониторинга состояния маршрута и его корректировки.

Высокой значимостью для северных широт обладают также операционно-технологические риски - 11,59 балла. Они включают в себя опасности нехватки ледокольного флота для сопровождения судов, недостаток буксиров и судов снабжения ледового класса, нехватку вертодромов, ограничение возможности поиска и спасания, слабое покрытие спутниковой связи. Наличие этих факторов перевешивает для экспертов значимость инфраструктурных рисков - 9,24 балла. Это говорит о высокой значимости обслуживания непосредственно судоходных маршрутов по сравнению с

наличием инфраструктуры. В части операционно-технологических рисков эксперты отметили, что «в сложных ледовых условиях в восточной части СМП, а иногда и в западной действительно ощутимую помощь могут оказывать только атомные ледоколы, которых, к сожалению, не хватает». Помимо ледоколов для ледокольного сопровождения судов во льдах «есть острая необходимость в буксирах ледового класса, способных обеспечивать швартовные операции в замерзающих портах в период зимней навигации». Нехватка буксиров ледового класса в Арктике – это серьёзный вызов, связанный с высокой стоимостью строительства судов, ограниченными производственными мощностями, ростом требований к судоходству и санкционными ограничениями. Также было отмечено, что ограниченный доступ к экстренным службам и спасательным формированиям создает сложности в организации оперативной помощи при возникновении нештатных ситуаций и обусловливает зависимость от собственных ресурсов в случае возникновения аварийных ситуаций.

Следующими по значимости эксперты выделили инфраструктурные риски - 10,24 балла. Инфраструктура портов включает в себя причалы для швартовки судов, грузовые терминалы, склады, оборудование для погрузки и разгрузки, системы навигационной поддержки, а также транспортные связи с внутренними районами. Хорошо развитая инфраструктура обеспечивает быструю, безопасную и эффективную обработку грузов и пассажиров. Эксперты подчеркивают, что «многие порты и аэродромы в Арктике имеют устаревшее оборудование и ограниченную пропускную способность, что затрудняет обработку грузов и пассажиров, особенно в пиковые периоды. Далеко не все порты готовы предоставить весь спектр услуг, которые предоставляются в неарктических портах, а если и находится возможность предоставления таких услуг, то стоимость в разы выше, чем на «большой земле»».

В рамках инфраструктурных рисков отмечена опасность отсутствия портов-убежищ. Так, при следовании судна на восток по СМП нет оборудованных портов, где судно могло бы укрыться в случае необходимости. Например, «порт Диксон является убежищем, но там нет пункта пропуска и судно, работающее под иностранным флагом, не сможет зайти в порт». Также «сложности возникнут, если судну под иностранным флагом потребуется зайти в порт на пути следования по СМП по каким-либо нуждам. Если судно вышло из Сабетты на восток, то ближайший пункт пропуска – порт Провидения».

Также экспертами отмечена нехватка вертодромов, это специально оборудованные площадки для взлёта и посадки вертолётов. Суровые климатические условия, вечная мерзлота и практически полное отсутствие наземной транспортной инфраструктуры в арктическом регионе делают вертолёты фактически единственным доступным и эффективным способом передвижения. Они могут быстро доставлять людей, грузы, оказывать экстренную помощь и обеспечивать связь между удалёнными поселениями и промышленными объектами. На территории Арктической зоны России насчитывается около 300 посадочных площадок, но большинство из них находятся в плохом состоянии или вовсе не соответствуют современным требованиям безопасности и эксплуатации. Многие вертодромы требуют ремонта или реконструкции.

Особое внимание экспертов обращалось на опасности прохождения судоходного канала в Обской губе («Морской канал»). Морской канал в Обской губе – это искусственно углубленный фарватер, обеспечивающий проход крупнотоннажных судов к арктическим портам Сабетта и Новый Порт. Его эксплуатация критически важна для транспортировки углеводородов с Ямальского месторождения по СМП, но сопряжена с уникальными географическими и климатическими рисками. Протяженность канала 52,6 км (26,4 морских миль), ширина 298 метров, глубина (минимальная) 14 метров. Средняя осадка танкера-газовоза в груженом состоянии 12 метров и его выход за границы канала

грозит посадкой на мель. Эксперты отмечают, что особо важной является минимальная скорость, при которой проход по каналу считается безопасным. Если капитан не уверен, что судно под его командованием сможет поддерживать нужную скорость – он не должен заходить в канал самостоятельно, потому как скорость дрейфа льда в совокупности с подводным течением может вынести судно на мель. Для снижения рисков принято правило об обязательных докладах со стороны администрации судна при пересечении определенных линий на пути следования в Морском канале, а также при отправке отчета о прохождении морского канала с фотоотчетом и данными ледового радара.

Слабое покрытие спутниковой связи – еще одна опасность в рамках инфраструктурных рисков для работы морских судов в Арктике. Эксперты отмечают, что GPS и ГЛОНАСС работают с перебоями в высоких широтах, что затрудняет не только навигацию, но и связь судна с внешним миром. Помимо нарушения обычной коммуникации судна с представителями коммерческих служб (судовладельцы, фрахтователи, агенты), из-за отсутствия связи возможны проблемы с передачей ежедневных докладов в ФГБУ «ГлавСевморпуть». Отсутствие ежедневных докладов рассматривается как нарушение Правил плавания по СМП и чревато отзывом разрешения на плавание в акватории Северного Морского Пути.

Экологические риски в оценке экспертов получили 8,9 балла. Причиной невысоких итоговых баллов являлась совокупность высокой оценки последствий реализации (S) и низкой оценки вероятности такого события (P). Эксперты отметили, что действующий режим плавания на СМП допускает только сертифицированные суда и регламентирует навигацию в зависимости от ледовых условий суда ледового класса. Суда, соответствующие требованиям Полярного кодекса, конструктивно адаптированы для безопасной навигации во льдах, включая предотвращение разливов топлива. Эксперты выделили такие значимые факторы рисков как разливы нефти при транспортировке, загрязнение воды стоками и выбросами судовых двигателей, возможное токсическое воздействие на морские экосистемы. Относительно опасностей нарушения среды жизнедеятельности для морских млекопитающих, эксперты отметили, что проводка караванов судов по Северному морскому пути происходит с помощью данных спутников в обход лежек белька и лежбищ тюленей, что является уникальным примером снижения рисков экологического природы.

Последними по значению опрошенные назвали санкционные риски – 7,25 балла. Несмотря на невысокую оценку, всеми экспертами было отмечено наличие и влияние этих рисков на обеспечение устойчивости морских транспортно-логистических операций. В частности, приводился пример прекратившей свою деятельность в России компании «АББ Марин», которая эксклюзивно занималась производством, ремонтом и обслуживанием судовых пропульсивных установок. Экспертами отмечалось, что «после прохождения сложных ледовых маршрутов судну часто требуется ремонт или обслуживание азиподов в порту. Экипажи судов вынуждены выходить из неудобного положения самостоятельно, что получается далеко не всегда». Эксперты отметили, если один из азиподов выходит из строя – ледовый класс судна опускается с АРК7 до АРК 4, что в свою очередь в период зимней навигации приводит к необходимости ледокольного сопровождения по всему участку ледового маршрута. То есть, судно, которое было бы в состоянии преодолеть этот участок самостоятельно, вынуждено прибегать к услугам ледокола, что влияет и на стоимость перевозки, и на планирование рейса (возможное ожидание ледокола). Указанные обстоятельства также усиливают нехватку атомных ледоколов для проводки судов по СМП.

Выводы

На основе экспертных оценок объективно выявлены, количественно оценены и проанализированы ключевые риски морской транспортно-логистической системы Арктики. Установлено, что наибольшие значения интенсивности рисков морских арктических транспортно-логистических систем представляют ледовые риски (15,21 балла). На втором месте по значимости для опрошенных экспертов находятся погодные условия (13,3 балла). Существенную угрозу также создают операционно-технологические риски (11,59 баллов) и инфраструктурные фактора риска (10,24 балла). Экологические риски оценивались в 8,9 балла, а санкционные — в 7,25 балла.

Предложенный в исследовании методологический подход и полученные результаты формируют научно-методическую основу для приоритезации комплекса мер по выявлению, оценке и управлению рисками морской транспортно-логистической системы Арктики в условиях интенсификации грузопотока по Северному морскому пути — от развития ледокольного флота до модернизации портовой инфраструктуры.

Научная значимость и новизна настоящего исследования, заключаются в комплексном осмыслении уникальных вызовов региона (климатических, геополитических, экологических, инфраструктурных), которые трудно изучить количественными методами. Работа восполняет пробелы в существующих фрагментарных исследованиях, формируя целостное представление о системе рисков, и обогащает методологический аппарат логистики за счёт интеграции качественных экспертных данных. Проведённое исследование может способствовать междисциплинарному синтезу знаний (судоходство, экология, геополитика, экономика) и выявить взаимосвязи между ключевыми факторами риска.

Выявление, количественная оценка и анализ рисков морских ТЛС в Арктике позволяет настраивать параметры навигационных систем под реальные угрозы, оптимизировать распределение ресурсов за счёт выделения приоритетных направлений минимизации рисков и обосновывать инвестиционные решения для морских арктических ТЛС на базе доказательных данных о вероятных рисках и их последствиях.

Благодарность/Финансирование

Работа выполнена в рамках темы НИР № FMEZ-2025-0071 "Разработка научно-методического обеспечения создания интегрированной системы анализа, прогнозирования и мониторинга состояния Арктической транспортно-логистической системы как инструмента реализации государственной политики Российской Федерации в Арктическом регионе в условиях цифровой трансформации и глобальных климатических изменений" (номер ЕГИСУ НИОКТР 1025040900038-6-1.5.1).

Список литературы

1. Baksh, A.-A. Marine transportation risk assessment using Bayesian Network: Application to Arctic waters / A.-A. Baksh, R. Abbassi, V. Garaniya, F. Khan // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 159. — P. 422–436. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.024.

2. Fu, S. Towards a probabilistic model for predicting ship besetting in ice in Arctic waters / S. Fu, D. Zhang, J. Montewka, X. Yan, E. Zio // Reliability Engineering & System Safety. — 2016. — Vol. 155. — P. 124–136. — DOI: 10.1016/j.ress.2016.06.010.

3. Smith, L. Arctic Marine Transport Risks: A Review of Emerging Challenges / L. Smith [et al.] // Marine Policy. — 2018. — Vol. 94. — P. 122–131.

4. Johannsdottir, L. Systemic risk of cruise ship incidents from an Arctic and insurance perspective / L. Johannsdottir, D. Cook, G. M. Arruda // Elementa: Science of the Anthropocene. — 2021. — Vol. 9, No. 1. — DOI: 10.1525/elementa.2020.00009.

5. Khan, B. A dynamic Bayesian network model for ship-ice collision risk in the Arctic waters / B. Khan, F. Khan, B. Veitch // Safety Science. — 2020. — Vol. 130. — Art. 104858. — DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104858.

6. Obisesan, A. Efficient response modelling for performance characterisation and risk assessment of ship-iceberg collisions / A. Obisesan, S. Sriramula // Applied Ocean Research. — 2018. — Vol. 74. — P. 127–141. — DOI: 10.1016/j.apor.2018.03.003.

7. Lin, B. An overview of scholarly literature on navigation hazards in Arctic shipping routes / B. Lin, M. Zheng, X. Chu, W. Mao, D. Zhang, M. Zhang // Environmental Science and Pollution Research. — 2023. — DOI: 10.1007/s11356-023-29050-2.

8. Цедрик, С. В. Изменение ледовитости морей Российской Арктики в XXI веке по результатам климатических моделей проекта CMIP6 / С. В. Цедрик, Р. И. Май // Лёд и Снег. — 2025. — Т. 65, № 3. — С. 22–34.

9. Østreng, W. Governance and Management of the Arctic Ocean: Options and Challenges / W. Østreng [et al.]. — Springer, 2013.

10. Raspotnik, A. The Arctic as a New Playground for Sino-Russian Cooperation: The Northern Sea Route / A. Raspotnik, L. Eger // Polar Journal. — 2020. — Vol. 10, No. 1. — P. 1–19.

11. Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report / Arctic Council [et al.] ; coord. by L. Brigham, R. McCalla, E. Cunningham [et al.]. — 2009. — 194 p.

12. Селин, В. С. Экономические риски освоения Арктики: методология и практика / В. С. Селин, В. А. Цукерман // Экономика региона. — 2019. — Т. 15, № 3. — С. 724–737.

13. Гудев, П. А. Риски и перспективы развития Северного морского пути / П. А. Гудев // Вестник МГИМО. — 2021. — № 5. — С. 102–125.

14. Overland, I. The Geopolitics of Arctic Shipping: Northern Sea Route, Northwest Passage and Polar Silk Road / I. Overland [et al.] // Polar Geography. — 2019. — Vol. 42, No. 2. — P. 83–101.

15. Raspotnik, A. Sanctions and the Northern Sea Route: Implications for Arctic Shipping and Resource Development / A. Raspotnik, W. Østreng // Marine Policy. — 2022. — Vol. 135. — Art. 104856.

16. Гудев, П. А. Санкционные ограничения и их влияние на развитие Северного морского пути / П. А. Гудев // Вестник МГИМО. — 2023. — № 4. — С. 112–130.

17. Lasserre, F. Risk Analysis of Oil Spills from Arctic Shipping / F. Lasserre [et al.] // Marine Pollution Bulletin. — 2017. — Vol. 117, No. 1–2. — P. 297–307.

18. Stephens, E. Arctic Search and Rescue: Challenges and Opportunities / E. Stephens [et al.] // Polar Geography. — 2019. — Vol. 42, No. 2. — P. 83–101.

19. Smith, L. Arctic Marine Transport Risks: A Review of Emerging Challenges / L. Smith [et al.] // Marine Policy. — 2018. — Vol. 94. — P. 122–131.

20. Eguíluz, V. M. A Quantitative Assessment of Arctic Shipping Activity from Satellite-Based Vessel Tracking / V. M. Eguíluz [et al.] // Scientific Reports. — 2016. — Vol. 6. — Art. 30682.

21. Kvale, S., Brinkmann S. Interviews: Learning the Craft of Qualitative Research Interviewing, 2nd edition, Los Angeles CA, 2009, p.376

22. Sydnes A.K. et al. ‘‘International Cooperation on Search and Rescue in the Arctic.’’ Arctic Review on Law and Politics, Vol. 8, 2017, pp. 109-136. http://dx.doi.org/10.23865/arctic.v8.705

23. Sydnes A.K., Sydnes M., Hamnevoll H. Learning from crisis: The 2015 and 2017 avalanches in Longyearbyen, Safety Science, Volume 134, 2021, 105045, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105045

References

1. Baksh A.-A., Abbassi R., Garaniya V., Khan F. Marine transportation risk assessment using Bayesian Network: Application to Arctic waters. Ocean Engineering. 2018. Vol. 159. P. 422–436. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.024.

2. Fu S., Zhang D., Montewka J., Yan X., Zio E. Towards a probabilistic model for predicting ship besetting in ice in Arctic waters. Reliability Engineering & System Safety. 2016. Vol. 155. P. 124–136. DOI: 10.1016/j.ress.2016.06.010.

3. Smith L. et al. Arctic Marine Transport Risks: A Review of Emerging Challenges. Marine Policy. 2018. Vol. 94. P. 122–131.

4. Johannsdottir L., Cook D., Arruda G. M. Systemic risk of cruise ship incidents from an Arctic and insurance perspective. Elementa: Science of the Anthropocene. 2021. Vol. 9, No. 1. DOI: 10.1525/elementa.2020.00009.

5. Khan B., Khan F., Veitch B. A dynamic Bayesian network model for ship-ice collision risk in the Arctic waters. Safety Science. 2020. Vol. 130. Art. 104858. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104858.

6. Obisesan A., Sriramula S. Efficient response modelling for performance characterisation and risk assessment of ship-iceberg collisions. Applied Ocean Research. 2018. Vol. 74. P. 127–141. DOI: 10.1016/j.apor.2018.03.003.

7. Lin B., Zheng M., Chu X., Mao W., Zhang D., Zhang M. An overview of scholarly literature on navigation hazards in Arctic shipping routes. Environmental Science and Pollution Research. 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-29050-2.

8. Tsedrik S. V., Mai R. I. Izmenenie ledovitosti morei Rossiiskoi Arktiki v XXI veke po rezul’tatam klimaticheskikh modelei proekta CMIP6 [Changes in the ice cover of the Russian Arctic seas in the 21st century according to CMIP6 climate model results]. Led i Sneg [Ice and Snow]. 2025. Vol. 65, No. 3. P. 22–34. (In Russian)

9. Østreng W. et al. Governance and Management of the Arctic Ocean: Options and Challenges. Springer, 2013.

10. Raspotnik A., Eger L. The Arctic as a New Playground for Sino-Russian Cooperation: The Northern Sea Route. Polar Journal. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 1–19.

11. Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report / Arctic Council et al.; coord. by Brigham L., McCalla R., Cunningham E. et al. 2009. 194 p.

12. Selin V. S., Tsukerman V. A. Ekonomicheskie riski osvoeniya Arktiki: metodologiya i praktika [Economic risks of Arctic development: methodology and practice]. Ekonomika regiona [Economy of Region]. 2019. Vol. 15, No. 3. P. 724–737. (In Russian)

13. Gudev P. A. Riski i perspektivy razvitiya Severnogo morskogo puti [Risks and prospects for the development of the Northern Sea Route]. Vestnik MGIMO [MGIMO Review of International Relations]. 2021. No. 5. P. 102–125. (In Russian)

14. Overland I. et al. The Geopolitics of Arctic Shipping: Northern Sea Route, Northwest Passage and Polar Silk Road. Polar Geography. 2019. Vol. 42, No. 2. P. 83–101.

15. Raspotnik A., Østreng W. Sanctions and the Northern Sea Route: Implications for Arctic Shipping and Resource Development. Marine Policy. 2022. Vol. 135. Art. 104856.

16. Gudev P. A. Sanktsionnye ogranicheniya i ikh vliyanie na razvitie Severnogo morskogo puti [Sanctions restrictions and their impact on the development of the Northern Sea Route]. Vestnik MGIMO [MGIMO Review of International Relations]. 2023. No. 4. P. 112–130. (In Russian)

17. Lasserre F. et al. Risk Analysis of Oil Spills from Arctic Shipping. Marine Pollution Bulletin. 2017. Vol. 117, No. 1–2. P. 297–307.

18. Stephens E. et al. Arctic Search and Rescue: Challenges and Opportunities. Polar Geography. 2019. Vol. 42, No. 2. P. 83–101.

19. Smith L. et al. Arctic Marine Transport Risks: A Review of Emerging Challenges. Marine Policy. 2018. Vol. 94. P. 122–131.

20. Eguíluz V. M. et al. A Quantitative Assessment of Arctic Shipping Activity from Satellite-Based Vessel Tracking. Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Art. 30682.

21. Kvale, S. , Brinkmann S. Interviews: Learning the Craft of Qualitative Research Interviewing, 2nd edition, Los Angeles CA, 2009, p.376

22. Sydnes A.K. et al. ‘‘International Cooperation on Search and Rescue in the Arctic.’’ Arctic Review on Law and Politics, Vol. 8, 2017, pp. 109-136. http://dx.doi.org/10.23865/arctic.v8.705

23. Sydnes A.K., Sydnes M., Hamnevoll H. Learning from crisis: The 2015 and 2017 avalanches in Longyearbyen, Safety Science, Volume 134, 2021, 105045, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105045

Vasileva Zh.V., Vasekha M.V., Vatutina M.V.

IDENTIFICATION AND RISK ANALYSIS OF THE MARITIME TRANSPORTATION AND LOGISTICS SYSTEM IN THE ARCTIC

Abstract*. The presented research results are devoted to the issue of risk management of the Arctic marine transport and logistics system (TLS). The functioning of marine transport and logistics systems in the extreme conditions of the Arctic is inextricably linked with multifactorial risks, while there are no studies devoted to a comprehensive risk analysis of the Arctic radar. The purpose of the work was to identify and comprehensively assess the risks of the functioning of Arctic marine radar stations. Expert analysis was used as the main method, in which semi-structured interviews were conducted with specialists working in the field of Arctic maritime transport and logistics. Quantitative risk assessment is performed using a probability and consequence matrix. Based on expert assessments, the key risks of the Arctic maritime transport and logistics system have been objectively identified, quantified and analyzed. The methodological approach proposed in the study and the results obtained can serve to form a scientific and methodological basis for prioritizing risk management measures, from the development of the icebreaker fleet to the modernization of port infrastructure, optimizing resource allocation and substantiating investment decisions.*

Keywords*: marine transport and logistics system (TLS), risks, Arctic, expert assessment, comprehensive risk analysis*

Сведения об авторах:

Васильева Жанна Вячеславовна
ФИЦ Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Россия,
старший научный сотрудник,
канд. техн. наук, доцент,
e-mail: kuchugura@mail.ru

Васёха Михаил Викторович
ФИЦ Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Россия,
ведущ. науч. сотрудник,
докт. техн. наук, доцент,
e-mail: Vasyoha@mail.ru

Ватутина Марина Викторовна
Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия,

магистрант,
e-mail: vasilevazhv@mauniver.ru

Information about the authors:

Vasileva Zhanna Vyacheslavovna
Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
Senior Researcher,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: kuchugura@mail.ru

Vasekha Mikhail Viktorovich
Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
Leading Researcher,
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: Vasyoha@mail.ru

Vatutina Marina Viktorovna
Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia,
postgraduate student,
e-mail: vasilevazhv@mauniver.ru

УДК 629.11

Абакаров А.А., Филиппова Н.А., Игитов Ш.М., Абдуллаев А.Г.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РЕСПУБЛИКЕ ДАГЕСТАН С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. *В регионах России активно разрабатываются и внедряются программы, направленные на цифровую трансформацию различных сфер жизни. В Республике Дагестан особое внимание в рамках такой стратегии уделено модернизации транспортной системы. Планируется оснастить общественный транспорт современными навигационными системами, сделать поездки более комфортными для пассажиров — упростить процесс оплаты проезда и сократить время ожидания транспортных средств.*

Анализ ситуации на дорогах Дагестана выявил тревожную тенденцию: в последние годы в горных районах участились дорожно-транспортные происшествия, причём их последствия становятся всё более серьёзными. Среди причин такого положения дел — рост числа автомобилей, в том числе принадлежащих автотуристам, снижение уровня дисциплины среди водителей, а также недостаточное развитие телематических систем и цифровой инфраструктуры на горных дорогах.

Авторы данной работы предлагают комплекс мер, которые помогут усовершенствовать цифровую инфраструктуру в горных районах Республики Дагестан. Среди предложенных решений — создание региональной системы диспетчерского управления, разработка системы оперативного информирования пассажиров, перевод горных автобусных маршрутов на цифровой формат, а также обновление навигационных карт и голосовых подсказок. Внедрение этих мер позволит существенно повысить безопасность пассажирских перевозок и дорожного движения в горной местности, а также сократить количество дорожно-транспортных происшествий.

Ключевые слова: *Дагестан, общественный транспорт, цифровизация, чрезвычайные ситуации, горные дороги, безопасность движения.*

Постановка задачи

В Республике Дагестан особое внимание уделяется модернизации транспортной отрасли. Цифровая трансформация в области транспорта является одной из важных задач региона.

Актуальность исследований по цифровизации на транспорте обусловлена следующими причинами:

- увеличением числа ДТП в Республике Дагестан в особенности в горных районах, возрастанием их тяжести, одним из факторов которой является увеличение количества пассажирского транспорта, а также потока туристов в республике;

- несвоевременным оказанием медицинской помощи и принятием оперативных решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций в горных условиях

Анализ последних исследований

Вопросы применения цифровых технологий на транспорте получили достаточно широкое освещение в научных публикациях. Между тем, данное направление представляется весьма перспективным для изучения в связи с тем, что в Республике Дагестан необходимо учитывать особенности эксплуатации транспортных средств в горных условиях.

Многие аспекты данной проблемы были затронуты в трудах ряда ученых МАДИ, в частности, профессоров Власова В.М., Жанказиева С.В., Филипповой Н.А., доцента Богумил В.Н. и других. Однако в работах ученых особенности внедрения цифровых технологий для горных условий эксплуатации раскрыты не в полной мере, а методы преодоления сложностей, связанных с эксплуатацией транспорта в горных районах, не получили должного развития.

Цель работы

Целью проведённого исследования является повышение безопасности транспортных процессов в Республике Дагестан, в частности, горных районах, методами внедрения современных цифровых технологий и совершенствования цифровой инфраструктуры, а также разработка как организационных, так и инженерных решений, адаптированных к специфике местного рельефа.

Основная часть

Правительством Республики Дагестан в 2024 году было принято важное решение: подписано распоряжение, которое утверждает концепцию развития общественного транспорта, а также рассматриваются перспективы совершенствования транспортной инфраструктуры республики до 2030 года. [1].

Также стоит отметить, что ещё в 2022 году был утверждён значимый документ, призванный ускорить процессы цифровой трансформации в различных областях жизни республики. Он охватывает такие сферы, как социальный сектор, экономика и государственное регулирование. В нём прописаны важнейшие направления внедрения цифровых решений, выделены флагманы цифровизации и установлены конкретные метрики успеха, призванные усилить эффективность и повысить уровень конкурентоспособности хозяйственной системы региона. Стратегия предусматривает масштабное использование современных технологий и укрепление цифровой инфраструктуры [2]. Реализация подобных масштабных программ требует тщательного экономического обоснования, включая оценку инвестиционной привлекательности мероприятий в сфере безопасности дорожного движения [3].

Но, прежде чем погружаться в анализ потенциальных путей развития транспортной отрасли, необходимо обратить внимание на существующие в ней трудности.

За последнее время частный сектор фактически монополизировал сферу пассажирских автоперевозок: сегодня более 90 % всех перевозок осуществляются предприятиями, находящимися в негосударственной собственности.

В Республике Дагестан функционирует обширная маршрутная сеть, включающая в себя 718 маршрутов регулярных перевозок (см. рисунок 1).

Отмена централизованного подхода при планировании транспортных маршрутов в городских агломерациях, увеличение числа частных транспортных компаний привели к дублированию маршрутов и это, в свою очередь, вызвало несбалансированность пассажиропотоков.



Рисунок 1. Маршрутная сеть Республики Дагестан

Стремление к сокращению государственного регулирования маршрутной сети стало ключевым фактором, который привёл к снижению уровня технического состояния и потере эффективности эксплуатации общественного транспорта большой вместимости.

Трудности в области управления общественным транспортом возникли в связи с тем, что городские пассажирские перевозки рассматривались лишь как способ получения прибыли, а не как составная часть системы жизнеобеспечения города, а также вследствие того, что транспортные компании не получали адекватного возмещения затрат, связанных с выполнением социальной миссии, в частности, уменьшения стоимости проезда для отдельных категорий населения [4].

В современном мире общественный транспорт выступает в качестве ключевого элемента, который обеспечивает свободу передвижения граждан и удовлетворяет их потребности в поездках на работу, по бытовым вопросам и для участия в культурных мероприятиях. Примечательно, что более 80% всех пассажирских перевозок осуществляются именно автомобильным транспортом, что подчёркивает его значимость для социально-экономического прогресса государства.

В настоящее время в городских агломерациях республики функционируют 24 транспортных предприятия, специализирующиеся на пассажирских перевозках. Кроме того, сфера автомобильного транспорта вносит значительный вклад в формирование рабочих мест и обеспечение занятости населения: в Республике Дагестан в этой отрасли работает порядка пяти тысяч человек.

Благодаря разветвлённой сети общественного транспорта удаётся достигать высокого уровня качества и оперативности перевозок.

В связи с этим перспективное развитие данной отрасли следует ориентировать на несколько приоритетных направлений: совершенствование мер безопасности, повышение эффективности транспортных услуг, активное внедрение передовых технологий и дальнейшее укрепление сектора в целом.

За последний год Дагестан существенно продвинулся в вопросе повышения цифровой зрелости. В 2021 году значение данного показателя составляло в целом по отраслям всего 37%, но в области транспорта показатель составлял от 14 до 19 процентов

(см. таблицу 1). В 2022 году этот показатель достиг 58%, а к сентябрю 2025 года уровень цифровой зрелости поднялся выше 80% (см. таблицу 2).

В г. Махачкале, в соответствии с проектом внедрения интеллектуальной транспортной системы в регионе, разработаны технологические решения и комплексные мероприятия, нацеленные на повышение эффективности контроля и управления общественным транспортом, в частности, модуль управления светофорами, модуль координации движения транспорта, системы фотовидеофиксации, блок мониторинга движения транспорта, подсистема контроля местоположения автобуса, блок управления движением транспорта, механизм, обеспечивающий приоритет движения и упрощенное управление маршрутами, интерактивные остановки.

Анализ текущей ситуации в регионе показывает, что стремление к цифровой трансформации транспортной сферы направлено на совершенствование работы городских транспортных систем и повышение комфортности перевозок пассажиров. Тем не менее, как отмечают эксперты, аспекты безопасности перевозок и движения на горных трассах остаются недостаточно разработанными.

В рамках усилий по совершенствованию цифровой трансформации транспортной инфраструктуры в городских агломерациях, в том числе в Республике Дагестан, Министерство транспорта РФ утвердило перечень из шести ключевых проектов. Среди них выделяется инициатива под названием «Зелёный цифровой коридор пассажира», которая призвана не только ускорить процесс транспортировки, но и значительно улучшить качество предоставляемых услуг, сделать их более доступными для граждан и предпринимателей, а также воплотить в жизнь идею беспрепятственных перевозок как внутри страны, так и за её границами.

Запуск данного проекта откроет возможности для:

- разработки наиболее рациональных маршрутов и обеспечения пассажиров современными средствами для планирования и навигации во время поездок;
- повышения уровня защищённости пассажиров во время перевозок;
- внедрения системы безналичной оплаты в автобусах, выполняющих регулярные рейсы;
- увеличения средней скорости перемещения пассажиров посредством городского общественного транспорта;
- минимизации времени, которое пассажиры тратят на ожидание транспортных средств.

В документе, определяющем вектор цифровой трансформации экономики, социальной сферы и государственного управления Республики Дагестан, представлены количественные показатели, отражающие динамику реализации проекта «Зелёный цифровой коридор пассажира» в 2021 и 2025 годах (см. таблицы 1 и 2).

В связи с особенностями рельефа и сложностью горных дорог в Республике Дагестан крайне важно реализовать комплекс мер, которые помогут сделать движение по дорогам более безопасным В числе таких мер перспективным является внедрение коммуникационных технологий типа «транспорт-всё» (V2X), способных повысить ситуационную осведомлённость водителей в сложных дорожных условиях [5, 6, 7]. Вопрос обеспечения безопасности на дорогах Дагестана имеет стратегическое значение и требует взаимодействия различных ведомств.

Приведем данные по статистике ДТП в республике за последние 4 года (таблица 3) [8].

Таблица 1

Результаты внедрения проекта «Зелёный цифровой коридор пассажира» в Республике Дагестан за 2021 год

Города	Количество городских автобусов, оборудованных системами видеонаблюдения в салонах, ед.	Число автобусов, информация о фактическом движении которых по маршрутам доступна в открытом доступе, ед.	Количество транспортных средств, оснащённых оборудованием для безналичной оплаты проезда, ед.	Суммарное число автобусов, задействованных в обслуживании маршрутной сети, ед.
Махачкала	391	268	290	1099
Избербаш	-	3	-	25
Дербент	15	-	-	205
Каспийск	-	-	-	120
Дагестанские Огни	12	-	-	6
Буйнакск	-	-	-	12
Кизилюрт	-	5	-	28
Хасавюрт	-	100	-	222
Кизляр	50	15	10	40
Южно-Сухокумск	-	-	-	0
Межмуниципальные	180	180	180	1498
Всего	648	571	480	3255
Доля показателя	19,91%	17,55%	14,75%	

Анализ статистических данных неумолимо свидетельствует о тревожно высоком уровне дорожно-транспортных происшествий. Существует несколько ключевых факторов, способствующих возникновению аварийных ситуаций:

- постоянный рост количества автомобилей, участвующих как в транзите, так и в местном дорожном движении;
- слабая приверженность водителей к соблюдению правил и норм безопасности на дорогах: управление транспортным средством в состоянии алкогольного опьянения, превышение допустимой скорости, некорректное выполнение манёвров;
- недостаточная просветительская работа с детьми дошкольного и школьного возраста в части обучения правилам дорожного движения, а также недостаточное внимание со стороны родителей и педагогов к вопросам безопасности на дорогах [9, 10].

Кроме того, серьёзную озабоченность вызывает система оказания медицинской помощи пострадавшим в ДТП. Статистика показывает, что уровень смертности в результате дорожных аварий в 18 раз превышает смертность от других видов травм. Люди, пережившие ДТП, в четыре раза чаще получают инвалидность и в шесть раз чаще нуждаются в госпитализации по сравнению с пострадавшими в иных происшествиях. Особенно остро проблема проявляется в труднодоступных районах, например, в горной местности, где требуется существенное улучшение механизмов оперативного прибытия медицинских работников на место аварии и оказания квалифицированной помощи.

Таблица 2

Результаты внедрения проекта «Зелёный цифровой коридор пассажира» в Республике Дагестан на 1.09.2025г.

Города	Количество городских автобусов, оборудованных системами видеонаблюдения в салонах, ед.	Число автобусов, информация о фактическом движении которых по маршрутам доступна в открытом доступе, ед.	Количество транспортных средств, оснащённых оборудованием для безналичной оплаты проезда, ед.	Суммарное число автобусов, задействованных в обслуживании маршрутной сети, ед.
Махачкала	957	912	871	1 099
Избербаш	24	24	23	24
Дербент	179	179	154	179
Каспийск	105	109	100	109
Дагестанские Огни	4	4	4	4
Буйнакск	0	0	0	1 5
Кизилюрт	20	25	32	32
Хасавюрт	143	190	158	190
Кизляр	50	50	50	50
Муниципальные	1482	1493	1392	1702
Межмуници-пальные	989	989	1092	1284
Всего	2471	2482	2484	2986
Доля показателя	82,75°/о	83,12°/о	83,19°/о	

Таблица 3

Динамика изменения количества дорожно-транспортных происшествий и пострадавших в Республике Дагестан

Год	ДТП	Погибло	Ранено
2021	1384	309	1914
2022	1446	329	2042
2023	1667	348	2450
2024	1502	276	2178

Ситуация на дорогах Дагестана достаточно сложная. Не только неопытный водитель, но даже водитель со стажем не всегда может справиться и не растеряться в сложных горных условиях или же с проблемами, которые вызваны погодными условиями [11, 12, 13].

Отдельную трудность составляют дороги в горной местности. Их ширина и качество далеко не такие как у городских дорог. Ситуация усложняется для участников дорожного движения в следующих случаях, представленных на рисунке 2.

В этих случаях ситуация на дороге становится крайне опасной. Большое скопление машин на опасных участках дороги, где положение и так осложнено одним из упомянутых обстоятельств, может обернуться куда большим количеством жертв и приобрести трагический характер [14, 15].

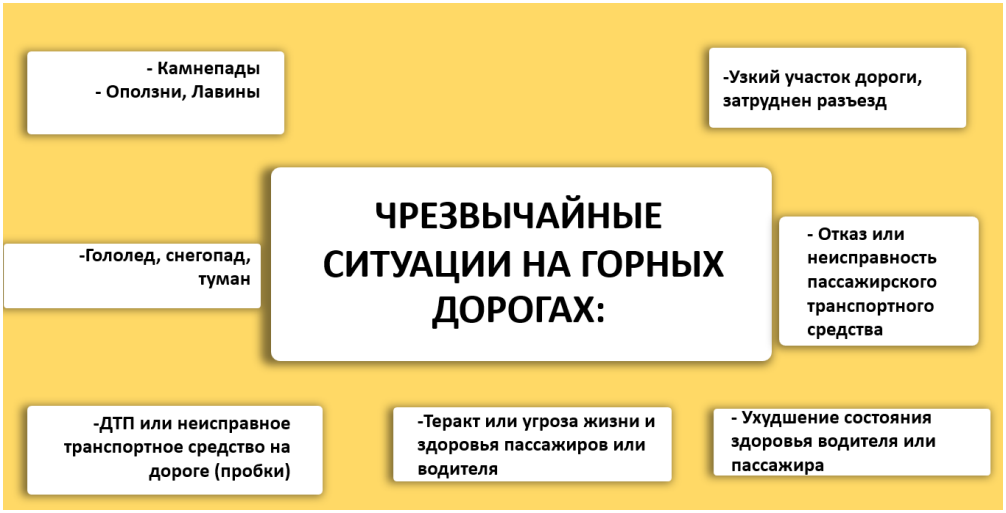


Рисунок 2. Основные возможные чрезвычайные ситуации на дорогах

К тому же обрывы и участки, где есть высокая вероятность возникновения обвала, повышают опасность. На рисунке 3 показаны последствия селевых потоков, возникшие в результате проливных дождей.

В результате обильных осадков 27 сентября 2025 года в Дагестане произошёл сход селевого потока, который привёл к серьёзным последствиям. Как информирует пресс-служба МЧС, из-за стихийного бедствия 19 населённых пунктов региона оказались отрезанными от внешнего мира. Жители Чародинского района лишились возможности передвигаться по суше. Селевые массы, представляющие собой опасную смесь воды и грунта, серьёзно повредили автодорогу Цуриб – Арчиб в районе села Магар. К сожалению, альтернативных путей объезда не предусмотрено.[1].



Рисунок 3. Последствия селевого потока на горных дорогах Дагестана

[1] [Электронный ресурс]: https://dag.aif.ru/incidents/soshedshiy-na-dorogu-sel-otrezal-19-syol-v-charodinskom-rayone-dagestana. Доступ 28.09.2025.

Из-за сильных осадков в Унцукульском районе Дагестана 10 августа 2025 г., сошли селевые потоки и камнепады, перекрыв четыре участка дороги (рисунок 4)[2].



Рисунок 4. Расчистка дорог в Дагестане от селевых наносов и камнепадов

В целях оказания своевременной помощи при возникновении чрезвычайных ситуаций, можно рекомендовать применение специальных транспортных средств, способных передвигаться по бездорожью и труднодоступным горным районам республики. В частности, это - вездеход «Звезда» российского производства (рисунок 5).

Производство инновационных вездеходов под маркой «Звезда» стартовало в городе Кстово, расположенном в Нижегородской области. Эти мощные машины созданы специально для эксплуатации в суровых условиях Арктики и Крайнего Севера, разумеется, применимы для горных условий эксплуатации. Производственные мощности предприятия позволяют выпускать около пятидесяти многоосных вездеходов с колёсными формулами 6×6 и 8×8 ежегодно, при этом существует возможность расширения производства в будущем.

Вершиной модельного ряда стала «Звезда Т24» — пассажирский вездеход-амфибия с колёсной формулой 8×8. Этот внушительный аппарат способен транспортировать до 28 человек одновременно. Его технические характеристики впечатляют: турбодизельный двигатель мощностью 190 лошадиных сил, полный привод, независимая подвеска и шины низкого давления. Благодаря такому оснащению, вездеход с лёгкостью преодолевает непроходимые участки —горные и болотистые местности, снежные заносы, при этом сохраняя способность передвигаться по воде.

Определено несколько направлений использования новой техники в Республике Дагестан. Вездеходы будут играть важную роль в обеспечении межпоселковых перевозок в отдалённых горных районах, использоваться для транспортировки работников МЧС и скорой помощи к труднодоступным объектам, транспортировки пострадавших из зон стихийных бедствий, доставки продуктов питания и медикаментов в районы, изолированные в результате чрезвычайных ситуаций, а также станут частью

[2] [Электронный ресурс]: https://www.stav.kp.ru/daily/27737/5127064/ . Доступ 28.09.2025.

специальных туристических программ, позволяющих путешественникам познакомиться с неповторимыми природными красотами труднодоступных мест Дагестана [16, 17, 18].



Рисунок 5. «Звезда» — пассажирские вездеходы

Выводы

В рамках модернизации транспортной системы региона, на основе проведенных исследований, авторами планируется реализация нескольких ключевых инициатив:

- создание и запуск региональной автоматизированной системы диспетчерского управления, которая позволит объединить диспетчерские центры городских агломераций региона и будет включать в себя навигационный комплекс, установленный на транспортных средствах;
- разработка и внедрение региональной автоматизированной системы информирования пассажиров, которая будет интегрирована с цифровыми платформами в режиме онлайн, реализована на остановочных пунктах и маршрутном транспорте;
- проведение работ по цифровизации автобусных маршрутов в горных локациях и создание их цифровых двойников-моделей. Такие модели дают возможность эффективно управлять транспортными процессами, проводить онлайн-мониторинг перемещения автобусов, оперативно реагировать на возникновение чрезвычайных ситуаций;
- обновление геоинформационных карт, а также внедрение функции голосовых оповещений о потенциальных опасностях и специфических особенностях маршрута;
- формирование парка специализированных транспортных средств — вездеходов, которые будут использоваться для оперативного оказания медицинской и иной помощи в экстремальных ситуациях в труднопроходимой местности.

Дальнейшее развитие цифровых технологий позволит обеспечить безопасность транспортных процессов в Республике Дагестан, в особенности в горных районах, оптимизировать маршруты движения, предоставить пассажирам актуальную информацию о движении транспорта в режиме реального времени и внедрить удобные системы оплаты проезда.

Список литературы:

1. Концепция развития общественного транспорта Республики Дагестан на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Республики Дагестан от 26 июня 2024 г. № 292-р

2. Стратегия в области цифровой трансформации отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления Республики Дагестан. Утверждена распоряжением Правительства Республики Дагестан от 11 октября 2022 г. № 461-р.

3. 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. – EDN BNSVCU.

4. Об утверждении государственной программы Республики Дагестан "Цифровой Дагестан". Правительство Республики Дагестан постановление от 27 апреля 2023 года N 155.

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. Evtukov, S. S. Innovative safety systems for modern vehicles / S. S. Evtukov, E. V. Golov, N. A. Ivanov // T-Comm. – 2019. – Vol. 13, No. 6. – P. 71-76. – DOI 10.24411/2072-8735-2018-10283. – EDN UVIVAU.

7. Development of the Analytical System for Vehicle Operating Conditions Management in the V2I Information Complex Using Simulation Modeling / M. Volodarets, I. Gritsuk, Y. Ukrainskyi [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 5, No. 3-107. – P. 6-16. – DOI 10.15587/1729-4061.2020.215006. – EDN WFLOEE.

8. [Электронный ресурс]: https://xn--80aebkobnwfcnsfk1e0h.xn--p1ai/r/05 (Официальный сайт ГИБДД), (дата обращения – 01.03. 2025 г.)

9. [Электронный ресурс]: https://mintransdag.ru/activity/13426 (Официальный сайт Минтранс РД), (дата обращения – 01.03. 2025 г.)

10. Стратегические приоритеты государственной программы Республики Дагестан «Цифровой Дагестан». Приложение к постановлению Правительства Республики Дагестан от 27 апреля 2023 года N 155.

11. Власов В.М. Применение цифровой инфраструктуры и телематических систем на городском пассажирском транспорте. Учебник / В.М. Власов, Д.Б. Ефименко. В.Н. Богумил. - Москва: ИНФРА- М, 2018. — 352 с.

12. Власов В.М., Байтулаев А.М., Богумил В.Н. Цифровая инфраструктура и телематические системы контроля работ по содержанию автомобильных дорог. Издательство: НИЦ ИНФРА-М, 2021. -229с.

13. Филиппова Н.А. Международная конференция «Логистика и ее преимущества в развитии транспортных сообщений Таджикистана со странами региона». Перспективы развития современных автоматизированных систем управления транспортной мобильностью в горной местности и сложных климатических условиях. 18-19 октября 2022г.

14. Абакаров А.А., Пирмагомедов И.Р., Хабибов К.М. Применение цифровых технологий с целью обеспечения безопасности транспортных процессов в горных условиях Республики Дагестан/ Современное состояние и перспективы инновационного развития науки: сборник статей международной научной конференции (Сургут, Январь 2024). – СПб.: МИПИ им.Ломоносова, 2024.

15. Филиппова Н. А., Власов В. М. Иерархические уровни управления мультимодальной транспортной системой для перевозки грузов северного завоза // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. № 4(59). – С. 99–102. EDN: QYGDNN.

16. Филиппова Н. А., Шутовская Г. А. Анализ мероприя- тий по снижению воздействия автотранспорта на окру- жающую среду // Молодежь в науке: новые аргументы / Сб. научных работ VI Международного молодежного конкурса. – 2017. – С. 172–175. EDN: ZBPFZX.

17. Filippova, N. A., Procedilo, S. B. Analysis of Measures to improve the competitiveness of Russian road haulers in international traffic. Norwegian Journal of development of the International Science, 2017, Vol. 1, Iss. 4, pp. 74–76. [Электронный ресурс]: https://www.calameo.com/read/ 005798408b5a756030dc5. Доступ 17.05.2025.

18. Филиппова Н. А., Суслакова Т. И., Безъязычная Т. А. Анализ современного состояния транспортной инфраструктуры // Автоматизация и управление в технических системах. – 2017. – № 2 (23). – С. 8. EDN:YVNEEY.

References

1. The Concept of Public Transport Development in the Republic of Dagestan for the period up to 2030. (2024). Approved by Order No. 292-r of the Government of the Republic of Dagestan dated June 26, 2024. (In Russ.)

2. The Strategy for Digital Transformation of Economic Sectors, Social Sphere, and Public Administration in the Republic of Dagestan. (2022). Approved by Order No. 461-r of the Government of the Republic of Dagestan dated October 11, 2022. (In Russ.)

3. Klyavin, V. E., Englezi, I. P., & Volodarets, N. V. (2023). Otsenka investitsionnoy privlekatel'nosti realizatsii meropriyatiy po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Assessment of the Investment Attractiveness of Road Safety Measures Implementation]. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*, (4), 7–15. EDN BNSVCU. (In Russ.)

4. On Approval of the State Program "Digital Dagestan" of the Republic of Dagestan. (2023). Government of the Republic of Dagestan Resolution No. 155 dated April 27, 2023. (In Russ.)

5. Tkachev, S. A., & 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 for Improving Road Safety]. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*, (4), 35–39. EDN BDDOYQ. (In Russ.)

6. Evtukov, S. S., Golov, E. V., & Ivanov, N. A. (2019). Innovative safety systems for modern vehicles. *T-Comm*, 13(6), 71–76. https://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10283. EDN UVIVAU.

7. Volodarets, M., Gritsuk, I., Ukrainskyi, Y., Shein, V., et al. (2020). Development of the Analytical System for Vehicle Operating Conditions Management in the V2I Information Complex Using Simulation Modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3-107), 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215006. EDN WFLOEE.

8. [Electronic resource]: Official website of the traffic police. (n.d.). Retrieved March 1, 2025, from https://xn--80aebkobnwfcnsfk1e0h.xn--p1ai/r/05 (In Russ.)

9. [Electronic resource]: Official website of the Ministry of Transport of the Republic of Dagestan. (n.d.). Retrieved March 1, 2025, from https://mintransdag.ru/activity/13426 (In Russ.)

10. Strategicheskie prioritety gosudarstvennoy programmy Respubliki Dagestan «Tsifrovoy Dagestan» [Strategic priorities of the state program of the Republic of Dagestan "Digital Dagestan"]. (2023). Appendix to the resolution of the Government of the Republic of Dagestan dated April 27, 2023 N 155. (In Russ.)

11. Vlasov, V. M., Efimenko, D. B., & Bogumil, V. N. (2018). *Primenenie tsifrovoy infrastruktury i telematicheskikh sistem na gorodskom passazhirskom transporte* [Application of digital infrastructure and telematic systems on urban passenger transport]. Moscow: INFRA-M. (In Russ.)

12. Vlasov, V. M., Baitulaev, A. M., & Bogumil, V. N. (2021). *Tsifrovaya infrastruktura i telematicheskie sistemy kontrolya rabot po soderzhaniyu avtomobil'nykh dorog* [Digital

infrastructure and telematic systems for monitoring road maintenance]. Moscow: NITs INFRA-M. (In Russ.)

13. Filippova, N. A. (2022, October 18-19). *Perspektivy razvitiya sovremennykh avtomatizirovannykh sistem upravleniya transportnoy mobil'nost'yu v gornoy mestnosti i slozhnykh klimaticheskikh usloviyakh* [Prospects for the Development of Modern Automated Transport Mobility Management Systems in Mountainous Areas and Difficult Climatic Conditions]. Paper presented at the Mezhdunarodnaya konferentsiya «Logistika i ee preimushchestva v razvitii transportnykh soobshcheniy Tadzhikistana so stranami regiona» [International Conference "Logistics and its Benefits in the Development of Transport Communications between Tajikistan and the Countries of the Region"]. (In Russ.)

14. Abakarov, A. A., Pirmagomedov, I. R., & Khabibov, K. M. (2024). Primenenie tsifrovykh tekhnologiy s tselyu obespecheniya bezopasnosti transportnykh protsessov v gornykh usloviyakh Respubliki Dagestan [Application of digital technologies in order to ensure the safety of transport processes in the mountainous conditions of the Republic of Dagestan]. In *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovatsionnogo razvitiya nauki: sbornik statey mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* (Surgut, Yanvar' 2024) [Current state and prospects of innovative development of science: collection of articles of the international scientific conference (Surgut, January 2024)] (pp. ?-?). St. Petersburg: MIPI im.Lomonosova. (In Russ.)

15. Filippova, N. A., & Vlasov, V. M. (2019). Ierarkhicheskie urovni upravleniya mul'timodal'noy transportnoy sistemoy dlya perevozki gruzov severnogo zavoza [Hierarchical levels of management of a multimodal transport system for the transportation of goods of the northern delivery]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)], 4(59), 99–102. EDN QYGDNN. (In Russ.)

16. Filippova, N. A., & Shutovskaya, G. A. (2017). Analiz meropriyatiy po snizheniyu vozdeystviya avtotransporta na okruzhayushchuyu sredu [Analysis of Measures to Reduce the Environmental Impact of Motor Vehicles]. *Molodezh' v nauke: novye argumenty: Sbornik nauchnykh rabot VI Mezhdunarodnogo molodezhnogo konkursa* [Youth in Science: New Arguments: Collection of Scientific Papers of the VI International Youth Competition], 172–175. EDN ZBPFZX. (In Russ.)

17. Filippova, N. A., & Procedilo, S. B. (2017). Analysis of Measures to improve the competitiveness of Russian road haulers in international traffic. *Norwegian Journal of development of the International Science*, 1(4), 74–76. Retrieved May 17, 2025, from https://www.calameo.com/read/005798408b5a756030dc5.

18. Filippova, N. A., Suslakova, T. I., & Bezyazychnaya, T. A. (2017). Analiz sovremennogo sostoyaniya transportnoy infrastruktury [Analysis of the current state of transport infrastructure]. *Avtomatizatsiya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh* [Automation and Control in Technical Systems], (2), 8. EDN YVNEEY. (In Russ.)

Abakarova A.A., Filippova N.A., Igitov Sh.M., Abdullaev A.G.

APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE REPUBLIC OF DAGESTAN TO ENSURE THE SAFETY OF TRANSPORT PROCESSES

Abstract. In the regions of Russia, programs are being actively developed and implemented to digitalize various areas of life. In the Republic of Dagestan, special attention is being paid to the modernization of the transport system as part of this strategy. It is planned to equip public transport with modern navigation systems, making trips more comfortable for passengers by simplifying the process of paying for transportation and reducing waiting times

for vehicles. An analysis of the situation on the roads of Dagestan has revealed an alarming trend: in recent years, road accidents have become more frequent in the mountainous regions, and their consequences have become increasingly serious. Among the reasons for this state of affairs are the growing number of cars, including those owned by motor tourists, the declining level of discipline among drivers, and the insufficient development of telematics systems and digital infrastructure on mountain roads. The authors of this work propose a set of measures to improve the digital infrastructure in the mountainous regions of the Republic of Dagestan. These include the creation of a regional dispatch management system, the development of an operational passenger information system, the digitalization of mountain bus routes, and the updating of navigation maps and voice prompts. The implementation of these measures will significantly improve the safety of passenger transportation and traffic in mountainous areas, as well as reduce the number of traffic accidents.

Keywords: Dagestan, public transport, digitalization, emergencies, mountain roads, traffic safety.

Сведения об авторах:

Абакаров Абакар Адамкадиевич
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» Прикаспийский межрегиональный институт (филиал), г. Махачкала, Россия,
к.т.н., доцент,
e-mail: abakarmadi@list.ru

Филиппова Надежда Анатольевна
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» г. Москва, Россия,
д.т.н., профессор,
e-mail: umen@bk.ru

Игитов Шамиль Магомедович
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» Прикаспийский межрегиональный институт (филиал), г. Махачкала, Россия,
к.т.н., доцент,
e-mail: shamiligitov@yandex.ru

Абдуллаев Абдулла Гаджибекович
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» Прикаспийский межрегиональный институт (филиал), г. Махачкала, Россия,
студент,
e-mail: A89644447066@mail.ru

Information about the authors:

Abakarov Abakar Adamkadievich
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Caspian Interregional Institute (branch), Makhachkala, Russia,
PhD, Associate Professor,

e-mail: abakarmadi@list.ru

Filippova Nadezhda Anatolyevna
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: umen@bk.ru

Igitov Shamil Magomedovich
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Caspian Interregional Institute (branch), Makhachkala, Russia,
PhD, Associate Professor,
e-mail: shamiligitov@yandex.ru

Abdullaev Abdulla Gadzhibekovich
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Caspian Interregional Institute (branch), Makhachkala, Russia,
student,
e-mail: A89644447066@mail.ru

УДК 629.3.06:656.13

Трофименко Ю.В., Рунец Р.С., Буриков Е.И.

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ С ИНФРАСТРУКТУРОЙ V2X

Аннотация. *Представлена концепция интеллектуального управления движением с использованием высокоавтоматизированных транспортных средств (BATC, SAE L3–L4) на основе интеграции с инфраструктурой V2X и унифицированной обработки данных, поступающих от мобильных (бортовых) и стационарных сенсоров. Теоретическую основу составляют обобщённые определения Эди (инвариантные к способу измерения) и кинематическая модель Лайтхилла—Уитхема—Ричардса (LWR) для описания макродинамики потока с ударными волнами. Концепция увязывает сервисы C-ITS/ETSI (DENM/CAM/CPS) и инфраструктурные Facilities-службы с профилями безопасности ITS PKI, механизмы контроля качества (QC) и валидацию с дорожными метеостанциями (RWIS/ESS), постами качества воздуха (FRM/FEM) и акустическими сетями (ISO/CNOSSOS-EU). Представлены: методы реконструкции характеристик транспортных потоков (v, q, k, w) из траекторных данных BATC; онборд-оценки видимости (MOR), состояния покрытия и коэффициента сцепления колес с дорогой μ; интеграция оценок экологических показателей загрязнения атмосферного воздуха (EMEP/EEA; ISO 1996-1, END/CNOSSOS-EU). Предложены архитектура обмена данными, алгоритм доверенной агрегации и контур принятия решений ADS на события DENM Release 2 с учётом ODD. Концепция опирается на спецификации ETSI Release 1/2 и подтверждается практикой реализации пилотных проектов C-Roads и WYDOT CV Pilot.*

Ключевые слова: *высокоавтоматизированные транспортные средства, дорожная инфраструктура, интеллектуальное управление движением, двухсторонняя интеграция, единая архитектура данных.*

Введение

Переход от «автоматизированного» к «кооперативному» вождению требует, чтобы информация о дорожной обстановке поступала в BATC не только из бортовых сенсоров, но и от инфраструктуры по каналам V2X — в стандартизованном виде, с атрибутами качества и криптографической защитой. Так реализуется кооперативное вождение (CDA) в терминологии SAE J3216 и согласуется уровень автоматизации SAE J3016 (ODD-ориентированный дизайн) с требованиями безопасности ADS. [1–3]

Сетевой каркас интеграции задают ETSI EN 302 665 (архитектура ITS-станции) и стек EN 302 636 (GeoNetworking/BTP); предупреждения о погодных/дорожных опасностях — сервис DENM (EN 302 637-3 для Release 1 и TS 103 831 для Release 2);

общие словари Facilities — TS 102 894-2; инфраструктурные Facilities-службы — TS 103 301; безопасность — TS 103 097 (ITS PKI). [4–11]

Параллельно дорожная измерительная инфраструктура (RWIS/ESS; посты оценки концентраций загрязняющих веществ и уровня шума в зоне влияния автомобильной дороги) обеспечивает трассируемые ряды и правовой статус наблюдений: WMO-No. 8 регламентирует методы измерений метрологических показателей, NTCIP 1204 стандартизует интерфейсы ESS, 40 CFR Part 53 — процедуры FRM/FEM для оценки загрязнения воздуха, ISO 1996-1 и Директива 2002/49/EC/2015/996 — акустические индикаторы и методы картирования. [12–17]

Дальнейшее развитие видится в переходе от «точечного» обмена к двухсторонней (bi-directional) интеграции: инфраструктура валидирует события и калибрует онборд-оценки, а ВАТС обогащают картину среды высокоплотной мобильной телеметрией.

Основная часть

Характеристики транспортных потоков: определения Эди и модель LWR

В прямоугольной области A на диаграмме «пространство–время» (x, t) обобщённые определения Эди задают инвариантные к способу измерения интенсивность q, плотность kи скорость v:

$$q = \frac{\sum_i X_i(A)}{|A|}, k = \frac{\sum_i T_i(A)}{|A|}, v = \frac{q}{k}.$$

Это обеспечивает корректное тождество $q = kv$и согласование временно- и пространственно-средних. [18,19]

Классическая модель LWR формулирует уравнение сохранения $\partial_t k + \partial_x q = 0, q = Q(k)$; скорость фронта (ударной волны) между состояниями (q_1, k_1), (q_2, k_2)равна $w = (q_2 - q_1)/(k_2 - k_1)$. Модель применяется для диагностики перегрузок, capacity-drop и проектирования управляющих воздействий. [20–19]

Коммуникационные и прикладные стандарты C-ITS/ETSI

Референсная архитектура ITS-станции и нижние уровни: EN 302 665; сеть и транспорт: EN 302 636-4-1 (GeoNetworking) и EN 302 636-5-1 (BTP). Сервис предупреждений: EN 302 637-3 (DENM, Release 1) и TS 103 831 (DENM, Release 2); общий дата-словарь Facilities: TS 102 894-2; инфраструктурные Facilities-службы (триггер/обновление/терминация сообщений): TS 103 301; безопасность и сертификаты: TS 103 097; эволюция Release 2 и Day-2 сервисов: TS 103 696; коллективное восприятие (CPS): TS 103 324. [4–11,22–23]

Дорожная метеорология, загрязнение воздуха и уровень шума транспортных потоков: нормативы и сети

Методы измерения видимости (MOR), осадков, температуры и влажности покрытия регламентированы WMO-No. 8; интерфейсы и словари ESS — NTCIP 1204 v04; регуляторная база оценки качества атмосферного воздуха опирается на 40 CFR Part 53 (FRM/FEM); уровни акустического излучения L_Aeq, L_{den}, L_{night} и стратегическое картирование определены ISO 1996-1 и Директивой 2002/49/EC с методологией CNOSSOS-EU (2015/996). [12–17]

Моделирование уровня загрязнения атмосферного воздуха транспортными потоками, он-роуд верификация

Для оценки выбросов загрязняющих веществ применяется методики MOVES (EPA) или EMEP/EEA (программа COPERT). Он-роуд верификация осуществляется в результате измерений выбросов АТС в транспортном потоке (PEMS) по EU RDE и методическим материалам JRC. [24–27]

Концепция построения системы интеграции информационного обмена ВАТС–инфраструктура V2X

Схема архитектуры и профилей сервисов двухсторонней интеграции

Схема архитектуры и профилей сервисов системы интеграции информационного обмена ВАТС–инфраструктура V2X приведена на рисунке 1.

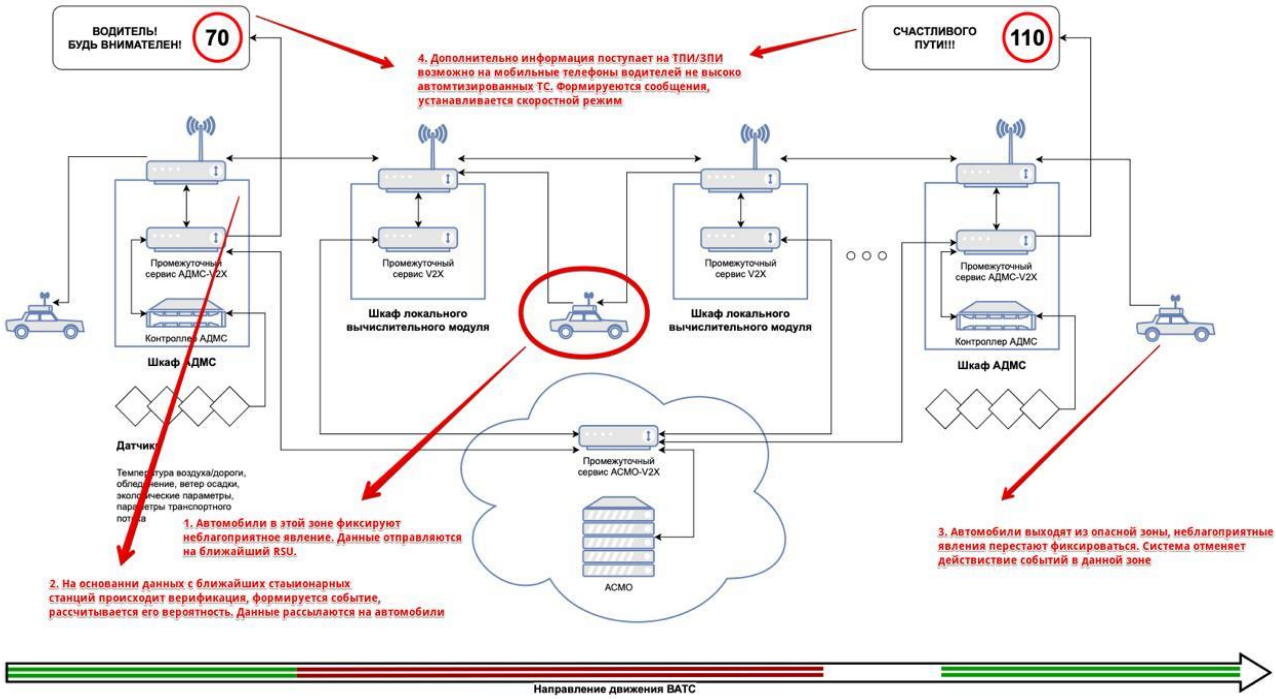


Рисунок 1. Схема архитектуры и профилей сервисов системы двухсторонней интеграции ВАТС–инфраструктура V2X

Алгоритм информационного взаимодействия ВАТС и инфраструктуры предусматривает выполнение следующих шагов:

1 – Один или несколько ВАТС, находящихся в зоне действия системы ВАТС-инфраструктура V2X, фиксируют неблагоприятное явление на контрольном участке. Данные отправляются на ближайшую стационарную станцию (RSU).

2 - На основании данных с ближайших стационарных станций осуществляется верификация, формируется событие, рассчитывается её вероятность.

3 – Для ВАТС, покидающих контрольный участок, неблагоприятные явления перестают фиксироваться. Система отменяет действия событий, происходящих на контрольном участке.

4 - Информация о неблагоприятном событии рассылается на автомобили, находящиеся на подъезде к контрольному участку дороги и отражается на табло

переменной информации (ТПИ/ЗПИ) на въезде-выезде с участка. Дополнительная информация также может поступать на мобильные телефоны водителей не высокоавтоматизированных АТС, движущихся в транспортном потоке на подъезде к контрольному участку.

Архитектура сервисов, реализующих указанный алгоритм, включает следующие ключевые компоненты:

A. Автомобиль (VbRWIS Unit) — источник первичных данных;

B. Локальный сервис V2X (Edge) — агрегация и предварительная фильтрация;

C. Опорная станция RWIS — валидация и калибровка;

D. Облачный сервис RWIS-V2X — оценка достоверности, фьюжн данных, связь с TMC;

E. Интерфейсы вывода (VMS, API, TMC Dashboard) — распространение уведомлений.

Передача данных между узлами осуществляется в соответствии с ETSI TS 103 831 (IF.DEN.1, IF.DEN.2) и NTCIP 1204. [7,9,11,22]

Двусторонняя валидация и федеративный QC

Процедуры доверенной агрегации и «сквозной» валидации: RWIS/ESS верифицируют нисходящие потоковые события (например, IceOnRoad), а BATC уточняют свои оценки MOR/μ по эталонным узлам; события публикуются как DENM с уровнем достоверности и временем жизни, а их завершение — Termination/Negation.

Безопасность и доверие

Подпись сообщений и управление сертификатами осуществляются по ETSI TS 103 097 (ITS PKI). Для денотации событий используется выпуск Release 2 (TS 103 831) с обратной совместимостью на приём Release 1 содержимого (EN 302 637-3). [7–8] (ETSI)

Методы оценивания характеристик транспортных потоков, дорожно-метеорологических, экологических показателей по сенсорам, находящимся на борту BATC

Характеристики транспортных потоков

Пополосная реконструкция. Относительные измерения лидаров/радаров/камер BATC позволяют восстанавливать траектории движения соседних транспортных средств и события пересечений линий разметки; из распределения headway/spacing оцениваются характеристики транспортных потоков (q, k, v) в терминах Эди, а по состояниям «до/после» «узкого» места — скорость волны (w). [18–21]

Floating Car Method / FCD. Классический FCM (времена проезда, встречи/обгоны) и современные FCD/зондовые данные включаются в единую схему оценивания для построения фундаментальной диаграммы (Q(k)) и диагностики capacity-drop. [19]

Дорожно-метеорологические показатели

Видимость и осадки. Видимость (MOR) оценивается бортовым датчиком рассеяния света, а также по затуханию сигнала лидара и сенсору микродопплеровского излучения; классификация осадков — по видео/радару. Калибровка результатов замеров осуществляется по методике WMO-No. 8, а привязка к ESS по (NTCIP 1204). [12–13]

Состояние покрытия и сцепление колес с дорогой. ИК-пирометр полотна и сигналы ABS/ESC дают оценку μ; верификация осуществляется по данным станций RWIS,

публикация событий — DENM (RoadSurfaceCondition) с геофильтрацией и TTL. [7,12–13]

Экологические показатели

Загрязнение атмосферного воздуха. Мобильные датчики концентраций загрязняющих веществ используются для высокоплотного картографирования; регуляторная привязка — через FRM/FEM (40 CFR Part 53); моделирование выбросов осуществляется с использованием методики EMEP/EEA (программа COPERT) [14,24–25], методики расчета максимальных разовых концентраций от выбросов одиночного точечного источника. [28]

Уровень шума. Измерения уровня транспортного шума (L_{Aeq}) осуществляются встроенными сенсорами с последующей агрегацией в (L_{den}), (L_{night}); стратегическое картирование осуществляется в соответствии с ISO 1996-1 и CNOSSOS-EU (2015/996). [15–17]

Контур управления BATC на основе событий V2X

Получив сообщение, ADS BATC проверяет подпись и актуальность DENM, выполняет кросс-проверку с бортовыми сенсорами и интегрирует событие в планировщик траектории:

- корректирует целевую скорость и дистанцию;
- выбирает стратегию торможения;
- активирует предупреждение водителю (*"Обледенение впереди, снижение скорости до 80 км/ч"*). При получении *Termination DENM* система возвращается в нормальный режим.

Взаимодействие с инфраструктурой оповещения

Данные верифицированных событий передаются также на *табло переменной информации (VMS)* и в *системы адаптивного управления движением*:

- вывод предупреждений «Внимание, гололёд»,
- автоматическое снижение скоростных ограничений (VSL),
- управление противообледенительными системами мостов.

Таким образом, информация становится доступной не только для BATC, но и для обычных водителей.

Появление Day-2 сервиса CPS (TS 103 324) позволяет учитывать инфраструктурное восприятие (объекты RSU) в локальном контуре принятия решений ADS. [11,1–3]

Примеры информационного взаимодействия BATC и инфраструктуры

Пример 1 — неблагоприятное событие - обледенение дорожного покрытия

Исходные условия:

- Станция RWIS установлена на мосту (рис. 2);
- Температура покрытия = –0,4 °C, влажность = 90 %;
- Автомобиль движется со скоростью 110 км/ч, расстояние до моста — 2 км.

Ход событий:

1. RWIS фиксирует условия, формирует *IceOnRoad*, достоверность 0,9.
2. DEN Basic Service создаёт сообщение и рассылает его по GeoBroadcast.
3. Через 1,5 секунды сообщение получает BATC.
4. Автопилот снижает целевую скорость до 80 км/ч, активирует антиблокировочную стратегию и отображает предупреждение на HMI.
5. После 10 минут температура повышается до +1 °C. RWIS отправляет *Termination*.

6. ВАТС восстанавливает исходный режим движения.

Характеристики процесса:

- Общая задержка T_total = 2,0 с;
- Вероятность приёма P_recv = 0,97;
- Результат - успешное предотвращение потенциального заноса.



Рисунок 2. Пример 1 информационного взаимодействия ВАТС и инфраструктуры (неблагоприятное событие - обледенение дорожного покрытия)

Пример 2 — неблагоприятное событие - резкое ухудшение видимости (туман)

1. Станция фиксирует снижение видимости ниже 150 м, осадки — снег.
2. Генерируется событие *LowVisibility* с зоной действия 3 км.
3. Автомобиль в потоке получает сообщение через RSU, включается режим ограничения скорости и увеличенного интервала между машинами.
4. Событие повторяется каждые 5 секунд (Repetition).
5. При улучшении видимости выше 300 м станция отправляет *Termination*.

Эффект — повышение безопасности на участке дороги, снижение средней скорости без нарушения плавности трафика.

Пример 3 — неблагоприятное событие - превышение уровня загрязнения атмосферного воздуха

1. Станция фиксирует рост концентрации дисперсных частиц $PM_{2.5}$ выше 100 $\mu g/m^3$ на селитебной территории в зоне влияния участка улично-дорожной сети
2. Создаётся событие *PollutionAlert* с радиусом 1 км.
3. Автомобили на участках УДС, въезжающие на территорию с повышенной концентрацией дисперсных частиц, получают сообщение и отображают предупреждение «Плохое качество воздуха».

4. Для электромобилей система может рекомендовать переход в режим рекуперации (минимизация выбросов $PM_{2.5}$ за счет износа тормозных колодок); автомобилей с ДВС – изменение скоростного режима, запрет (введение платы) на проезд АТС низких экологических классов.

5. После снижения концентрации $PM_{2.5}$ станция передаёт информацию на табло переменной информации на территории и участках УДС.

Этот пример демонстрирует потенциал RWIS для экологического информирования и адаптивного управления транспортным потоком.

Требования к временным характеристикам обмена информацией

Согласно ETSI TR 102 638 и ETSI EN 302 637-3 [20], для событий, связанных с безопасностью движения, должны выполняться ограничения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Значения времени обмена информацией для разных событий в системе двухсторонней интеграции ВАТС–инфраструктура V2X

Показатель	Обозначение	Максимально допустимое значение	Источник
Время реакции от детектора до приёма ВАТС	TE2ET_{E2E}TE2E	≤ 3 с	ETSI EN 302 637-3
Интервал повторов	TrepT_{rep}Trep	1–5 с	ETSI EN 302 637-3
Срок актуальности события	TvalidT_{valid}Tvalid	10–30 мин	ETSI EN 302 637-3
Вероятность приёма пакета	PsuccP_{succ}Psucc	≥ 0.95	ETSI EN 302 665
Точность координат центра события	Δgeo\Delta_{geo}Δgeo	≤ 25 м	ETSI EN 302 931

Указанные в таблице 1 значения времени обмена информацией для разных событий обеспечивают своевременность оповещения и согласованность действий между инфраструктурой и ВАТС.

Реализация и эмпирические свидетельства

За рубежом разработаны пилотные проекты информационного взаимодействия ВАТС с инфраструктурой V2X, обеспечивающие реализацию принципов «кооперативного» вождения ВАТС и адаптивного управления транспортными потоками.

Так, пилотный проект C-Roads демонстрирует операционную систему C-ITS (межсайтовая интероперабельность, профили сообщений, процессы эксплуатации), включая переход к Release 2/Day-2 сервисам; ежегодные обзоры пилотов фиксируют развёртывание и эксплуатационные показатели. [29–30]

Разработанный в США пилотный проект WYDOT CV Pilot на I-80 показал работоспособность связки RWIS–CV для погодных предупреждений, интеграцию DSRC-приложений и оценку влияний по набору KPI в финальной оценке (Phase 3). [31–32].

Эти примеры подтверждают жизнеспособность предлагаемой архитектуры интеграции и её масштабируемость. [19–20]

Контроль качества и доверенная агрегация

Предлагается агрегировать вероятности событий по взвешенной схеме (P(E)=w_1 P_{veh}+w_2 P_{RWIS}+w_3 P_{cloud}), где веса зависят от плотности наблюдений, расстояния и согласованности показаний; статус события поддерживается циклами New→Update→Termination/Negation. Механизм реализует triangulation данных и «сквозной» QC с учётом Release 2 атрибутов качества в DENM и словаря TS 102 894-2. [7,10]

Кибербезопасность и доверие

Каждое сообщение подписывается по профилю TS 103 097; доверительная инфраструктура (ITS PKI) обеспечивает аутентичность источника и управление отзывом сертификатов. Release 2 (TS 103 831) обеспечивает расширяемость контейнеров (в т. ч. Pre-Crash) при обратной совместимости. [7–8]

Заключение

Разработанная концепция интеллектуального управления дорожным движением с использованием высокоавтоматизированных транспортных средств при их интеграции с инфраструктурой V2X показывает, что беспилотный автомобиль может служить универсальным мобильным сенсором характеристик транспортных потоков на дорожной и улично-дорожной сети, метеоданных и экологических показателей.

Сформулирован информационный каркас системы взаимодействия ВАТС и инфраструктуры V2X, который: формально связывает измеряемые AV параметры с макромоделями транспортных потоков; описывает совместные алгоритмы достоверного мониторинга характеристик транспортных потоков, метеоданных и загрязнения атмосферного воздуха; задаёт процедуры платформенной интеграции со стационарными сетями и валидации данных.

Методический подход включает: единый аппарат усреднений по Эди для всех источников; включение классического метода «плавающего автомобиля» и современных Floating Car Data (FCD) в общую процедуру оценивания; схемы «онборд» оценки видимости, состояния покрытия и сцепления; протоколы экологического (эмиссионного и акустического) оценивания; стандартизируемую архитектуру данных и контроля качества.

Это создаёт основу для интеллектуального управления движением одиночных ВАТС, «облака» ВАТС, адаптивного управления движением транспортных потоков и технологиями зимнего содержания дорожный объектов на единой стандартизируемой архитектуре данных.

По нашему мнению, основными преимуществами разработанной концепции информационного взаимодействия ВАТС с инфраструктурой V2X являются:

- существенное повышение пространственного разрешения наблюдений (каждая машина — сенсор);
- возможность быстрой реакции на локальные опасности;
- снижение затрат на установку и обслуживание стационарных станций;
- автоматическая взаимная калибровка и повышение точности управляющих воздействий;
- поддержка международных стандартов V2X и ETSI DENM Release 2.

В долгосрочной перспективе концепция VbRWIS может стать основой для:

- построения динамических карт метеоопасностей в реальном времени;
- прогнозирования скользкости и видимости с использованием ИИ;
- интеграции с цифровыми двойниками транспортной сети;
- объединения с системами Smart City и энергетическими сетями (например, управление обогревом мостов).

Имеющиеся проблемы реализации предложенной концепции связаны с погодной чувствительностью сенсорного стека AV, необходимостью обеспечения репрезентативности (стратификация/взвешивание), требовательностью к калибровке «эко/метео»-модулей и правовыми рамками приватности.

Перспективными направлениями совершенствования предложенной концепции, по нашему мнению, являются:

онлайновая идентификация $Q(k)$и прогноз ударных волн;

объединение AV-измерений с инфраструктурным восприятием (стац. LiDAR/видео высокого класса);

моделирование выбросов в реальном времени с учётом характеристик транспортных потоков;

интеграция с цифровыми двойниками объектов и систем [11,17,29] в рамках реализации концепции «Умный город», реализации технологий виртуальной и дополненной реальности при проектировании, строительстве, эксплуатации, ремонте участков и сетей транспортной инфраструктуры.

Обозначения и сокращения (номенклатура)

- q— интенсивность транспортного потока (авт/с, авт/ч);
- k— плотность потока (авт/км);
- v_t, v_s— временная и пространственная средние скорости движения;
- w— фазовая скорость ударной волны;
- A— область на диаграмме (x, t);
- $X_i(A), T_i(A)$— путь и время i-го ТС в A;
- MOR — *meteorological optical range* (метеорологическая дальность видимости);
- ESS/RWIS — дорожные метеостанции;
- FCM/FCD — метод «плавающего автомобиля» / данные «плавающих автомобилей»;
- AQM — стационарные сети качества атмосферного воздуха;
- PEMS — переносные газоанализаторы для он-роуд испытаний;
- ODD — область допустимой эксплуатации (операционные условия AV);
- MRC — минимально-рисковое состояние.

Список литературы

1. NHTSA (2017). Automated Driving Systems: A Vision for Safety 2.0. (NHTSA).
2. SAE J3016 (2021). Taxonomy and Definitions for Driving Automation (ODD и уровни). (UNECE Wiki).
3. SAE J3216 (2020). Taxonomy and Definitions for Cooperative Driving Automation. (UNECE Wiki).
4. ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010). ITS — Communications Architecture. (ETSI).

5. ETSI EN 302 636-4-1 V1.4.1 (2020). GeoNetworking — Media-independent functionality. (Iteh Standards).

6. ETSI EN 302 636-5-1 V2.2.1 (2019). Basic Transport Protocol (BTP). (Iteh Standards).

7. ETSI EN 302 637-3 V1.3.1 (2019) / ETSI TS 103 831 V2.2.1 (2024). Decentralized Environmental Notification (DENM) — Release 1/2. (Iteh Standards).

8. ETSI TS 103 097 V2.1.1 (2021). Security Header and Certificate Formats for ITS. (ETSI).

9. ETSI TS 103 301 V2.2.1 (2024). Facilities Layer Infrastructure Services. (ETSI).

10. ETSI TS 102 894-2 V2.3.1 (2024). Applications & Facilities Common Data Dictionary. (ETSI)

11. ETSI TS 103 324 V2.1.1 (2023). Collective Perception Service (CPS). (ETSI)

12. WMO-No. 8 (2021–2025). *Guide to Instruments and Methods of Observation*. (library.wmo.int).

13. NTCIP 1204 v04.26b (2021/2022). Environmental Sensor Station (ESS). (NTCIP).

14. 40 CFR Part 53. Ambient Air Monitoring Reference and Equivalent Methods. (ECFR).

15. ISO 1996-1:2016. Acoustics — Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise. (ISO).

16. Directive 2002/49/EC. Assessment and Management of Environmental Noise. (EUR-Lex).

17. Commission Directive (EU) 2015/996. CNOSSOS-EU Common Noise Assessment Methods. (EUR-Lex).

18. Edie L. C. Discussion of Traffic Stream Measurements and Definitions // *Proc. 2nd Int. Symp. on the Theory of Traffic Flow*, 1963. (доступные реплики) (pdfcoffee.com).

19. Treiber M., Kesting A. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer, 2013. (SpringerLink).

20. Lighthill M. J., Whitham G. B. On Kinematic Waves II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads // *Proc. Royal Society A*, 1955. (Royal Society Publishing).

21. Richards P. I. Shock Waves on the Highway // *Operations Research*, 1956. (INFORMS Pubs Online).

22. ETSI TS 102 636-4-2 V1.4.1. GeoNetworking over ITS-G5 Access. (ETSI).

23. ETSI TS 103 696 V2.1.1 (2021). ITS Release 2 Background. (ETSI).

24. EPA (2021). *Overview of MOVES3 (EPA-420-R-21-004)*. (EPA).

25. EEA (2023–2024). *EMEP/EEA Guidebook — 1.A.3.b Road transport (incl. tyre/brake wear)*. (copert.emisia.com).

26. JRC (2017). *PEMS Guidance Note for LDV (EU-RDE)*. (JRC Publications).

27. Commission Regulation (EU) 2016/427. RDE test procedures / PEMS. (Legislation.gov.uk).

28. Приказ Минприроды России "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе" от 06.06.2017 N 273 (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 N 47734)..

29. C-Roads (2022). *Ecosystem for fully operational C-ITS service delivery*. (C-Roads).

30. C-Roads (2022). *Annual Pilot Overview Report 2021*. (C-Roads).

31. USDOT / WYDOT (2022). *Final System Performance Measurement and Evaluation — WYDOT CV Pilot*. (ROSA P).

32. FHWA (2020). *Road Weather Management Program — Wyoming Case Study*. (FHWA Operations).

References

1. NHTSA (2017). Automated Driving Systems: A Vision for Safety 2.0. (NHTSA).

2. SAE J3016 (2021). Taxonomy and Definitions for Driving Automation (ODD and levels). (UNECE Wiki).

3. SAE J3216 (2020). Taxonomy and Definitions for Cooperative Driving Automation. (UNECE Wiki).

4. ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010). ITS — Communications Architecture. (ETSI).

5. ETSI EN 302 636-4-1 V1.4.1 (2020). GeoNetworking — Media-independent functionality. (Iteh Standards).

6. ETSI EN 302 636-5-1 V2.2.1 (2019). Basic Transport Protocol (BTP). (Iteh Standards).

7. ETSI EN 302 637-3 V1.3.1 (2019) / ETSI TS 103 831 V2.2.1 (2024). Decentralized Environmental Notification (DENM) — Release 1/2. (Iteh Standards).

8. ETSI TS 103 097 V2.1.1 (2021). Security Header and Certificate Formats for ITS. (ETSI).

9. ETSI TS 103 301 V2.2.1 (2024). Facilities Layer Infrastructure Services. (ETSI).

10. ETSI TS 102 894-2 V2.3.1 (2024). Applications & Facilities Common Data Dictionary. (ETSI).

11. ETSI TS 103 324 V2.1.1 (2023). Collective Perception Service (CPS). (ETSI).

12. WMO-No. 8 (2021–2025). *Guide to Instruments and Methods of Observation*. (library.wmo.int).

13. NTCIP 1204 v04.26b (2021/2022). Environmental Sensor Station (ESS). (NTCIP).

14. 40 CFR Part 53. Ambient Air Monitoring Reference and Equivalent Methods. (ECFR).

15. ISO 1996-1:2016. Acoustics — Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise. (ISO).

16. Directive 2002/49/EC. Assessment and Management of Environmental Noise. (EUR-Lex).

17. Commission Directive (EU) 2015/996. CNOSSOS-EU Common Noise Assessment Methods. (EUR-Lex).

18. Edie L. C. Discussion of Traffic Stream Measurements and Definitions // *Proc. 2nd Int. Symp. on the Theory of Traffic Flow*, 1963. (доступные реплики) (pdfcoffee.com).

19. Treiber M., Kesting A. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer, 2013. (SpringerLink).

20. Lighthill M. J., Whitham G. B. On Kinematic Waves II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads // *Proc. Royal Society A*, 1955. (Royal Society Publishing).

21. Richards P. I. Shock Waves on the Highway // *Operations Research*, 1956. (INFORMS Pubs Online).

22. ETSI TS 102 636-4-2 V1.4.1. GeoNetworking over ITS-G5 Access. (ETSI).

23. ETSI TS 103 696 V2.1.1 (2021). ITS Release 2 Background. (ETSI).

24. EPA (2021). *Overview of MOVES3 (EPA-420-R-21-004)*. (EPA).

25. EEA (2023–2024). *EMEP/EEA Guidebook — 1.A.3.b Road transport (incl. tyre/brake wear)*. (copert.emisia.com).

26. JRC (2017). *PEMS Guidance Note for LDV (EU-RDE)*. (JRC Publications)

27. Commission Regulation (EU) 2016/427. RDE test procedures / PEMS. (Legislation.gov.uk).

28. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of Russia "On the Approval of Methods for Calculating the Dispersion of Emissions of Harmful (Polluting) Substances in the Atmospheric Air" dated June 6, 2017 No. 273 (Registered with the Ministry of Justice of Russia on August 10, 2017, No. 47734).

29. C-Roads (2022). *Ecosystem for fully operational C-ITS service delivery*. (C-Roads).

30. C-Roads (2022). *Annual Pilot Overview Report 2021*. (C-Roads).

31. USDOT / WYDOT (2022). *Final System Performance Measurement and Evaluation — WYDOT CV Pilot*. (ROSA P).

32. FHWA (2020). *Road Weather Management Program — Wyoming Case Study*. (FHWA Operations).

Trofimenko Y.V., Runets R. S., Burikov E.I.

A CONCEPT FOR INTELLIGENT TRAFFIC CONTROL OF HIGHLY AUTOMATED VEHICLES WITH INTEGRATION WITH V2X INFRASTRUCTURE

Abstract*. The concept of intelligent traffic management using highly automated vehicles (HAV, SAE L3–L4) is presented based on integration with the V2X infrastructure and unified processing of data received from mobile (onboard) and stationary sensors. The theoretical basis is formed by the generalized Edie definitions (invariant to the measurement method) and the Lighthill-Witham-Richards (LWR) kinematic model for describing the macrodynamics of a flow with shock waves. The concept links C-ITS/ETSI services (DENM/CAM/CPS) and infrastructure Facilities services with ITS PKI safety profiles, quality control (QC) mechanisms and validation with road weather stations (RWIS/ESS), air quality posts (FRM/FEM) and acoustic networks (ISO/CNOSSOS-EU). The following are presented: methods for reconstructing traffic flow characteristics (v, q, k, w) from RVTS trajectory data; on-board assessments of visibility (MOR), road surface condition and wheel adhesion coefficient μ; Integration of environmental air pollution indicator assessments (EMEP/EEA; ISO 1996-1, END/CNOSSOS-EU). A data exchange architecture, a trusted aggregation algorithm, and an ADS decision-making framework for DENM Release 2 events, taking into account ODD, are proposed. The concept is based on the ETSI Release 1/2 specifications and is confirmed by the implementation of the C-Roads and WYDOT CV Pilot pilot projects.*

Keywords*: Highly automated vehicles, road infrastructure, intelligent traffic management, two-way integration, unified data architecture.*

Сведения об авторах:

Трофименко Юрий Васильевич
Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), г. Москва, Российская Федерация,
Заведующий кафедрой техносферной безопасности МАДИ,
руководитель секции «Охрана окружающей среды. Энергосбережение»
научно- технического совета ГК «Российские автомобильные дороги»,
д-р техн. наук,
e-mail: ywtrofimenko@mail.ru

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

Буриков Евгений Игоревич
ООО «Иксолоджи», г. Химки, Московская область, основатель,
генеральный директор, инженер по специальности
«Проектирование и технология радиоэлектронных средств»
Московский государственный технический университет
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
e-mail: burikov@xologie.ru

Information about the authors:

Trofimenko Yuri Vasilievich
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
(MADI), Moscow, Russian Federation,
Head of the Department of Technosphere Safety at MADI,
Head of the "Environmental Protection. Energy Conservation" Section
Scientific and Technical Council of the Russian Highways State Corporation,
Doctor of Technical Sciences,
e-mail: ywtrofimenko@mail.ru

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

Burikov Evgeny Igorevich
LLC XOLOGIE, Khimki, Moscow Region, — Founder
and Chief Executive Officer Engineer, majoring in Design
and Technology of Radio-Electronic Devices,
Bauman Moscow State Technical University
(MSTU named after N.E. Bauman)
e-mail: burikov@xologie.ru

УДК 656.1

Богумил В.Н., Власов В.М., Байтулаев А.М., Андреева М.Д.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НОРМАТИВА ВРЕМЕНИ ОБОРОТНОГО РЕЙСА НА МАРШРУТЕ, ВЫПОЛНЯЕМОГО С ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ ПАССАЖИРСКИМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ

Аннотация. *Одной из важнейших особенностей развития современных интеллектуальных транспортных систем (ИТС) является использование телематических систем, которые на автомобильном транспорте широко внедряются в форме автоматизированных навигационных систем диспетчерского управления (АНСДУ) перевозками наземным городским пассажирским транспортом (НГПТ). В настоящее время АНСДУ рассматриваются как важные подсистемы современных ИТС, поскольку эффективно работающий городской пассажирский транспорт помогает решать важнейшие задачи ИТС – уменьшение заторов на дорогах, уменьшение загрязнения окружающей среды. Эти задачи могут решаться на основе повышения привлекательности городского пассажирского транспорта для населения, что приводит к повышению доли населения, использующего НГПТ и, соответственно, снижению количества поездок на личном транспорте. Одно из направлений повышения привлекательности – повышение надежности процесса перевозок за счет уменьшения числа случаев нарушений расписаний движения. В статье рассматриваются вопросы расчета норматива времени оборотного рейса на маршрутах со сложными условиями движения и напряженным пассажиропотоком, обеспечивающего его выполнение пассажирским транспортным средством с заданной вероятностью.*

Ключевые слова: *надежность процесса перевозки пассажиров, статистические данные, длительность оборотного рейса, вероятность выполнения расписания движения.*

Введение

Городской пассажирский транспорт является одной из самых востребованных населением общественных услуг: житель России в среднем пользуется городским транспортом 250 раз в год, всего ежегодно совершается более 17 млрд. поездок, что составляет 92% от всех поездок на транспорте общего пользования, более двух третей которых приходится на пассажирский транспорт в городских агломерациях [1]. В связи с этим, вопросы организации и управления работой городского пассажирского транспорта имеют большое социальное значение. По мнению специалистов, наиболее перспективной является модель управления, позволяющая сохранить контроль за работой автотранспортных предприятий и одновременно обеспечить конкуренцию на рынке транспортных услуг [2]. Такая новая модель впервые появилась около десяти лет назад в Москве, а затем и в некоторых других городах [3]. Данная форма организации перевозочного процесса получила название брутто-контракт. Брутто-контракт, это контракт, который заключают заказчик и исполнитель на маршрут, группу маршрутов

(лот) или обслуживание определённой территории без фиксации маршрутной сети на период действия контракта. Единица измерения транспортной работы во всех перечисленных случаях – машино-километр, пройденный исполнителем с заданным качеством и заданными параметрами. При этом сбор платы за проезд осуществляется силами и средствами заказчика.

В такой системе оплата работы перевозчиков зависит только от количества и качества выполнения запланированных рейсов.

Заказчик получает основание требовать от перевозчиков выполнения всего объема заказанной транспортной работы. Данная модель организации перевозок пассажиров наземным городским пассажирским транспортом развивает основные положения Федерального закона от 13 июля 2015г. № 220-ФЗ [4] и Устава автомобильного транспорта [5] в части организации пассажирских перевозок.

В централизованной общегородской диспетчерской системе диспетчеры использовали команды управления, изменяя время выхода в рейс очередного транспортного средства, чтобы уменьшить негативные последствия отставания транспортного средства от расписания и увеличения интервала движения [6].

Однако, при работе в условиях брутто-контракта превышение небольшого допустимого отклонения от планового времени выхода в рейс приводит к штрафу в виде неоплаты транспортной работы. Следовательно, указанные выше действия диспетчеров предприятия, работающего в условиях брутто-контракта, не допустимы. Отсюда следует, что необходимо учитывать вариацию фактического времени оборотного рейса [7] в процессе перевозок. С этой целью разработана методика расчета времени оборотного рейса для маршрутов с большой частотой движения транспортных средств (например, интервалы движения в час «пик» 20 минут и менее), основанная на использовании реальных статистических данных о движении транспортных средств.

Применение настоящей методики позволяет оценить характеристики случайной величины «время оборотного рейса» для различных периодов суток на заданном маршруте, и определить плановую продолжительность оборотного рейса по статистическим данным, превышение которой можно считать практически невозможным событием.

Порядок сбора и первичной обработки статистических данных о времени оборотного рейса на маршруте

В качестве исходных данных необходимо собирать статистику о фактическом времени движения в оборотном рейсе. Исходные данные должна формировать диспетчерская система по каждому маршруту и хранить статистику фактических данных времени движения в оборотном рейсе в разрезе маршрутов по дням недели. Расчет планового времени ведется поэтапно. Порядок действий при расчете планового времени оборотного рейса на маршруте показан на рисунке 1.

Методика сбора и обработки первичных данных должна соответствовать требованиям [8, раздел 4]. В соответствии с указанными требованиями, для каждой группы статистических данных, разбитых на третьем этапе по часовым интервалам, необходимо выполнить следующие операции:

- исключить известные систематические погрешности из результатов измерений;
- принять, что случайная величина «фактическое время рейса» в каждой почасовой совокупности для прямого и обратного рейсов распределена по нормальному закону на основании действия закона больших чисел.
- проверить по критерию Гиббса [8, Раздел 6] наличие грубых погрешностей и при обнаружении исключить их;
- для каждой группы статистических данных, разбитых по часовым интервалам,

вычислить оценку ($\bar{x}$) величины «фактическое время рейса» и среднего квадратического отклонения (S) в соответствии с [8, пункт 5].



Рисунок 1. Схема поэтапного расчета планового времени оборотного рейса по статистическим данным о фактическом времени движения транспортного средства в оборотном рейсе

На четвертом этапе необходимо выделить однородные статистические данные по часам суток для случайной величины «Фактическое время оборотного рейса».

Однородность статистических данных необходимо проверить с использованием критерия Стьюдента [9, п. 6]. Данный критерий используется для проверки гипотезы: «Средние двух выборок относятся к одной и той же совокупности».

На пятом этапе из множества каждой группы однородных данных необходимо сформировать вариационный ряд и найти значение перцентиля p95. Это значение является статистической оценкой значения квантиля x0,95 случайной величины, которая определяет границу, вероятность попадания случайной величины слева от нее равна 0,95. В приведенном примере необходимо определить три таких значения.

Для расчёта p-го перцентиля в статистике используется формула

$$p_{\%} = (n+1)\frac{p}{100}, \quad (1)$$

где n – общее количество членов вариационного ряда; P –процент членов ряда, лежащих слева от позиции перцентиля.

На шестом этапе необходимо выполнить расчет планового времени оборотного рейса ($t_{об}^{+\sigma}$) для каждого периода суток, соответствующего однородным статистическим

данным. В соответствии с [7] и с учетом рассчитанного значения величины p_{95}, данная величина определится по формуле:

$$t_{\text{об}}^{+\sigma} = p_{95} + t_{\text{пер}} \text{ , мин.} \quad (2)$$

Пример расчета норматива времени оборотного рейса на маршруте, выполняемого с заданной вероятностью

Пусть количество собранных однородных статистических данных равно 250 Выстроим по возрастанию вариационный ряд. Позиция квантиля р95 определится по формуле (1):

$$p_{95} = (250 + 1)95/100 \text{ =238,45.}$$

Полученный результат говорит о том, что позиция 0,95 квантиля находится между 238 и 239 членами вариационного ряда.

Пусть значение 238 члена равно 105 минут. Значение 239 члена равно 107 минут. Тогда оцениваемое значение квантиля р0,95 равно значению 238 члена, увеличенному на разность между 239 и 238 членами, умноженную на 0,45. В нашем случае при округлении до минут в качестве решения можно принять р0,95 =106 минут. То есть с вероятностью 0,95 фактическое время оборотного рейса не превысит указанную величину.

Пусть плановое время отстоя на пункте А равно 10 минут. Тогда плановое время оборотного рейса с учетом времени отстоя на пункте А равна 106+10=116 минут.

Если плановое время оборотного рейса, рассчитанное по предлагаемой методике, изменилось по сравнению с действующим, то при его практическом использовании необходимо пересчитать количество транспортных средств (Ам), работающих на маршруте по формуле:

$$A_{\text{м}} = t\text{об/I}, \quad (3)$$

где *t*об – плановое время оборотного рейса в минутах; I– плановый интервал движения на маршруте.

В нашем случае tоб равно 116 минутам. Пусть плановый интервал равен 15 минутам. Тогда плановое количество транспортных средств на маршруте равно 8 единицам.

Заключение

Применение настоящей методики позволяет повысить надежность процесса перевозок на маршруте на основе обработки реальных статических данных о времени кругового рейса на заданном маршруте. В данном подходе на первое место ставятся интересы пассажиров за счет нахождения времени оборотного рейса, превышение которого в каждом отдельном рейсе можно рассматривать как практически невозможное событие. Это обстоятельство исключает возможность срыва перевозочного процесса в конкретных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Интегрированная транспортная система 2018. Совместный доклад Центра Стратегических разработок и Центра экономики инфраструктуры. — М., 2018. — 278 с.

2. Логистика: общественный пассажирский транспорт: Учебник для студентов экономических вузов / Под общ. ред. Л.Б. Миротина. – М.: Издательство «Экзамен», 2003. – 224 с.

3. Постановление Правительства Москвы от 29 марта 2016 года № 116-ПП «О внесении изменений в постановление Правительства Москвы от 15 декабря 2015 года № 880-ПП»

4. Федеральный закон от 13 июля 2015г. № 220-ФЗ «Об организации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». – 103 с.

5. Федеральный закон от 08 ноября 2007г. № 259-ФЗ «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта». – 47 с.

6. ГОСТ 32422-2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Системы диспетчерского управления городским пассажирским транспортом. Требования к архитектуре и функциям. – 4 с.

7. Ларин О.Н. Пассажирские перевозки [Текст]: учебное пособие / О.Н. Ларин; М-во образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский гос. ун-т, Каф. "Эксплуатация автомобильного трансп.". - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. - 120 с.

8. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – 27 с.

9. ГОСТ Р 50779.21-2004 Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение. – 43 с.

References

1. Integrated Transport System 2018. Joint report of the Center for Strategic Research and the Center for Infrastructure Economics. Moscow, 2018. 278 p. (In Russ.)

2. Logistics: Public Passenger Transport: Textbook for students of economic universities / Edited by L.B. Mirotin. Moscow: "Examen" Publishing House, 2003. 224 p. (In Russ.)

3. Decree of the Government of Moscow No. 116-PP, dated March 29, 2016, "On Amending Decree of the Government of Moscow No. 880-PP, dated December 15, 2015". (In Russ.)

4. Federal Law No. 220-FZ, dated July 13, 2015, "On the Organization of Regular Carriage of Passengers and Luggage by Road and Urban Ground Electric Transport in the Russian Federation and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation". 103 p. (In Russ.)

5. Federal Law No. 259-FZ, dated November 8, 2007, "The Charter of Road Transport and Urban Ground Electric Transport". 47 p. (In Russ.)

6. GOST 32422-2013. Global Navigation Satellite System. Urban Passenger Transport Dispatch Control Systems. Requirements for Architecture and Functions. 4 p. (In Russ.)

7. Larin, O.N. Passenger Transportation [Text]: Textbook / O.N. Larin; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, South Ural State University, Department of "Operation of Road Transport". Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, 2011. 120 p. (In Russ.)

8. GOST R 8.736-2011. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Direct Multiple Measurements. Methods for Processing Measurement Results. Basic Principles. 27 p. (In Russ.)

9. GOST R 50779.21-2004. Statistical Methods. Rules for Determining and Methods for Calculating Statistical Characteristics from Sample Data. Part 1: Normal Distribution. 43 p. (In Russ.)

Bogumil V.N., Vlasov V.M., Baytulaev A.M., Andreeva M.D.

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE STANDARD TIME OF A TURNAROUND TRIP ON A ROUTE PERFORMED WITH A GIVEN PROBABILITY BY A PASSENGER TRANSPORT VEHICLE

Abstract. *One of the most important features of the development of modern intelligent transport systems (ITS) is the use of telematics systems, which are widely implemented in road transport in the form of automated navigation systems for dispatch control for transportation by public ground transport. Currently, the systems are considered as important subsystems of modern ITS, since effectively operating urban passenger transport helps to solve the most important tasks of ITS - reducing traffic congestion, reducing environmental pollution. Solution of these tasks is increasing the attractiveness of urban passenger transport for the population, which leads to an increase in the share of the population using public transport and, accordingly, a decrease in the number of trips by private transport. One of the areas of increasing attractiveness is increasing the reliability of the transportation process by reducing the number of cases of violations of traffic schedules. The article considers the issues of calculating the standard time of a turnaround trip on routes with difficult traffic conditions and intense passenger flow, ensuring its implementation by a passenger vehicle with a given probability.*

Key words: *reliability of the passenger transportation process, statistical data, duration of the return trip, probability of compliance with the schedule.*

Сведения об авторах:

Богумил Вениамин Николаевич
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
Адрес: 125319, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, 64
К.т.н, доцент кафедры “Транспортная телематика”
e-mail: v_bogumil@mail.ru

Власов Владимир Михайлович
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
Адрес: 125319, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, 64
доктор технических науки, профессор, заведующий кафедрой “Транспортная телематика”
e-mail: vmv@transnavi.ru

Байтулаев Али Магомедович
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
Адрес: 125319, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, 64
К.т.н, доцент кафедры “Транспортная телематика”
e-mail: ttr_madi@inbox.ru

Андреева Мария Дмитриевна
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
Адрес: 125319, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, 64
инженер кафедры “Транспортная телематика”
e-mail: ttr_madi@inbox.ru

Information about the authors:

Bogumil Veniamin Nikolaevich
Moscow Automobile and Road Transport State Technical University (MADI)
Address: 64 Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russia
PhD, Associate Professor of the Department of Transport Telematics
e-mail: v_bogumil@mail.ru

Vlasov Vladimir Mikhailovich
Moscow Automobile and Road Transport State Technical University (MADI)
Address: 64 Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russia
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Telematics
e-mail: vmv@transnavi.ru

Baytulaev Ali Magomedovich
Moscow Automobile and Road Transport State Technical University (MADI)
Address: 64 Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russia
PhD, Associate Professor of the Department of Management
e-mail: ttr_madi@inbox.ru

Andreeva Maria Dmitrievna
Moscow Automobile and Road Transport State Technical University (MADI)
Address: 64 Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russia
Engineer of the Department of Management
e-mail: ttr_madi@inbox.ru

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

УДК 621.432:620.19

Кудреватых А.В., Шальков А.В.

МОНИТОРИНГ ДЕГРАДАЦИИ МОТОРНОГО МАСЛА И ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ДВИГАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

***Аннотация**. Основная роль моторного масла заключается в защите деталей двигателя от разрушения в результате трения, износа, коррозии, отложений и окисления, обеспечивая при этом ожидаемый эффект топливной экономичности и эффективной работы всей силовой установки. Однако процесс деградации масла непрерывен и неизбежен, поэтому мониторинг состояния смазочных материалов позволяет получить ценную информацию как об их эксплуатационных качествах, так и о состоянии двигателя в целом. В связи с этим, в статье рассмотрены различные подходы к мониторингу деградации моторного масла, результаты которых позволяют принять решения относительно корректировки процесса обслуживания двигателей и необходимости проведения профилактических мероприятий. В процессе исследования предложена система мониторинга моторного масла в режиме реального времени на основе IoT. Основное отличие авторской методики заключается в гибридной нейросетевой архитектуре и ее глубокой интеграции с IoT-платформой, в то время как многие существующие системы ограничиваются пороговыми значениями или простыми регрессионными моделями. Разработанная методика позволяет обрабатывать данные о физико-химических свойствах смазочных материалов, на основании чего можно прогнозировать изменение состояния системы «смазочное масло - двигатель» в динамике.*

***Ключевые слова:** масло, двигатель, деградация, анализ, ремонт, датчик.*

Постановка задачи

Для того чтобы двигатель внутреннего сгорания сохранял высокие эксплуатационные характеристики и при этом оставался долговечным, большое значение имеет используемое моторное масло. Ученые указывают на важность моторного масла для обеспечения движения без трения между подвижными поверхностями путем поддержания оптимальной вязкости, термической стабильности, стойкости к окислению, замедления коррозии и удаления остатков и загрязнений из двигателя [1]. Из-за окисления и термических напряжений в рабочих условиях физические и химические свойства масла ухудшаются и в итоге приводят к увеличению скорости его износа, которая начинается с истощения присадок, после чего запускаются процессы окисления базового масла. Отдельный акцент необходимо сделать на том, что деградация масла значительно ускоряется, если двигатель работает в тяжелых условиях, таких как очень высокие температуры, запуск в холодном состоянии или высокое давление, что характерно, например, для двигателей карьерных самосвалов.

По мере развития технологий производства моторных масел для удовлетворения растущих потребностей в продлении срока службы двигателей, с учетом требований усиления их защиты и экономии топлива, становится все сложнее понять механизмы деградации масел. Более того, внедрение новых химических присадок и очень сложные условия, в которых масла находятся в современных силовых агрегатах, еще больше усугубляют ситуацию неопределенности. Развитие новых технологий в отрасли машиностроения за счет уменьшения размеров и внедрения бензиновых двигателей с непосредственным впрыском стало причиной формирования сложных условий для работы моторного масла. Эти модернизации привели не только к тому, что повысилась температура смазочного материала и увеличилась удельная мощность, но и произошло уменьшение его объема, вследствие чего масло более продолжительное время находится в зоне поршня и подвергается воздействию NOx при более высоких температурах [2]. Все эти изменения свидетельствуют о повышенном уровне окисления и нитрации, а также являются причиной более быстрой деградации масла.

Отмеченные вопросы актуализируют задачи использования эффективных и точных методов анализа масла, которые позволят с высокой степенью достоверности ответить на вопрос, когда моторное масло достигло точки отказа, на основании чего может быть выбран оптимальный период технического обслуживания двигателя. Однако задачи выбора наиболее приемлемого метода определения деградации моторного масла остаются открытыми, особенно для двигателей большого размера, которые нуждаются в адаптивных и гибких приемах мониторинга в режиме реального времени.

Анализ последних исследований

Перспективы использования цифровых технологий, датчиков и Интернета в отношении деградации масла и присадок на основе их физико-химических, композиционных и трибологических свойств рассматривают в своих трудах Emrullah Hakan Kaleli, [3], Посяда А.С. [4], Химченко А.В. [5].

Описанию широкого спектра эксплуатационных факторов, которые способствуют деградации масла, таких как стиль вождения автомобиля, область его использования, состояние трансмиссии и т.д., посвятили свои публикации Mohammad Maher Kallas [6], Yicong Xu [7], R. Moolat [8], Темердашев З.А [9].

Высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день труды и наработки, необходимо отметить, что некоторые вопросы заслуживают более углубленного анализа. Так, нерешенной остается проблема оценки качества масла в динамике, поскольку отбор проб и их изучение в определенные моменты времени не позволяет получить точные результаты. Кроме того, в усовершенствовании и развитии нуждаются подходы к изучению изменений параметров моторного масла, которые происходят в транспортных средствах, испытывающих критические неисправности.

Цель работы

Цель статьи заключается в рассмотрении особенностей и методов мониторинга деградации моторного масла, позволяющих прогнозировать ресурс двигателей карьерных самосвалов.

Основная часть

В системе «двигатель-масло» особый интерес представляют любые изменения случайных процессов, происходящих внутри них и между ними, а также инверсии физико-химических характеристик элементов этой структуры [10]. Решение о контроле и продлении жизненного цикла двигателя мотивирует на создание новых стратегий управления износом и внедрение более прогрессивных алгоритмов математического

моделирования процессов деградации масла. Повышение эффективности использования масел в силовых установках связано со сложностью определения предельного состояния, которое зависит от массы факторов, влияющих на старение масла.

На рисунке 1 представлены основные причины ухудшения качества моторного масла.

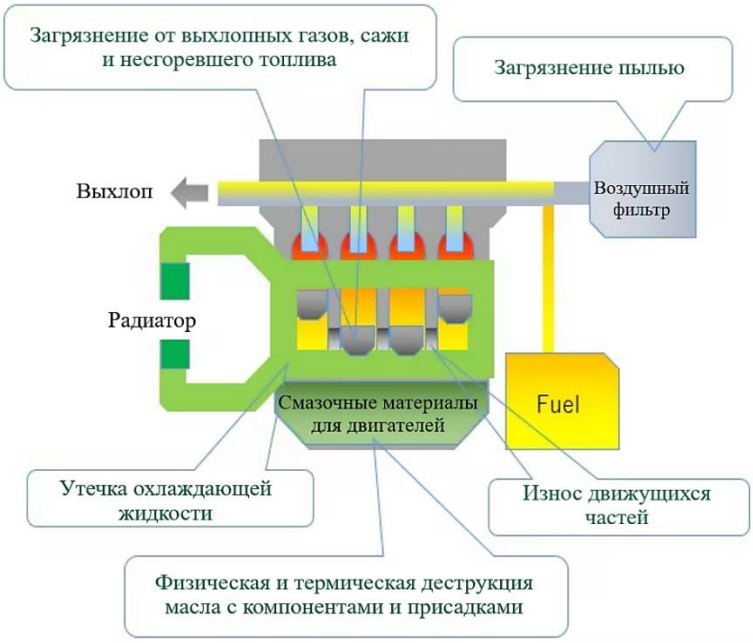


Рисунок 1. Типичные причины ухудшения качества моторного масла

Процессы деградации масел рассматриваются как полные и необратимые изменения, происходящие с течением времени. Старение вызывается химическими, термическими и механическими силами, которые действуют на смазочное масло во время его работы в устройстве. В таблице 1 представлены традиционные методы и подходы мониторинга деградации моторного масла, которые нашли свое широкое распространение на практике.

В ряде современных публикаций на сегодняшний день эксперты сходятся во мнении, что для лучшего понимания влияния деградации масла на ресурс двигателей карьерных самосвалов целесообразным является сосредоточиться на двух конкретных областях [11, 12, 13, 14, 15].

Первая область исследования предусматривает необходимость нахождения уровня содержания кислот в смазочном материале в течение срока эксплуатации, вычисление его истинного базового запаса, а также оценку эффективности используемых подходов для измерения этих свойств. По мнению экспертов, на основании анализа поведения сильных и слабых кислот в комбинации со стандартными системами присадок, можно разработать рекомендации, позволяющие нейтрализовать негативное влияние этих процессов.

Вторая область внимания включает в себя процессы окисления и нитрования смазочного материала, а также фокусировку на изучении того, каким образом эти явления влияют на деградацию масла. Для нитрации это предполагает проведение анализа первопричин ее появления, а также мониторинг колебания ее уровня в рамках определенного временного интервала.

Для обоснования этих утверждений учеными были проведены оценки одной формулы смазочного материала в трех различных условиях работы двигателя с очень разными температурами картера, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 1

Методы анализа качества моторного масла и степени его деградации

	Объекты анализа (элементы)	Система мониторинга
Ухудшение	Окисление	ИК-ФУРЬЕ
	Нитрование	
	Сульфатные побочные продукты	
Загрязнение	Вода	ИК-ФУРЬЕ
	Сажа	
	Бензин	Газовая хроматография
	Дизельное топливо	ИК-ФУРЬЕ
	Охлаждающая жидкость (B, Na, K)	Газовая хроматография
	Антифриз (Na)	ИК-ФУРЬЕ
	Пыль (Si)	Газовая хроматография
	Вода	АЭС-ИСП
		ИК-ФУРЬЕ
	Сажа	АЭС-ИСП
	Бензин	
	Дизельное топливо	
Износ	Металлы (Al, Fe, Cu, Cr, Ni, Zn и др.)	АЭС-ИСП
Присадки	Антиоксиданты (Zn, Cu, B)	АЭС-ИСП
	Противоизносные агенты (B, Cu, K, S, Zn и т.д.)	ИК-ФУРЬЕ
	Ингибиторы моющих средств (Ba, Mg, Ca и др.)	АЭС-ИСП
	Ингибиторы коррозии (Ba, Zn)	ИК-ФУРЬЕ
	Антикоррозийные агенты (K, Ba)	АЭС-ИСП
	Добавки-модификаторы трения (Mo)	
	Металлы (Al, Fe, Cu, Cr, Ni, Zn и др.)	
	Антиоксиданты (Zn, Cu, B)	

Таблица 2

Результаты тестирования одной формулы масла при различных условиях работы

Двигатель	Максимальная температура поддона картера	Интервал замены масла, км	Эксплуатация	Скорость нитрования	Скорость окисления	Накопление нитратных эфиров
Полевые испытания: 2-литровый турбированный двигатель с расслоенным впрыском топлива	110°C	30000	3% городские, 17% загородные, 80% высокоскоростные поездки	Низкая	Низкая	Медленное
Динамометрический стенд: 1,6-литровый двигатель в лабораторных условиях	130°C	20000	Длительная езда с высокой нагрузкой	Высокая	Средняя	Быстро
Статические стендовые испытания двигателя: 3,6-литровый двигатель	150°C	-	Искусственное поддержание высокой температуры поддона картера	Низкая	Высокая	-

Полученные результаты продемонстрировали тенденцию к тому, что скорость нитрования сначала увеличивалась, а затем уменьшалась при повышении температуры, в то время как окисление постоянно увеличивалось при повышении температуры.

По мнению авторов настоящей статьи, значительные перспективы и потенциал для карьерных самосвалов на сегодняшний день имеет мониторинг деградации моторного масла в режиме онлайн. Эта система может послужить основой для прогнозирования остаточного ресурса двигателя с помощью технологий искусственного интеллекта. В таких системах обычно используются датчики и алгоритмы обработки данных для сбора информации о различных параметрах, таких как уровень масла, температура, давление, вязкость и загрязнение.

Учитывая вышеизложенное, предлагаем авторскую методику непрерывного интеллектуального контроля состояния моторного масла, основу которой составляет интеграция IoT-платформы NodeMCU с системой распределённых датчиков и облачным модулем глубокого обучения, что обеспечивает онлайн-анализ физико-химических свойств масла и прогнозирование остаточного ресурса в реальном времени.

Итак, основу аппаратной архитектуры составляет микроконтроллер NodeMCU (ESP8266), выполняющий сбор и предварительную обработку данных от «умных» сенсоров, измеряющих основные параметры масла (см. табл. 3).

Таблица 3

Диагностические показатели, используемые в интеллектуальной системе анализа состояния моторного масла

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Физический смысл
Температура масла	T	°C	Тепловое состояние системы
Вязкость при 100 °C	V	сСт	Текучесть и качество присадок
Диэлектрическая проницаемость	D	—	Содержание воды и загрязнений
Щелочное число	BN	мг KOH/г	Буферная способность масла
Кислотное число	AN	мг KOH/г	Степень окисления
Содержание металлов износа (Fe, Cu, Al)	M_i	ppm	Интенсивность трения и износа

Передача данных на сервер осуществляется по протоколу MQTT через защищённый канал (TLS).

На рис. 2 представлена схема разработанной авторами интеллектуальной системы анализа и мониторинга состояния моторного масла.

В соответствии с предложенной системой для оценки деградации масла формируется матрица измерений:

$$X = \left[X_k(t_j)\right]_{K \times N} \quad (1)$$

где K — количество диагностируемых параметров;

N — число временных отсчётов (например, часов работы двигателя).

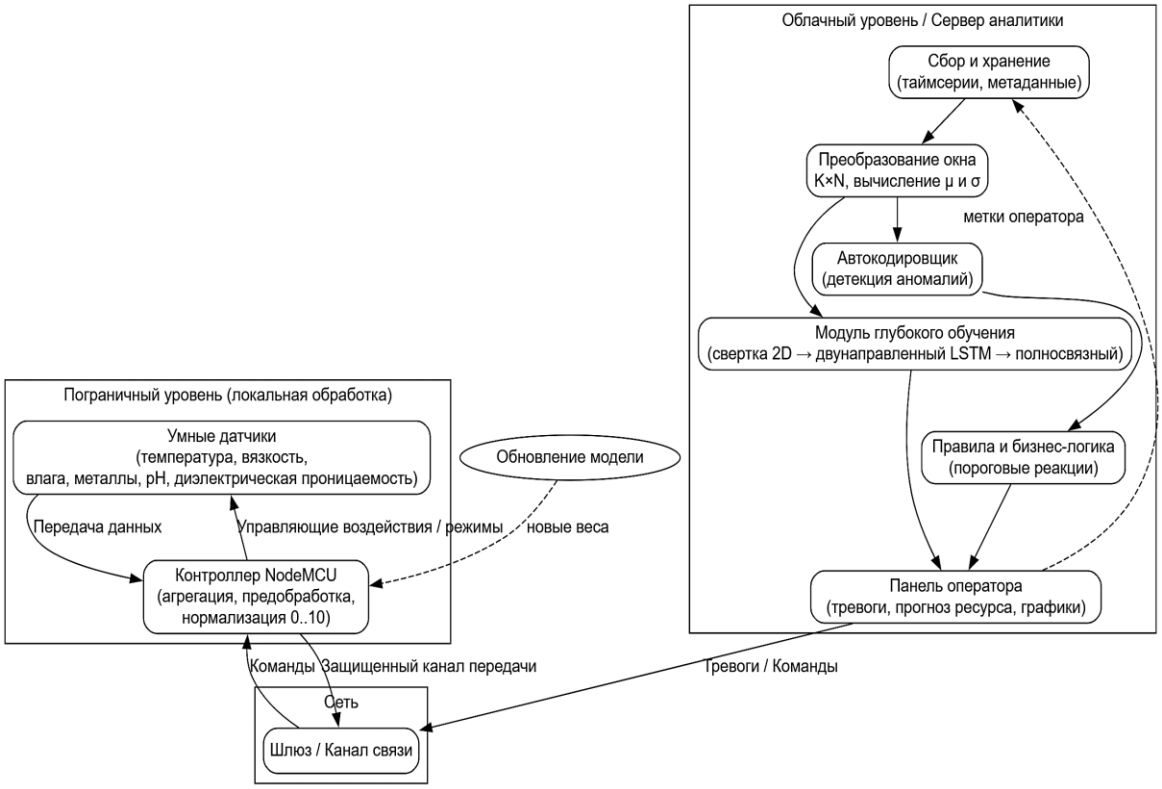


Рисунок 2. Интеллектуальная система анализа и мониторинга состояния моторного масла

Каждый параметр нормируется в диапазоне 0 … 10 с учётом его индивидуальных границ:

$$E_k(t_j) = 10 \cdot \frac{X_k(t_j) - R_{n,k}}{R_{v,k} - R_{n,k}} \quad (2)$$

где $R_{n,k}$, $R_{v,k}$ - нижний и верхний контрольные пределы вариации параметра.

В качестве иллюстрации в рамках проводимого исследования примем следующие эталонные диапазоны (см. табл. 4).

Таблица 4

Эталонные диапазоны и пределы нормализации контролируемых параметров

Параметр	Нижний предел ($R_{n,k}$)	Верхний предел ($R_{v,k}$)	Нормализованный диапазон
T	60 °C	130 °C	0–10
V	8 сСт	16 сСт	0–10
D	1.9	2.6	0–10
BN	0	10 мг KOH/г	0–10
AN	0	8 мг KOH/г	0–10
Fe	0	150 ppm	0–10

Полученные нормированные значения формируют матрицу состояния масла:

$$E = [E_k(t_j)] \quad (3)$$

Алгоритм интеллектуального анализа состояния масла включает следующие последовательные этапы:

1. Сбор и предобработка данных (фильтрация, интерполяция, нормализация).

2. Построение матрицы состояния E по данным наблюдения.
3. Расчёт статистических показателей:

$$\mu_k = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} E_k(t_j) \quad (4)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left(E_k(t_j) - \mu_k\right)^2} \quad (5)$$

4. Формирование признаков (μ, σ, градиенты изменений).
5. Анализ нейросетевой моделью (автокодировщик и классификатор).
6. Прогнозирование остаточного ресурса масла.
7. Выдача решения и обратная связь IoT (оповещение оператора, корректировка режима).

Для анализа многомерных временных данных, получаемых в ходе наблюдений за состоянием моторного масла, предлагаем использовать гибридную модель (рис. 3), которая включает:

–сверточный блок (Conv2D) для выделения локальных зависимостей между параметрами масла;

–двунаправленную рекуррентную сеть (Bi-LSTM) для анализа динамики во времени;

–полносвязные слои (Dense) для классификации или регрессии (RUL).

–

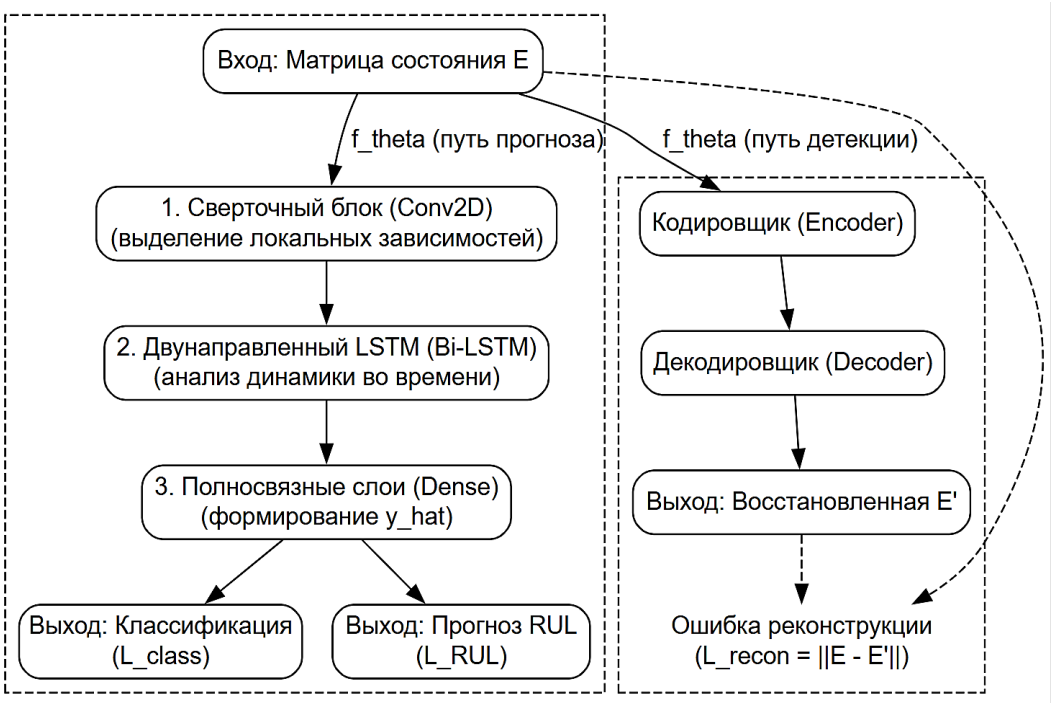


Рисунок 3. Схема гибридной нейросетевой модели для прогнозирования и детекции аномалий состояния моторного масла

Математически модель, представленная на рис. 3, реализует следующее отображение:

$$\hat{y}(t_j) = f_\theta(E) \quad (6)$$

где f_θ — нейросеть с параметрами θ, $\hat{y}$ — оценка состояния системы.

Для обучения классификатора используется функция потерь кросс-энтропии:

$$\mathcal{L}_{class} = -\sum_{c} y_c log\hat{y}_c \quad (7)$$

а для прогноза остаточного ресурса - среднеквадратичная ошибка (MSE):

$$\mathcal{L}_{RUL} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(\hat{r}_i - r_i)^2 \quad (8)$$

При детекции аномалий применяется автокодировщик с ошибкой реконструкции:

$$\mathcal{L}_{recon} = \|E - f_\theta(E)\|_F^2 \quad (9)$$

На основании вычисленных признаков формируется интегральный показатель деградации:

$$S_k = \left(1 - \frac{\mu_k}{10}\right) + \lambda\frac{\sigma_k}{\sigma_{ref,k}} \quad (10)$$

где $\sigma_{ref,k}$ — эталонное стандартное отклонение при нормальной работе;

λ — весовой коэффициент (обычно 0,5–1,0).

Средний интегральный показатель по всем параметрам:

$$S = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} S_k \quad (11)$$

Интерпретация результатов приведена в таблице 5.

Таблица 5

Оценка состояния и рекомендации по интегральному показателю деградации моторного масла

Диапазон (S)	Оценка состояния	Рекомендации
0 – 0,3	Норма	Работа без ограничений
0,3–0,6	Предупреждение	Плановое ТО, проверка качества масла
0,6–1.ъ,0	Деградация	Замена масла, анализ причин износа

На следующем этапе исследования проведем апробацию разработанной авторами интеллектуальной системы анализа и мониторинга состояния моторного масла. Тестирование проводилось на учебно-экспериментальном стенде ДВС мощностью 120 кВт с электронным сбором данных каждые 5 минут. Наблюдение длилось в течение 180 часов работы.

В результате наблюдений были получены следующие усреднённые показатели для типичных режимов работы (табл. 6).

Таблица 6

Усреднённые показатели деградации по режимам работы

Режим работы	Среднее μ по параметрам	Среднее σ	Интегральный S	Заключение
Холостой ход	9,4	0,3	0,08	Норма
Номинальная нагрузка	8,1	0,6	0,27	Допустимо
Перегрузка + загрязнение фильтра	6,5	1,4	0,66	Деградация
После замены масла	9,8	0,2	0,04	Восстановлено

На графике изменения интегрального показателя (рис. 4) чётко наблюдается рост S при деградации и его снижение после замены масла, что подтверждает адекватность

методики.

Прогноз нейросети по остаточному ресурсу масла показал ошибку RMSE = 6,3 % относительно лабораторных измерений щелочного числа, что указывает на высокую точность предложенной модели.

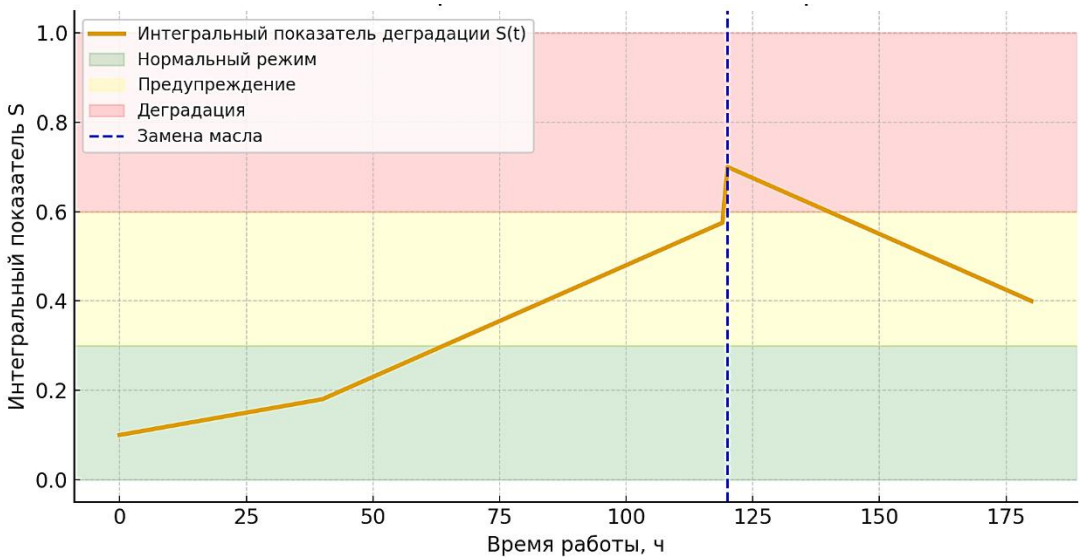


Рисунок 4. График изменения интегрального показателя деградации масла

Таким образом, отметим, что предложенная авторская методика представляет собой комплексную киберфизическую систему для непрерывного интеллектуального контроля состояния моторного масла. Суть методики заключается в интеграции аппаратного IoT-уровня (микроконтроллер NodeMCU и набор датчиков) с облачным модулем глубокого обучения для анализа данных и прогнозирования в реальном времени.

Заключение

Смазочное масло, состоящее из базового масла и различных присадок, а также содержащее значительную трибологическую информацию об эксплуатационном процессе, играет важную роль в обеспечении работоспособности двигателей автомобилей на протяжении всего срока их службы. Для прогнозирования ресурса двигателей карьерных самосвалов в статье разработана и апробирована интеллектуальная методика анализа и мониторинга состояния моторного масла на основе IoT-технологий и методов глубокого обучения.

В отличие от традиционного дискретного лабораторного анализа, авторская система обеспечивает постоянный сбор данных, что позволяет отслеживать динамику деградации и прогнозировать остаточный ресурс в любой момент времени. Апробация методики на стенде ДВС показала высокую точность модели, с ошибкой прогноза остаточного ресурса 6,3% относительно эталонных лабораторных измерений. Кроме того, достоинством и отличительной чертой методики от существующих подходов является то, что она не просто отслеживает один параметр, а формирует интегральный показатель деградации, учитывающий как средние значения, так и их изменчивость. Это дает более робастную оценку общего состояния системы «смазочное масло-двигатель».

Список литературы

1. Синявский Н.Я. Исследование деградации судовых моторных масел методом ИК-Фурье спектроскопии // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4-1. С. 72-

78. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.009

2. Jun Wang Online Monitoring of Automotive Engine Lubricating Oil Based on Internet of Things Technology. *Wireless Communications and Mobile* Computing. 2022; 20: 14-24.

3. Emrullah Hakan Kaleli Experimental investigation of the effect of tribological performance of reduced graphene oxide additive added into engine oil on gasoline engine wear. *Lubrication Science*. 2022; 3(16): 129-135.

4. Посяда А.С. Анализ компонентов цилиндрового масла крейцкопфных двигателей, возможность его регенерации и повторного использования // Молодежь. Наука. Инновации. 2024. Т. 1. С. 101-105.

5. Химченко А.В. Планирование эксперимента для определения зависимости изменения щелочного числа моторного масла от эксплуатационных факторов в пределах одного срока замены // Наука в центральной России. 2024. № 5 (71). С. 94-104. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-5-94-104

6. Mohammad Maher Kallas Experimental Comparison of the Effect of Using Synthetic, Semi-Synthetic, and Mineral Engine Oil on Gasoline Engine Parts Wear. *Advances in Tribology*. 2024; 1(8): 87-95.

7. Yicong Xu Wear Condition Evolution of Cylinder Liner-Piston Ring on the Two-Stroke Marine Diesel Engine Through Long-Term Monitoring and Analysis of Cylinder Oil. *Lubrication Science*. 2025; 59: 107-113.

8. Remsha Moolat Compact microwave sensor for monitoring aging of oil and fuel adulteration. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2022; 32: 84-93.

9. Темердашев З.А. Определение вязкостных и моющих присадок в синтетических моторных маслах методом гель-проникающей хроматографии // Журнал аналитической химии. 2023. Т. 78. № 3. С. 231-240. DOI: 10.31857/S0044450223030143

10. Химченко А.В. Предпосылки применения цифрового двойника для определения предельного состояния моторного масла или прогнозирования его остаточного ресурса // Наука в центральной России. 2024. № 3 (69). С. 148-160. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-148-160

11. Baranitharan Paramasivam Investigation on emission, performance, and combustion distinctiveness of bael seed cake pyrolysis oil/nano biochar/diesel blend fuelled in a compression ignition engine. *Environmental Progress & Sustainable*. 2022; 41: 25-37.

12. Xingshan Chang Predicting steady degradation in ship power system: A deep learning approach based on comprehensive monitoring parameters. *IET Intelligent Transport Systems*. 2024; 18: 159-164.

13. Метод оценки склонности моторных масел к образованию низкотемпературных отложений на деталях дизеля / К. В. Шаталов, М. Д. Прокопцова, Д. А. Уханов, И. Ф. Адгамов // Вестник Технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 99–106. – DOI 10.55421/1998-7072_2025_28_1_99.

14. Кузин Е. Г. Предиктивное управление техническим состоянием горных транспортных машин / Е. Г. Кузин // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 1(165). – С. 41–49. – DOI 10.26730/1816-4528-2023-1-41-49.

15. Путинцев С.В. Обоснование и направление конструкционной адаптации поршневого двигателя к смазыванию энергосберегающим сверхмаловязким моторным маслом / С.В. Путинцев, С.П. Деменкова // Двигателестроение. – 2024. – № 4 (298). – С. 39–54. – EDN AYHUBL.

References

1. Sinyavskiy N.Ya., Bulychev A.G. Study of degradation of marine motor oils by IR Fourier spectroscopy. *Marine Intellectual Technologies*. 2023; 4-1: 72-78. (in Russian). DOI:

10.37220/MIT.2023.62.4.009

2. Jun Wang Online Monitoring of Automotive Engine Lubricating Oil Based on Internet of Things Technology. *Wireless Communications and Mobile* Computing. 2022; 20: 14-24.

3. Emrullah Hakan Kaleli Experimental investigation of the effect of tribological performance of reduced graphene oxide additive added into engine oil on gasoline engine wear. *Lubrication Science*. 2022; 3(16): 129-135.

4. Posyada A.S. Analysis of the components of cylinder oil of crosshead engines, the possibility of its regeneration and reuse. *Youth. Science. Innovations*. 2024; 1: 101-105. (in Russian).

5. Khimchenko A.V. Planning an experiment to determine the dependence of changes in the base number of motor oil on operational factors within one replacement period. *Science in Central Russia*. 2024; 5(71): 94-104. (in Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2024-5-94-104

6. Mohammad Maher Kallas Experimental Comparison of the Effect of Using Synthetic, Semi-Synthetic, and Mineral Engine Oil on Gasoline Engine Parts Wear. *Advances in Tribology*. 2024; 1(8): 87-95.

7. Yicong Xu Wear Condition Evolution of Cylinder Liner-Piston Ring on the Two-Stroke Marine Diesel Engine Through Long-Term Monitoring and Analysis of Cylinder Oil. *Lubrication Science*. 2025; 59: 107-113.

8. Remsha Moolat Compact microwave sensor for monitoring aging of oil and fuel adulteration. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2022; 32: 84-93.

9. Temerdashev Z.A. Determination of viscosity and detergent additives in synthetic motor oils by gel permeation chromatography. *Journal of Analytical Chemistry*. 2023; 78: 231-240. (in Russian). DOI: 10.31857/S0044450223030143

10. Khimchenko A.V. Prerequisites for the use of a digital twin to determine the limit state of motor oil or predict its residual life. *Science in Central Russia*. 2024; 3 (69): 148-160. (in Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-148-160

11. Baranitharan Paramasivam Investigation on emission, performance, and combustion distinctiveness of bael seed cake pyrolysis oil/nano biochar/diesel blend fuelled in a compression ignition engine. *Environmental Progress & Sustainable*. 2022; 41: 25-37.

12. Xingshan Chang Predicting steady degradation in ship power system: A deep learning approach based on comprehensive monitoring parameters. *IET Intelligent Transport Systems*. 2024; 18: 159-164.

13. Shatalov K. V., Prokoptsova M. D., Ukhanov D. A., Adgamov I. F. A method for assessing the propensity of engine oils to form low-temperature deposits on diesel engine parts. *Bulletin of the Technological University*. 2025; 28; 1. 99-106. (in Russian). DOI 10.55421/1998-7072_2025_28_1_99.

14. Kuzin E. G. Predictive management of the technical condition of mining transport vehicles. *Mining equipment and electromechanics*. 2023; 1; 165. 41-49. (in Russian). DOI 10.26730/1816-4528-2023-1-41-49.

15. Putintsev S.V., Demenkova S.P. Substantiation and direction of structural adaptation of a piston engine to lubrication with energy-saving ultra-viscous engine oil. *Engine building*. 2024; 4; 298. 39-54. (in Russian). EDN AYHUBL

Kudrevatykh A.V., Shalkov A.V.

ENGINE OIL DEGRADATION MONITORING AND ENGINE LIFE PREDICTION CAPABILITIES OF DUMP TRUCK ENGINES

Abstract. *The main role of motor oil is to protect engine parts from damage caused by*

friction, wear, corrosion, deposits, and oxidation, while ensuring the expected fuel economy and efficient operation of the entire power unit. However, the process of oil degradation is continuous and inevitable, so monitoring the condition of lubricants provides valuable information about both their performance and the condition of the engine as a whole. In this regard, the article discusses various approaches to monitoring engine oil degradation, the results of which allow decisions to be made regarding adjustments to the engine maintenance process and the need for preventive measures. The study proposes a real-time motor oil monitoring system based on IoT. The main difference between the author's methodology and many other systems is its hybrid neural network architecture and deep integration with the IoT platform, while many other systems are limited to threshold values or simple regression models. The developed methodology allows processing data on the physicochemical properties of lubricants, on the basis of which it is possible to predict changes in the state of the "lubricating oil - engine" system in dynamics.

Keywords: *oil, engine, degradation, analysis, repair, sensor.*

Сведения об авторах:

Кудреватых Андрей Валерьевич
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Кемерово, Россия,
заведующий кафедрой эксплуатации автомобилей,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kav.ea@kuzstu.ru

Шальков Антон Владимирович
филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в г. Прокопьевске, Прокопьевск, Россия,
старший преподаватель кафедры информационных технологий, машиностроения и автотранспорта,
e-mail: prk-s@yandex.ru

Information about the Authors

Kudrevatykh Andrey Valerievich
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev", Kemerovo, Russia,
Head of the Department of Car Operation,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: kav.ea@kuzstu.ru

Shalkov Anton Vladimirovich
Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev" in Prokopyevsk, Prokopyevsk, Russia,
Senior Lecturer at the Department of Information Technologies, Mechanical Engineering, and Motor Transport,
e-mail: prk-s@yandex.ru

УДК 656.137

Ахунова И.Б., Мамсиров Н.И., Галинская Н.Н.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Аннотация. *В данной работе рассматриваются эффективные методы использования автотранспортных средств применительно к сфере сельского хозяйства. Планирование работы транспортных предприятий и организаций сельского хозяйства в современной экономической среде ставит своей целью доставку грузов с минимальными логистическими затратами. Выявлены особенности перевозки сельскохозяйственных грузов (зерновых культур - озимая пшеница) с позиции логистического подхода. Указываются характеристика и свойства зерновых культур для эффективной организации их перевозки. В статье приводится разработка транспортно-логистической схемы рациональной организации перевозки озимой пшеницы на примере хозяйствующего субъекта. Решается задача эффективного использования транспортной техники по методу «донаращивания» кузовных бортов. Предложены инновационные методы повышения эффективности автомобильных перевозок при выполнении планируемого объема перевозки пшеницы.*

Ключевые слова: *зерновые культуры, сельское хозяйство, озимая пшеница, эффективность, логистика, перевозка, автомобильный транспорт, производительность.*

Постановка задачи

Автомобильный транспорт в прошлом и настоящем занимает основную роль в развитии всех отраслей народного хозяйства, в том числе в производстве и реализации сельскохозяйственной продукции. Автомобильная перевозка различной номенклатуры сельскохозяйственных грузов имеет ярко выраженный сезонный характер, отличается неравномерностью спроса, и характеризуется многочисленными изменениями материальных потоков в пространстве и во времени с прямыми и обратными связями. Одним из факторов повышения показателей работы автомобильного транспорта применительно к отрасли сельского хозяйства является эффективное планирование перевозок [1,2]. Планирование автомобильных перевозок зерновых культур является необходимым условием для слаженной работы транспортных и сельскохозяйственных предприятий, требует их четкого взаимодействия. Организация любого производственного процесса, особенно транспортного, требует согласованности в действиях всех его участников. Эффективное планирование автотранспортных перевозок требует учета объемов, сроков, маршрутов и логистических затрат в целях оптимизации производства. Разделение планирования деятельности автотранспортных предприятий на текущее (оперативное), среднесрочное (тактическое) и стратегическое (бизнес-планирование) позволяет гибко и комплексно управлять транспортными и сопутствующими логистическими процессами, адаптируясь к сезонным колебаниям и динамичным изменениям в цепочках поставок сельхозпродукции. Такой

многоуровневый подход обеспечивает согласованность действий всех участников логистической сети, повышает эффективность использования ресурсов и, в конечном счете, способствует надежному и рентабельному обеспечению агропромышленного комплекса транспортными услугами.

Анализ последних исследований

Методология эффективного использования автотранспортных средств/ погрузочно-разгрузочной техники и повышения их производительности при перевозках сельскохозяйственных грузов основывается на принципах логистики: правильном выборе транспортных средств/техники по соответствию экономичности и экологичности; разработке алгоритма построения оптимального маршрута движения подвижной техники в указанный пункт назначения; эффективности логистики полного цикла с минимальными затратами, обеспечением безопасности и сохранением качества перевозимой продукции [3,4,5]. Синергетический подход в оптимизации логистического процесса перевозки зерновых культур позволяет снизить общие транспортные издержки, ускорить перевозку и повысить качество оказываемых услуг.

Зерновые культуры, к которым относится озимая пшеница, – это сыпучий груз, который относится к первому классу насыпных грузов по грузоподъемности. Перевозка такого вида зерновых культур требует срочности в сжатые сроки, соблюдая особые санитарные и температурные условия. Согласно транспортной классификации грузов, физико-химические свойства озимой пшеницы связаны с сыпучестью, пористостью, способностью впитывать влагу, «дышать» и самосогреваться, что требует правильной организации перевозки и хранения [6].

Наибольшие объемы перевозки пшеницы приходятся на ее пик и, если обратиться к отчетам хозяйств районов республики, приходится на июль-август месяц. Перевозка зерновых распределена на все время уборки. При организации перевозки зерна используется автомобильный транспорт. Логистическая цепочка строится по следующему принципу: от комбайна на ток, с тока на элеватор. На каждом этапе логистики перевозки к автомобильному транспорту предъявляются свои особые требования. Так, например, перевозка от комбайна на ток определяется календарным графиком уборки зерновых культур и ритмом работы комбайнов. Организация перевозки с тока на элеватор выполняется партиями согласно времени просушки и подготовкой к перевозке. Перевозка зерновых культур может осуществляться прямым комбинированием или трехзвенным способом. Наиболее перспективной является трехзвенная технология: «бункер-комбайн-перегрузчик зерна» [7]. Увеличивается производительность комбайнов до 30 %, разрывается жесткая связь «комбайн - транспортное средство», снижаются простои. На практике, в основном, уборка зерна производится комбайном, который загружает собранный урожай в свой бункер и уже из него заполняет специализированный бортовой автомобиль-самосвал. В этом случае специализированная техника подвозит собранный урожай к краю поля для выгрузки его в кузов грузового автомобиля. Такая логистическая схема транспортного процесса эффективна с точки зрения снижения негативного антропогенного воздействия автотранспорта на почву, не разрушая ее структуру и не вызывая увеличения затрат энергии на ее последующую обработку [8,9]. Выбор уборочно-транспортной технологии зерновых культур должен быть основан на экономическом и экологическом критериях.

Цель работы

Цель настоящей работы заключается в разработке эффективной организации транспортного процесса перевозки зерновых культур автомобильным транспортом с

целью снижения логистических затрат и повышения производительности автотранспортных средств.

Основная часть

Республика Адыгея относится к аграрному типу регионов, где ключевыми направлениями экономического роста выступают растениеводство и животноводство. Растениеводство специализируется на выращивании зерновых, плодово-ягодных и технических культур, тогда как животноводство ориентировано на производство мяса, молока и продукции птицеводства. При этом, на долю растениеводства приходится 60%, а на долю животноводства — 40% от общего объема сельскохозяйственной продукции. В регионе реализуется региональный проект «Создание системы поддержки фермеров и развитие сельской кооперации в Республике Адыгея», разработанный в соответствии с федеральным проектом «Создание системы поддержки фермеров и развитие сельской кооперации». Производство и реализацию сельскохозяйственной продукции невозможно представить без транспорта, который участвует во всех звеньях логистической цепи поставок. Автомобильный транспорт, и он единственный в данной цепочке, способствует формированию эффективных взаимоотношений сельхозпроизводителей с другими отраслями экономики народного хозяйства, оказывает значительное влияние на развитие предпринимательства и рынок сельхозпродукции, сырья и продовольствия. Взаимоотношения транспортных предприятий Республики Адыгея с сельскохозяйственными организациями и фермерскими хозяйствами происходят на краткосрочной договорной основе, в части выполнения целого комплекса логистических операций, включая транспортировку зерновых культур. Эти отношения носят партнерский характер, где предприятия автомобильного транспорта предоставляют услуги по доставке и транспортировке, а сельхозпроизводители являются их заказчиками, формируя потребность в специализированных транспортных решениях для своевременной и безопасной перевозки собранного урожая и поставок материалов/комплектующих.

В данном исследовании выбрано сельскохозяйственное предприятие по выращиванию зерновых культур, расположенное в Гиагинском районе Республики Адыгея. Рассмотрим логистику организации перевозки пшеницы автомобильным транспортом от поля до потребителя. Потребителем транспортных услуг может быть любое зернохранилище, мельничный комплекс, элеватор, завод по переработке зерновых культур. В данном реальном примере перевозка пшеницы организуется с поля (ИП) до основного потребителя - элеватор. Загрузка зерна производится по методу «прямого комбайнирования». Бункер комбайна заполняется зерном, которое в дальнейшем перегружается в специализированный бортовой автосамосвал КАМАЗ. От места уборки сельскохозяйственной продукции до места хранения (переработки) доставить груз можно только по одному маршруту, протяженностью 28,8 км и с асфальтовым покрытием (рисунок 1).

Строим маршрут перевозки автомобильным транспортом: (поле, принадлежащее индивидуальному предпринимателю) до накопительного пункта (элеватор) в станице Дондуковской. Пробег автомобиля на маршруте «поле – зернохранилище – поле» составляет 57,6 км. Пробег автомобиля с грузом – 28,8 км. Движение осуществляется в сложных дорожных и полевых условиях (рисунок 2, 3).

Возможна перевозка на близлежащие элеваторы или временные зернохранилища (ток). Разработанная технологическая схема представлена на рисунке 4.

а) б)

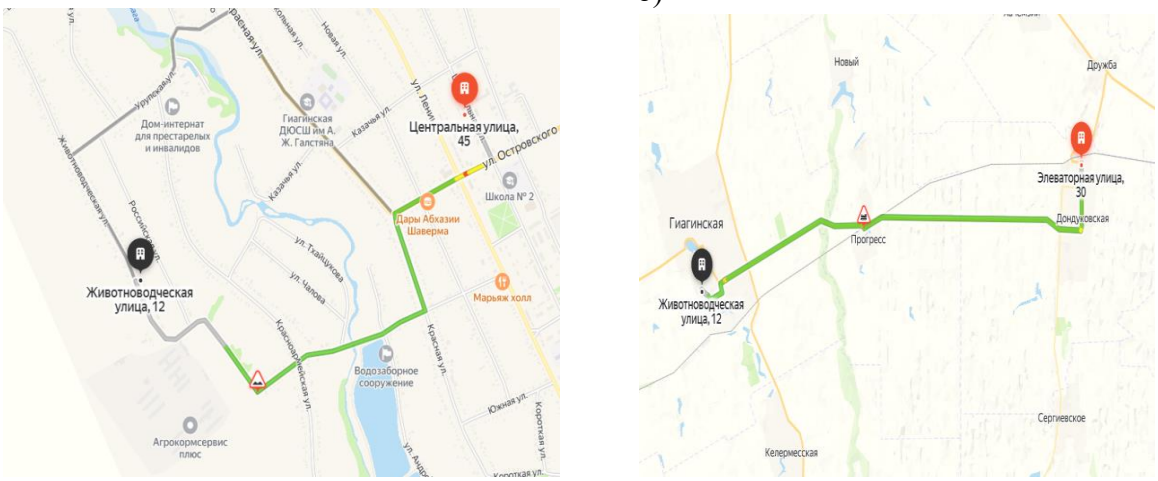


Рисунок 1. Транспортные пути для осуществления доставки зерна от места сбора до места хранения озимой пшеницы: а) АТП- поле; б) поле - элеватор

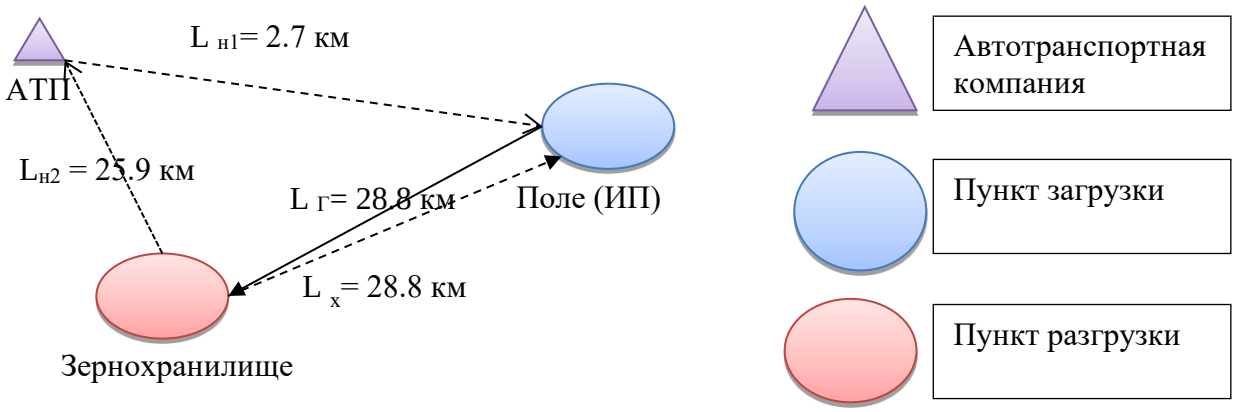


Рисунок 2. Маршрут движения автотранспорта по схеме «поле – элеватор»

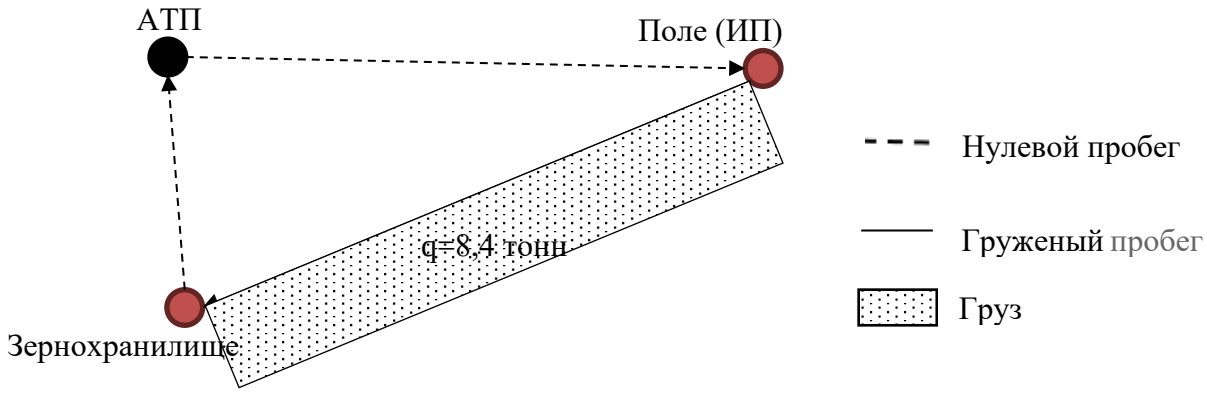


Рисунок 3. Эпюра ездки с грузом

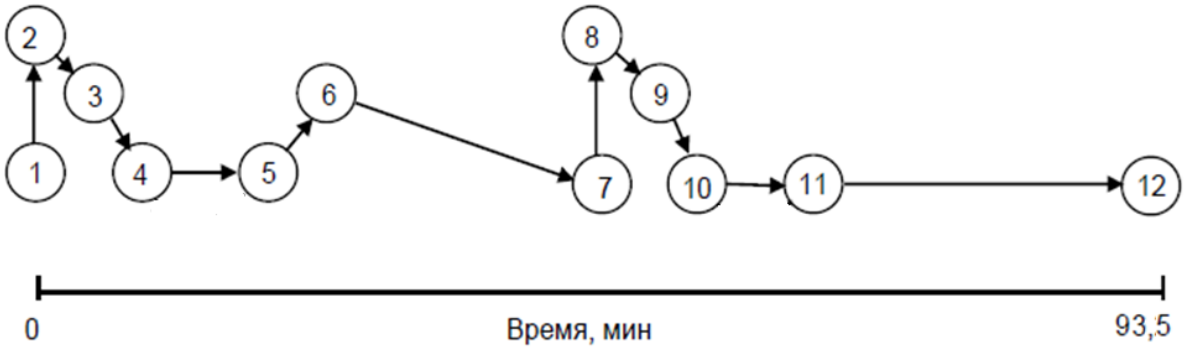


Рисунок 4. Технологическая схема перевозки зерна

На основании технологической карты вычисляется примерный объем грузов Qj по цепочке доставки груза (озимой пшеницы). Расчеты выполняются по общепринятой методике определения объема транспортных работ (в тонно-километрах) с учетом площади возделывания зерновых культур (Si), среднего значения урожайности (Yi) и коэффициента повторности перевозок для сельскохозяйственных грузов (K):

$$P=Si\times Yi\times K\times li \quad (1)$$

где li – расстояние от места сбора урожая до места хранения или переработки, км.

Технологический процесс перевозки сельскохозяйственных грузов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Технологический процесс перевозки сельскохозяйственных грузов (пшеница)

Этап операции	Наименование работы	Продолжительность, мин.
1-2	Ожидание погрузки	0
2-3	Маневрирование автомобиля	1
3-4	Подготовительные работы	1,5
4-5	Погрузка автомобиля	14
5-6	Закрепление тента	4
6-7	Перевозка	32
7-8	Ожидание разгрузки	0
8-9	Маневрирование	1
9-10	Подготовка к разгрузке	4
10-11	Разгрузка автомобиля	4
11-12	Подача подвижного состава под погрузку комбайна, обратный рейс	32
Итого		93,5 (1 час.33 мин.)

При перевозке пшеницы от места сбора до мест хранения и переработки на расстояние 28,8 км самосвал марки КамАЗ 65115 за время пребывания в наряде выполняет 6 рейсов, при этом фактически время работы составляет 7 часов, что на 1 час меньше времени наряда. Расчетная производительность в час составляет 8,4 тонн,

грузооборот составит 241,92 тонн/км/час. Номинальная грузоподъемность автомобиля данной марки и модели составляет 15 тонн, фактически масса перевозимого груза составляет 8,4 т (что соответствует загрузке транспортного средства на 72,2 %). Расчетные показатели транспортных работ приведены в таблице 2.

Значительно повысить производительность и эффективность перевозки зерна и всех видов сельскохозяйственных культур возможно при регулярном техническом поддержании транспортных средств, правильном планировании маршрутов, обучении персонала и внедрении новых технологий перевозки и мониторинга транспортного процесса. Использование инструментов и технологий цифровизации в области автомобильных перевозок направлено на повышение эффективности и прозрачности логистических процессов, что включает: электронный документооборот выполнения транспортной операции, автоматизация погрузочно-разгрузочных процессов, «умные» транспортные решения в логистике сельского хозяйства. Внедрение этих технологий (с точки зрения экономической эффективности) позволит сократить сроки доставки зерна и других культур на 15-25%, уменьшить расход топлива при доставке до 20%, повысить сохранность сельскохозяйственного груза и прозрачность транспортно- логистических операций от места производства до конечного потребителя.

Таблица 2

Расчетные показатели транспортных работ

Культура	Объем перевозки груза, тонн/рейс	Коэфф-т повторности, К	Р, т-км	Расстояние перевозки, км
Пшеница	8,4	2,5	241,92	28,8

Для повышения эффективности автомобильных перевозок зерновых культур необходимо правильно организовать транспортно-логистический процесс, включая подготовку и погрузку груза, перевозку, разгрузку [10,11,12]. Процесс подготовки производства предопределяет следующие этапы: что и куда перевозим, когда перевозим, в каких условиях и с какими средствами. Рациональное использование транспортных средств зависит от правильно организованной совместной работы уборочной техники и автомобильного транспорта с учетом объемов бункеров и кузовов грузовых автомобилей. Одним из наиболее эффективных и экономичных способов повышения грузоподъемности подвижного состава при выполнении сезонных зерноуборочных работ является конструктивная доработка кузова - а именно, «донаращивание» его бортов [13]. Законность такой технологии обеспечивается дальнейшей процедурой регистрации обновленной конструкции кузова грузового автомобиля в Госавтоинспекции. При этом условиями ограничения считается максимальная высота наращиваемых бортов, которая ограничивается высотой разгрузочных устройств транспортно-уборочной техники, соблюдение требований безопасности движения автотранспортных средств с грузом в «полевых» условиях и по сельским дорогам, учет риска перегруза и нагрузки на ось, а также технические условия устойчивости транспортного средства.

За счет применения наращенных бортов увеличится объемная масса груза (грузовместимость) и производительность автотранспортных средств. По результатам расчетов технико-эксплуатационных показателей для автосамосвала КАМАЗ (с увеличенным объемом кузова) возможно увеличение объема перевозимой пшеницы в

кузове до 10,2 тонны [14,15]. Грузовместимость автомобиля, которая зависит от его технических характеристик, объема/формы кузова, при перевозке пшеницы составит на уровне 10 тонн.

Представим результат проведенных расчетов объема перевозимой пшеницы в кузове автосамосвала на диаграмме 5.

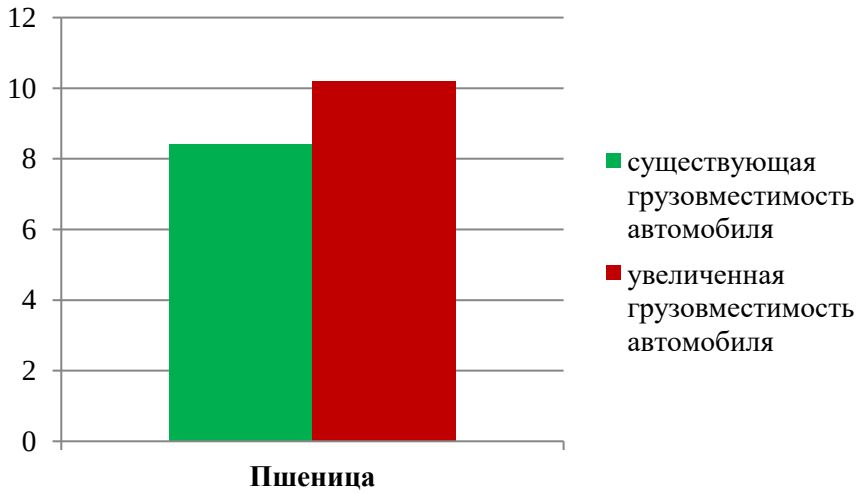


Рисунок 5. Объемный показатель грузовместимости автосамосвала КамАЗ 65115, тонн/час

Выводы

Результаты показали, что применение метода «донаращивания автомобильных бортов» позволяет увеличить объемную грузовместимость кузовной платформы задействованного в специализированной перевозке автомобиля, что значительно отразится на результатах работы перевозчика, сельхозпроизводителя и, в целом, на эффективности транспортно-логистического процесса. Помимо наращивания бортов кузова, существуют и другие эффективные методы повышения производительности и рентабельности автомобильного грузового парка при перевозке сельскохозяйственных грузов различной номенклатуры, которые можно классифицировать по нескольким направлениям.

1. Технические и технологические решения. Один из самых распространенных способов увеличения производительности грузового автомобиля в сезонной перевозке груза – это использование прицепов и полуприцепов, установка самосвальных систем, зерновозов с системой пневморазгрузки, а также применение контейнеров-цистерн. Внедрение систем мониторинга сельскохозяйственной и транспортной техники в реальном времени, оснащение средствами телематики также позволяет отслеживать местоположение, расход топлива, режим работы водителя и простои.

2. Организационно-управленческие методы. Использование специального программного обеспечения для построения маршрутов позволяет учитывать дорожную ситуацию, весогабаритные ограничения, график работы пунктов разгрузки, что минимизирует холостые пробеги. Синхронизация работы транспорта и погрузочной техники, организация сквозной технологии «от поля до элеватора» без лишней перегрузки позволяет сократить общее время логистического цикла перевозки.

3. Подготовка квалифицированного кадрового состава для выполнения современных задач транспортной логистики в сфере доставки грузов сельскохозяйственного назначения.

Список литературы

1. Developing the method of rational trucking routing based on the modified ant algorithm / N. Khalipova, A. Pasichnyk, I. Lesnikova [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 1, No. 3(91). – P. 68-76. – DOI 10.15587/1729-4061.2018.123862.

2. Бондарева, Т.В., Ахунова, И.Б. Эффективное использование автомобильного транспорта в деятельности сельскохозяйственного предприятия по производству комбикормов //Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Сборник докладов по Материалам Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), 8-10 ноября 2023 года. – Майкоп: изд-во «Магарин О.Г.», 2023. – с. 89- 93.

3. Using the wave algorithm for optimal route construction / K. Zhigalov, E. Klochkova, T. Ya. Druzhinina [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1111, No. 1. – P. 012019. – DOI 10.1088/1757-899x/1111/1/012019. – EDN HNBZCZ.

4. Overview of algorithms for finding the optimal route for vehicles / J. V. Mahovikova, S. N. Mironenko, A. V. Devjatkov, J. I. Shamlitskiy // T-Comm. – 2020. – Vol. 14, No. 2. – P. 52-56. – DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-2-52-56.

5. Балан, Д.А., Ахунова, И.Б. Транспортная логистика в системе управления автомобильными грузоперевозками //Научный журнал «Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта», №3 – 2023. с.24-28.

6. Агешкина, Н.А. Грузоведение (наземный транспорт) : учебник / Н.А. Агешкина. - Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2019. - 318 с. - ЭБС IPR Books. - URL: https://www.iprbookshop.ru/80363.html- Режим доступа: по подписке.

7. Кожуховская, Л. Я. Задачи повышения эффективности перевозки сельскохозяйственной продукции автомобильным транспортом / Л. Я. Кожуховская, А. А. Диков // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2020. – № 3(42). – С. 215-218. – EDN PTTQFM.

8. Голдина, И. И. Особенности грузоперевозок в сельском хозяйстве / И. И. Голдина, Г. А. Иовлев // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. – 2023. – № 1(17). – С. 44-51. – EDN KZCGZN.

9. Moving freight with better trucks : research report / Intern. transport forum. – Paris : OECD, 2011. – 356 p. – ISBN 978-92-821-0293-0. – EDN QNXTLH.

10. Зачесов, А. В. Транспортная логистика и организация перевозок : учебное пособие / А. В. Зачесов, С. В. Бунташова. — Новосибирск : Сибирский государственный университет водного транспорта, 2022. — 196 с. — ISBN 978-5-8119-0925-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/148831.html

11. Ахунова И.Б., Мамсиров Н.И. Маркетинговые методы исследования в эффективной реализации фермерской продукции //БИОТЕХНОЛОГИЯ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 25-летию со дня основания факультета биотехнологии (Часть 1). – Владикавказ: изд-во ФГБОУ ВО «Горский госагроуниверситет», 2023. –с. 85-88.

12. Совершенствование использование автомобильного транспорта на уборке урожая / Ф. Н. Мухаметгалиев, М. М. Низамутдинов, М. М. Хисматуллин [и др.] // Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры: материалы III Международной научно-практической конференции. - Казань, 2021. - С. 17-24.

13. Есин, К. С. Методика выбора подвижного состава при уборке зерновых культур / К. С. Есин, А. Л. Севостьянов // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 2(41). – С. 95-102.

14. Степашкина, А. С. Повышение эффективности использования автотранспортных средств за счет увеличения номинального объема кузова при выполнении зерноуборочных работ / А. С. Степашкина // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 122-128. – DOI 10.36508/RSATU.2021.50.2.017

15. Пехутов, А.С. и [др.] Графическая и аналитическая модель транспортного процесса в сельском хозяйстве // Вестник ВСГУТУ. 2022. № 2(85). С. 49–55.

References

1. Khalipova, N., Pasichnyk, A., Lesnikova, I. et al. Developing the method of rational trucking routing based on the modified ant algorithm. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018, Vol. 1, No. 3(91), pp. 68-76. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123862.

2. Bondareva, T.V., Akhunova, I.B. Efficient use of road transport in the activities of an agricultural enterprise for the production of compound feed. *Agrarian Science and Education at the Modern Stage of Development: Experience, Problems and Solutions: Collection of Reports Based on the Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference (with International Participation), November 8-10, 2023*. Maykop: O.G. Magarin Publishing House, 2023, pp. 89-93. (In Russ.)

3. Zhigalov, K., Klochkova, E., Druzhinina, T.Ya. et al. Using the wave algorithm for optimal route construction. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, Vol. 1111, No. 1, p. 012019. DOI: 10.1088/1757-899x/1111/1/012019. EDN: HNBZCZ.

4. Mahovikova, J.V., Mironenko, S.N., Devjatkov, A.V., Shamlitskiy, J.I. Overview of algorithms for finding the optimal route for vehicles. T-Comm. 2020, Vol. 14, No. 2, pp. 52-56. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-2-52-56.

5. Balan, D.A., Akhunova, I.B. Transport logistics in the road freight management system. Scientific Journal "Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport", 2023, No. 3, pp. 24-28. (In Russ.)

6. Ageshkina, N.A. Cargo Science (Land Transport): Textbook. Saratov: IPR Media, 2019. 318 p. IPR Books EBS. URL: https://www.iprbookshop.ru/80363.html (Accessed: Subscription access). (In Russ.)

7. Kozhukhovskaya, L.Ya., Dikov, A.A. Problems of increasing the efficiency of agricultural products transportation by road. Technical Regulation in Transport Construction. 2020, No. 3(42), pp. 215-218. EDN: PTTQFM. (In Russ.)

8. Goldina, I.I., Iovlev, G.A. Features of freight transportation in agriculture. Scientific and Technical Bulletin: Technical Systems in the Agro-Industrial Complex. 2023, No. 1(17), pp. 44-51. EDN: KZCGZN. (In Russ.)

9. Moving Freight with Better Trucks: Research Report. International Transport Forum. Paris: OECD Publishing, 2011. 356 p. ISBN 978-92-821-0293-0. EDN: QNXTLH.

10. Zachesov, A.V., Buntashova, S.V. Transport Logistics and Transportation Management: Textbook. Novosibirsk: Siberian State University of Water Transport, 2022. 196 p. ISBN 978-5-8119-0925-4. URL: https://www.iprbookshop.ru/148831.html (In Russ.)

11. Akhunova, I.B., Mamsirov, N.I. Marketing research methods for the effective sale of farm products. *BIOTECHNOLOGY IN THE MODERN WORLD. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 25th Anniversary of the Faculty of Biotechnology (Part 1)*. Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University Publishing House, 2023, pp. 85-88. (In Russ.)

12. Mukhametgaliev, F.N., Nizamutdinov, M.M., Khismatullin, M.M. et al. Improving the use of road transport during harvesting. Agriculture and Food Security: Technologies, Innovations, Markets, Personnel: Materials of the III International Scientific and Practical Conference. Kazan, 2021, pp. 17-24. (In Russ.)

13. Esin, K.S., Sevostyanov, A.L. Methodology for selecting vehicles for harvesting grain crops. World of Transport and Technological Machines. 2013, No. 2(41), pp. 95-102. (In Russ.)

14. Stepashkina, A.S. Increasing the efficiency of using motor vehicles by increasing the nominal body volume during grain harvesting. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2021, Vol. 13, No. 2, pp. 122-128. DOI: 10.36508/RSATU.2021.50.2.017. (In Russ.)

15. Pekhutov, A.S. et al. Graphic and analytical model of the transport process in agriculture. Bulletin of VSTU. 2022, No. 2(85), pp. 49-55. (In Russ.)

Akhunova I.B., Mamsirov N.I., Galinskaya N.N.

METHODS OF INCREASING THE PRODUCTIVITY AND EFFICIENCY OF USING MOTOR VEHICLES IN TRANSPORTING GRAIN CROPS

Abstract*. This paper examines effective methods for using motor vehicles in agriculture. In today's economic environment, the goal of planning the operations of transport companies and agricultural organizations is to deliver cargo with minimal logistics costs. The specifics of transporting agricultural cargo (grain crops, such as winter wheat) are identified from a logistics perspective. The characteristics and properties of grain crops for efficient transportation are outlined. The article presents the development of a transport and logistics scheme for the rational organization of winter wheat transportation using the example of a business entity. The problem of efficient use of transport equipment using the "extended" method of truck bed extensions is addressed. Innovative methods for improving the efficiency of road transportation while meeting the planned volume of wheat transportation are proposed.*

Keywords*: grain crops, agriculture, winter wheat, efficiency, logistics, transportation, road transport, productivity.*

Сведения об авторах:

Ахунова Инна Бислановна
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет», Майкоп, Россия
доцент кафедры автомобильного транспорта
кандидат экономических наук, доцент
e-mail: inna0116@mail.ru

Мамсиров Нурбий Ильясович
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет», Майкоп, Россия
заведующий кафедрой технологии производства сельскохозяйственной продукции
доктор сельскохозяйственных наук, доцент.
E-mail: nur.urup@mail.ru

Галинская Наталья Николаевна
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет», Майкоп, Россия
доцент кафедры маркетинга, сервиса и туризма
кандидат экономических наук
e-mail: natgal76@rambler.ru

Information about the authors:

Akhunova Inna Bislanovna
Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Maikop State Technological University", Maikop, Russia
Associate Professor, Department of Road Transport
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
e-mail: inna0116@mail.ru

Mamsirov Nurbiy Ilyasovich
Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Maikop State Technological University", Maikop, Russia
Head, Department of Agricultural Production Technology
Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor
E-mail: nur.urup@mail.ru

Galinskaya Natalya Nikolaevna
Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Maikop State Technological University", Maikop, Russia
Associate Professor, Department of Marketing, Service and Tourism
Candidate of Economic Sciences
e-mail: natgal76@rambler.ru

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 656.1/.1

Донченко В.В., Шестопалов А.Г., Калакутин П.С., Морозов С.А.

МЕХАНИЗМЫ ФИНАНСИРОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ: ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОССИЙСКИХ УСЛОВИЯХ (ЧАСТЬ 2. МЕХАНИЗМЫ ПРИВЛЕЧЕНИЯ СРЕДСТВ ДЛЯ ФИНАНСИРОВАНИЯ ПТОП И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ О ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЗАРУБЕЖНОГО И ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОПЫТА ФИНАНСИРОВАНИЯ ПТОП В УСЛОВИЯХ РОССИИ)

Аннотация. *Во второй части работы рассмотрены используемые в Российской Федерации подходы к привлечению средств для организации финансирования городского пассажирского транспорта общего пользования (ПТОП). Представлен сопоставительный анализ затрат на приобретение подвижного состава ПТОП с использованием различных механизмов: механизмов лизинга, казначейского инфраструктурного кредита, инфраструктурных облигаций и механизма финансирования через национальный проект «Экологическое благополучие». Даны предложения по текущим и перспективным задачам совершенствования механизмов финансирования городского пассажирского транспорта общего пользования на основе анализа отечественного и передового зарубежного опыта.*

Ключевые слова*: городской пассажирский транспорт общего пользования, механизмы финансирования, привлечение средств, лизинг, казначейский инфраструктурный кредит, инфраструктурные облигации, государственно-частное партнерство.*

Постановка задачи

Пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) является важнейшей устойчивой альтернативой использованию личного автотранспорта для поездок в городах. В то же время, одной из серьезнейших проблем развития и обеспечения функционирования ПТОП в настоящее время продолжает оставаться недостаток выделяемых на эти цели финансовых средств. Одним из направлений решения данной проблемы, помимо рассмотренных в первой части статьи, является использование различных механизмов привлечения в транспортные проекты средств государственного и частного капитала на возвратной основе. В этой связи интересен сопоставительный анализ различных подобных механизмов, используемых в настоящее время в Российской Федерации.

Анализ последних исследований

Вопросы привлечения средств для финансирования проектов в области развития транспортной инфраструктуры в российской практике рассматривались в последнее время рядом ученых-экономистов [1,2,3,4]. Однако следует отметить, что практически

все эти исследования были посвящены вопросам реализации механизмов ГЧП применительно к крупным инфраструктурным проектам в дорожном строительстве, строительстве объектов инфраструктуры воздушного, морского и железнодорожного транспорта. В то же время, поставленная Правительством задача обновления парка подвижного состава и инфраструктуры наземного городского пассажирского транспорта общего пользования, ставит вопрос о рассмотрении эффективности различных механизмов привлечения средств государственного и частного капитала в рамках подобных проектов.

Цель работы

Целью данной работы является анализ возможностей получения дополнительных источников финансирования развития и функционирования ПТОП на основе совершенствования структуры финансовых потоков, формируемых в сфере городского транспорта, и распределения собираемых средств с целью повышения устойчивости и эффективности транспортной деятельности в городах. Данная цель достигается путем анализа передовой отечественной и зарубежной практики в рассматриваемой сфере и рассмотрения возможностей применения передового опыта в российских реалиях**.**

Механизмы привлечения средств в проекты развития и совершенствования функционирования систем наземного городского пассажирского транспорта общего пользования

Одним из важных направлений решения проблем финансирования проектов в области пассажирского транспорта общего пользования является использование различных механизмов привлечения средств (бюджетных и частных инвесторов) на возвратной основе.

1. Государственно-частные партнерства (ГЧП). ГЧП является механизмом привлечения средств для реализации проекта, таким же образом, как и кредит, но который возлагает на кредитора (частный сектор) обязательства и ответственность за надлежащее выполнение проекта. Целью ГЧП, которое может принимать различные формы, является вовлечение частного сектора в первоначальные инвестиции и/или эксплуатацию проекта путем передачи доли риска частным партнерам, гарантируя при этом для привлечения инвесторов достаточно прибыльную организацию процесса (при необходимости посредством субсидий государственного сектора). В долгосрочной перспективе реальное финансирование поступает от пользователей и/или государственного сектора через продажу билетов и вознаграждение частного партнера, ответственного за погашение кредитов.

Многие проекты ГЧП в зарубежной практике касаются крупных проектов создания систем метро, LRT и BRT, требующих значительных объемов финансирования, которые государственным органам было бы трудно взять на себя в одиночку. Растущее во всем мире использование ГЧП в сфере городского транспорта доказывает, что этот механизм отвечает потребностям обоих партнеров: властей, ответственных за ПТОП, и частного сектора. Широкий спектр типов контрактов также показывает, что механизм ГЧП является гибким и может быть адаптирован к местным нормативным актам и институциональной культуре, а также к финансовым возможностям партнеров, но должны соблюдаться определенные общие требования к контрактам ГЧП.

2. Применение механизмов привлечения средств на проекты в области развития ПТОП в российской практике. Бюджетные источники городов и регионов и поступления от билетной выручки на текущий момент с трудом могут обеспечить необходимый уровень финансирования ПТОП. В подобных условиях города зачастую прибегают к использованию механизмов кредитования, лизинга и федеральному со-

финансированию. При этом необходимо понимать, что в условиях высокой ключевой ставки финальная стоимость объекта закупки (условно – стоимость использования этого механизма) может значительно превышать начальную цену.

2.1. Лизинг при участии Государственной транспортной лизинговой компании (ГТЛК)

Государственная транспортная лизинговая компания (ГТЛК), находясь в управлении Министерства транспорта РФ и Министерства финансов РФ, занимается реализацией программ лизинга подвижного состава ПТОП на льготных условиях с целью реализации государственной политики по модернизации и развитию транспортных систем и машиностроительного комплекса страны. В рамках данного механизма у городов и регионов появляется возможность обновления парка подвижного состава ПТОП на условиях финансового лизинга с субсидированием из федерального бюджета: часть начальной цены приобретаемого объекта софинансируется государством, что для покупателя трансформируется в скидку, и уже по ней начисляются лизинговые платежи по базовой рыночной ставке. У данного механизма уже есть опыт применения: так, в рамках национального проекта «Безопасные и качественные дороги (БКД)» в лизинг было передано 2292 единицы городского пассажирского транспорта общего пользования: 1805 автобусов, 417 троллейбусов, 70 трамваев [5].

2.2. Субсидирование и софинансирование в рамках национального проекта «Экологическое благополучие»

Целью национального проекта является сохранение и восстановление окружающей среды в целях улучшения экологического благополучия, в том числе в рамках мероприятий по снижению выбросов опасных загрязняющих веществ за счёт обновления парка подвижного состава. В состав нацпроекта входит федеральный проект «Чистый воздух», который предусматривает субсидирование закупки экологически чистого транспорта, в первую очередь электробусов, троллейбусов и трамваев. Также регионы смогут получить субсидии на строительство и ремонт троллейбусных линий, трамвайных путей и депо [6].

На текущий момент национальным проектом также предусмотрено со-финансирование мероприятий по лизинговой схеме, для городов, которые являются участниками данного проекта (а их немного – всего 43).

2.3. Казначейские инфраструктурные кредиты (КИК)

Казначейские инфраструктурные кредиты представлены в рамках национального проекта «Инфраструктура для жизни» как продолжение инфраструктурных бюджетных кредитов (ИБК) и специальных казначейских кредитов (СКК). Причём, если ИБК и СКК действуют с 2022 – 2023 года, то КИК в такой форме инструмент новый – он был представлен в 2025 году.

Основным преимуществом данных кредитов является льготная ставка в размере 3% годовых на срок до 15 лет. Данная ставка может быть увеличена до 6% если заёмная сторона не выполняет условия договора или не укладывается в установленные сроки. Сам кредит выплачивается с 3-года.

Так как сфера применения ИБК и СКК (и, логично предположить, что она будет похожа и для КИК) довольно широкая, то необходимо посмотреть на опыт применения данных механизмов именно в сфере ПТОП (рисунок 1) [7].



Рисунок 1. Сферы применения ИБК и СКК

В части ИБК большая часть кредитов выдавалась на инфраструктуру для объектов жилищного фонда (80%). На цели развития транспортной инфраструктуры было выдано 10% кредитов. Но важно не только количество выданных кредитов, но и объём выданных средств. Так, на поставку общественного транспорта в города и регионы за всё время было выдано 117,42 миллиарда рублей, что также составляет около 10% от всех выданных средств.

В части СКК на приобретение подвижного состава пассажирского транспорта общего пользования было выдано 50 миллиардов рублей, что составляет примерно четверть (26%) от общей суммы выданных кредитов.

2.4. Инфраструктурные облигации

Инфраструктурные облигации являются инструментом долгового финансирования, выпускаемым под гарантии государства или региона, для привлечения частных инвестиций в развитие жилищного строительства и городской инфраструктуры. В РФ данный механизм реализуется с участием государственного финансового института Дом.РФ. СОПФ (дочерняя компания Дом.РФ) привлекает финансирование за счет размещения облигаций под поручительство Дом.РФ по рыночной ставке, а затем СОПФ выдает займы под обеспечение юридическим лицам уже по льготной ставке. Финансирование может происходить как через дочерние общества субъекта, так и через частные компании в рамках концессии или ГЧП.

Точно так же, как и с КИК, этот механизм нацелен не только на развитие пассажирского транспорта общего пользования, но и на проекты в других сферах, в первую очередь – в сферах развития инженерной и социальной инфраструктуры. В части ПТОП существует всего три проекта: первый реализован частично (обновление троллейбусного парка в г. Чебоксары), а второй и третий находятся в стадии реализации (обновление троллейбусного парка в г. Челябинске и трамвайная линия в г. Санкт-Петербурге). Для сравнения: в сфере развития дорожной инфраструктуры имеется 7 проектов (4 реализованных и 3 в процессе реализации), а в сфере инженерных сетей – 17 проектов [8].

3. Сравнение механизмов привлечения средств на проекты в области ПТОП

Для сравнения эффективности рассмотренных выше механизмов привлечения средств для финансирования ПТОП следует оценить размер итоговой переплаты при выборе каждого из них. Возьмем в качестве расчётного транспортного средства односекционный трамвайный вагон 71-911ЕМ «Львёнок» с базовой стоимостью 83 миллиона рублей. Расчёты при использовании разных механизмов привлечения средств приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение итоговой стоимости приобретаемого подвижного состава при использовании различных механизмов привлечения средств

Механизм	Лизинг через ГТЛК		Казначейский инфраструктурный кредит	Инфраструктурные облигации	Национальный проект «Экологическое благополучие»
	Льготный (с субсидией)	Без субсидии			
Стоимость, включая скидку (при наличии)	49 800 000,00 ₽	83 000 000,00 ₽	83 000 000,00 ₽	83 000 000,00 ₽	49 800 000,00 ₽
Процентная ставка	26%	26%	3%	6%	26%
Максимальный срок, лет	7	7	15	15	5
Выплата за год	15 627 847,99 ₽	26 046 413,32 ₽	7 804 452,15 ₽	8 545 909,41 ₽	18 898 922,98 ₽
Итоговая стоимость	109 394 935,95 ₽	182 324 893,26 ₽	101 457 877,93 ₽	128 188 641,12 ₽	94 494 614,91 ₽
Итоговая переплата	26 394 935,95 ₽	99 324 893,26 ₽	18 457 877,93 ₽	45 188 641,12 ₽	11 494 614,91 ₽

Самым важными показателями являются значения итоговой стоимости приобретения подвижного состава и итоговой переплаты. Следует обратить внимание, что в случае применения механизма финансирования с использованием лизинга без льгот итоговая переплата за приобретение трамвайного вагона превышает базовую стоимость вагона. Если рассматривать более привлекательные с точки зрения переплаты механизмы, то можно заметить, что наиболее привлекательны механизмы с прямым федеральным софинансированием. Конечно, можно заметить довольно низкий показатель переплаты при использовании КИК, однако, как было сказано ранее, для данного механизма возможны трудности при его применении в сфере проектов ПТОП.

Безусловно, все эти механизмы более привлекательны чем закупка подвижного состава за счет «одномоментной выплаты», особенно если мы рассматриваем более реалистичный сценарий, когда требуется обновление хотя бы части парка подвижного состава (например – 10 вагонов), а не одного вагона. Но важно понимать, что сами по себе инструменты привлечения не решают проблемы недофинансирования сферы общественного транспорта в городах, а лишь частично позволяют снизить нагрузку на бюджеты.

4. Выводы и предложения

• В большинстве стран, как и в России, значительная зависимость пассажирского транспорта общего пользования от субсидий, выделяемых государством из общих бюджетных средств, приводит к неопределенности и непостоянству финансирования и может существенно повлиять на планирование и реализацию проектов в сфере ПТОП.

• В связи с этим важное значение имеют стабильные и предсказуемые механизмы финансирования, а также соответствующие стимулы к повышению эффективности работы систем ПТОП.

• Использование целевых налогов и сборов может помочь решить проблему устойчивости и достаточности финансирования ПТОП, обеспечив предсказуемый и стабильный источник средств. Существует четкая логика в том, чтобы направлять поступления от налогов на владение и использование транспортных средств и сборов с пользователей дорог на развитие общественного транспорта и активной мобильности.

• Целевые налоги на транспортные средства и пользователей дорог могут стать значительным дополнительным источником финансирования ПТОП. Однако поступления от целевых налогов не должны в значительной мере замещать поступления от оплаты проезда. Взаимоувязанное реформирование тарифной политики и использование части целевых налоговых поступлений на инвестиции в инфраструктуру и подвижной состав ПТОП могут снизить этот риск. Кроме этого, необходимы четкие правила целевого использования налогов в рамках более широкой стратегии финансирования общественного транспорта.

• Рассмотрение возможности введения новых целевых налогов/платежей должно рассматриваться и оцениваться в соответствии со стандартными критериями налогообложения независимо от ожидаемых выгод от целевого финансирования ПТОП. Это подразумевает отказ от налогов, которые вызывают значительные опасения по поводу их социальной приемлемости, эффективности или справедливости. При рассмотрении предложений относительно новых целевых налогов целесообразно использовать принцип фискальной нейтральности.

• Хотя введение любых новых налогов/платежей на владельцев автотранспорта (например, сборов за проезд на большие расстояния, сборов/платы за перегруженность УДС и др.) в российских условиях крайне проблематично и может вызвать значительную социальную напряженность, следует учитывать, что оно могло бы помочь обеспечить эффективное увеличение относительной стоимости перевозок личным автотранспортом по сравнению со стоимостью использования ПТОП. Это, в свою очередь, могло бы повысить привлекательность ПТОП по сравнению с личным автотранспортом и, таким образом, повысить доходы от билетной выручки.

• Обеспечение эффективной работы ПТОП снижает потребность в государственных субсидиях. Эффективность приобретает еще большее значение, учитывая все более заметную роль ПТОП в устойчивом и социально ориентированном развитии городских транспортных систем будущего. Для повышения эффективности систем городского ПТОП необходимы реформы в области развития инфраструктуры, совершенствование маршрутной сети и повышение качества предоставляемых услуг. Необходимо использовать современные подходы к измерению и оценке показателей эффективности систем ПТОП.

• Обоснованная тарифная политика может сделать финансирование со стороны пользователей (пассажиров) более эффективным и менее подверженным политическому влиянию. При разработке тарифной политики необходимо проведение широких консультаций с заинтересованными сторонами, особенно с пользователями ПТОП, что повысит приемлемость предлагаемых тарифов.

• В отличие от установления общих низких тарифов, использование целенаправленных льготных тарифов может обеспечить доступность ПТОП, сохранив и даже повысив величину общего дохода от взимания платы за проезд. Право на льготные тарифы должно основываться в первую очередь на потребностях (т.е. на уровне дохода), а не на принадлежности к определенным социальным группам.

• Учитывая значительное увеличение стоимости земли, создаваемое проектами в области развития систем ПТОП, такое увеличение стоимости могло бы стать эффективным и справедливым источником их дополнительного финансирования. В случаях, когда косвенные бенефициары проектов в области развития ПТОП вносят свой вклад в инвестиционные затраты, это также может сделать такие проекты более привлекательными для финансирования. Однако значительные различия в сроках, размерах и распределении эффектов от увеличения стоимости земли в результате инвестиций в ПТОП означают, что подходы к использованию земель могут быть различными.

• Механизмы привлечения средств для финансирования ПТОП более привлекательны чем закупка подвижного состава за счет одномоментной выплаты его полной стоимости, особенно если мы рассматриваем более реалистичный сценарий, когда требуется обновление хотя бы части парка подвижного состава. Но важно понимать, что сами по себе инструменты привлечения средств на возвратной основе не решают проблемы недофинансирования сферы общественного транспорта в городах, а лишь частично позволяют снизить нагрузку на бюджеты.

• Региональным и местным органам власти следует определить масштабы и характер изменений в инвестиционных приоритетах, необходимых для решения задач, вытекающих из национальных целей, установленных Указом Президента. Им следует рассмотреть возможность перераспределения инвестиционных расходов на городскую дорожную инфраструктуру на основе реалистичных прогнозов объемов дорожного движения, соответствующих поставленным национальным целям. Эта задача должна сопровождаться определением потребностей в инвестициях в систему ПТОП и развитие активной мобильности.

• Конечно, введение рассмотренных механизмов финансирования часто требует изменений в законодательстве, и это может быть связано с целым рядом трудностей. Например, введение нового налога всегда является непопулярной мерой, особенно для местных жителей, которые не пользуются транспортной инфраструктурой. Трудности с получением общественной поддержки часто удерживают политиков от голосования за такие меры, которые требуют консенсуса.

• Возможно, на данном этапе наиболее реализуемым решением в российских условиях в части поддержки дополнительного финансирования ПТОП могло бы являться внесение дополнений в Статью 179.4 Бюджетного Кодекса РФ, предусматривающих выделение определенной доли (например, 10-12%) средств дорожных фондов на финансирование ПТОП. Такое решение аналогично практике, принятой в США - «Закон о фиксированном наземном транспорте Америки» (FAST) (Fixing America’s Surface Transportation Act) 2008 года разрешил расходовать часть средств Дорожного трастового фонда (Highway Trust Fund) на общественный транспорт.

• Подобное решение безусловно оправдано в городах и городских агломерациях – здесь переключение перевозок с личного автотранспорта на ПТОП существенно снижает нагрузку на улично-дорожную сеть, снижает ее перегруженность и износ. Что, в свою очередь, снижает потребности в инвестициях в дорожную инфраструктуру (рис.2).

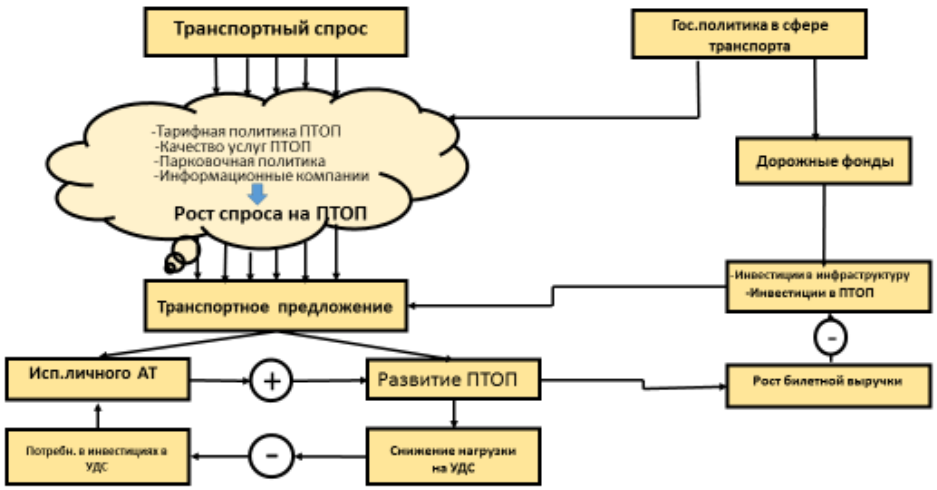


Рисунок 2. Общая структура предлагаемого перераспределения потоков финансирования ПТОП

Список литературы

1. Фрейдина, И. А. Финансовое обеспечение реализации транспортных инфраструктурных проектов : специальность 08.00.10 "Финансы, денежное обращение и кредит" : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Фрейдина Ирина Александровна, 2020. – 191 с. – EDN BIIQSF.

2. Качкин Д., Арутюнян Л. Оценка перспектив развития ГЧП в городском наземном рельсовом транспорте. Адвокатское бюро «Качкин и партнеры», СПБ, 2019 (https://www.kachkin.ru/wp-content/uploads/2019/10/kachkin_tram_2019_fin_web.pdf).

3. Соколов, М. Ю. Эффективность применения государственно-частного партнерства в сфере транспорта / М. Ю. Соколов // ГЧП в сфере транспорта: модели и опыт - 2015 : Сборник тезисов докладов конференции, Санкт-Петербург, 20 мая 2015 года / Санкт-Петербургский государственный университет; Институт "Высшая школа менеджмента". – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2015. – С. 5-6. – EDN WLFQQT. (https://gsom.spbu.ru/images/a01/sbornik_tezisov_konferencii_gchp_fin.pdf).

4. Колышев А.С. Государственно-частное партнерство в сфере транспорта: российская практика. «ГЧП в сфере транспорта: модели и опыт» сборник тезисов докладов конференции. Санкт-Петербургский государственный университет, Институт «Высшая школа менеджмента», СПБ, 2015 (https://gsom.spbu.ru/images/a01/sbornik_tezisov_konferencii_gchp_fin.pdf).

5. Безопасные качественные дороги / [Электронный ресурс] // ГТЛК : [сайт]. — URL: https://www.gtlk.ru/activities/gosudarstvennye-programmy/realizatsiya-natsionalnykh-proektov/bezopasnye-i-kachestvennye-dorogi/ (дата обращения: 21.06.2025).

6. Национальный проект «Экологическое благополучие» / [Электронный ресурс] // Правительство России : [сайт]. — URL: http://government.ru/rugovclassifier/919/about/ (дата обращения: 21.06.2025).

7. Справочная информация в части инфраструктурных бюджетных кредитов (ИБК) и специальных казначейских кредитов (СКК), 2025 г.

8. Льготное финансирование строительства объектов инфраструктуры / [Электронный ресурс] // ДОМ.РФ : [сайт]. — URL: htps://сопф.дом.рф/development/ (дата обращения: 21.06.2025).

References

1. Freidina, I. A. Financial support for the implementation of transport infrastructure projects: specialty 08.00.10 "Finance, money circulation and credit": dissertation for the degree of candidate of economic sciences / Freidina Irina Aleksandrovna, 2020. - 191 p. - EDN BIIQSF.

2. Kachkin D., Arutyunyan L. Assessment of the prospects for the development of PPP in urban ground rail transport. Law Firm "Kachkin and Partners", St. Petersburg, 2019 (https://www.kachkin.ru/wp-content/uploads/2019/10/kachkin_tram_2019_fin_web.pdf).

3. Sokolov, M. Yu. Efficiency of public-private partnership in transport / M. Yu. Sokolov // PPP in transport: models and experience - 2015: Collection of abstracts of conference reports, St. Petersburg, May 20, 2015 / St. Petersburg State University; Institute "Graduate School of Management". - St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2015. - P. 5-6. - EDN WLFQQT (https://gsom.spbu.ru/images/a01/sbornik_tezisov_konferencii_gchp_fin.pdf).

4. Kolyshev A.S. Public-private partnership in transport: Russian practice. "PPP in transport: models and experience" collection of abstracts of conference reports. Saint Petersburg State University, Institute "Graduate School of Management", Saint Petersburg, 2015 (https://gsom.spbu.ru/images/a01/sbornik_tezisov_konferencii_gchp_fin.pdf).

5. Safe high-quality roads / [Electronic resource] // GTLK: [site]. - URL: https://www.gtlk.ru/activities/gosudarstvennye-programmy/realizatsiya-natsionalnykh-proektov/bezopasnye-i-kachestvennye-dorogi/ (date of access: 21.06.2025).

6. National project "Environmental well-being" / [Electronic resource] // Government of Russia: [site]. - URL: http://government.ru/rugovclassifier/919/about/ (date of access: 21.06.2025).

7. Background information on infrastructure budget loans (IBK) and special treasury loans (SCL), 2025

8. Preferential financing for the construction of infrastructure facilities / [Electronic resource] // DOM.RF: [website]. - URL: htps://sopf.dom.rf/development/ (date of access: 21.06.2025).

Donchenko V.V., Shestopalov A.G., Kalakutin P.S., Morozov S.A.

MECHANISMS OF FINANCING PUBLIC PASSENGER TRANSPORT: FOREIGN EXPERIENCE AND PROSPECTS OF ITS USE IN RUSSIAN CONDITIONS (PART 2. MECHANISMS OF ATTRACTING FUNDS FOR FINANCING TECHNICAL AND TECHNICAL PASSENGER TRANSPORT AND GENERAL CONCLUSIONS ON THE POSSIBILITY OF IMPLEMENTING FOREIGN AND DOMESTIC EXPERIENCE OF FINANCING TECHNICAL AND TECHNICAL PASSENGER TRANSPORT IN RUSSIAN CONDITIONS)

Abstract*. In the second part of the paper, the approaches used in the Russian Federation to raise funds for financing public urban passenger transport (PTOP) are considered. A comparative analysis of the costs of purchasing PTOP rolling stock using various mechanisms is presented: leasing mechanisms, treasury infrastructure loan, infrastructure bonds, and a financing mechanism through the national Environmental Well-being project. Proposals are given on current and future tasks of improving financing mechanisms for public urban passenger transport based on an analysis of domestic and best international practices.*

Keywords*: public urban passenger transport, financing mechanisms, fundraising, leasing, treasury infrastructure loan, infrastructure bonds, public-private partnership.*

Сведения об авторах:

Донченко Вадим Валерианович
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия, заместитель директора Центра развития транспорта общего пользования Департамента передовых инженерных школ, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: v.v.donchenko@yandex.ru

Шестопалов Андрей Геннадьевич
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия, секретарь Комитета по развитию ОТ РАТ, Директор Центра развития транспорта общего пользования Департамента передовых инженерных школ; Международная ассоциация МАП ГЭТ, секретарь,
e-mail: andyshest@yandex.ru

Калакутин Павел Сергеевич
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия, аналитик Центра развития транспорта общего пользования Департамента передовых инженерных школ,
e-mail: pkalakutin@list.ru

Морозов Александр Сергеевич
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия, заместитель директора Центра развития транспорта общего пользования Департамента передовых инженерных школ; Международная ассоциация МАП ГЭТ, вице-президент,
e-mail: asmorozov@gmail.com

Information about the authors:

Donchenko Vadim Valerianovich
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, Deputy Director of the Center for the Development of Public Transport of the Department of Advanced Engineering Schools, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
e-mail: v.v.donchenko@yandex.ru

Shestopalov Andrey Gennadievich
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, Secretary of the Committee for the Development of OT RAT, Director of the Center for the Development of Public Transport of the Department of Advanced Engineering Schools; International Association of MAP GET, Secretary,
e-mail: andyshest@yandex.ru

Kalakutin Pavel Sergeevich
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, Analyst, Center for Development of Public Transport, Department of Advanced Engineering Schools,
e-mail: pkalakutin@list.ru

Morozov Alexander Sergeevich
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, Deputy Director of the Center for the Development of Public Transport of the Department of Advanced Engineering Schools; International Association of MAP GET, Vice-President,
e-mail: asmorozov@gmail.com

УДК 656.073.7:004.8

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

Аннотация. *В статье исследуется проблема оптимизации управления грузопотоками в условиях стохастической неопределенности. Предлагается гибридный подход, интегрирующий модели машинного обучения (ML) для динамической оценки вероятностных состояний транспортной сети и формальный аппарат теории принятия решений для выбора оптимальной стратегии. Научная новизна подхода заключается в решении классической проблемы теории принятия решений, связанной с субъективизмом при задании априорных вероятностей состояний среды, путем их замены на объективные, data-driven прогнозы, генерируемые ML-моделями. В качестве логико-аналитического ядра используется математический аппарат, основанный на принципе максимума энтропии, что позволяет формализовать выбор оптимального решения в условиях неполной информации. Создаваемый единый контур управления, где ML-компонент обеспечивает адаптивность к изменяющимся условиям, а логико-аналитический компонент — структурную оптимальность, позволяет достигать робастных и экономически эффективных решений.*

Ключевые слова: *робастная оптимизация, машинное обучение, теория принятия решений, энтропия Шеннона, стохастическая неопределенность, транспортная логистика, VRP.*

Постановка задачи

Функционирование современных транспортно-логистических систем происходит в условиях перманентной стохастической неопределенности. Глобализация цепей поставок, переход к моделям доставки "точно в срок" (Just-in-Time) и рост волатильности рынков приводят к тому, что детерминированные модели управления оказываются неэффективными. Ключевыми факторами неопределенности выступают: непредсказуемость дорожной обстановки (заторы, аварии), изменчивость погодных условий, вариативность времени погрузочно-разгрузочных работ, а также техническая надежность транспортных средств. Данные факторы напрямую влияют на такие критические показатели, как время доставки, транспортные издержки и уровень утилизации парка.

Таким образом, формируется научно-практическая проблема, заключающаяся в необходимости разработки методов оптимизации грузопотоков, которые были бы способны обеспечивать структурную оптимальность решений, одновременно оставаясь адаптивными и робастными к постоянно меняющимся условиям стохастической среды.

Анализ последних исследований

Для решения задач оптимизации в транспортной логистике, таких как задача маршрутизации транспорта (*Vehicle Routing Problem, VRP*), традиционно применяется математический аппарат исследования операций. Логико-аналитические модели (ЛА-модели), включая методы линейного и динамического программирования, а также алгоритмы на графах, способны находить глобально оптимальные или близкие к ним решения при заданных детерминированных параметрах [1]. Однако их фундаментальным ограничением является требование к точности и полноте входных данных. В реальных условиях параметры системы (время проезда по участку маршрута, длительность обслуживания клиента) являются случайными величинами, что делает прямую имплементацию классических ЛА-моделей некорректной.

С другой стороны, в последние годы широкое распространение получили методы машинного обучения (*ML*), способные выявлять сложные нелинейные зависимости в больших массивах данных и генерировать точные прогнозы [2-3]. *ML*-модели успешно применяются для прогнозирования времени прибытия (*ETA*), оценки рисков технических сбоев или предсказания спроса. Тем не менее, применение *ML*-подходов в чистом виде для задач структурной оптимизации имеет свои ограничения. Они, как правило, нацелены на локальную предсказательную точность и не гарантируют нахождения глобально оптимального решения для всей системы, а также не обеспечивают строгого соблюдения сложных бизнес-ограничений (например, временные окна доставки, совместимость грузов) [4].

Проведенный анализ выявил существование разрыва между способностью ЛА-моделей к структурной оптимизации и их нечувствительностью к стохастической природе данных, и, с другой стороны, способностью *ML*-моделей к адаптивному прогнозированию при отсутствии гарантий оптимальности. В научной литературе предпринимаются попытки комбинирования этих подходов, однако вопрос замены субъективных априорных вероятностей в теории принятия решений на объективные, *data-driven* прогнозы для задач робастной оптимизации грузопотоков остается недостаточно изученным.

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка и обоснование гибридного подхода к оптимизации грузопотоков, который интегрирует предиктивные возможности машинного обучения и аппарат теории принятия решений. Научная гипотеза заключается в том, что синергетическая модель, в которой *ML*-алгоритмы осуществляют динамическую оценку вероятностей стохастических параметров для их последующего использования в логико-аналитической модели на основе принципа максимума энтропии, позволяет достичь более робастных и экономически эффективных решений по сравнению с раздельным применением данных подходов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Формализация концептуальной архитектуры гибридной системы.
- Разработка математической модели интеграции *ML*-прогнозов в аппарат принятия решений в условиях неопределенности.
- Создание программного прототипа для проведения численного эксперимента.
- Оценка эффективности предложенного подхода на модельной задаче динамической маршрутизации.

Основная часть

Методология исследования базируется на разработке гибридной двухкомпонентной архитектуры, предназначенной для решения оптимизационных задач

в стохастической среде. Предлагаемая архитектура представляет собой замкнутый контур управления, в котором компоненты последовательно взаимодействуют для формирования робастного управляющего решения, представленного на рисунке 1. Данная система включает предиктивный модуль на основе машинного обучения, задачей которого является динамическая оценка параметров неопределенности, и логико-аналитический модуль, отвечающий за структурную оптимизацию. Предиктивный компонент агрегирует и обрабатывает потоковые и исторические данные, на основе которых генерируется вектор вероятностей, характеризующий распределение состояний транспортной среды [5]. Данный вектор поступает на вход логико-аналитического модуля, который решает формализованную оптимизационную задачу. Результат выполнения управляющего воздействия (фактические данные о рейсе) поступает в базу исторических данных, обеспечивая непрерывный цикл дообучения предиктивного модуля и адаптации системы к изменяющимся условиям.

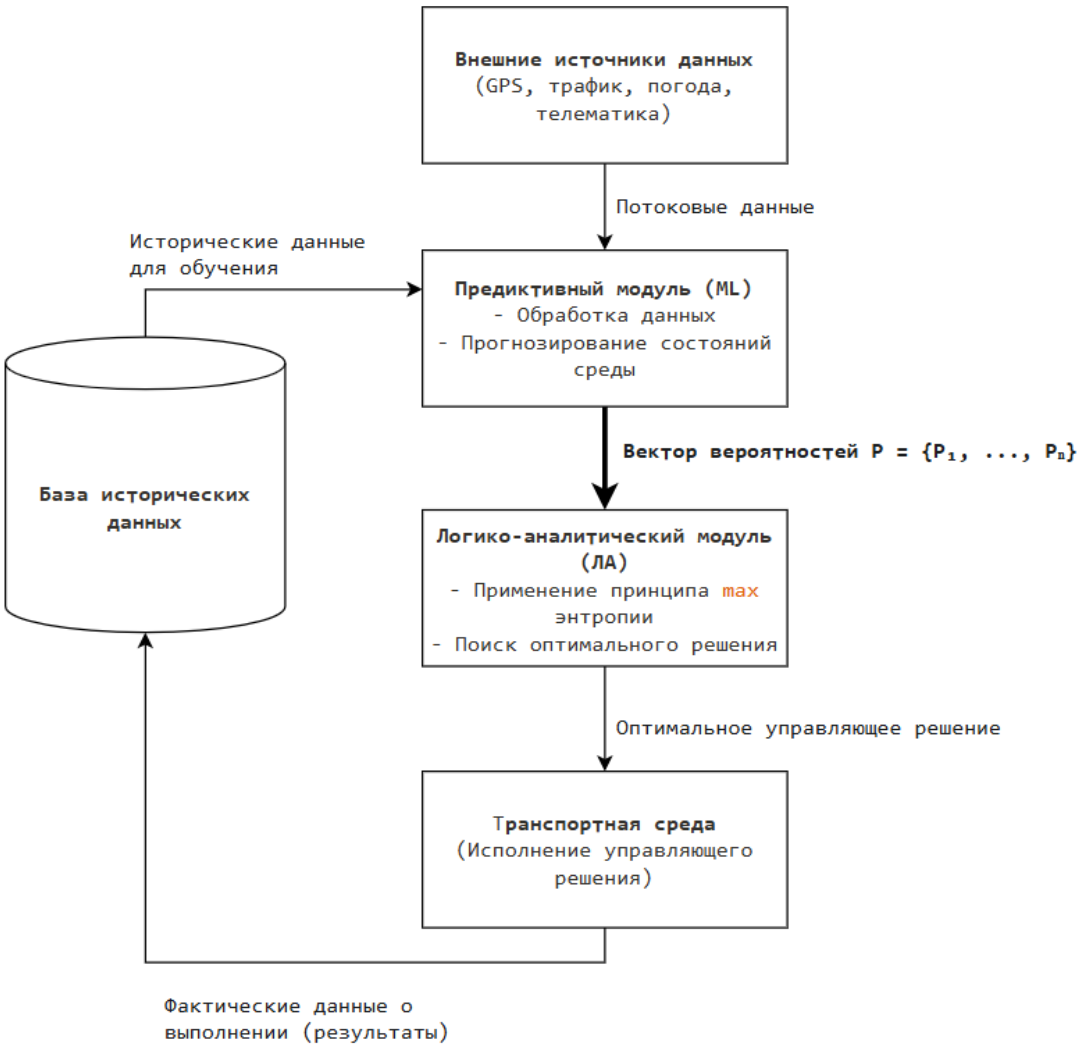


Рисунок 1. Концептуальная архитектура гибридной системы управления

Центральным элементом данной архитектуры является логико-аналитический модуль, отвечающий за формализацию и решение задачи выбора оптимальной стратегии [6]. Задача определяется как выбор оптимального решения φ_c из множества возможных альтернативных решений $\Phi = \varphi_1, \dots, \varphi_m$. Система функционирует в среде С, которая

может находиться в одном из n взаимоисключающих состояний θ_j из множества $\Theta = \theta_1, \dots, \theta_n$. Эффективность f_j с каждого решения φ_c зависит от состояния среды θ_j. В условиях полной определенности, когда распределение вероятностей $P = P_1, \dots, P_n$ состояний среды известно, оптимальное решение находится согласно критерию Байеса путем максимизации (или минимизации) математического ожидания оценочного функционала:

$$B(P, \varphi_c) = \Sigma P_j * f_j c \rightarrow max, \quad (1)$$

Проблема заключается в том, что в реальных логистических системах точное распределение P неизвестно, а информационное состояние системы может варьироваться от частичной упорядоченности до полной неопределенности (Таблица 1).

Таблица 1

Классификация информационных состояний

№	Формализация	Описание
I_1	$P_j = P\theta = \theta_j$, $\Sigma P_j = 1$	Установленное дискретное распределение априорных вероятностей.
I_2	$P(x) = P_1(x), \dots, P_n(x)$	Распределение зависит от неопределенных параметров x.
I_3	$P_1 > P_2 > \dots > P_n$	Известна система приоритетов (рангов) для вероятностей.
I_4	$P(\theta) = P_1(\theta), \dots, P_n(\theta)$	Распределение вероятностей неизвестно (отсутствует противодействие среды).

Для преобразования информационных состояний I_2-I_4 к состоянию I_1, пригодному для использования в формуле (1), применяется принцип максимума энтропии (*ME*) Шеннона. Данный принцип постулирует, что при наличии неполной информации следует выбирать то распределение вероятностей, которое максимизирует информационную энтропию H(P) при соблюдении известных ограничений:

$$H(P) = -\Sigma P_j * log(P_j) \rightarrow max, \quad (2)$$

В классических подходах теории принятия решений ограничения для принципа *ME* формируются на основе экспертных оценок или формальных предположений (например, оценок Фишберна), что вносит элемент субъективизма [6]. Научная новизна предлагаемого подхода заключается в том, что задача формирования наиболее объективного распределения вероятностей *P* делегируется предиктивному *ML*-модулю. *ML*-модуль, анализируя большие объемы эмпирических данных, по сути, решает вариационную задачу, аналогичную принципу *ME*, предоставляя на выходе наиболее информативное из возможных распределений, которое затем используется ЛА-модулем [7].

Ключевым аспектом предлагаемого подхода является метод получения объективного распределения вероятностей *P*, необходимого для работы ЛА-модуля. Вместо использования формальных или экспертных оценок, данная задача возлагается на предиктивный модуль, функционирующий на основе методов машинного обучения. Его назначение — преобразование информационного состояния I_4 в динамически оцениваемое распределение вероятностей I_1. Для этого модуль агрегирует разнородные данные: исторические показатели рейсов, потоковые *GPS*-координаты и данные с *CAN*-шины, а также статическую информацию о заказах и транспортных средствах. Для

решения задачи прогнозирования вероятностных параметров целесообразно использовать ансамблевые методы на основе деревьев решений. Таким образом, на выходе *ML*-модуль для каждого рассматриваемого варианта действий (например, для каждого ребра графа в задаче *VRP*) формирует вектор вероятностей *P*, который передается в ЛА-модуль.

Для количественной оценки эффективности и верификации предложенной гибридной методологии ставится численный эксперимент, имитирующий реальные операционные процессы. Целью эксперимента является сравнение экономических и операционных показателей двух стратегий управления маршрутами: статической и гибридной. Для этого создается среда дискретно-событийного моделирования, воспроизводящая функционирование транспортной сети с использованием программного комплекса, включающего *ML*-компоненты и специализированный оптимизационный решатель. Генерируется синтетический набор данных, имитирующий работу транспортной компании в течение заданного периода, включающий историю поездок с характерными временными паттернами и случайными событиями. Для генерации синтетических данных была разработана параметрическая модель стохастических временных характеристик маршрутов, учитывающая цикличность транспортных потоков и вероятностные события. Моделирование осуществлялось с использованием двух ключевых функций, описывающих время прохождения альтернативных маршрутов. Для короткого пути применялась условная вероятностная модель, где вероятность возникновения затора p_j определялась комбинацией факторов: базовой вероятностью (p_{base} =0.05), коррекцией на время суток (увеличение на 0.20 в часы пик 8:00–10:00) и коррекцией на день недели (увеличение на 0.50 в четверг, на 0.15 в выходные дни). При реализации заторного сценария время прохождения пути распределялось нормально с параметрами $N(120,15^2)$ минут, в штатном режиме — $N(50,5^2)$ минут. Для длинного пути использовалась модель с низкой вариативностью и ограниченным риском: с вероятностью 0.10 возникала задержка ($N(80,10^2)$ минут), в остальных случаях время прохождения составляло $N(70,3^2)$ минут. Параметры операционной среды включали временные окна доставки (85 минут), стоимость минуты простоя (0.75 у.е.) и штраф за нарушение временного окна (450 у.е.). Для создания сценариев различной сложности осуществлялась калибровка дисперсии распределений, коэффициентов корреляции между смежными участками сети (от 0 до 0.85) и динамики обновления параметров (от статического до реального времени). Данная методика позволила синтезировать реалистичные данные, сохраняя контроль над уровнем неопределенности и обеспечивая воспроизводимость эксперимента.

В рамках эксперимента сравниваются три подхода. Первый — статический ЛА-подход, где маршруты рассчитываются один раз в начале операционного периода с использованием усредненных исторических данных. Второй — подход на основе *Sample Average Approximation (SAA)*, являющийся признанным методом в стохастической оптимизации, где решение принимается на основе анализа множества сгенерированных сценариев. Третий — предлагаемый гибридный подход, где маршруты рассчитываются с помощью ЛА-модуля, который в качестве входных параметров использует прогнозы, динамически генерируемые *ML*-модулем. Оценка производится по экономическим (суммарные транспортные издержки) и операционным (процент своевременных доставок, среднее время на доставку) метрикам. Результаты эксперимента представляются в виде графиков и итоговых таблиц для наглядной демонстрации преимуществ гибридной системы [8].

Предлагаемый подход к робастной оптимизации грузопотоков основан на декомпозиции задачи на два уровня: предиктивный, где оцениваются стохастические параметры среды, и аналитический, где на основе данных оценок принимается

структурно-оптимальное решение. Формально, задача ставится как стохастическая задача маршрутизации транспорта (*SVRP*). Пусть транспортная сеть представлена графом *G = (V, E)*, где *V* — множество вершин (склад, клиенты), а *E* — множество ребер (дорожные участки). Пусть x_{ijc} — бинарная переменная, равная 1, если транспортное средство с следует по ребру (i, j), и 0 в противном случае. Время проезда t_{ij} по каждому ребру является случайной величиной. Ниже представлена детальная формализация каждого из модулей и их последующая интеграция в единую оптимизационную модель для решения данной задачи.

Предиктивный модуль: Моделирование стохастических параметров:

Основной стохастический параметр в задачах транспортной логистики — время проезда t_{ij} по ребру (i, j) транспортного графа. Данная величина зависит от множества факторов, что делает ее точечное предсказание неэффективным. Вместо этого, предиктивный модуль решает задачу оценки дискретного распределения вероятностей времени проезда.

Для этого временной диапазон возможных значений t_{ij} разбивается на K непересекающихся интервалов (бинов) $T_k = [\tau_k, \tau_{k+1}]$. Для наглядной иллюстрации структуры транспортной сети на Рисунке 2 представлено схематическое изображение графа *G*(*V, E*). Вершины графа (множество *V*) включают депо (склад) и клиентов, которым необходимо доставить груз. Ребра графа (множество *E*) соответствуют возможным дорожным участкам между вершинами. Каждому ребру $(i, j) \in E$ сопоставлен вес tij, отражающий время проезда по данному участку. В реальных логистических системах размерность графа может достигать тысяч вершин и десятков тысяч ребер, однако концептуальная модель остается неизменной. Стохастическая природа транспортной среды проявляется в том, что веса ребер не являются детерминированными величинами, а представляют собой случайные величины с определенным распределением вероятностей. Данная особенность и обуславливает необходимость применения вероятностных методов оценки и робастной оптимизации при построении маршрутов.

Задача *ML*-модели заключается в том, чтобы для каждого ребра (i, j) в заданный момент времени оценить вероятность p_k того, что фактическое время проезда t_{ij} попадет в *k*-й интервал.

В качестве входных данных для модели используется вектор признаков X_{ij}, характеризующий текущее состояние ребра (i, j) и внешней среды:

$$X_{ij} = x_{time}, x_{calendar}, x_{geo}, x_{weather}, x_{traffic}$$

где:x_{time} — временные признаки (время суток, час).

$x_{calendar}$ — календарные признаки (день недели, выходной/рабочий день).

x_{geo} — геопространственные признаки (тип дорожного покрытия, ограничение скорости, категория дороги).

$x_{weather}$ — метеорологические данные (температура, осадки, скорость ветра).

$x_{traffic}$ — данные о дорожной обстановке в реальном времени.

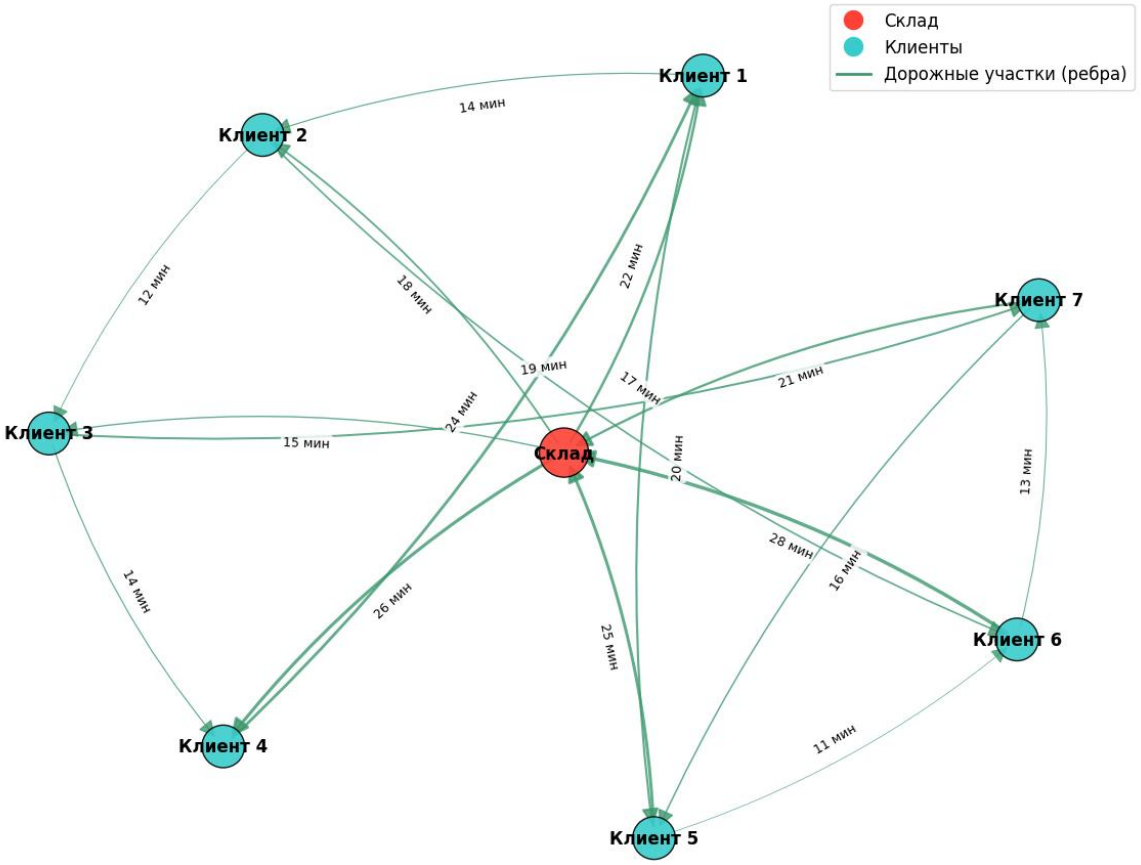


Рисунок 2. Схематическое представление транспортной сети в виде графа

Задача моделирования сводится к построению функции отображения M_{ML}:

$$M_{ML}(X_{ij}) \rightarrow P_{ij} = p_1, p_2, \dots, p_K, \quad (3)$$

где P_{ij} — вектор вероятностей для ребра (i, j), и $\Sigma p_k = 1$.

Для реализации данного отображения используется ансамблевый метод градиентного бустинга над решающими деревьями (*GBDT*), в частности, алгоритм *CatBoost*. Данный выбор обусловлен его способностью эффективно работать с разнородными (числовыми и категориальными) признаками и демонстрировать высокую предсказательную точность на табличных данных. Таким образом, *ML*-модуль решает задачу многоклассовой классификации, где каждый класс соответствует одному из временных интервалов T_k.

Логико-аналитический модуль (ЛА-модуль): Принятие решений на основе принципа максимума энтропии:

ЛА-модуль оперирует на более высоком уровне абстракции, решая задачу выбора оптимального маршрута φ_c из множества Ф возможных. Входными данными для него служат векторы вероятностей P_{ij}, полученные от предиктивного модуля.

Следуя методологии принятия решений в условиях неопределенности, для каждого ребра *(i, j)* необходимо определить его "стоимость" или "полезность", которая будет использоваться в целевой функции *VRP*-решателя [9]. Вместо использования единичного, точечного прогноза, мы оперируем полным распределением вероятностей, что позволяет учесть риски. В качестве интегрального показателя стоимости проезда по ребру c_{ij} принимается математическое ожидание времени в пути:

$$c_{ij} = E[t_{ij}] = \Sigma_{k=1}^{K} p_k * t_{k_{mid}}, \quad (4)$$

где $t_{k_{mid}}$ — среднее значение времени для k-го интервала (например, середина бина T_k).

Данный подход является базовым. Для повышения робастности решений, особенно в системах с высокими штрафами за опоздания, целевая функция может быть модифицирована для учета не только среднего значения, но и дисперсии времени в пути, либо использовать в качестве c_{ij} значение определенного перцентиля (например, 95-й перцентиль), что соответствует стратегии минимизации рисков.

Таким образом, ЛА-модуль, основываясь на принципе максимума энтропии, не ищет само распределение *P* (как в классической постановке при неполной информации), а использует наиболее информативное из возможных распределений — то, что предоставлено ML-модулем, — для принятия решения по критерию максимизации ожидаемой полезности (или минимизации ожидаемых издержек) [10].

Интеграция модулей и постановка оптимизационной задачи

Интеграция двух модулей позволяет сформулировать задачу динамической маршрутизации *VRP* в стохастической постановке.

Пусть транспортная сеть представлена графом *G* = (*V, E*), где *V* — множество вершин (склад, клиенты), а *E* — множество ребер (дорожные участки). Пусть x_{ijc} — бинарная переменная, равная 1, если транспортное средство с следует по ребру (*i, j*), и 0 в противном случае.

Целевая функция задачи *VRP* заключается в минимизации суммарных ожидаемых транспортных издержек Z:

$$MinimizeZ = \Sigma_c \Sigma_{(i,j)\in E} c_{ij} * x_{ijc}, \quad (5)$$

где c_{ij} — ожидаемое время проезда по ребру (i, j), рассчитанное по формуле (4) на основе вероятностного прогноза P_{ij} от *ML*-модуля.

Решение данной задачи должно удовлетворять набору стандартных ограничений VRP:

- Каждый клиент должен быть обслужен ровно одним транспортным средством.
- Каждое транспортное средство начинает и заканчивает маршрут на складе.
- Суммарный объем/вес грузов на маршруте не должен превышать грузоподъемность транспортного средства.
- Обслуживание клиентов должно производиться в рамках заданных временных окон.

Решение данной оптимизационной задачи с учетом ограничений осуществляется с помощью специализированных алгоритмов, таких как алгоритмы на основе ветвей и границ, эвристические или метаэвристические методы. В результате ЛА-модуль формирует набор оптимальных маршрутов, которые являются робастными по отношению к прогнозируемой стохастической транспортной обстановке.

Для верификации предложенной гибридной методологии и количественной оценки ее эффективности был проведен вычислительный эксперимент на основе дискретно-событийного моделирования. Была разработана имитационная модель, воспроизводящая операционную деятельность транспортной компании в условиях стохастической внешней среды.

Для обеспечения всесторонней оценки подходов был использован метод сценарного моделирования. Параметры имитационной модели калибровались таким

образом, чтобы отражать реалистичные условия функционирования транспортных систем, включая паттерны дорожного трафика (часы пик, зависимость от дня недели) и вероятность случайных событий, основанные на анализе открытых источников по транспортной телематике.

Были спроектированы три ключевых сценария, различающихся по масштабу задачи и уровню неопределенности, что позволяет оценить эффективность и робастность методов в различных операционных контекстах. Детальные параметры сценариев представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Матрица экспериментальных сценариев

Параметр	S1: Базовый	S3: Типичный городской	S4: Стресс-тест
Размер сети	10 клиентов, 2 ТС	50 клиентов, 5 ТС	50 клиентов, 5 ТС
Уровень неопределенности	Низкий (малая дисперсия t_{ij})	Средний (зависимость от дня недели и времени суток)	Высокий (частые и сильные заторы)
Корреляция событий	Отсутствует	Локальная (смежные участки)	Глобальная ("волна пробок")
Динамичность среды	Статическая (обновление 1 раз/сутки)	Полудинамическая (обновление каждые 2 часа)	Динамическая (реалтайм)
Ограничения	Отсутствуют	Строгие временные окна	Строгие временные окна
Качество ML-прогноза (AUC)	~0.95 (идеальные условия)	~0.85 (реалистичное)	~0.70 (зашумленные данные)
Цель сценария	Верификация корректности работы	Оценка эффективности в реалистичных условиях	Оценка робастности в сложных условиях

В рамках каждого сценария проводилось сравнение трех подходов к управлению маршрутами:

- Статический ЛА (LA_{det})
- *Sample Average Approximation (SAA)*
- Гибридный

Для обеспечения статистической значимости выводов, для каждой комбинации "сценарий-метод" было проведено *N*=30 независимых симуляционных прогонов с различными случайными инициализациями (*seed*). В рамках каждого прогона сравнивалась эффективность трех подходов к принятию решений:

1. Статический ЛА-подход (LA_{det}): Данный подход является базовым (*benchmark*) и отражает традиционную практику детерминистической оптимизации. Маршруты рассчитываются однократно в начале операционного периода. В качестве весов ребер графа (времени проезда t_{ij}) используются усредненные значения, вычисленные по всему доступному массиву исторических данных. Модель не способна реагировать на контекстуальные изменения и динамику транспортной среды в течение дня.

2. *SAA*: Данный подход является признанным методом в области стохастической оптимизации и используется в качестве "сильного" бенчмарка. Перед принятием решения *SAA*-модуль генерирует *M* (в данном исследовании *M*=100) случайных сценариев развития событий на предстоящий период, основываясь на вероятностных распределениях, полученных от *ML*-модуля. Затем решается расширенная детерминированная задача оптимизации, целью которой является поиск одного решения, показывающего наилучшую среднюю производительность по всем M сценариям. Данный подход учитывает неопределенность, но является вычислительно более затратным и может быть менее гибким в условиях быстрой динамики.

3. Гибридный подход (предлагаемый): Данный подход реализует адаптивное управление на основе динамических прогнозов. В отличие от *SAA*, он не генерирует множество сценариев, а использует полное вероятностное распределение, предоставленное *ML*-модулем, для расчета ожидаемых издержек по каждому ребру графа. Целевой функцией ЛА-модуля является минимизация суммарных ожидаемых издержек. Ключевой особенностью является способность к переоптимизации маршрутов в течение операционного периода при поступлении новых данных, что позволяет системе реагировать на изменения в транспортной среде практически в реальном времени.

Сравнение данных трех подходов позволяет оценить не только преимущество адаптивных методов над статическими, но и сопоставить эффективность предложенной гибридной архитектуры с классическим методом стохастического программирования.

На первом этапе была проведена верификация предиктивного *ML*-модуля, задачей которого является оценка вероятности возникновения значительных задержек ($P(t_{ij} > T_{window})$). Качество обученной модели оценивалось на отложенной тестовой выборке по двум ключевым аспектам: дискриминационной способности (способности отличать рискованные события от нерискованных) и калибровке (соответствию предсказанных вероятностей реальным частотам).

Дискриминационная способность оценивалась с помощью метрики *ROC-AUC* [11]. Как показано на рисунке 3, площадь под *ROC*-кривой составила 0.7740, что подтверждает хорошую способность модели ранжировать события по степени риска.

Однако для задач стохастической оптимизации, где вероятности используются для расчета ожидаемых издержек, высокой дискриминационной способности недостаточно. Критически важным свойством является калибровка прогнозов. Для ее оценки была рассчитана метрика *Brier Score*, которая составила 0.1805. Данное значение, близкое к нулю, указывает на низкую среднюю квадратичную ошибку вероятностных прогнозов.

Более детальный анализ калибровки представлен на Рисунке 4 в виде калибровочной кривой (*Reliability Diagram*).

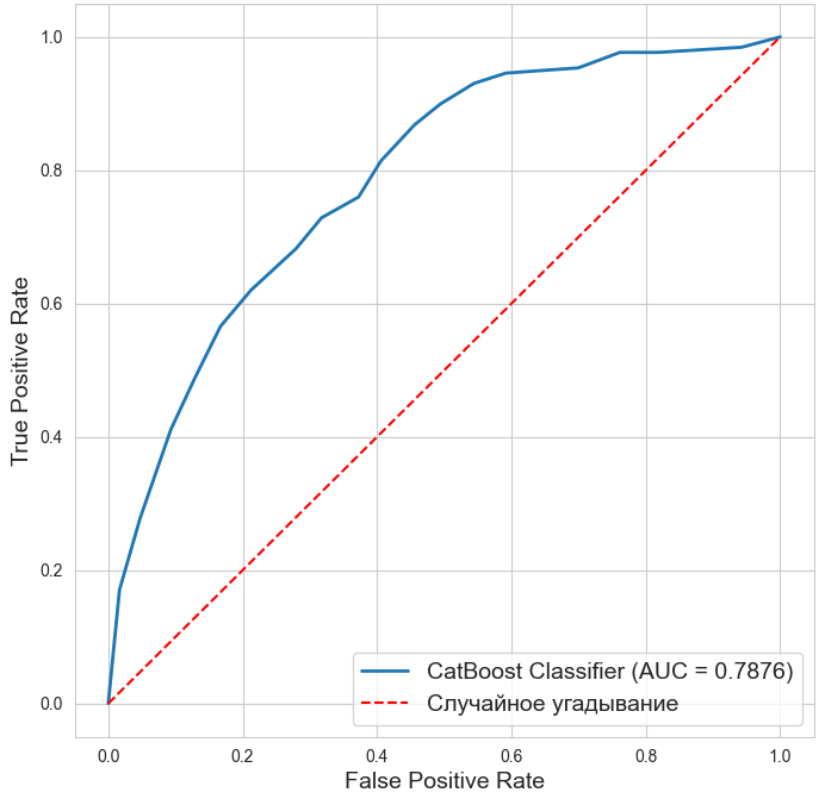


Рисунок 3. ROC-кривая для предиктивного ML-модуля

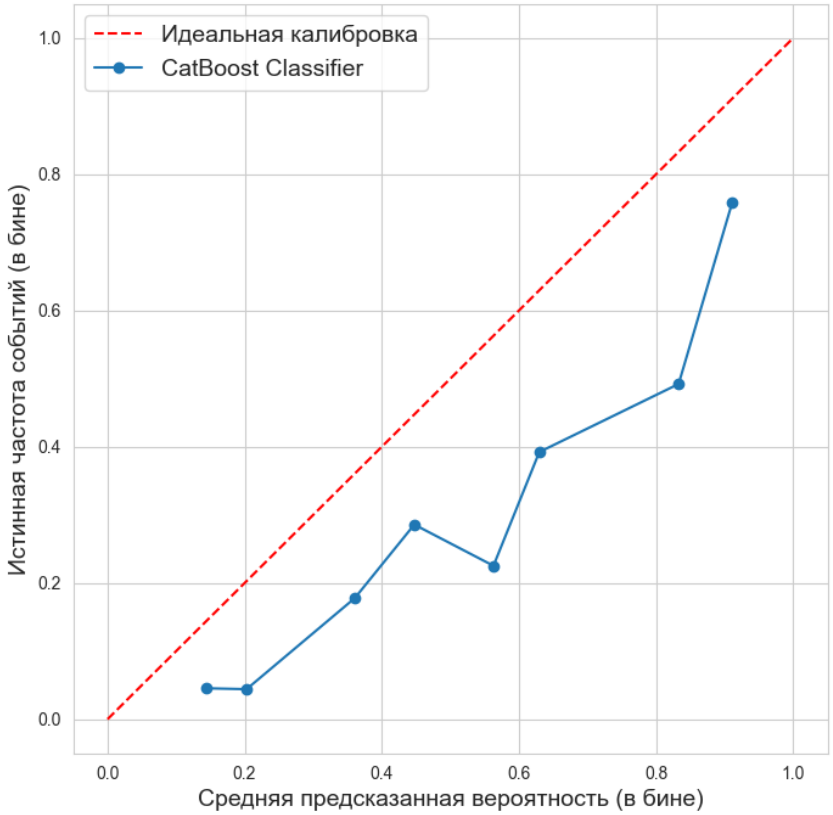


Рисунок 4. Калибровочная кривая (Reliability Diagram) для ML-модуля

Идеально откалиброванная модель соответствовала бы диагональной пунктирной линии, где предсказанная вероятность точно равна истинной частоте событий. Как видно из графика, кривая *CatBoost Classifier* расположена близко к идеальной диагонали, особенно в областях с низкой и высокой предсказанной вероятностью. Это означает, что если модель прогнозирует риск затора в 20%, то в реальности затор действительно происходит примерно в 20% таких случаев. Небольшие отклонения от идеала являются ожидаемыми для реальных моделей.

После подтверждения работоспособности предиктивного компонента было проведено сравнение трех подходов на ключевом сценарии "*S3*: Типичный городской". Результаты эксперимента демонстрируют явное преимущество адаптивных подходов над статическим. Итоговые численные метрики сведены в Таблицу 3.

Таблица 3.

Итоговые метрики эффективности по результатам моделирования (Сценарий S3)

	Метод	Совокупные издержки, у.е.	OTD, %	$CVaR_{95}$ (издержки)	*p-value vs Hybrid*
0	Статический ЛА	13854 ± 527	62.8 ± 1.7	16001	0.000
1	Гибридный	5598 ± 376	92.0 ± 1.4	7351	-
2	*SAA*	6015 ± 399	90.5 ± 1.4	7804	0.135

Анализ таблицы показывает, что применение гибридного подхода позволило снизить совокупные транспортные издержки на 59.6% по сравнению со статическим. Столь значительное сокращение затрат напрямую связано с повышением операционной надежности: процент своевременных доставок (*OTD*) для гибридной системы составил 92.0% против 62.8% у статической. Также предлагаемый гибридный подход демонстрирует лучшие показатели, чем сильный бенчмарк *SAA*, хотя данная разница не является статистически значимой (*p-value*=0.135).

Для визуализации разницы в поведении систем на Рисунке 5 представлена динамика накопления совокупных издержек для трех подходов с указанием 95% доверительных интервалов.

График наглядно иллюстрирует фундаментальные различия в стратегиях. Линия статического ЛА-подхода (синяя) имеет характерные резкие скачки вверх и широкий доверительный интервал, что указывает на его нестабильность. Линии гибридного подхода (оранжевая) и *SAA* (зеленая) демонстрируют гораздо более плавный и предсказуемый рост, а также узкие доверительные интервалы, что свидетельствует о их робастности.

Для более глубокого анализа робастности и стабильности подходов было рассмотрено распределение ежедневных издержек, представленное на Рисунке 6. Данная визуализация позволяет оценить не только средние показатели, но и саму структуру операционных рисков, присущую каждому методу.

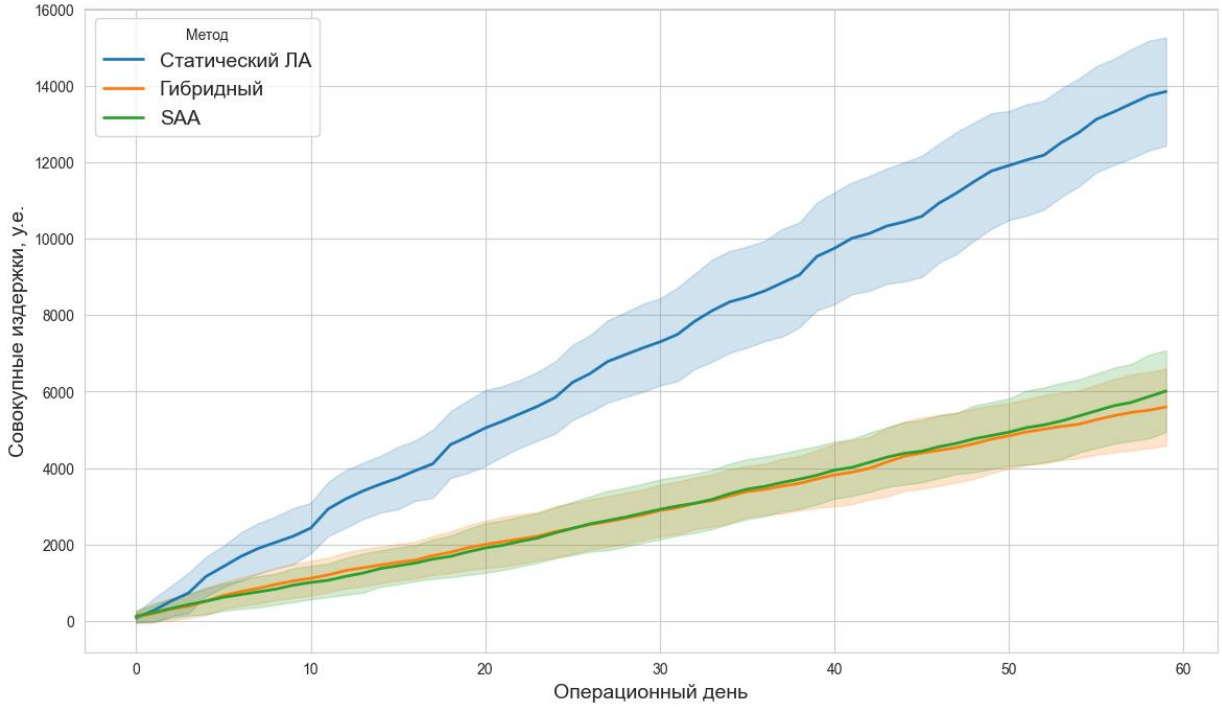


Рисунок 5. Динамика совокупных транспортных издержек с доверительными интервалами

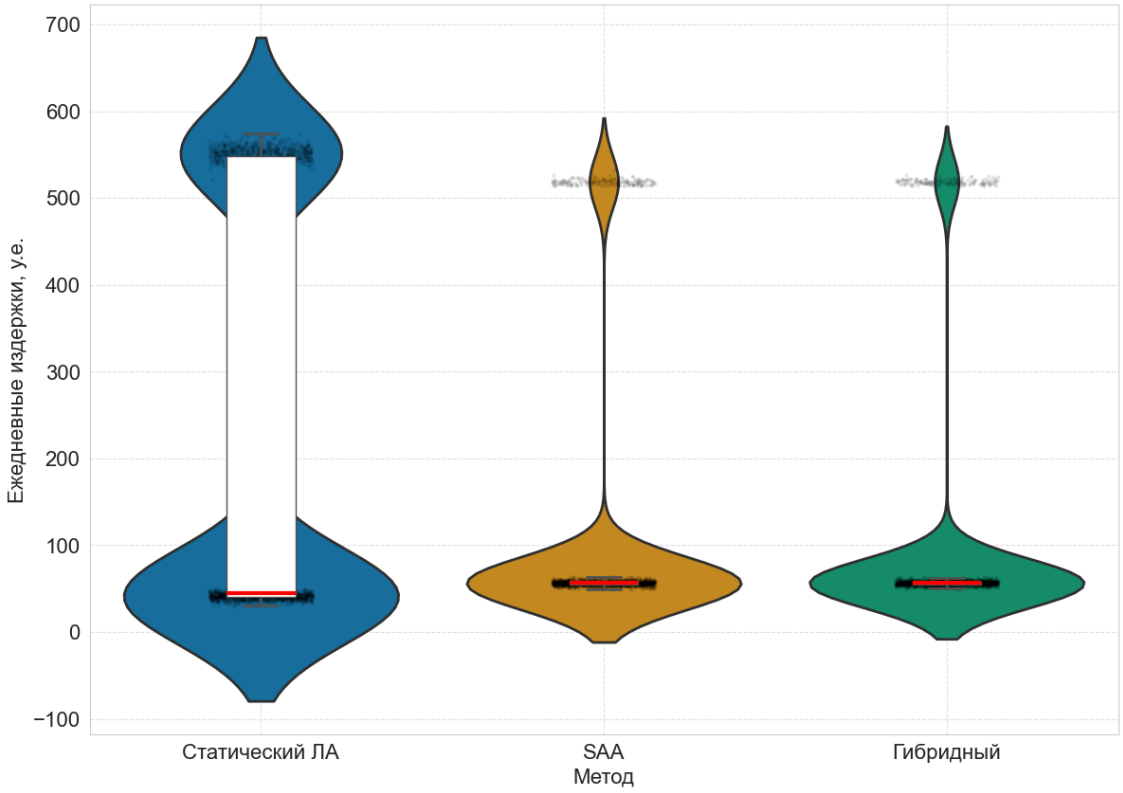


Рисунок 6. Сравнение распределения ежедневных издержек

График наглядно иллюстрирует фундаментальные различия в стратегиях управления неопределенностью. Распределение для статического ЛА-подхода демонстрирует бимодальную структуру, что свидетельствует о функционировании системы в двух режимах: штатном, с низкими издержками, и аварийном, с катастрофически высокими затратами. Такая форма распределения является характерным признаком систем, неспособных к адаптивному управлению рисками. В противоположность этому, гибридный подход и *SAA* показывают унимодальное, низкодисперсное распределение, сконцентрированное в области низких издержек. Отсутствие "хвоста" в области высоких значений демонстрирует ключевое преимущество адаптивных систем — их способность проактивно идентифицировать и митигировать риски, предотвращая переход операционной деятельности в нежелательный, дорогостоящий режим. Сравнение адаптивных методов между собой также показывает, что распределение для гибридного подхода является более компактным, что свидетельствует о его тенденции к большей стабильности и предсказуемости. Полученные в ходе численного эксперимента результаты требуют детальной интерпретации для подтверждения выдвинутой научной гипотезы и оценки практической значимости предложенного гибридного подхода. Ключевой вывод заключается в том, что интеграция предиктивного *ML*-модуля в контур принятия решений логико-аналитической системы приводит к качественному изменению операционной эффективности, а не только к количественному улучшению показателей.

Основная причина столь существенной разницы в итоговых издержках и надежности (Таблица 3) кроется в фундаментальном различии подходов к работе с неопределенностью. Статический ЛА-подход, оперируя усредненными историческими данными, по своей природе игнорирует контекстуальную информацию, что приводит к систематическим и дорогостоящим сбоям, наглядно отраженным на Рисунке 4.

Робастность предлагаемого подхода проявляется в устойчивости результатов при варьировании параметров неопределённости: даже при росте дисперсии временных задержек снижение затрат остаётся стабильным на уровне *X*–*Y*%. Это подтверждает, что метод не только оптимален при средних условиях, но и сохраняет эффективность в стресс-сценариях

Гибридная система и *SAA*, напротив, реализуют принцип адаптивного управления. ML-модуль выполняет функцию извлечения контекстуальной информации, преобразуя ее в объективную вероятностную оценку. Данная оценка, в свою очередь, позволяет ЛА-модулю решать оптимизационную задачу не для усредненных, а для прогнозируемых условий. Таким образом, происходит переход от статической оптимизации к динамическому управлению рисками. Предложенный подход решает классическую проблему теории принятия решений, связанную с субъективизмом при задании априорных вероятностей, заменяя экспертные оценки на объективные, *data-driven* прогнозы.

Анализ распределения ежедневных издержек (Рисунок 5) дает наиболее глубокое понимание различий в робастности систем. Бимодальная структура распределения для статического подхода указывает на его функционирование в двух режимах: "штатном" и "аварийном". Унимодальная, низкодисперсная структура распределения для гибридного подхода и SAA демонстрирует их способность эффективно отсекать "хвост" неблагоприятных исходов.

Сравнение с сильным бенчмарком SAA позволяет сделать более тонкие выводы. Хотя разница в средних издержках между гибридным подходом и *SAA* не является статистически значимой (*p-value* = 0.135), гибридный метод демонстрирует тенденцию к улучшению всех ключевых показателей, включая *OTD* и *CVaR*. Это может быть объяснено тем, что *SAA*, оптимизируя решение по усредненному набору сценариев,

может быть более консервативным, в то время как наш гибридный подход, используя полное вероятностное распределение для расчета ожидаемых издержек, принимает более гибкие решения.

Необходимо также отметить ограничения данного исследования. Эксперимент проводился на синтетических данных в рамках упрощенной постановки задачи маршрутизации. Кроме того, качество работы гибридной системы напрямую зависит от предсказательной способности *ML*-модуля. В данном исследовании не рассматривались последствия ошибок *ML*-модуля I и II рода, которые в реальных условиях могут приводить к неоптимальным решениям. Важным направлением для будущих исследований является верификация предложенного гибридного подхода на реальных данных транспортных компаний. Планируется сбор анонимизированных исторических данных за 2023-2025 гг. для проведения верификации. Дополнительно планируется использовать данные из открытых государственных источников, включая Портал открытых данных, статистические сборники Росстата по грузовым перевозкам и открытые датасеты Министерства транспорта РФ. Использование реальных данных позволит не только подтвердить полученные результаты, но и выявить дополнительные факторы, влияющие на эффективность гибридной системы, такие как сезонные паттерны, пространственная корреляция дорожных событий и специфика городской инфраструктуры отдельных регионов РФ. Верификация будет осуществляться с использованием методики A/B-тестирования, где часть маршрутов будет планироваться с применением гибридного подхода, а часть – с использованием традиционных методов, что обеспечит объективное сравнение эффективности в реальных операционных условиях.

Тем не менее, полученные результаты имеют высокую практическую значимость. Они демонстрируют, что даже при использовании относительно простых *ML*-моделей возможен существенный прирост эффективности за счет их корректной интеграции с формальными методами оптимизации. Предложенная архитектура может служить основой для разработки интеллектуальных модулей в современных системах управления транспортом (*TMS*) и автопарком (*FMS*). Дальнейшие направления исследований могут включать усложнение постановок оптимизационных задач (*multi-vehicle, multi-depot VRP*), использование более сложных предиктивных моделей, а также исследование чувствительности системы к точности *ML*-прогнозов.

Выводы

В рамках настоящей работы была исследована проблема оптимизации грузопотоков в условиях стохастической неопределенности. Была предложена и верифицирована гибридная методология, интегрирующая предиктивные возможности машинного обучения и формальный аппарат теории принятия решений. На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Продемонстрирована ограниченность применения статических логико-аналитических подходов в изменчивой транспортной среде. Основываясь на усредненных данных, данные системы не способны адаптироваться к контекстуальным изменениям рисков, что приводит к систематическим операционным сбоям и, как следствие, к значительным экономическим потерям, что подтверждается низким показателем *OTD* (62.8%) и высоким риском катастрофических издержек (*CVaR*).

2. Разработана и обоснована концептуальная архитектура гибридной системы, в которой предиктивный *ML*-модуль осуществляет динамическую и объективную оценку вероятностей состояний среды, а логико-аналитический модуль на основе данных прогнозов решает задачу структурной оптимизации. Данный подход позволяет перейти

от статической оптимизации к проактивному управлению рисками, заменяя субъективные априорные оценки на объективные, основанные на данных.

3. Результаты численного эксперимента полностью подтвердили выдвинутую научную гипотезу. Гибридный подход продемонстрировал преимущество над статическим по всем ключевым показателям: совокупные транспортные издержки были снижены на ~59.6%, а процент своевременных доставок увеличился с 62.8% до 92.0%.

4. Доказана конкурентоспособность предложенного подхода по сравнению с сильными бенчмарками. В сравнении с классическим методом стохастического программирования (*SAA*), гибридный подход показал сопоставимую производительность, продемонстрировав тенденцию к улучшению ключевых бизнес-метрик, включая совокупные издержки и операционную надежность.

5. Доказано, что основное преимущество гибридной системы заключается не только в повышении экономической эффективности, но и в обеспечении робастности принимаемых решений. Система продемонстрировала способность эффективно отсекать "хвост" распределения с наиболее неблагоприятными и дорогостоящими исходами, что обеспечивает стабильность и предсказуемость операционной деятельности.

Таким образом, предложенная синергетическая модель является перспективным инструментом для снятия стохастической неопределенности в сложных логистических системах. Результаты работы имеют как теоретическую ценность, развивая методы интеграции искусственного интеллекта и исследования операций, так и высокую практическую значимость, открывая пути для создания нового поколения интеллектуальных систем управления транспортом.

Благодарность/Финансирование

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования – Минобрнауки РФ) по теме: «Научные, методологические и практические основы разработки и применения интеллектуальных технологий и систем поддержки принятия решений с учетом факторов неопределенности для обеспечения устойчивого развития транспортной отрасли Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2025-0023).

Список литературы

1. Федотова С.Н. Цифровизация транспортно-логистических услуг // Экономика и бизнес: теория и практика. 2019. № 11-3 (57). С. 124-127. EDN: JGYIMU

2. Агафонов, А. А. Сравнение методов машинного обучения в задаче прогнозирования движения общественного транспорта / А. А. Агафонов, А. С. Юмаганов // Сборник трудов ИТНТ-2019, Самара, 21–24 мая 2019 года. Том 4. – Самара: Новая техника, 2019. – С. 761-768. – EDN WBQMKX.

3. Астапов, Р. Л. Автоматизация подбора параметров машинного обучения и обучение модели машинного обучения / Р. Л. Астапов, Р. М. Мухамадеева // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2021. – № 5-2(73). – С. 34-37. – EDN GJEUNW.

4. Дернов, Н. С. Применение искусственного интеллекта и машинного обучения в логистике / Н. С. Дернов, Г. А. Дербенев, Д. Е. Шаронов // Научные исследования 2025 : Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 апреля 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. – С. 58-61. – EDN OBUGDK.

5. Писарева, О. М. Программный агент организации вычислений в крупномасштабных системах управления / О. М. Писарева, Д. В. Стефановский // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024) : Труды Семнадцатой

международной конференции, Москва, 24–26 сентября 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова Российской академии наук, 2024. – С. 1140-1145. – EDN PPTBHH.

6. Халтурин, Р. А. Методы снятия неопределенности в сложных логистических системах при распределении ресурсов по объектам инфраструктуры / Р. А. Халтурин, А. В. Терентьев // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-1(90). – С. 116-123. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-3-1(90)-116-123. – EDN TFPOLY.

7. Терентьев А.В. Развитие метода районирования // Инновации на транспорте и в машиностроении: Материалы 4-ой международной научно-практической конференции. СПб.: Национальный минеральносырьевой университет "Горный". 2016. С. 127-130. EDN: XFGWSZ

8. Стеценко А.В., Ефремова С.М. Инновационные технологии в логистике: оценка и перспективы развития. Материалы XXII Международной научно-практической конференции. Орел. 2024. С. 155-160.

9. Terentiev, A. V., Yevtukov, S. S., & Karelina, E. A. (2020). Development of zoning method for solving economic problems of optimal resource allocation to objects of various importance in context of incomplete information. Advances in Economics, Business and Management Research, 128, 765-772. 10.2991/aebmr.k.200312.108. DOI: 10.2991/aebmr.k.200312.108EDN EDN: LJQRIK

10. Модель структуры системы распределения ресурсов, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей / Р. А. Халтурин, И. Ю. Каштанов, В. Д. Кутков, Н. С. Акиньшин // International Journal of Advanced Studies. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 234-251. – DOI 10.12731/2227-930X-2025-15-1-357. – EDN STTJXT.

11. Liu, Yu. Implications of imbalanced datasets for empirical ROC-AUC estimation in binary classification tasks / Yu. Liu, Ya. Li, D. Xie // Journal of Statistical Computation and Simulation. – 2024. – Vol. 94, No. 1. – P. 183-203. – DOI 10.1080/00949655.2023.2238235. – EDN JCWKNQ.

References

1. Fedotova S.N. Tsifrovizatsiya transportno-logisticheskikh uslug [Digitalization of transport and logistics services]. Ekonomika i biznes: teoriya i praktika [Economics and Business: Theory and Practice], 2019, no. 11-3 (57), pp. 124–127. EDN: JGYIMU (in Russian).

2. Agafonov A. A., Yumaganov A. S. Sravnenie metodov mashinnogo obucheniya v zadache prognozirovaniya dvizheniya obshchestvennogo transporta [Comparison of machine learning methods in the problem of public transport movement prediction]. Sbornik trudov ITNT-2019, Samara, 21–24 maya 2019 goda. Tom 4 [Proceedings of ITNT-2019, Samara, May 21-24, 2019. Volume 4]. Samara: Novaya tekhnika, 2019, pp. 761–768. EDN: WBQMKX (in Russian).

3. Astapov R. L., Mukhamadeeva R. M. Avtomatizatsiya podbora parametrov mashinnogo obucheniya i obuchenie modeli mashinnogo obucheniya [Automation of machine learning parameters selection and training of a machine learning model]. Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire [Current Scientific Research in the Modern World], 2021, no. 5-2(73), pp. 34–37. EDN: GJEUNW (in Russian).

4. Dernov N. S., Derbenev G. A., Sharonov D. E. Primenenie iskusstvennogo intellekta i mashinnogo obucheniya v logistike [Application of artificial intelligence and machine learning in logistics]. Nauchnye issledovaniya 2025: Sbornik statey XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 23 aprelya 2025 goda [Scientific Research 2025:

Collection of articles of the XVI International Scientific and Practical Conference, Penza, April 23, 2025]. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.Yu.), 2025, pp. 58–61. EDN: OBUGDK (in Russian).

5. Pisareva O. M., Stefanovskiy D. V. Programmnýy agent organizatsii vychisleniy v krupnomasshtabnykh sistemakh upravleniya [Software agent for computation organization in large-scale control systems]. Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2024): Trudy Semnadtsatoy mezhdunarodnoy konferentsii, Moskva, 24–26 sentyabrya 2024 goda [Control of Development of Large-Scale Systems (MLSD'2024): Proceedings of the Seventeenth International Conference, Moscow, September 24-26, 2024]. Moscow: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova Rossiyskoy akademii nauk, 2024, pp. 1140–1145. EDN: PPTBHH (in Russian).

6. Khalturin R. A., Terent'ev A. V. Metody snyatiya neopredelennosti v slozhnykh logisticheskikh sistemakh pri raspredelenii resursov po ob"ektam infrastruktury [Methods of uncertainty removal in complex logistics systems when distributing resources to infrastructure objects]. Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin [World of Transport and Technological Machines], 2025, no. 3-1(90), pp. 116–123. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-1(90)-116-123. EDN: TFPOLY (in Russian).

7. Terent'ev A.V. Razvitie metoda rayonirovaniya [Development of the zoning method]. Innovatsii na transporte i v mashinostroenii: Materialy 4-oy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovations in transport and mechanical engineering: Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg: Natsional'nyy mineral'nosyr'evoy universitet "Gornyy", 2016, pp. 127–130. EDN: XFGWSZ (in Russian).

8. Stetsenko A.V., Efremova S.M. Innovatsionnye tekhnologii v logistike: otsenka i perspektivy razvitiya [Innovative technologies in logistics: assessment and development prospects]. Materialy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Orel [Materials of the XXII International Scientific and Practical Conference, Orel], 2024, pp. 155–160 (in Russian).

9. Terentiev, A. V., Yevtukov, S. S., & Karelina, E. A. Development of zoning method for solving economic problems of optimal resource allocation to objects of various importance in context of incomplete information. Advances in Economics, Business and Management Research, 2020, vol. 128, pp. 765–772. DOI: 10.2991/aebmr.k.200312.108. EDN: LJQRIK.

10. Khalturin R. A., Kashtanov I. Yu., Kutkov V. D., Aknishin N. S. Model' struktury sistemy raspredeleniya resursov, osnovannoy na funktsional'no-setevom printsipe predstavleniya pokazateley [Model of the resource distribution system structure based on the functional-network principle of indicators representation]. International Journal of Advanced Studies, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 234–251. DOI: 10.12731/2227-930X-2025-15-1-357. EDN: STTJXT (in Russian).

11. Liu, Yu., Li, Ya., Xie, D. Implications of imbalanced datasets for empirical ROC-AUC estimation in binary classification tasks. Journal of Statistical Computation and Simulation, 2024, vol. 94, no. 1, pp. 183–203. DOI: 10.1080/00949655.2023.2238235. EDN: JCWKNQ.

Sudorgin R.O., Aknishin N.S., Nikitin D.V., Solovev N.V.

HYBRID APPROACH TO ROBUST OPTIMIZATION OF FREIGHT FLOWS BASED ON THE SYNERGY OF MACHINE LEARNING AND DECISION THEORY

Abstract. *The article investigates the problem of optimizing cargo flow management under conditions of stochastic uncertainty. A hybrid approach is proposed, integrating machine learning (ML) models for the dynamic assessment of the probabilistic states of a transport network and the formal apparatus of decision theory for selecting an optimal strategy. The scientific novelty of the approach lies in solving the classical problem of decision theory related to the subjectivity of assigning a priori probabilities of environmental states by replacing them with objective, data-driven forecasts generated by ML models. The logical-analytical core uses a mathematical apparatus based on the principle of maximum entropy, which makes it possible to formalize the choice of the optimal solution under incomplete information. The created unified control loop, where the ML component ensures adaptability to changing conditions, and the logical-analytical component ensures structural optimality, allows for achieving robust and economically efficient solutions. The effectiveness of the proposed methodology is confirmed by a numerical experiment based on discrete-event simulation, which demonstrated a significant reduction in total costs and an increase in operational reliability compared to static and stochastic programming benchmarks.*

Keywords: robust optimization, machine learning, decision theory, Shannon entropy, stochastic uncertainty, transport logistics, VRP.

Сведения об авторах:

Судоргин Роман Олегович
Государственный университет управления
Адрес: 109542, Москва, Рязанский пр-т, д. 99
к.э.н, младший научный сотрудник УКНИ
e-mail: ro_sudorgin@guu.ru

Акиньшин Никита Сергеевич
Государственный университет управления
Адрес: 109542, Москва, Рязанский пр-т, д. 99
Аспирант, младший научный сотрудник ЦУИП
e-mail: ns_akinshin@guu.ru

Никитин Дмитрий Владимирович
Государственный университет управления
Адрес: 109542, Москва, Рязанский пр-т, д. 99
аспирант, научный сотрудник УКНИ
e-mail: dv_nikitin@guu.ru

Соловьев Николай Владимирович
Государственный университет управления
Адрес: 109542, Москва, Рязанский пр-т, д. 99
научный сотрудник УКНИ
e-mail: nv_solovev@guu.ru

Information about the authors:

Sudorgin Roman Olegovich
State University of Management
Address: 99 Ryazansky Prospect, Moscow, 109542
Ph.D. in Economics, Junior Researcher at the Research Center
e-mail: ro_sudorgin@guu.ru

Aknishin Nikita Sergeyevich
State University of Management
Address: 99 Ryazansky Prospect, Moscow, 109542
Postgraduate Student, Junior Researcher at the Center for Digital Platforms
e-mail: ns_akinshin@guu.ru

Nikitin Dmitry Vladimirovich
State University of Management
Address: 99 Ryazansky Prospect, Moscow, 109542
Postgraduate Student, Research Assistant at the Research Center
e-mail: dv_nikitin@guu.ru

Solovev Nikolai Vladimirovich
State University of Management
Address: 99 Ryazansky Prospect, Moscow, 109542
Research Assistant at the Research Center
e-mail: nv_solovev@guu.ru

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) **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.
12) **Пропуск строки.**
13) **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).

14) **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, основную 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 Сборника и требования по оформлению статей размещены на сайте https://journal.dat-dn.ru/.

Научное издание

ВЕСТНИК ДОНЕЦКОЙ АКАДЕМИИ ТРАНСПОРТА

№ 4
2025

(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. 19,76. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Знак информационной продукции 16+
Подписано в печать 22.12.2025.
Дата выхода в свет 23.12.2025.

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