

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 656.222.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-188-200



АНАЛИЗ ОПЫТА И ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Бессоненко С.А., Осипов Н.И.

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Аннотация. На современном этапе цифровизация транспортной сферы обусловила предпосылки для трансформации железнодорожного транспорта, в связи с чем в детальном исследовании нуждается потенциал искусственного интеллекта (ИИ) для повышения эффективности перевозок. Целью статьи является систематизация методов, опыта и перспектив использования ИИ при управлении перевозочным процессом на железнодорожном транспорте. Проведен обзор нормативной литературы, научных публикаций и реализованных проектов в данной сфере за последнее десятилетие, в течение которого ИИ стал одним из драйверов развития транспорта. В результате проведенного анализа выделены технологические тренды интеграции ИИ в эксплуатационную работу, проектирование инфраструктуры и логистику железнодорожного транспорта (машинное обучение, компьютерное зрение, цифровые двойники). Определены области применения ИИ от прогнозирования спроса и планирования на стратегическом уровне до нейросетевого моделирования тяговых расчетов. Систематизированы преимущества (рационализация использования пропускной способности, снижение себестоимости перевозок, повышение надежности и безопасности функционирования инфраструктуры) и барьеры внедрения ИИ (качество и разнородность данных, нормативное регулирование, специфика перевозочного процесса). Обоснована целесообразность использования ИИ для уменьшения неопределенности при выборе эффективной системы интервального регулирования движения поездов на однопутных железнодорожных участках. Дальнейшие исследования по внедрению ИИ в управление перевозочным процессом должны быть сосредоточены на создании адаптивных систем управления, интеграции разнородных данных, разработке отраслевого стандарта и интеграции тренировочных сред в учебный процесс инженеров путей сообщения.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, управление перевозочным процессом на железнодорожном транспорте, цифровой двойник, прогнозная аналитика, интеллектуальные системы

© Бессоненко С.А., Осипов Н.И., 2026

Для цитирования

Бессоненко С.А., Осипов Н.И. Анализ опыта и перспектив применения искусственного интеллекта для управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 188-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-188-200>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ANALYSIS OF EXPERIENCE AND PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO RAILWAY TRANSPORT OPERATIONS MANAGEMENT

Bessonenko S.A., Osipov N.I.

Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

Abstract. At the present stage, the digitalization of the transport sector has created prerequisites for the transformation of railway transport, making it necessary to conduct a detailed study of the potential of artificial intelligence (AI) for improving transportation efficiency. The aim of this paper is to systematize the methods, practical experience, and prospects for the use of AI in railway transport operations management. A review of regulatory documents, scientific publications, and implemented projects in this field over the past decade has been conducted, during which AI has become one of the key drivers of transport development. The analysis has identified technological trends in the integration of AI into railway operations, infrastructure design, and logistics, including machine learning, computer vision, and digital twins. The areas of AI application have been identified, ranging from demand forecasting and strategic-level planning to neural-network-based traction calculation modeling. The advantages of AI implementation (more efficient utilization of line capacity, reduced transportation costs, and improved reliability and safety of infrastructure) as well as barriers to its implementation, including data quality and heterogeneity, regulatory requirements, and the specific characteristics of the transportation process, have been systematized. The feasibility of using AI to reduce uncertainty in selecting an effective train traffic interval regulation system for single-track railway sections is substantiated. Further research into the implementation of AI in railway transport operations management should focus on developing adaptive control systems, integrating heterogeneous data, developing an industry-specific standard, and incorporating training environments into the educational process for railway engineering students.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, railway transport operations management, digital twin, predictive analytics, intelligent systems

For citation

Bessonenko S.A., Osipov N.I. Analysis of Experience and Prospects for the Application of Artificial Intelligence to Railway Transport Operations Management. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 188-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-188-200>

Введение

На современном этапе развития железнодорожного транспорта имеются следующие вызовы: переориентирование грузопотоков на восток, потребность в обновлении инфраструктуры, геополитические риски, необходимость повышения эффективности. Решение данных задач требует цифровизации всех бизнес-процессов в весьма сжатые сроки (к 2030 году в соответствии с указаниями руководства ОАО «РЖД»), в связи с чем необходимо вести работу по выделению приоритетных проектов. Данные проекты должны быть ориентированы на интеграцию мультимодальных перевозок, развитие клиентских сервисов, оптимизацию графика движения и плана формирования поездов, автоматизацию процессов на ключевых станциях сети и технологическую независимость.

Решение задач по реагированию на обозначенные вызовы сопряжено со сбором, анализом и интерпретацией большого объема данных различного рода, обработка которых с помощью аналитического (вследствие недостаточной точности) или имитационного (вследствие трудоемкости) моделирования не может считаться исчерпывающей. Развитие вычислительных мощностей позволило к аналитическому и имитационному модели-

рованию добавить новый инструмент для поддержки принятия решений – искусственный интеллект (ИИ).

В соответствии с [1] ИИ – это способность технической системы имитировать когнитивные функции человека и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека. Следует отметить, что внедрение ИИ на отечественном железнодорожном транспорте сопряжено с двумя особенностями – значительной протяженностью сети и наличием унаследованных систем управления перевозочным процессом. Под унаследованными системами в данном случае понимается совокупность программного обеспечения и программно-аппаратных комплексов, нуждающаяся в адаптации к современным условиям перевозочного процесса (в частности, к необходимости взаимодействия с ИИ). Данные обстоятельства предопределили точечный характер внедрения ИИ на сети железных дорог ОАО «РЖД». При этом необходим системный анализ целесообразности внедрения ИИ во избежание необоснованного его использования.

Основным документом, излагающим порядок внедрения ИИ в транспортные бизнес-процессы, является Белая книга ИИ в сфере транспорта и логисти-

ки [2]. В качестве требований для железнодорожного транспорта Белой книгой установлены безопасность, точность до минут, учет состояния инфраструктуры. К особенностям отнесены значительные объемы телеметрии, геопространственных и исторических данных. В качестве типичных ИИ-решений выделены предиктивное обслуживание, оптимизация графика движения поездов (ГДП), автоведения поездов.

Классификация технологий ИИ с указанием количества их упоминания в качестве ключевых слов к научным публикациям и количества проектов в сфере управления перевозками в соответствии с [3] представлена на **рис. 1**.

Целью данной статьи является проведение анализа возможностей, существующих решений и перспективных направлений применения ИИ для повышения эффективности, гибкости и надежности управ-

ления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- классифицировать технологии ИИ и оценить степень их интеграции в перевозочный процесс на отечественном железнодорожном транспорте;
- проанализировать мировой опыт, перспективные направления и проблемы применения ИИ в управлении поездопотоками, планировании перевозок и проектировании инфраструктуры;
- на примере решения задачи выбора системы интервального регулирования движения поездов на железнодорожном участке определить положение ИИ в алгоритмике робастного управления перевозочным процессом.

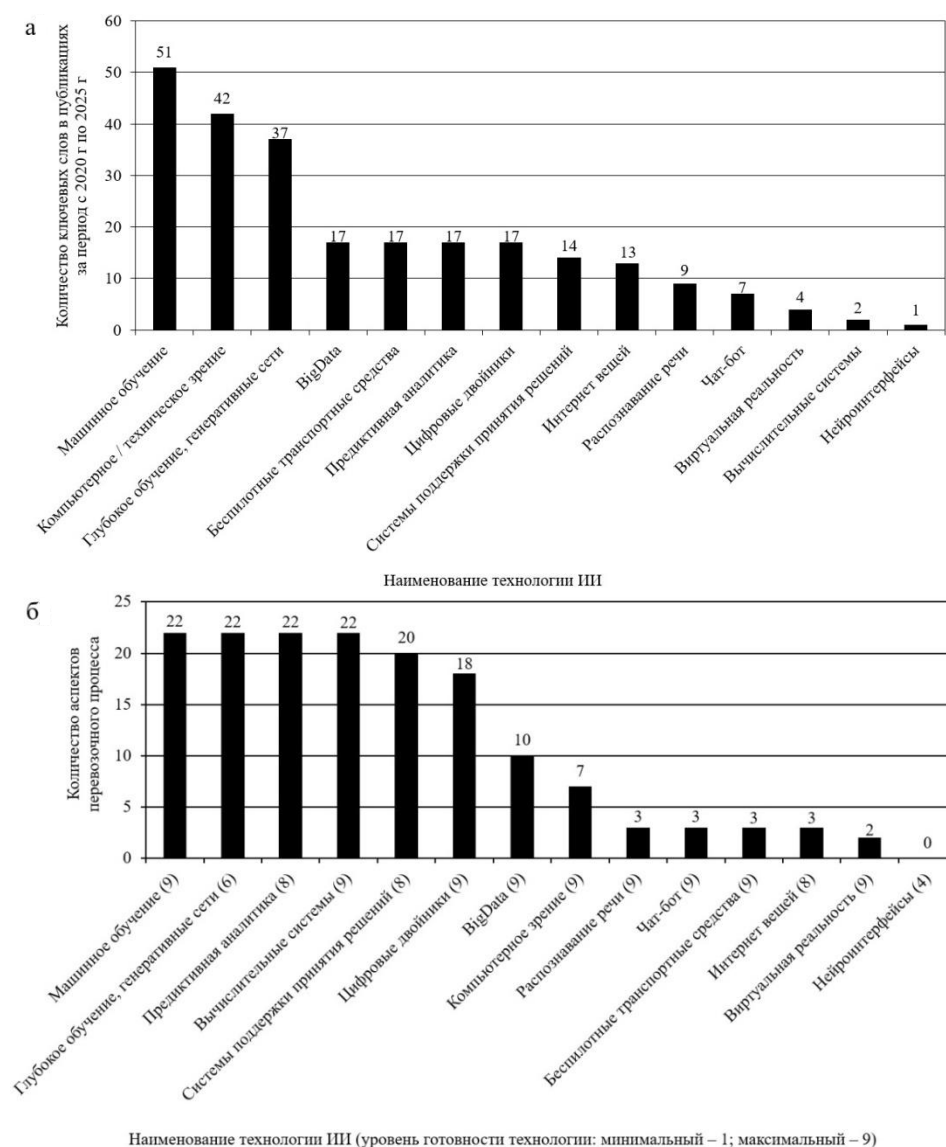


Рис. 1. Технологии ИИ, упоминаемые в качестве ключевых слов к рецензируемым публикациям (а) и используемые в перевозочном процессе (б)

Fig. 1. AI technologies mentioned as keywords in peer-reviewed publications (a) and used in railway transportation operations (б)

Характеристика технологий ИИ, применяемых для управления перевозочным процессом и степень их внедрения на ОАО «РЖД»

На данный момент имеет место ряд отечественных исследований по внедрению ИИ в управление перевозками. Основными их выводами являются:

- целесообразность применения ИИ для построения энергоэффективного ГДП (посредством системы «ЭЛЬБРУС») с целью реакции на изменения в сочетании с детерминированными алгоритмами для логического обоснования [4];
- важность машинного обучения при регулировании вагонопотоков с целью минимизации нарушений сроков доставки [5], в том числе на основе «Динамической модели загрузки инфраструктуры» (ДМЗИ) [6];
- возможность перехода к нейросетевому управлению с выработкой последовательности действий поездного диспетчера (без снятия с него ответственности) по совершенствованию параметров поездной работы [7].

Классификация подходов ИИ, достоинства, недостатки и область их применения в управлении перевозочным процессом представлены на **рис. 2**.

Следует отметить, что за последние пять лет отсутствуют научные публикации по применению символического ИИ для управления процессами перевозок, поскольку он уступил место более гибким технологиям – методам машинного обучения, способным адаптироваться к изменяющимся условиям перевозочного процесса в реальном времени.

Суть эволюционного подхода (в частности, генетических алгоритмов) – стохастическая оптимизация с использованием механизмов естественного отбора. Они позволяют находить оптимальное решение среди множества вариантов, что делает возможным их применение для оперативного планирования. Так, в работе [8] на основе анализа 500000 записей о грузоперевозках РЖД за два года представлена возможность применения генетического алгоритма для оптимизации ГДП.

В отличие от лишенных «прозрачности» глубоких нейросетей, ансамблевые методы могут применяться для задач, решение которых должно быть не только точным, но и обоснованным. К данным методам относится метод случайного леса (проводится опрос всех решающих деревьев) и градиентного бустинга (проводится последовательное обучение каждого решающего дерева на основе ошибок предыдущего). Анализ публикаций позволил установить:

- возможность применения случайного леса для расчета ускорения поезда в зависимости от массы, скорости, используемой силы тяги, уклона пути [9];
- эффективность применения градиентного бустинга в сравнении со случайным лесом для анализа вероятности нарушения машинистом безопасности движения [10];
- состоятельность случайного леса и градиентного бустинга для прогнозирования энергозатрат тягового подвижного состава [11].

Основой систем глубокого обучения является многослойный персептрон. Многослойный персептрон является нейронной сетью прямого распространения с несколькими слоями (входным, скрытыми, выходным).

Многослойный персептрон применяется в качестве самостоятельной архитектуры, если зависимости в данных относительно просты. Он не требует значительных вычислительных ресурсов и является универсальным аппроксиматором. Например, известны:

- блок прогноза системы управления сортировочной станцией [12];
- исследование устойчивости системы курсирования кольцевых маршрутных поездов со случайными значениями грузопотока [13];
- набор нейросетевых моделей планирования работы малоинтенсивной железнодорожной линии [14];
- метод прогнозирования пассажиропотока на высокоскоростной магистрали (с учетом как прямого, так и скрытого спроса) [15].

Значительное внимание обращают на себя технологии компьютерного зрения (анализа изображений) и технического зрения (автоматического действия на основе результатов анализа). Так, на данный момент существуют:

- принципы системы поддержки принятия решений машинистом локомотивов [16] на основе идентификации объектов;
- решения для распознавания номера вагона по изображению [17], правильности погрузки груза на открытом подвижном составе [18];
- комплекс для повышения безопасности при проведении путевых работ [19];
- концепция прогнозирования работы сортировочной станции на основе данных «от колеса» и технического зрения [20];
- «сканер эмоций», который анализирует мимику пассажиров для повышения качества сервиса [21].

Ансамблевые методы выявляют статические зависимости в данных, однако определяющая характеристика перевозочного процесса – эволюция во времени. Рекуррентные нейронные сети, в особенности архитектуры с долгой краткосрочной памятью (LSTM), представляют собой модель, обладающую «памятью». Данное свойство позволяет решать задачи, где прогноз зависит как от текущего состояния, так и от предыстории процесса. На данный момент с применением рекуррентных нейросетей:

- возможно определение оптимальной позиции контроллера машиниста [22];
- установлены закономерности в последовательности предпосылок нештатных ситуаций и проведен регрессионный анализ временных рядов о задержках [8];
- может прогнозироваться логистическая обстановка на основе данных о движении транспортных потоков [23].

В условиях, когда данные от железнодорожных датчиков не имеют готовых «подписей», методы обучения без учителя открывают путь к проактивному управлению перевозочным процессом. Эти алгоритмы исследуют неразмеченные данные, группируя сходные события и обнаруживая закономерности. К настоящему моменту в научной литературе имеют место:

- выявление аномалий в устройствах передачи кода на сигнальной точке на базе данных системы технической диагностики без необходимости ручного анализа диагностируемых параметров [24];

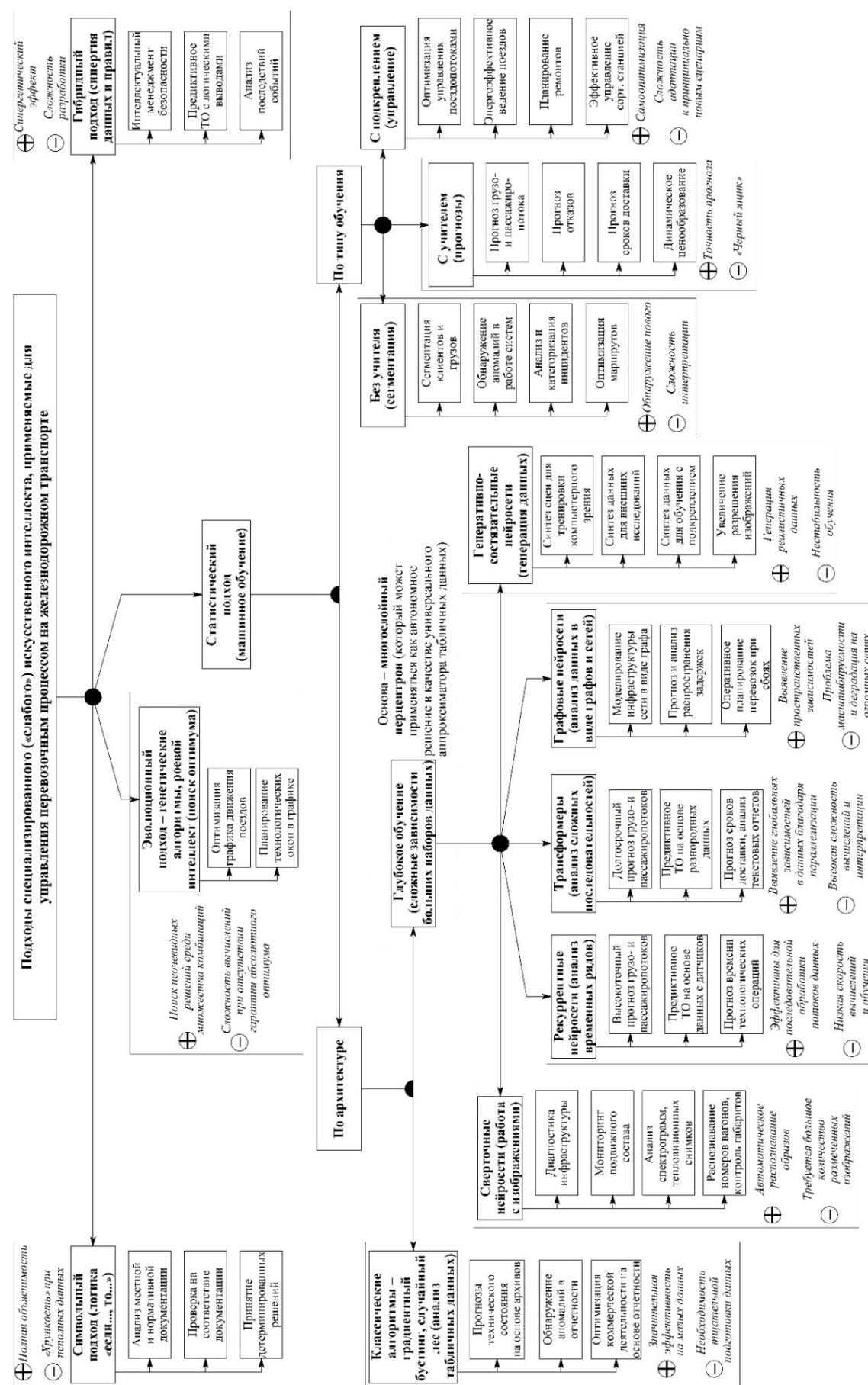


Рис. 2. Характеристика подходов ИИ
Fig. 2. Characteristics of AI approaches

– возможность применения обучения без учителя для прогноза рисков работы железнодорожной линии на основе размеров движения, простоев, отказов и технологических окон [25].

Обучение с учителем – это метод машинного обучения, при котором модель обучается на примерах с известными «правильными ответами». Модель получает массивы данных (например, ГДП, записи с датчиков, изображения инфраструктуры), в которых каждый пример содержит как условие, так и итог – «разметку». Например, в исследовании [26] рассматривается обучение искусственной нейросети для повышения точности тяговых расчетов при использовании в качестве «учителя» эталонных данных о режиме движения поезда, полученных методом динамического программирования.

Обучение с подкреплением – это метод ИИ, в котором агент учится вырабатывать стратегию действий через взаимодействие со средой, получая от неё сигналы вознаграждения или штрафа. Цель агента – добиться максимального вознаграждения. В отечественной научной литературе изложены:

– успешное применение обучения с подкреплением моделей для управления движением поездов в качестве поездного диспетчера на цифровой модели железнодорожного участка [27];

– перспективность применения обучения с подкреплением при организации движения виртуально соединенных поездов [28];

– мультиагентная модель обучения с подкреплением, продемонстрировавшая на модели станции в сравнении с жадным алгоритмом и симплекс-методом сокращения простоев поездов, энергозатрат и отсутствие столкновений [29].

В последние годы активное развитие получили гибридные нейросетевые модели, позволяющие перекрыть недостатки «чистых» архитектур. Наиболее часто в сочетании с другими архитектурами используют графовые нейросети, обеспечивающие моделирование сетевой топологии. Так, в работе [30] представлена комбинация графовой и рекуррентной нейросетей, имитационного моделирования, динамической оптимизации и линейного программирования в форме блока оперативного управления станцией.

Мировой опыт, проблемы и перспективы применения искусственного интеллекта для управления перевозочным процессом

За рубежом (как и в России) наибольшее внимание сосредоточено на интеграции в управление перевозочным процессом компьютерного зрения и глубокого обучения. Значительный научный интерес представляют особенности внедрения ИИ на иностранном железнодорожном транспорте.

В статье [31] описывается специфика внедрения ИИ в управление перевозками в Китае, США и Евросоюзе. Данный процесс имеет много общих черт с Россией. Например, с целью прогнозирования задер-

жек поездов используются рекуррентные нейросети, для оптимизации расписаний применяется обучение с подкреплением, машинное обучение дополняется классическими подходами для устойчивости решений. В то же время развиваются мультиагентные системы, где поезда или диспетчеры выступают в роли агентов, обеспечивающих децентрализованное управление движением, что противоречит принципу иерархии на ОАО «РЖД».

Интересен опыт Китая, обладающего развитой сетью высокоскоростных магистралей. В статье [32] выделены три направления для высокоскоростного железнодорожного транспорта: планирование пассажирских перевозок, прогнозирование пассажиропотока и развитие ИИ-платформ. Проанализированы генетические алгоритмы для оптимизации остановок, LSTM-модели для прогнозирования спроса и цифровые двойники. Особенностью китайского подхода является системность внедрения ИИ: прогнозные модели пассажиропотока связаны с алгоритмами составления расписаний, а цифровые двойники используются как для оперативного, так и для долгосрочного планирования.

В рассмотрении нуждаются китайские исследования по интеграции ИИ в радиосвязь. Так, работа [33] посвящена применению генеративно-состязательных сетей для оценки канала связи на высокоскоростной магистрали. Авторы предлагают подход, при котором генератор создает правдоподобные характеристики канала, а дискриминатор учится отличать их от реальных. Так генератор приобретает способность предсказывать состояние канала для обеспечения стабильности связи.

Метод, изложенный в работе британских ученых [34], основан на анализе топологии сети с формированием «отпечатков» станций в виде векторов и их синтеза в единый образ всего маршрута движения поезда с его подачей на вход модели машинного обучения. Подобный подход, позволяющий алгоритму выявлять критические по задержкам участки сети, мог бы дополнить существующие в России методы анализа устойчивости графиков движения.

Важным трендом является развитие федеративного ИИ для сохранения коммерческой тайны при взаимодействии участников перевозочного процесса. В этой парадигме исходные данные остаются локальными, доступ предоставляется только к обновлениям моделей, что обеспечивает конфиденциальность и совместное обучение. Федеративный ИИ может повысить точность прогнозирования трафика и гибкость систем управления движением без централизации данных о поездах. Для его развития необходимы выбор масштабируемой архитектуры в сетях связи и разработка механизмов агрегирования данных [35].

Научный интерес представляет применение трансформеров. Данная архитектура может быть адаптирована для прогнозирования пространственно-временных взаимодействий в транспортных системах. При этом для обучения трансформера требуются значительные объемы данных. Проанализированные

работы иллюстрируют три подхода применения трансформеров.

Первый подход предполагает применение «чистого» трансформера. Так, во французском исследовании [36] выполняется прогноз распространения задержек в реальном времени для всей сети на основе трансформера. Механизм «самовнимания» (лежащий в основе трансформера) позволяет модели анализировать состояние более 3000 поездов на горизонте до 70 мин и выявлять силу влияния каждого поезда на другие. На вход модель получает актуальные данные о местоположении, расписании и задержках каждого поезда. Механизм «самовнимания» вычисляет взаимосвязи между всеми поездами.

Второй подход связан с созданием гибрида. В китайском исследовании [37] используется LSTM-трансформер-модель, преодолевающая ограничения рекуррентных сетей при обработке временных последовательностей. LSTM извлекает из архивных данных зависимости и преобразует их в векторы. Эти векторы поступают на вход трансформера для прогноза на основе выявления неочевидных взаимосвязей. Таким образом, симбиоз двух архитектур позволяет сохранить преимущества LSTM для работы с временными рядами и трансформера для параллельной обработки данных.

Основой третьего подхода является сравнение разных способов гибридизации. Так, американское исследование [38] посвящено системному сравнению сочетаний LSTM и трансформера для измерения профиля переездов с оценкой их эффективности на данных с датчиков. Наиболее эффективными оказались архитектуры, в которых LSTM и трансформер работают параллельно или последовательно с LSTM на первом этапе. Успешные модели эффективно сочетали способность LSTM улавливать зависимости в данных датчиков с механизмом «самовнимания» трансформера для выявления взаимосвязей в профиле.

Исследователи сходятся во мнении, что ИИ сохраняет потенциал оптимизации железнодорожного транспорта посредством управления пропускной способностью [39]. Дальнейшее развитие ИИ неразрывно связано с технологиями 5G, интернетом вещей, граничными вычислениями и блокчейном [35]. Отмечается возможность перехода к интеллектуализации, при которой роботы работают с документами, освобождая персонал для творческих задач [40]. Это ведет к трансформации профессий, например к появлению машиниста-оператора [39]. Важным инструментом называются цифровые двойники, позволяющие обучать нейросети без рисков для производства. В таблице представлены примеры решения актуальных задач управления перевозками с помощью ИИ.

Проведенный анализ подходов к внедрению ИИ свидетельствует о том, что Россия, Китай, США и Евросоюз рассматривают ИИ в качестве инструмента для повышения безопасности и эффективности. Однако их стратегии внедрения ИИ предполагают как точечную модернизацию и решение проблем фрагментации (Россия, Евросоюз), так и масштабные про-

екты и стремление к автономности (Китай, США). При этом ключевые вызовы связаны с интеграцией ИИ в унаследованные системы, обеспечением кибербезопасности и преодолением нормативных барьеров.

Выбор системы интервального регулирования движения поездов на железнодорожном участке с применением ИИ

Актуальным способом повышения эффективности перевозок является развитие систем автоматики и телемеханики. Появление бесветофорных систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП) сделало необходимым сокращение неопределенности при выборе режима эксплуатации железнодорожных полигонов. Оценку эффективности СИРДП следует производить с учетом коэффициентов заполнения пропускной способности, влияния дестабилизирующих факторов и экономической эффективности.

Основной проблемой при решении данной задачи является необходимость рассмотрения сочетаний управленческих решений и дестабилизирующих факторов. В ходе рассмотрения неизбежны «проклятие размерности» и «комбинаторный взрыв», сопряженные с затруднительностью моделирования работы участка в течение 24 ч при множестве сочетаний стратегий и факторов. Другой проблемой является то, что уплотнение поездопотока на одной части участков может обернуться затруднениями на другой части участков и быть неэффективным для сети в целом.

В рамках данной статьи предлагается две постановки (рис. 3).

Прямая постановка задачи. Обеспечить развитие железнодорожного направления путем определения рациональных параметров его инфраструктуры (количество приемо-отправочных путей на промежуточных и технических станциях, количество главных путей на перегоне, СИРДП на перегонах) и технологии работы (тип графика движения поездов) с учетом дестабилизирующих факторов при условии обеспечения норматива маршрутной скорости с минимальными инвестициями. Требуется выбрать конфигурацию x^* :

$$\begin{cases} x^* = \arg \min C(x); \\ P(V(x, w) \geq V_{\text{норм}}) \geq (1 - \varepsilon), \end{cases} \quad (1)$$

где $C(x)$ – капитальные затраты при переходе к конфигурации участка x , руб.; P – вероятность выполнения норматива маршрутной скорости; w – сценарий прогона модели, предполагающий определенное состояние внешних условий на рассматриваемом участке и определенные параметры внешней среды; $V(x, w)$ – маршрутная скорость при данной конфигурации участка x и при данном сценарии w , км/ч; $V_{\text{норм}}$ – норматив маршрутной скорости, задаваемый заказчиком, км/ч; ε – задаваемая заказчиком вероятность невыполнения норматива.

Таблица. ИИ-решения актуальных задач управления процессами перевозок
Table. AI solutions for current railway transportation operations management tasks

Конкретная задача	Технология ИИ	Риски внедрения	Варианты снижения рисков
Оптимизация смешанных перевозок	Федеративный ИИ (для объединения моделей участников перевозки без обмена «сырыми» данными)	Технологические (несовместимость данных); правовые (коммерческая тайна); методологические (разработка единой целевой функции)	Разработка отраслевых протоколов обмена «обезличенными» моделями, создание пилотных проектов на основе госзаказа
Оснащение перегонов (количество главных путей, система интервального регулирования)	Гибрид на основе графовых нейросетей (для моделирования участков), генеративных (для дополнения базы данных), трансформеров (для анализа временных рядов), объяснимого ИИ	Технологические (перегруженность модели); информационные (дефицит данных по редким, но критичным событиям); нормативные (отсутствие стандартов)	Послойное моделирование каждого фактора; обучение на синтетических данных; апробация на существующих участках; введение «коэффициента надежности» (для выбора устойчивых решений)
Генеративное проектирование станций и узлов	Генеративно-состязательные сети и графовые нейронные сети (для генерации планировочных решений)	Методологические (сложность формализации требований для ИИ); кадровые (требуется «проектировщик-аналитик» данных); нормативные (отсутствие стандартов)	Выбор инженером среди множества ИИ-решений финального; тестирование на цифровых двойниках
Создание контура данных для тестирования ИИ-решений	Сквозной «железнодорожный ИИ» (с генерацией данных при их дефиците)	Технологические (разнородность исторических данных); организационные (коммерческая тайна); угроза кибербезопасности	Инициатива «сверху» по созданию стандартов данных, разработка контура данных для авторизованного доступа ученых
Формирование у инженеров путей сообщения навыков работы в симбиозе с ИИ	Адаптивные образовательные платформы; деловые игры на основе цифровых двойников; ИИ-инструменты в учебном процессе	Кадровые (консерватизм учебных программ); фундаментальные (студент может не усвоить основы профильных дисциплин)	Проведение хакатонов; применение ИИ для оптимизации (а не подмены) основ; визуализация связей между параметрами и результатом работы ИИ

Обратная постановка задачи. Обеспечить развитие железнодорожного направления путем определения рациональных параметров его инфраструктуры (количество приемо-отправочных путей на промежуточных и технических станциях, количество главных путей на перегоне, СИРДП на перегонах) и технологии работы (тип графика движения поездов) с учетом дестабилизирующих факторов при условии соблюдения предела инвестиций в его развитие. Требуется выбрать конфигурацию x^* :

$$\begin{cases} x^* = \arg \max f(x); \\ f(x) = \mu_V(x) - \lambda \cdot \sigma \cdot V(x, w); \\ C(x) \leq C(x)_{\text{норм}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $f(x)$ – функция «полезности» (риск-скорректированный критерий) конфигурации x ; $\mu_V(x)$ – математическое ожидание участковой скорости, км/ч; λ – коэффициент штрафа за риск; σ – стандартное отклонение скорости; $V(x, w)$ – маршрутная скорость при данной конфигурации участка x и при данном сценарии внешних условий и среды w , км/ч; $C(x)$ – капитальные затраты при переходе к конфигурации участка x , руб.; $C(x)_{\text{норм}}$ – предел инвестиций в развитие участка, руб.

Параметры внешней среды E (пропускная способность прилегающих железнодорожных направлений, перерабатывающая способность примыкающих технических станций, статистика дестабилизирующих факторов) включаются в сценарий w и опреде-

ляются законами распределения. Распределение скорости определяется зависимостью

$$V(x, w) = V(x, E, w_{\text{уч}}), \quad (3)$$

где $w_{\text{уч}}$ – дестабилизирующие факторы на анализируемом железнодорожном участке (ограничения скорости, неравномерность движения, отказы технических средств и прочие), интенсивность действия которых задается на основе анализа статистических данных о перевозочном процессе на участке.

Для генерации мутаций на каждом поколении генетического алгоритма предлагается использовать генеративно-состязательную сеть, обученную на множестве целесообразных конфигураций железнодорожного участка. Полученные данным способом мутации позволяют генерировать варианты, сохраняющие внутренние связи между параметрами инфраструктуры (например, между количеством путей и выбором СИРДП). Сочетание генетического алгоритма и генеративно-состязательной сети демонстрирует состоятельность при динамической многокритериальной оптимизации благодаря более высокому качеству генерируемых решений при меньшем размере популяции, а также по соотношению числа принятых решений к общему числу сгенерированных [41].

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Технологии ИИ трансформируют парадигму управления перевозочным процессом от реактивной к адаптивной. Цифровизация возможна только при комплексном подходе, включающем как разработку алгоритмов, так и инвестиции в цифровую инфраструктуру. Успех внедрения зависит в значительной степени

от «мягких» факторов: готовности организации к изменениям, развития человеческого капитала и адаптации нормативной среды. Кроме того, требуется конкретизация технико-экономической эффективности внедрения ИИ.

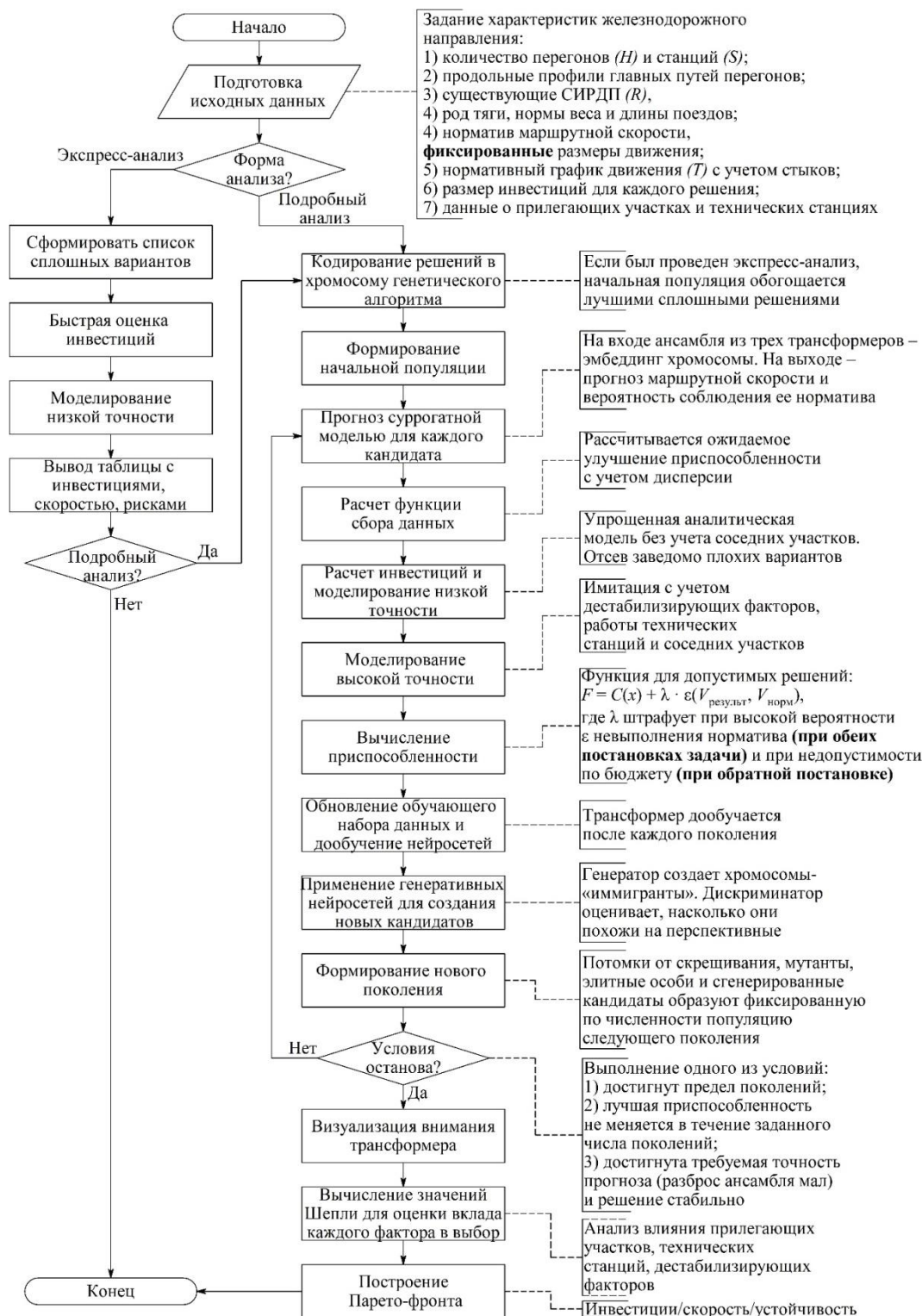


Рис. 3. Алгоритм выбора оптимального варианта СИРДП

Fig. 3. Algorithm for selecting the optimal train traffic interval regulation system

2. Достоинства ИИ носят в основном количественный и стратегический характер (снижение затрат, рост эффективности, новые возможности). Недостатки же часто имеют качественный и фундаментальный характер (проблемы доверия, ответственности, кибербезопасности, «черного ящика»). Сильная сторона ИИ – работа с большими данными и сложными нелинейными моделями – одновременно является его слабостью, выраженной в проблемах интерпретируемости и зависимости от качества данных.

3. Внедрение ИИ в перевозочный процесс должно идти по пути «гибридного интеллекта», где ИИ выступает как мощный инструмент поддержки принятия решений, а окончательный выбор и ответственность остаются за человеком (диспетчером, инженером).

4. Важнейший технологический эффект ИИ при принятии управленческих решений заключается в возможности оперативного рассмотрения их последствий. Также ИИ позволяет увеличить масштаб рассматриваемого элемента железнодорожной сети (вплоть до сети в целом) и обеспечить повышение прозрачности взаимного влияния различных сегментов сети.

5. ИИ может быть эффективно применен для решения задачи определения эффективности различных систем интервального регулирования движения поездов, о чем свидетельствует разработанный алгоритм выбора оптимальной СИРДП. Данный алгоритм является основой системы поддержки принятия решений по внедрению СИРДП с учетом дестабилизирующих факторов (ограничений скорости, неравномерности движения, отказов технических средств и прочих) на основе анализа зависимостей, определяемых в результате взаимодействия между нейросетевым и имитационным комплексами.

Список источников

1. ПНСТ 884-2023. Искусственный интеллект на железнодорожном транспорте. Варианты использования [Электронный ресурс] // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. URL: <https://www.rst.gov.ru>. (Дата обращения: 29.03.2026).
2. Белая книга. Искусственный интеллект в сфере транспорта и логистики : отраслевой документ [Электронный ресурс] // Министерство транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/12167>. (Дата обращения: 29.03.2026).
3. Реестр технологий искусственного интеллекта в транспортной отрасли [Электронный ресурс] // Министерство транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru>. (Дата обращения: 29.03.2026).
4. Кириякин В.Ю., Лобанов С.В. Перспективы использования ИИ-технологий в целях повышения энергоэффективности прогнозных графиков движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2025. № 11. С. 4–12.
5. Организация вагонопотоков: условия, ограничения, цифровые решения / А.Ф. Бородин, К.Ю. Николаев, Р.В. Шиндеров, В.В. Прозоров // Железнодорожный транспорт. 2025. № 6. С. 11–19.
6. О возможности применения в управлении железнодорожными транспортными системами и перевозочным процессом искусственного интеллекта / А.Т. Осьминин, А.Н. Баушев, И.И. Осьминина, А.А. Шатохин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. М.: ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 2022. С. 332–343.
7. Чеботарева Е.А. Развитие инструментов оценки резервов пропускной способности железнодорожных участков на базе создания цифрового двойника и применения искусственной нейронной сети // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 3-2(86). С. 126–131. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-3-2(86)-126-131.
8. Третьяков Г. М., Мазыко Н. Н., Варламов А. В. Применение технологий машинного обучения для автоматизации процессов планирования и управления грузовыми перевозками на железной дороге // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 4. С. 88–100. DOI: 10.17513/snt.39977.
9. Бушуев С.В., Голочалов Н.С. Моделирование движения поезда на основе применения статистических данных // Инновационный транспорт. 2024. № 1(51). С. 52–57. DOI: 10.20291/2311-164X-2024-1-52-57.
10. Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Поддержка принятия решения по профилактике нарушений безопасности в работе // Надежность. 2021. Т. 21. № 4. С. 38–46. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-38-46.
11. Ларин Е.С. Прогнозирование энергетических затрат подвижного состава с использованием алгоритмов машинного обучения // Динамика систем, механизмов и машин. 2024. Т. 12. № 3. С. 130–134. DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-3-130-134.
12. Обухов А.Д. Нейросетевое управление сортировочными процессами // Мир транспорта. 2016. Т. 14. № 1(62). С. 138–147.
13. Казаков А.Л., Упырь Р.Ю., Доможирова А.Д. Нейросетевой подход к изучению функционирования системы курсирования кольцевых маршрутных поездов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. Т. 82. № 2. С. 158–167. DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-2-158-167.
14. Ковалев К.Е., Новичихин А.В. Процедура планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий: логистические аспекты и нейросетевые модели // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20. № 2. С. 325–335. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335.
15. Журавлева Н.А., Баталова Н.В. Алгоритм расчета прогнозного пассажиропотока инновационного железнодорожного транспорта на основе нейронной модели // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 3. С. 474–485. DOI: 10.17816/transsyst688684.
16. Domanov K.I., Istomin S.G., Shatokhin A.P. Approaches to Creating a Driver Decision Support System for Digital Analysis of Railway Infrastructure Based on Machine Learning and Machine Vision Algorithms // E3S Web of Conferences : Proceedings of the 2nd International Conference on High-Speed Transport Development (HSTD 2023). Les Ulis: EDP Sciences - Web of Conferences, 2023. P. 05001. DOI: 10.1051/e3sconf/202344605001.
17. Любченко А.А., Смолин И.Ю. Особенности алгоритма распознавания номера вагона по изображению // Автоматика, связь, информатика. 2024. № 4. С. 7–9. DOI: 10.34649/AT.2024.4.4.002.

18. Смирнов Ф.А., Новичихин А.В. Автоматизация приема вагонов к перевозке: система управления и нейросетевая модель // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21. № 3. С. 670–685. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-670-685.
19. Сидоренко В.Г., Кулагин М.А., Родина Д.М. Интеллектуальная система обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11. № 1. С. 55–65. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-55-65.
20. Формирование объективных показателей работы сортировочной станции на основе данных «от колеса» / А.Е. Хатламаджиян, И.А. Ольгейзер, А.В. Суханов, В.С. Иерусалимов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10. № 3. С. 254–268. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-254-268.
21. Лященко З.В., Игнатъева О.В., Шотт М.К. Оценка качества обслуживания пассажиров на железнодорожном транспорте на основе оценки эмоций пассажиров с использованием технологий искусственного интеллекта // Наука и техника транспорта. 2024. № 1. С. 58–66.
22. Использование методов машинного обучения для решения задачи энергооптимального движения поезда / С.Г. Истомин, К.И. Доманов, А.П. Шатохин [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22. № 1. С. 75–84. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-75-84.
23. Иванова Н.В., Зобнин В.Д., Орлов В.В. Оптимизация маршрутов доставки с использованием методов искусственного интеллекта в условиях изменяющейся транспортно-логистической обстановки // Транспортное дело России. 2024. № 8. С. 139–144.
24. Канарский В.А. Исследование эффективности машинного обучения в мониторинге сигнальной точки // Надежность. 2023. № 1. С. 38–44. DOI: 10.21683/1729-2646-2023-23-1-38-44.
25. Прогнозирование рисков функционирования железнодорожной инфраструктуры с помощью искусственных нейронных сетей / А.В. Орлов, А.С. Алексеев, А.В. Истомин, Л. Бадирила // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 3(153). DOI: 10.60797/IRJ.2025.153.35.
26. Малахов С.В., Капустин М.Ю. Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80. № 1. С. 13–19. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19.
27. Булавин Ю.П., Игнатъева О.В. Обучение искусственных нейронных сетей с подкреплением // Автоматика, связь, информатика. 2024. № 11. С. 18–21. DOI: 10.62994/AT.2024.11.11.003.
28. Голочалов Н.С. Методы обучения с подкреплением в контексте моделирования беспилотного движения поездов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3(67). С. 53–60. DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-53-60.
29. Сеначин Н.М. Оптимизация взаимодействия автономных железнодорожных систем на основе мультиагентного обучения // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3(67). С. 100–105. DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-100-105.
30. Корнилов С.Н., Мишкурлов П.Н., Рахмангулов А.Н. Нейросетевая модель управления железнодорожной станцией // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды юбилейной международной научно-практической конференции. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 295–301.
31. Zhang J., Zhang J. Artificial Intelligence Applied on Traffic Planning and Management for Rail Transport: A Review and Perspective // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2023. Vol. 2023. P. 1832501. DOI: 10.1155/2023/1832501.
32. A review of artificial intelligence applications in high-speed railway systems / X. Li, M. Zhu, B. Zhang [et al.] // High-speed Railway. 2024. Vol. 2. No. 1. P. 11–16. DOI: 10.1016/j.hspr.2024.01.002.
33. Artificial intelligence in rail transit wireless communication systems: Status, challenges and solutions / Ju. Zhao, Xu. Gao, Zh. Wu [et al.] // Physical Communication. 2024. Vol. 67. P. 102484. DOI: 10.1016/j.phycom.2024.102484.
34. Tang R., Liu R., Lin Zh. Predicting primary delay of train services using graph-embedding based machine learning // Journal of Rail Transport Planning and Management. 2025. Vol. 34. P. 100518. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2025.100518.
35. Saki S., Soori M. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced transportation systems, a review // Multimodal Transportation. 2026. Vol. 5. No. 1. P. 100242. DOI: 10.1016/j.multra.2025.100242.
36. Arthaud F., Lecoeur G., Pierre A. Transformers à Grande Vitesse: Massively parallel real-time predictions of train delay propagation // Journal of Rail Transport Planning and Management. 2024. Vol. 29. P. 100418. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2023.100418.
37. Yue M., Ma Sh. LSTM-Based Transformer for Transfer Passenger Flow Forecasting between Transportation Integrated Hubs in Urban Agglomeration // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Vol. 13. No. 1. P. 637. DOI: 10.3390/app13010637.
38. Hybrid LSTM-Transformer Models for Profiling Highway–Railway Grade Crossings / K. Chatterjee, J. Q. Li, F. Ansari [et al.] // Journal of Transportation Engineering Part A: Systems. 2026. Vol. 152. No. 2. P. 04025138. DOI: 10.1061/jtepbs.teeng-9135.
39. Popov P. A., Ozerov A. V., Marshova A. S. Prospects of autonomous railway transport development // BRICS Transport. 2024. Vol. 3. No. 3. DOI: 10.46684/2024.3.4.
40. Никищенко С.А., Гаранин А.В. Технология автоматизированной корректировки нормативных графиков движения поездов с применением программных роботов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10. № 1. С. 18–31. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-18-31.
41. The genetic algorithm based on generative adversarial network for dynamic multi-objective optimization problem and application / T. Zhang, H. Yi, Z. Tai [et al.] // Knowledge-Based Systems. 2026. Vol. 332. P. 114939. DOI: 10.1016/j.knosys.2025.114939.

References

1. PNST 884-2023 Artificial intelligence in the railway industry. Use cases. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Available at: <https://www.rst.gov.ru>. (Accessed on March 29, 2026).

2. White Paper. Artificial Intelligence in Transport and Logistics: Industry Document. Ministry of Transport of the Russian Federation. Available at: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/12167> (Accessed on March 29, 2026).
3. Register of Artificial Intelligence Technologies in the Transport Industry. Ministry of Transport of the Russian Federation. Available at: <https://mintrans.gov.ru> (Accessed on March 29, 2026).
4. Kiryakin V.Yu., Lobanov S.V. Prospects for using AI technologies to improve energy efficiency of predictive train schedules. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2025;(11):4-12. (In Russ.)
5. Borodin A.F., Nikolaev K.Yu., Shinderov R.V., Prozorov V. V. Organization of car flows: conditions, limitations, digital solutions. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2025;(6):11-19. (In Russ.)
6. Osminin A.T., Baushev A.N., Osminina I.I., Shatokhin A.A. On the possibility of applying artificial intelligence in the management of railway transport systems and the transportation process. *Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte. Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Innovative Technologies in Railway Transport. Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation]. Moscow: Russian University of Transport, 2022, pp. 332-343. (In Russ.)
7. Chebotareva E.A. Development of reserve assessment tools the capacity of railway sections based on the creation of a digital twin and the use of an artificial neural network. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines]. 2024;(3-2(86)):126-131. (In Russ.). DOI: 10.33979/2073-7432-2024-3-2(86)-126-131.
8. Tretyakov G.M., Mazko N.N., Varlamov A.V. The use of machine learning technologies to automate the planning and management of freight transportation on the railway. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2024;(4):88-100. (In Russ.). DOI: 10.17513/snt.39977.
9. Bushuev S.V., Golochalov N. S. Train movement simulation based on the application of statistical data. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2024;(1(51)):52-57. (In Russ.). DOI: 10.20291/2311-164X-2024-1-52-57.
10. Kulagin M.A., Sidorenko V.G. Decision support for preventing safety violations. *Nadezhnost* [Reliability]. 2021;21(4):38-46. (In Russ.). DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-38-46.
11. Larin E.S. Forecasting the energy costs of rolling stock using machine learning algorithms. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines]. 2024;12(3):130-134. (In Russ.). DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-3-130-134.
12. Obukhov A.D. Neural network control of marshalling processes. *Mir transporta* [World of transport]. 2016;14(1(62)):138-147. (In Russ.)
13. Kazakov A.L., Upry R.Yu., Domozhirova A.D. Neuronal network approach to study the operation of shuttle-service trains. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]. 2023;82(2):158-167. (In Russ.). DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-2-158-167.
14. Kovalev K.E., Novichikhin A.V. The procedure for planning the operation of low-intensity railway lines: logistical aspects and neural network models. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023;20(2):325-335. (In Russ.). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335.
15. Zhuravleva N.A., Batalova N.V. Calculation algorithm of the expected passenger flow of innovative railway transport based on a neural model. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies]. 2025;11(3):474-485. (In Russ.). DOI: 10.17816/transsyst688684.
16. Domanov K.I., Istomin S.G., Shatokhin A.P. Approaches to Creating a Driver Decision Support System for Digital Analysis of Railway Infrastructure Based on Machine Learning and Machine Vision Algorithms. *E3S Web of Conferences. Proceedings of the 2nd International Conference on High-Speed Transport Development (HSTD 2023). Les Ulis, EDP Sciences - Web of Conferences. 2023; 05001. DOI: 10.1051/e3sconf/202344605001.*
17. Lyubchenko A.A., Smolin I.Yu. Features of the algorithm for recognising car number from the image. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, Communication, Informatics]. 2024;(4):7-9. (In Russ.). DOI: 10.34649/AT.2024.4.4.002.
18. Smirnov F.A., Novichikhin A.V. Automation of acceptance of wagons for transportation: control system and neural network model. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2024;21(3):670-685. (In Russ.). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-670-685.
19. Sidorenko V.G., Kulagin M.A., Rodina D.M. Intelligent system detecting safety requirements violation in railway infrastructure maintenance. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2025;11(1):55-65. (In Russ.). DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-55-65.
20. Khatlamadzhiyan A.E., Olgeizer I.A., Sukhanov A.V., Ierusalimov V.S. Formation of objective indicators of marshalling yard performance based on data «from the wheel». *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2024;10(3):254-268. (In Russ.). DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-254-268.
21. Lyashchenko Z. V., Ignatieva O. V., Schott M. K. Assessment of passenger service quality in railway transport based on passenger emotion assessment using artificial intelligence technologies. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport science and technology]. 2024;(1):58-66. (In Russ.)
22. Istomin S.G., Domanov K.I., Shatokhin A.P. et al. The use of machine learning methods to solve the problem of energy-efficient train movement. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2025;22(1):75-84. (In Russ.). DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-75-84.
23. Ivanova N.V., Zobnin V.D., Orlov V.V. Optimizing delivery routes using artificial intelligence in a changing transport environment. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2024;(8):139-144. (In Russ.)
24. Kanarsky V.A. Research on the efficiency of machine learning in signal point monitoring. *Nadezhnost* [Reliability]. 2023;(1):38-44. (In Russ.). DOI: 10.21683/1729-2646-2023-23-1-38-44.

25. Orlov A.V., Alekseev A.S., Istomin A.V., Badirila L. Forecasting railway infrastructure operation risks using artificial neural networks. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal]. 2025;(3(153)). (In Russ.). DOI: 10.60797/IRJ.2025.153.35.
26. Malakhov S.V., Kapustin M.Yu. Method for constructing an adaptive suboptimal stationary train traffic controller based on artificial neural networks. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]. 2021;80(1):13-19. (In Russ.). DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19.
27. Bulavin Yu.P., Ignatieva O.V. Reinforcement training in the task of managing the passage of trains through the site. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, Communication, Informatics]. 2024;(11):18-21. (In Russ.). DOI: 10.62994/AT.2024.11.11.003.
28. Golochalov N.S. Reinforcement learning methods in the context of simulation of unmanned train movement. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railway Transport]. 2025;(3(67)):53-60. (In Russ.). DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-53-60.
29. Senachin N.M. Optimizing the interaction of autonomous railway systems based on multi-agent learning. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railway Transport]. 2025;(3(67)):100-105. DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-100-105. (In Russ.)
30. Kornilov S.N., Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Neural network model for railway station management. *Akademik Vladimir Nikolaevich Obratsov – osnovopolozhnik transportnoy nauki. Trudy yubileinoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov, founder of transport science. Proceedings of the Anniversary International Scientific and Practical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga, 2024, pp. 295-301. (In Russ.)
31. Zhang J., Zhang J. Artificial Intelligence Applied on Traffic Planning and Management for Rail Transport: A Review and Perspective. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2023;2023:1832501. DOI: 10.1155/2023/1832501.
32. X. Li, M. Zhu, B. Zhang et al. A review of artificial intelligence applications in high-speed railway systems. *High-speed Railway*. 2024;2(1):11-16. DOI: 10.1016/j.hspr.2024.01.002.
33. Ju. Zhao, Xu. Gao, Zh. Wu et al. Artificial intelligence in rail transit wireless communication systems: Status, challenges and solutions. *Physical Communication*. 2024;67:102484. DOI: 10.1016/j.phycom.2024.102484.
34. Tang R., Liu R., Lin Zh. Predicting primary delay of train services using graph-embedding based machine learning. *Journal of Rail Transport Planning and Management*. 2025;34:100518. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2025.100518.
35. Saki S., Soori M. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced transportation systems, a review. *Multimodal Transportation*. 2026;5(1):100242. DOI: 10.1016/j.multra.2025.100242.
36. Arthaud F., Lecoeur G., Pierre A. Transformers à Grande Vitesse: Massively parallel real-time predictions of train delay propagation. *Journal of Rail Transport Planning and Management*. 2024;29:100418. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2023.100418.
37. Yue M., Ma Sh. LSTM-Based Transformer for Transfer Passenger Flow Forecasting between Transportation Integrated Hubs in Urban Agglomeration. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(1):637. DOI: 10.3390/app13010637.
38. Chatterjee K., Li J.Q., Ansari F. et al. Hybrid LSTM-Transformer Models for Profiling Highway–Railway Grade Crossings. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*. 2026;152(2):04025138. DOI: 10.1061/jtepbs.teeng-9135.
39. Popov P.A., Ozerov A.V., Marshova A.S. Prospects of autonomous railway transport development. *BRICS Transport*. 2024;3(3). DOI: 10.46684/2024.3.4.
40. Nikishchenkov S.A., Garanin A.V. Automated adjustment technology standard train schedules using software robots. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport]. 2024;10(1):18-31. (In Russ.). DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-18-31.
41. Zhang T., Yi H., Tai Z. et al. The genetic algorithm based on generative adversarial network for dynamic multi-objective optimization problem and application. *Knowledge-Based Systems*. 2026;332:114939. DOI: 10.1016/j.knsys.2025.114939.

Поступила 28.04.2026; принята к публикации 19.07.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 28/04/2026; revised 19/07/2026; published 30/09/2026

Бессоненко Сергей Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой», Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия.
Email: bessonenko@stu.ru. ORCID 0000-0001-5782-1596

Осипов Николай Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия.
Email: N-I-Osipov@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3278-6330

Sergey A. Bessonenko – DrSc (Eng.), Associate Professor, Chief of Operations Management Department, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia.
Email: bessonenko@stu.ru. ORCID 0000-0001-5782-1596

Nikolay I. Osipov – PhD (Eng.), Associate Professor of Operations Management Department, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia.
Email: N-I-Osipov@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3278-6330