

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

<https://doi.org/10.17816/transsyst688684>

Труды I Международной научно-практической конференции
«Экономика высоких скоростей: технологии будущего»

© Н.А. Журавлева, Н.В. Баталова

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПРОГНОЗНОГО ПАССАЖИРОПОТОКА ИННОВАЦИОННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ МОДЕЛИ

Цель. Создание нейросетевого инструментария прогнозирования пассажирских перевозок инновационным (высокоскоростным) железнодорожным транспортом.

Материалы и методы. Статистические данные по пассажиропотокам на всех видах транспорта в зонах тяготения высокоскоростных железнодорожных магистралей. Методы: эконометрическое моделирование, многослойный перцептрон.

Результаты. Создан алгоритм планирования пассажирских перевозок на высокоскоростных железнодорожных магистралях (ВСЖМ) на основе интеллектуальной модели нейронного типа.

Заключение. Способность нейросетевой модели к «обучению» позволяет повысить достоверность прогнозов мобильности населения при оценке проектов ВСЖМ.

Ключевые слова: высокоскоростной железнодорожный транспорт; нейросетевое моделирование; многослойный перцептрон; архитектура данных; прогноз пассажиропотоков.

Как цитировать:

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

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

© N.A. Zhuravleva, N.V. Batalova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

CALCULATION ALGORITHM OF THE EXPECTED PASSENGER FLOW OF INNOVATIVE RAILWAY TRANSPORT BASED ON A NEURAL MODEL

AIM: The work aimed to develop neural network tools to forecast passenger transportation by innovative (high-speed) railway transport.

METHODS: Passenger flow statistics for all modes of transport in the attraction areas of high-speed railway lines. Methods include the econometric modeling and multilayer perceptron.

RESULTS: An algorithm to plan passenger transportation by high-speed railway lines (HSRL) has been developed based on a neural model.

CONCLUSION: The ability of the neural network model to learn allows to increase reliability of population mobility forecasts when assessing HSRL projects.

Keywords: high-speed railway transport; neural network modeling; multilayer perceptron; data architecture; passenger flow forecast.

To cite this article:

Zhuravleva NA, Batalova NV. Calculation algorithm of the expected passenger flow of innovative railway transport based on a neural model. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(3):474–485. doi: 10.17816/transsyst688684

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие инновационных видов пассажирского транспорта, а именно, высокоскоростного железнодорожного транспорта (ВСЖТ) вызывает множество существенных проблем обоснования совокупного уровня инновационной активности, направленной на рост мобильности населения страны. Идеология инновационной активности расширяет понятие перевозки в функционал, обеспечивающий сокращение времени и пространства или «экономику транспорта высоких скоростей», которая вбирает в себя производство и внедрение новейших методов и средств управления, технологий и техники перевозочного процесса, создания принципиально новых комплексных форм обслуживания клиентов при высокой рыночной капитализации транспортных компаний и коммерциализации инноваций. При этом коммерциализация должна обнаруживать выраженную величину прироста маржинального дохода (или дохода домашнего хозяйства) пассажира при условии снижения ее стоимости у производителя.

Многочисленные экономические исследования показали, что ВСЖТ генерирует *эффект роста доходности только при увеличении плотности сети (ВСЖТ и локальные транспортные сети, обеспечивающие пассажиропоток высокоскоростной перевозки) и сокращением времени поездки*, при которой долговременная кривая средних издержек приобретает нисходящий характер [1–3].

Удельные издержки снижаются по мере увеличения производительности железнодорожной линии, поскольку фиксированная стоимость железнодорожной инфраструктуры распределяется на все большее число единиц перевозок. Для эффективной экономики железнодорожной сети требуется высокая степень использования инфраструктуры: чем выше степень использования, тем лучше экономика инфраструктуры, тем большая доходность может быть обеспечена инвестору. Учет этих факторов в условиях новой геополитики и геоэкономики России существенно влияет на эффективность принимаемых решений по развитию сети ВСЖТ [4].

Целью данного исследования является разработка интеллектуального инструментария планирования и прогнозирования пассажирских перевозок ВСЖТ, повышающим достоверность обоснования данных проектов.

Для этого в статье исследуется суть самой инновации как «нововведения, имеющего коммерческий или иной эффект» при оказании услуги по перевозке. Основные результаты исследования и идентифицируемый источник инновационного обновления транспортных систем описываются в комплексе, отражающем эффект: производства транспортной услуги, технологий, используемых в ее производстве и потреблении, а также достигаемом эффекте мультипликации. Инновационные решения в формировании новых транспортных систем могут быть обнаружены при переходе на принципиально новые скорости перевозки пассажиров, генерируемых инновационным транспортом, инфраструктурой и технологией перевозки [5].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Основные расчетные данные опираются на 2019 г., в течение которого на подвижность населения не оказали существенного влияния ни кризисные явления в экономике, наблюдавшиеся в 2015–2017 года, ни крупномасштабные мероприятия, сравнимые с Чемпионатом мира ФИФА 2018 г. Пассажиропотоки в 2020–2021 годах не рассматривались, из-за введения ограничений на передвижения, связанные с пандемией COVID-19. Данные после 2022 года из-за изменения политической обстановкой и началом «Специальной военной операции» на Украине оценены как «нехарактерные» из-за введения санкций и сложностями заграничных передвижений.

Использованы статистические данные по объемам и динамике пассажиропотоков на воздушном, железнодорожном и автобусном транспорте, а также по корреспонденциям между регионами зоны тяготения ВСЖМ-1 на легковом автомобильном транспорте с разбивкой по указанным выше периодам (Федерального дорожного агентства (Росавтодор)). Данные по пассажиропотокам на транспорте общего пользования за базовый год были получены из открытых источников компаний-перевозчиков (структуры ОАО «РЖД») и операторов пассажирских терминалов (ООО «Воздушные Ворота Северной Столицы», Санкт-Петербургский ГУП «Пассажиравтотранс» и др.) [6–8]. Были учтены следующие предпосылки роста суммарных пассажиропотоков:

- существенное влияние темпов роста ВРП на темпы роста деловых корреспонденций;
- влияние темпов роста реальной заработной платы на темпы роста бытовых и рекреационных корреспонденций;
- самая высокая динамика подвижности населения наблюдается на связях с Москвой;
- уровень социально-экономического развития территорий, прилегающих к ВСЖМ, влияет на изменения темпов роста пассажиропотока с бытовыми и рекреационными целями.

База данных для моделирования сформирована из социально-экономических показателей (ретроспективный ряд и прогноз) и пассажиропотоков (ретроспективный ряд) по рассматриваемым связям по целям корреспонденций.

Сформированная база данных состоит из социально-экономических показателей (ретроспективный ряд и прогноз) и пассажиропотоков (ретроспективный ряд) по рассматриваемым связям по целям корреспонденций. Количественная оценка степени разброса и однородность данных по каждому из отобранных показателей получена по данным дескриптивной статистики, удаления из нее аномальных значений.

Построены эконометрические модели, отражающие зависимости изменения темпов роста пассажирских перевозок от изменения темпов роста социально-экономических показателей. Эконометрических модели и область их применения показаны в Табл. 1.

Таблица 1. Эконометрические модели, используемые для получения ориентиров темпов роста пассажиропотоков**Table 1.** Econometric models used to determine benchmarks for passenger flow growth rates

Функция	Область применения
$GR_P_{business} = a + b * \ln (GR_GRP)$	Получение ориентиров темпов роста пассажирских перевозок с деловыми целями
$GR_P_{l\&rec} = a * GR(W)$	Получение ориентиров темпов роста пассажирских перевозок с бытовыми и рекреационными целями

Источник: составлено авторами

Здесь $GR_P_{business}$ – расчетное (прогнозное) значение темпа роста пассажиропотока с деловыми целями, полученное на основе эконометрической модели;

$GR_P_{l\&rec}$ – расчетное (прогнозное) значение темпа роста пассажиропотока с культурно-бытовыми и рекреационными целями, полученное на основе эконометрической модели;

GR_GRP – усредненное значение темпа роста ВРП;

$GR(W)$ – усредненное значение темпа роста средней заработной платы;

a , b – расчетные коэффициенты (доля деловых корреспонденций и корреспонденций с бытовыми и рекреационными целями в общем количестве поездок по маршрутам прилегания ВСЖМ).

Неоднородность факторов, влияющих на подвижность населения ввиду нынешних обстоятельств политического и экономического характера, использование линейных зависимостей и агрегированных статистических данных не позволяют учитывать скрытые нелинейные зависимости между событиями, влияющими на мобильность населения, и снижают достоверность результатов прогнозов объемов перевозок проектируемой ВСЖМ-1. Использование инструментария нейросетевого моделирования способно обучить прогнозную модель реагировать на все изменения внешней и внутренней среды по мере их появления. Доказана эффективность использования для данных целей метода многослойного перцептрона (MLP) [9]. Разработанная в данном исследовании модель обучена на эмпирических данных, адаптирована под специфику миграционных потоков территории ВСЖМ-1, учитывает скорость передвижения по локальным маршрутам трассы, например, Москва-Тверь и Санкт-Петербург – Нижний Новгород.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Систематизированы эффекты инновационного обновления транспортных систем на базе ВСЖТ.

Получены и доказаны зависимости влияния инновационной транспортной услуги на базе ВСЖТ на отдельные макроэкономические показатели и общий эффект мультипликации (трудова мобильность – рост урбанизации) см. Табл. 2 и Рис. 1.

Таблица 2. *Последствия влияния инновационных транспортных систем на макроэкономические факторы***Table 2.** *Influence of innovative transport systems on macroeconomic factors*

Факторы влияния Последствия влияния на ИТС	Изменение трудовой мобильности	Изменения рекреационной мобильности	Изменение возрастной структуры потребителей и работников	Рост/Снижение доходов населения	Рост урбанизации
Изменение модели производства – потребление	Рост новых точек создания продукта	Создание новых рекреационных территорий	Старение населения и дисбаланс трудовых ресурсов	Рост доходов населения повышает спрос на поездки, способствуя развитию новых транспортных систем.	Высокая плотность населения в городах и потребность в сокращении времени перемещения между ними
Гибкие модели гравитации перевозок	Изменение маршрутизации перевозок	Изменение географии перевозок	Изменение предпочтений в перевозках	Смешанные перевозки (время, цена) повышают доходы домашних хозяйств	Создание междугородного высокоскоростного пассажирского сообщения
Изменения в нормах накопления	Локализация производства	Смещение мобильности населения	Насыщение базовых потребностей	Изменение динамики спроса на ресурсы	Ограничение пространства и рост мобильности
Изменение капиталоемкости	Рост концентрации населения в новых точках развития производства	Смещение рекреационной мобильности	Цифровое мышление	Уменьшение материало- и ресурсоемкости	Развитие сервисов

Источник: составлено авторами с учетом исследований [10, 11].

Эффекты инновационного обновления транспортной системы на основе высокоскоростного транспорта сгруппированы и показаны на Рис. 1.

2. Создана база данных из неструктурированных источников. Выделены данные индуцированного спроса на передвижения с деловыми, бытовыми и рекреационными целями.

Использованы результаты анализа структурированных – деловые поездки (статистических) и неструктурированных данных.

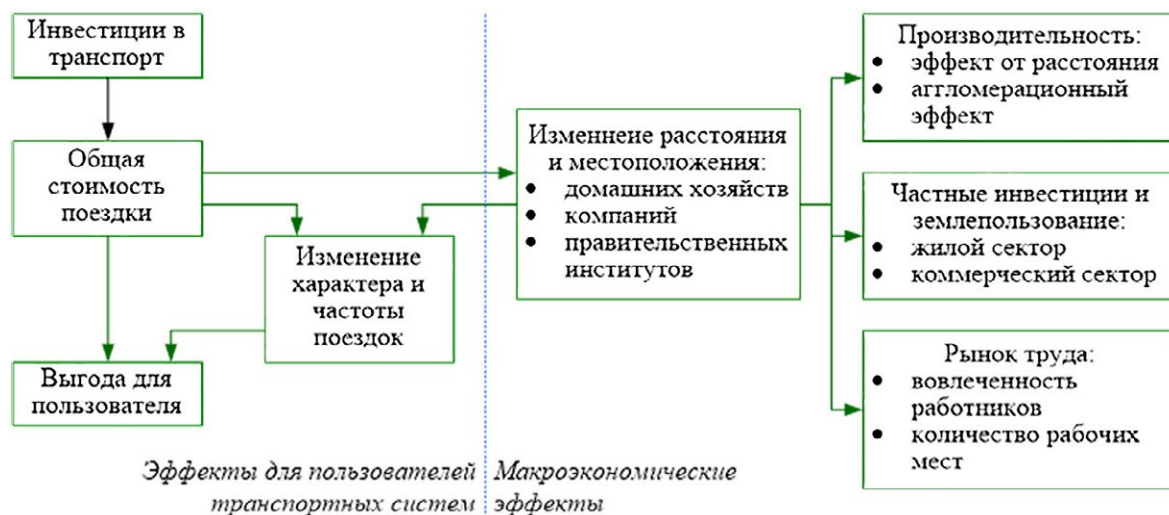


Рис. 1. Совокупные эффекты высокоскоростного железнодорожного транспорта

Fig. 1. Combined effects of high-speed railway transport

Индукцированный спрос возникает из-за **скрытого спроса**, который существует, но по каким-то причинам подавляется неспособностью системы справиться с ним. Индукцированный спрос на передвижения обусловлен сокращением времени проезда и будет представлен в основном разовыми кратковременными (без ночевки) поездками. Определение спроса на такие поездки основывается на результатах социологического опроса, проводимого в населенных пунктах, расположенных вдоль трассы ВСЖМ-1. Объем индукцированного спроса рассчитывается путем стратификации респондентов на группы с одинаковым опытом и фактической частотой поездок и одинаковой желаемой частотой поездок. Объем индукцированного спроса определяется на основе оценки разницы между желаемой и наблюдаемой частотой поездок.

3. Разработан алгоритм модели многослойного перцептрона (MLP)

Архитектура перцептрона состоит из 2-х скрытых слоев (количество нейронов определяется эмпирически в процессе обучения). Использована входная функция «сигмоида» активации скрытых слоёв. Выходная функция представляет собой тождество (линейная). Соотношение данных: 70% обучающая, 30% тестовая выборка. Примененное масштабирование: нормализация min-max.

Последовательность реализации процесса нейромоделирования представлен на Рис. 2.

4. Результаты моделирования.

В результате моделирования получены следующие результаты:

4.1. Динамика распределения суммарного пассажиропотока на всех связях между видами транспорта при наличии и отсутствии ВСЖМ-1 представлена на Рис. 3.

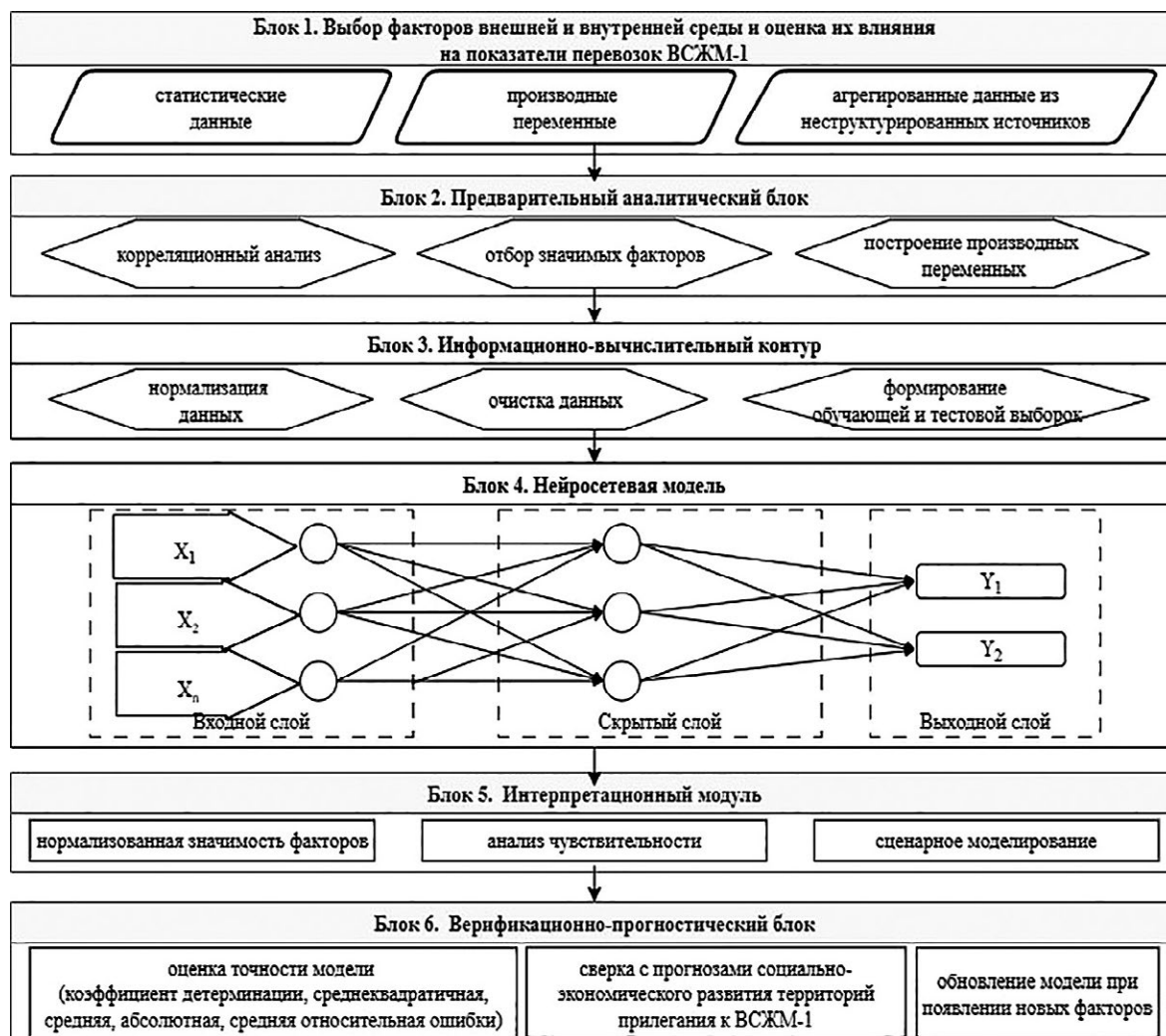


Рис. 2. Укрупненный алгоритм модели многослойного перцептрона в нейросетевой модели оценки эффектов высокоскоростного железнодорожного транспорта

Fig. 2. An enlarged algorithm of a multilayer perceptron model in a neural network model for assessing the effects of high-speed rail transport

Объем индуцированного спроса в общей структуре пассажиропотока на ВСЖМ-1 достаточно велик и составит от 40% в 2029 г. до 36% в 2052 г.

Индуцированный спрос будут формировать в основном рекреационные поездки жителей и ежедневная трудовая миграция. Доля последней в общем объеме индуцированного спроса составит 20% в 2032 г., увеличиваясь к 2052 г. до 27%.

4.2. Динамика годовых пассажиропотоков по ВСЖМ-1 в целом, на связях Москвы с крупными городами и на связях между крупными городами (Москва, Тверь, Великий Новгород, Санкт-Петербург) представлена на Рис. 4.

Учет неструктурированных данных и способность нейросети учитывать все возможные изменения геоэкономики, технических нововведений,

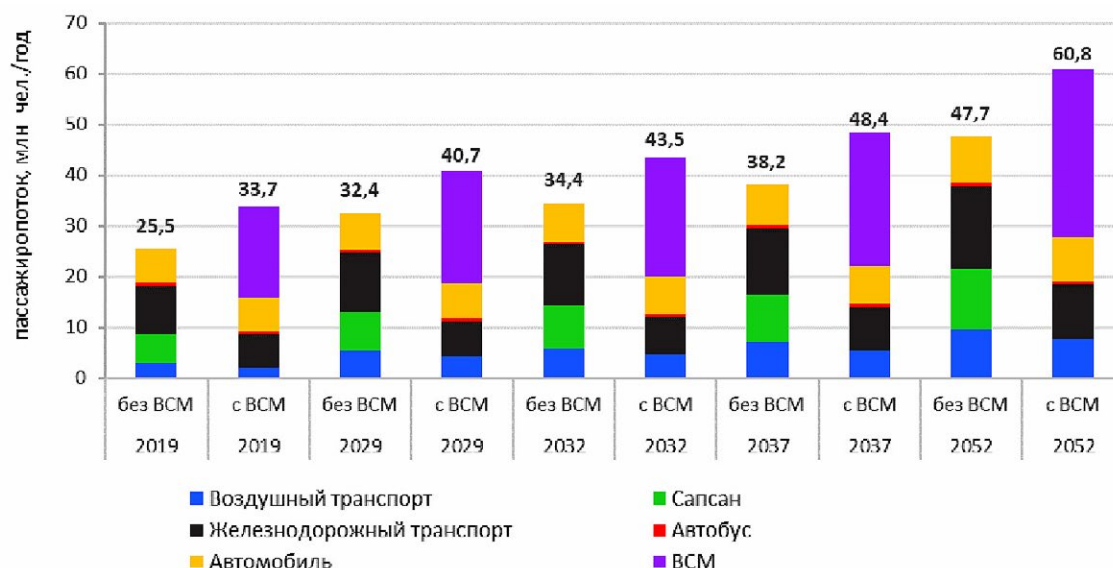


Рис. 3. Прогнозное распределение пассажиропотоков между видами транспорта при наличии и отсутствии ВСЖМ-1 на связи крупных городов

Fig. 3. Predicted distribution of passenger traffic between modes of transport in the presence and absence of the VSZhM-1 railway link between major cities

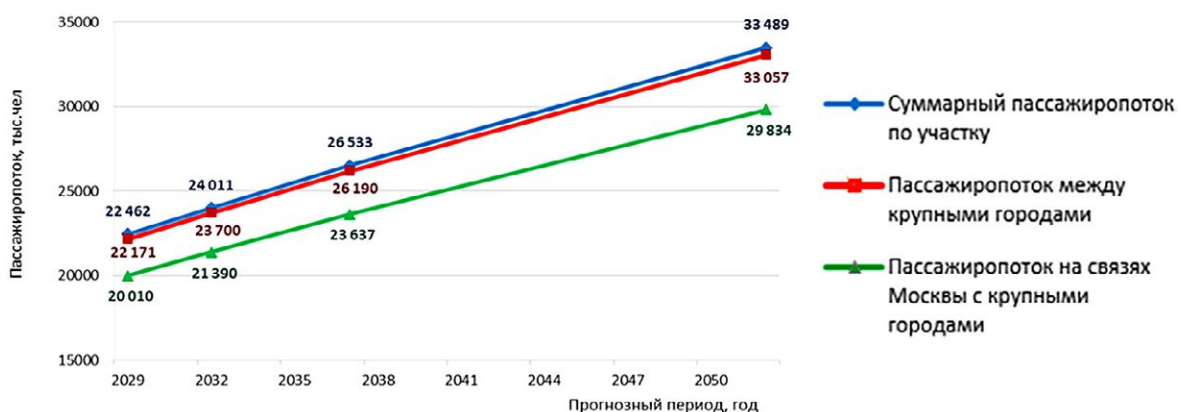


Рис. 4. Динамика годовых пассажиропотоков по ВСЖМ-1

Fig. 4. Dynamics of annual passenger traffic on the VSZhM-1 railway

мотивации и поведения пассажиров отражается на прогнозных значениях пассажиропотоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С развитием инновационных транспортных систем, а именно, ВСЖТ, появляется множество вопросов, которые требуют дальнейшего обсуждения. Одним из важнейших остается понимание того, как высокоскоростные дороги

изменяют экономику регионов, повысят мобильность населения, а, значит, уровень доходов домашних хозяйств. Остаются открытыми ключевые вопросы соответствия капитальных расходов и эксплуатационных затрат проектов ВСМ их будущей доходности, построенной на прогнозах пассажиропотоков.

Полученные в исследовании результаты позволяют повысить достоверность обоснования проектов строительства ВСЖТ и могут быть частью их финансовых моделей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства железнодорожного транспорта (Росжелдор) на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н. Экономика инфраструктуры для высокоскоростного движения // Бюллетень результатов научных исследований. 2013. № 4 (9). С. 69-75. EDN: SERDED
2. Цыденов А.С. Создание высокоскоростных магистралей – залог успеха страны в настоящем и будущем // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2016. № 5 (66). С. 10–15. EDN: WZJSSH
3. Миронова И.А., Тищенко Т.И., Фролова М.П. Проблемы оценки социально-экономической эффективности крупномасштабного инфраструктурного проекта на примере высокоскоростной магистрали // Российский экономический журнал. 2022. №3. doi: 10.33983/0130-9757-2022-3-100-119
4. Журавлева Н.А. Экономическая оценка интермодальных эффектов высокоскоростных транспортных систем в экономике нового технологического уклада // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. № 4. С. 31–40. EDN: YYSSED
5. Васильева М.Е., Волкова Е.М., Романов А.С. Интеллектуальные транспортные системы в Российских агломерациях: сущность, структура и направления развития // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 4. С. 117–128. doi: 10.17816/transsyst202394117-128
6. Росстат – Национальные счета [internet] Дата обращения: 14.07.2025. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts>

7. Данные Комитета по развитию туризма Санкт-Петербурга. Отчет о ходе реализации Государственной программы Санкт-Петербурга «Развитие сферы туризма в Санкт-Петербурге» за 2019 год и за I полугодие 2020 года. [internet] Дата обращения: 14.07.2025. Режим доступа: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_tourism/otchet-na-pravitelstvo-o-hode-realizacii-gosudarstvennoj-programmy-san/
8. Данные Комитета по развитию туризма Санкт-Петербурга. Статистика развития туристического рынка. «Турбарометр Санкт-Петербурга 20232». Аналитические показатели туризма и индустрии гостеприимства Санкт-Петербурга в 2023 г. [internet] Дата обращения: 14.07.2025. Режим доступа: https://businessstat.ru/russia/services/hotels_and_tourism/tourism/?yclid=12898454363016527871
9. Толстых В.Н. Перцептрон, нейронная сеть. Что дальше? // Парадигма. 2022. № 37. EDN WLFBI
10. Wei Z., Liangheng Ch., Junke X. High-speed railway, market access and economic growth // International Review of Economics & Finance. Vol.76. doi: 10.1016/j.iref.2019.11.014
11. Cascetta E., Carteni A., Henke I., Pagliara F. Economic growth, transport accessibility and regional equity impacts of high-speed railways in Italy: ten years ex post evaluation and future perspectives // Transp Res Part A Policy Pract. 2020;139:412–428. doi: 10.1016/j.tra.2020.07.008

REFERENCES

1. Zaitsev AA, Talashkin GN. Economics of High-Speed Infrastructure. *Bulletin of scientific research results*. 2013;4(9):69–75. EDN: SERDED (In Russ.)
2. Tsidenov AS. The creation of high-speed highways is the key to the country's success in the present and future. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike*. 2016;5(66):10–15. EDN: WZJSSH
3. Mironova IA, Tishchenko TI, Frolova MP. Problems of assessing the socio-economic efficiency of a large-scale infrastructure project using the example of a high-speed highway. *Rossiiskii ekonomicheskii zhurnal*. 2022;3. (In Russ.) doi: 10.33983/0130-9757-2022-3-100-119
4. Zhuravleva NA. Economic assessment of intermodal effects of high-speed transport systems in the economy of the new technological order. *Bulletin of scientific research results*, 2018; 4:31-40. EDN: YYSSED (In Russ.)
5. Vasilyeva ME, Volkova EM, Romanov AS. Intelligent transport systems in Russian megacities: the essence, structure and directions of development. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):117–128. doi: 10.17816/transsyst202394117-128 (In Russ.)
6. Rosstat – Natsionalnie scheta [internet] Accessed: Jul 14, 2025 Available from: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> Accessed: Jul 14, 2025
7. Dannie Komiteta po razvitiyu turizma Sankt-Peterburga. Otchet o khode realizatsii Gosudarstvennoi programmi Sankt-Peterburga «Razvitie sferi turizma v Sankt-Peterburge» za 2019 god i za I polugodie 2020 goda. [internet] Accessed: Jul 14, 2025 Available from: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_tourism/otchet-na-pravitelstvo-o-hode-realizacii-gosudarstvennoj-programmy-san/ (In Russ.)

8. Dannie Komiteta po razvitiyu turizma Sankt-Peterburga. Statistika razvitiya turisticheskogo rinka. «Turbarometr Sankt-Peterburga 2023». Analiticheskie pokazateli turizma i industrii gostepriimstva Sankt-Peterburga v 2023 g. [internet] Accessed: Jul 14, 2025 Available from: https://businessstat.ru/russia/services/hotels_and_tourism/tourism/?yclid=12898454363016527871 (In Russ.)
9. Tolstikh VN. Pertseptron, neironnaya set. Chto dalshe? *Paradigma*, 2022;37. (In Russ.) EDN: WLFBI
10. Zou W, Chen L, Xiong J. High-speed railway, market access and economic growth. *International Review of Economics & Finance*. 2019. doi: 76. 10.1016/j.iref.2019.11.014.
11. Cascetta E, Cartenì A, Henke I, Pagliara F. Economic growth, transport accessibility and regional equity impacts of high-speed railways in Italy: ten years ex post evaluation and future perspectives. *Transp Res Part A Policy Pract.* 2020;139:412–428. doi: 10.1016/j.tra.2020.07.008

Сведения об авторах:

Журавлева Наталья Александровна, д-р экон. наук, профессор;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Баталова Наталья Владимировна, старший преподаватель;
eLibrary SPIN: 4027-4771; ORCID: 0000-0002-5948-7226
E-mail: natalyabatalova@yandex.ru

Information about the authors:

Natalya A. Zhuravleva, Dr Sci. (Economics), Professor;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Natalya V. Batalova, Senior Lecturer;
eLibrary SPIN: 4027-4771; ORCID: 0000-0002-5948-7226
E-mail: natalyabatalova@yandex.ru