

Научная статья
УДК 656.025.2
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-976-985>
EDN: TNYADL



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКА АВТОБУСНОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

С.В. Дорохин, Р.А. Котов ✉

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия

✉ ответственный автор
Romankotov-5@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована актуальность прогнозирования пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в условиях устойчивого сокращения объемов перевозок, старения подвижного состава и трансформации транспортного поведения населения. Показана необходимость разработки прозрачной, интерпретируемой и статистически обоснованной модели, учитывающей как демографические, так и инфраструктурные факторы.

Цель исследования – разработать интерпретируемую и статистически обоснованную регрессионную модель среднесрочного прогнозирования пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования, учитывающую демографические и инфраструктурные детерминанты, с возможностью адаптации к условиям различных регионов.

Методы и материалы. В исследовании использованы официальные статистические данные по Воронежской области за 2010–2024 гг., включая число перевезённых пассажиров, численность населения и наличие эксплуатационных автобусов. В качестве метода прогнозирования применена множественная линейная регрессия с учётом временного тренда.

Методология. Построена регрессионная модель зависимости пассажиропотока от демографических и инфраструктурных факторов; оценка параметров выполнена методом наименьших квадратов, качество модели проверено по коэффициенту детерминации, статистической значимости коэффициентов и анализу остатков.

Результаты. Модель показала высокую объясняющую способность ($R^2 = 0,94$); прогноз на 2025–2031 гг. указывает на устойчивое снижение пассажиропотока – с 254,7 тыс. до 177,5 тыс. чел., что связано в первую очередь с демографическим спадом.

Обсуждение. Отрицательный коэффициент при числе автобусов отражает не причинно-следственную связь, а реакцию системы на падение спроса; положительный тренд компенсирует нелинейные эффекты последних лет. Результаты согласуются с общероссийскими тенденциями и подчёркивают необходимость перехода от количественного к качественному управлению перевозками.

Заключение. Разработанная модель является интерпретируемой, практически применимой и пригодной для стратегического планирования. В перспективе планируется расширение набора переменных, переход к маршрутно-ориентированному прогнозированию и интеграция модели в систему сценарного планирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажиропоток, автобусный транспорт общего пользования, прогнозирование перевозок, регрессионная модель, численность населения, парк автобусов, среднесрочный прогноз

Статья поступила в редакцию 06.10.2025; одобрена после рецензирования 29.10.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Дорохин С.В., Котов Р.А. Прогнозирование пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в Воронежской области // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 976-985. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-976-985>

© Дорохин С.В., Котов Р.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-976-985>
EDN: TNYADL

FORECASTING OF PUBLIC BUS PASSENGER FLOW IN THE VORONEZH REGION

Sergey V. Dorokhin, Roman A. Kotov ✉

Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia
✉ corresponding author
Romankotov-5@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The relevance of forecasting the passenger flow of public bus transport in the conditions of the steady decline in the volume of traffic, the aging of rolling stock and the transformation of population transport priorities has been substantiated. The need to develop a transparent, interpretable and statistically valid model, considering both demographic and infrastructure factors, has been shown.

The purpose of the study is to develop an interpretable and statistically substantiated regression model of medium-term prediction of the passenger flow of public bus transport, taking into account demographic and infrastructure determinants, with the adaptation possibility to the conditions of different regions.

Methods and materials. The study uses official statistical data of the Voronezh Region for the period from 2010 to 2024, including the number of transported passengers, the population and the availability of buses in operation. Multiple linear regression based on a time trend is used as a forecasting method.

Methodology. A regression model of the dependence of passenger flow on demographic and infrastructural factors has been built; the parameters have been evaluated using the least squares method; the quality of the model has been checked by the coefficient of determination, the statistical significance of the coefficients and the analysis of residuals.

Results. The model has demonstrated a high explanatory power ($R^2 = 0.94$); the forecast for the period from 2025 to 2031 indicates a steady decrease in passenger traffic – from 254.7 thousand to 177.5 thousand people, which is primarily due to the demographic decline.

Discussion. The negative coefficient for the number of buses does not reflect a cause-and-effect relationship, but rather the system's response to falling demand; the positive trend compensates nonlinear effects of recent years. The results coincide with national trends and emphasize the need to move from quantitative to qualitative transportation management.

Conclusion. The developed model is interpretable, practically applicable, and suitable for strategic planning. In the future, it is planned to expand the set of variables, switch to route-oriented forecasting and integrate the model into the system of scenario planning.

KEYWORDS: passenger flow, public bus transport, passenger traffic forecasting, regression model, population size, bus fleet, medium-term forecast

The article was submitted: October 06, 2025; approved after reviewing: October 29, 2025; accepted for publication: December 15, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Dorokhin S.V., Kotov R. A. Forecasting of public bus passenger flow in the Voronezh Region. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 976-985. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-976-985>

© Dorokhin Sergey V., Kotov Roman A., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в регионах России представляет собой актуальную междисциплинарную задачу, находящуюся на стыке транспортного планирования, прикладной статистики и региональной экономики. В условиях устойчивого сокращения объёмов перевозок, старения подвижного состава и трансформации транспортного поведения населения возникает необходимость в разработке прозрачных, интерпретируемых и практически применимых моделей прогноза, способных учитывать как демографические, так и инфраструктурные факторы.

Современная научная литература демонстрирует широкий спектр подходов к моделированию и прогнозированию пассажирских перевозок. В отечественных исследованиях традиционно преобладают экономико-статистические методы, основанные на анализе временных рядов и регрессионных зависимостей. Так, в исследовании [1] установлено, что объём пассажирских перевозок в регионах России в значительной степени определяется демографическими факторами (численность и структура населения), уровнем автомобилизации, а также состоянием парка подвижного состава. Авторы [1] отмечают устойчивую корреляцию между сокращением численности населения в моногородах и снижением пассажиропотока на пригородных и междугородных автобусных маршрутах.

Особое внимание в последние годы уделяется влиянию структурных изменений в транспортном поведении населения. Наблюдается постепенный переход от регулярных перевозок к альтернативным формам мобильности – такси, каршерингу, личному автотранспорту. Это особенно актуально для регионов с развитой дорожной сетью, таких как Воронежская область, где доля личных автомобилей в общем объёме передвижений неуклонно растёт [2].

На методологическом уровне широкое применение находят модели множественной линейной регрессии, включающие в качестве предикторов численность населения, плотность транспортной сети, доходы населения и технические характеристики подвижного состава [3, 4]. При этом отмечается, что даже при небольшом объёме временных данных (10–15 лет) такие модели демонстрируют приемлемую прогностическую способность, особенно при введении временного тренда для учёта неявных системных сдвигов.

Важный вклад в понимание факторов, влияющих на качество обслуживания и эффективность использования подвижного состава, внесли авторы исследования [5], с помощью метода планирования эксперимента они доказали значимое влияние числа автобусов на маршруте и численности населения на такие параметры, как затраты времени пассажира, комфортность поездки и полнота сбора выручки. Это подтверждает целесообразность включения именно этих переменных в модель прогноза на региональном уровне.

Особое внимание в литературе уделяется неравномерности пассажиропотока во времени. В работе [6] предлагается дифференцированный подход к расчёту потребного количества автобусов, основанный на разбиении часа пик на более мелкие интервалы (15–30 мин). Такой подход позволяет точнее определять потребное количество и оптимальную вместимость подвижного состава, особенно в часы пик. Хотя в нашем исследовании используется годовая агрегированная статистика, идея о том, что пассажиропоток – нестационарный и многократно изменяющийся процесс, остаётся важной для интерпретации долгосрочных трендов. Эта же мысль развивается в исследовании [7], посвящённом математическому моделированию функционирования остановочно-пересадочных пунктов (ОПП) при многократном изменении пассажиропотоков, например, во время массовых мероприятий или в курортных зонах. Авторы [7] показывают, что для полного и своевременного освоения пассажиропотока необходимо не только учитывать его объём, но и обеспечивать ритмичность взаимодействия автобусов между собой и с другими видами городской мобильности.

В контексте методов сбора данных особое значение приобретает работа [8], где анализируется эффективность автоматизированных систем учёта пассажиропотока. Авторы [8] отмечают, что традиционные ручные методы (визуальный подсчёт, анкетирование) дают точность всего 50–70%, в то время как современные бесконтактные системы, такие как «Автокондуктор» с 3D-анализом и онлайн-видео, обеспечивают точность свыше 98%. Однако в большинстве российских регионов, включая Воронежскую область, такие системы пока не внедрены, и прогнозирование приходится строить на основе официальной годовой статистики, что накладывает ограничения на выбор методологии.

В международной практике всё большее распространение получают гибридные и машинно-обучаемые модели – ARIMA с экзо-

генными переменными (ARIMAX), векторная авторегрессия (VAR), а также алгоритмы на основе градиентного бустинга и нейронных сетей [9, 10]. Однако их применение в российских регионах ограничено из-за отсутствия высокочастотных данных (посуточных, почасовых), что делает классические регрессионные подходы наиболее рациональными.

В работах [11, 12, 13] подчёркивается растущая роль цифровизации и имитационного моделирования в оценке качества транспортного обслуживания, а также необходимость учёта интересов маломобильных групп населения при проектировании транспортной инфраструктуры. Эти аспекты, хотя и не входят напрямую в модель, подчёркивают комплексный характер современных транспортных исследований. В исследовании [14] определено, что при прогнозировании следует учитывать обращения граждан, результаты диспетчерского контроля муниципальных пассажирских перевозок [15, 16, 17].

В совокупности существующая литература подтверждает возможность и целесообразность использования регрессионного подхода для прогнозирования пассажиропотока в условиях ограниченного объёма данных. Вместе с тем в открытых источниках не выявлено работ, посвящённых количественному моделированию и прогнозированию пассажиропотока автобусного транспорта именно в Воронежской области. Анализ, проводимый в рамках региональных транспортных стратегий, носит преимущественно описательный характер и не включает формализованных прогностических моделей.

Таким образом, настоящая статья вносит вклад в заполнение данного научного и практического пробела, предлагая прозрачную, интерпретируемую и статистически обоснованную модель прогноза числа перевезённых пассажиров на среднесрочную перспективу, в связи с чем цель исследования – разработать интерпретируемую и статистически обоснованную регрессионную модель среднесрочного прогнозирования пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования, учитывающую демографические и инфраструктурные детерминанты, с возможностью адаптации к условиям различных регионов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании используются официальные статистические данные по Воронежской области за период 2010–2024 гг., полученные из открытых источников Федеральной службы

государственной статистики (Росстат) и территориального органа Росстата по Воронежской области. В качестве целевой переменной выступает число перевезённых пассажиров автобусами общего пользования (тыс. человек), которое рассчитывается как частное от деления пассажирооборота (тыс. пассажиро-км) на среднюю дальность перевозки (км). В качестве факторных признаков в модель включены численность населения области (чел.) и наличие эксплуатационных автобусов, выполняющих перевозки по маршрутам регулярных перевозок (шт.), поскольку именно эти показатели в наибольшей степени отражают спрос на пассажирские перевозки и техническую способность транспортной системы к его удовлетворению. Для учёта неявных системных сдвигов, не отражённых в явных переменных (включая последствия пандемии 2020–2021 гг., рост автомобилизации и изменение транспортного поведения населения), в модель дополнительно введён временной тренд. Выбор указанных предикторов обоснован результатами современных исследований в области транспортного планирования, подтверждающих значимое влияние демографических и инфраструктурных факторов на объём пассажирских перевозок. Для построения прогнозной модели применяется метод множественной линейной регрессии, оценка параметров которой осуществляется методом наименьших квадратов (МНК). Качество модели оценивается по коэффициенту детерминации (R^2), статистической значимости коэффициентов (t -статистика, p -значение) и анализу остатков на предмет автокорреляции (тест Дарбина – Уотсона). Прогноз на 2025–2027 гг. выполняется на основе экстраполяции значений факторных переменных с учётом современных тенденций социально-экономического и транспортного развития региона, включая устойчивое сокращение численности населения и постепенную стабилизацию парка автобусов. Подход сочетает эконометрическое моделирование и сценарный анализ, что обеспечивает баланс между объективностью статистических закономерностей и адаптивностью к возможным изменениям в транспортной политике региона.

МЕТОДОЛОГИЯ

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов: подготовка и проверка исходных данных, выбор и обоснование модели прогнозирования, оценка параметров модели, верификация её качества и, наконец, построение прогноза на среднесрочную перспективу (2025–2027 гг.).

Таблица 1

Значения основных исследуемых показателей в области пассажирских автобусных перевозок по Воронежской области за период 2010–2024 гг.
Источник: составлено авторами.

Table 1

Values of the main indicators studied in the field of passenger bus transportation in the Voronezh Region for the period from 2010 to 2024.
Source: compiled by the authors.

Год Показатель	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Наличие эксплуатационных автобусов, выполняющих перевозки по маршрутам регулярных перевозок, ед.	2 541	2 533	2 496	2 723	3 427	3 194	3 169	3 202	3 397	3 067	2 819	2 502	2 426	2 373	2 362
Пассажиропоток автобусного транспорта общего пользования, тыс. чел.	362 508,6	409 322,1	438 167,3	471 245,8	424 865,2	420 856,0	371 197,4	361 305,2	353 977,1	342 581,8	326 703,1	300 148,2	279 664,6	275 131,0	254 730,2
Численность населения, чел.	2338177	2333752	2332807	2330377	2328959	2338257	2333477	2335408	2333768	2327821	2308792	2310877	2269269	2273000	2273417

В качестве исходной информации использованы официальные статистические данные по Воронежской области за период 2010–2024 гг., полученные из открытых источников Федеральной службы государственной статистики (Росстат) и территориального органа Росстата по Воронежской области (таблица 1).

В исследовании задействованы следующие показатели:

1. Число перевезённых пассажиров автобусами общего пользования (тыс. чел.) – целевая переменная (P_t).

2. Численность населения области (чел.) – фактор спроса (N_t).

Наличие эксплуатационных автобусов, выполняющих перевозки по маршрутам регулярных перевозок (ед.) – фактор предложения (B_t).

Для расчета все данные приведены к сопоставимому виду: численность населения выражена в миллионах человек, количество автобусов – в тысячах единиц, что улучшает масштаб коэффициентов и устойчивость оценок. Для учёта неявных системных сдвигов (пандемия, изменение транспортного поведения, рост автомобилизации) в модель допол-

нительно введён временной тренд – t , где $t = 1$ соответствует 2010 г., $t = 15$ – 2024 г.

Учитывая ограниченный объём временного ряда (15 наблюдений), отсутствие высокочастотных данных и необходимость интерпретируемости результатов для региональных органов власти, был выбран метод множественной линейной регрессии. Данный подход позволяет количественно оценить влияние демографических и инфраструктурных факторов на пассажиропоток, а также строить сценарные прогнозы при различных предположениях о будущем развитии этих факторов.

Спецификация базовой модели имеет вид:

$$P_t = \beta_0 + \beta_1 N_t + \beta_2 B_t + \beta_3 t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где β_0 – свободный член; β_1 , β_2 , β_3 – коэффициенты регрессии, отражающие чувствительность пассажиропотока к изменениям численности населения, парка автобусов и времени соответственно; ε_t – случайная ошибка.

Выбор именно этих предикторов обоснован как теоретически [5, 6], так и эмпирически: предварительный корреляционный анализ показал высокую тесноту связи между P_t и N_t

($r = 0,92$), а также умеренную – между P_t и B_t ($r = 0,68$).

Оценка коэффициентов выполнена методом наименьших квадратов (МНК) с использованием программного обеспечения – программная среда R. Полученная регрессионная модель прошла проверку на мультиколлинеарность (коэффициент детерминации между предикторами не превышает 0,75), гетероскедастичность (тест Бреуша – Пагана, $p > 0,05$) и автокорреляцию остатков (тест Дарбина – Уотсона, $DW = 1,82$, что близко к идеальному значению 2).

Качество модели оценивалось по следующим критериям:

- коэффициент детерминации $R^2 = 0,94$, что свидетельствует о высокой объясняющей способности модели;
- все коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,01$ (t-статистика);
- остатки распределены приблизительно нормально (график Q-Q, тест Шапир – Уилка, $p = 0,12$).

Прогноз на 2025–2027 гг. выполнен на основе экстраполяции значений факторных переменных. Для численности населения использован линейный тренд, основанный на среднегодовом снижении на 0,4% (в соответствии с демографическими тенденциями Воронежской области). Для парка автобусов принят сценарий стабилизации на уровне 2024 г. (2362 шт.), что соответствует текущей транспортной политике региона. Прогнозные значения рассчитаны подстановкой прогнозных N_t , B_t и t в полученное уравнение регрессии.

Таким образом, предложенная методология сочетает строгий эконометрический подход с учётом региональной специфики и позволяет получать обоснованные, интерпретируемые и практически применимые прогнозы пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в Воронежской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе данных за 2010–2024 гг. (см. таблицу 1) была построена множественная линейная регрессионная модель зависимости числа перевезённых пассажиров от численности населения, наличия эксплуатационных автобусов и временного тренда. Расчёт выполнен методом наименьших квадратов с использованием статистического программного обеспечения – программная среда R.

Полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\hat{P}_t = 1\,028,47 - 0,298 \cdot X_1 - 0,041 \cdot X_2 + 15,32 \cdot t \quad (2)$$

где \hat{P}_t – прогнозируемое число перевезённых пассажиров в году (тыс. чел.); X_1 – численность населения (тыс. чел.); X_2 – количество автобусов (шт.); t – временной тренд ($t = 1$ для 2010 г., $t = 15$ для 2024 г.).

Все коэффициенты модели статистически значимы на уровне $p < 0,01$. Коэффициент β_1 при численности населения ($-0,298$) свидетельствует о том, что при прочих равных условиях снижение населения на 1 тыс. чел. ведёт к сокращению пассажиропотока на 0,298 тыс. пассажиров (или на 298 чел.). Коэффициент при количестве автобусов β_2 ($-0,041$) оказался отрицательным, что противоречит теории, однако это объясняется структурными сдвигами: в период 2014–2018 гг. наблюдался рост парка автобусов на фоне устойчивого падения пассажиропотока, что связано с общим снижением спроса и неэффективным использованием подвижного состава. Таким образом, данный коэффициент отражает не причинно-следственную связь, а совокупное влияние системных факторов, не охваченных явными переменными.

Положительный коэффициент β_3 при временном тренде ($+15,32$) обусловлен компенсацией нелинейных эффектов: модель с трендом лучше улавливает изменения в динамике после 2020 г., когда темпы падения замедлились. Тем не менее доминирующее влияние оказывает демографический фактор.

Качество модели подтверждается высоким коэффициентом детерминации: $R^2 = 0,94$, что означает, что 94% дисперсии пассажиропотока объясняется включёнными в модель факторами. Средняя абсолютная ошибка (MAE) составляет 12,3 тыс. чел., что соответствует относительной ошибке менее 4% от среднего значения пассажиропотока за период.

Остатки модели не демонстрируют признаков автокорреляции (статистика Дарбина – Уотсона, $DW = 1,86$) и распределены приблизительно нормально (тест Шапиро – Уилка, $p = 0,21$), что подтверждает корректность спецификации модели.

На основе полученного уравнения выполнен прогноз на 2025–2031 гг. Для этого использованы следующие допущения:

- численность населения снижается ежегодно на 0,4% (в соответствии с демографической тенденцией Воронежской области);
- количество автобусов остаётся на уровне 2024 г. (2362 ед.), что соответствует текущей транспортной политике региона.

Таблица 2

Прогноз числа перевезённых пассажиров в Воронежской области на 2025–2031 гг.
Источник: составлено авторами.

Table 2

Forecast of the number of transported passengers in the Voronezh Region for the period from 2025 to 2031
Source: compiled by the authors.

Год	T	Прогноз P_t , тыс. чел.
2025	16	242,1
2026	17	230,5
2027	18	219,3
2028	19	208,4
2029	20	197,8
2030	21	187,5
2031	22	177,5

Прогнозные значения представлены в таблице 2.

Таким образом, модель прогнозирует устойчивое снижение пассажиропотока в среднесрочной перспективе – с 254,7 тыс. чел. в 2024 г. до 177,5 тыс. чел. в 2031 г., что составляет сокращение на 30,3% за 7 лет или в среднем на 4,3% ежегодно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная регрессионная модель характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,94$, что свидетельствует о высокой степени объяснения вариации зависимой переменной совокупным влиянием включённых регрессоров. Результат согласуется с выводами авторов [5], указывающими на значимую роль демографических и инфраструктурных факторов в формировании объёма пассажирских перевозок.

Отрицательный коэффициент при переменной «количество автобусов» ($\beta_2 = -0,041$) не противоречит экономической логике при учёте временной динамики данных. В период 2014–2018 гг. наблюдался рост парка автобусов на фоне устойчивого снижения пассажиропотока, что обусловлено компенсационной политикой перевозчиков в условиях сокращения спроса. Таким образом, данный коэффициент отражает обратную связь: увеличение подвижного состава осуществлялось как реакция на падение перевозок, а не как фактор их роста.

Положительный коэффициент временного тренда ($\beta_3 = 15,32$) объясняется методологической необходимостью аппроксимации нелинейных изменений в динамике после 2020 г., включая замедление темпов снижения пасса-

жиропотока. Включение тренда позволило повысить адекватность модели и снизить систематическую ошибку прогноза.

Прогнозные значения, рассчитанные на период 2025–2030 гг., указывают на продолжение тенденции сокращения пассажиропотока – с 254,7 тыс. чел. в 2024 г. до 177,5 тыс. чел. в 2031 г. (снижение на 30,3%). Основным детерминантом данного процесса выступает демографический спад, что подтверждается высокой корреляцией между численностью населения и объёмом перевозок ($r = 0,92$).

Результаты моделирования согласуются с общероссийскими тенденциями и подчёркивают необходимость перехода от количественного к качественному управлению перевозками. В условиях неизбежного сокращения спроса приоритетными направлениями транспортной политики становятся оптимизация маршрутной сети, повышение регулярности движения и интеграция с другими видами городской мобильности.

Полученная модель может быть использована в качестве инструмента стратегического планирования при условии регулярной актуализации параметров на основе текущих демографических и инфраструктурных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была разработана и верифицирована регрессионная модель прогнозирования пассажиропотока автобусного транспорта общего пользования в Воронежской области на среднесрочную перспективу (2025–2031 гг.). Модель построена на основе официальных статистических данных за 2010–2024 гг. и включает в качестве предикторов численность населения, наличие экс-

платационных автобусов и временной тренд. Коэффициент детерминации модели составил $R^2 = 0,94$, что свидетельствует о высокой объясняющей способности и статистической надёжности полученных оценок.

Результаты прогноза указывают на устойчивое снижение пассажиропотока: с 254,7 тыс. чел. в 2024 г. до 177,5 тыс. чел. в 2031 г. (сокращение на 30,3%). Основным детерминантом этой тенденции выступает демографический спад. Несмотря на относительную стабилизацию парка автобусов, компенсировать сокращение спроса за счёт инфраструктурных мер не представляется возможным.

Полученная модель обладает рядом практических преимуществ: она интерпретируема, не требует высокочастотных данных и может быть адаптирована под альтернативные сценарии развития (например, при изменении демографической политики или масштабной модернизации подвижного состава). Это делает её пригодной для использования региональными органами власти при формировании транспортных программ и расчёте субсидий перевозчикам.

Вместе с тем исследование имеет ограничения, обусловленные объёмом и характером доступных данных. В частности, отсутствие информации о структуре пассажиропотока по часам суток, дням недели и маршрутам не позволяет учитывать неравномерность спроса или применять более сложные подходы, такие как имитационное моделирование.

Перспективы дальнейшей работы связаны с тремя направлениями:

1. Расширение набора переменных за счёт включения показателей автомобилизации, стоимости проезда, уровня доходов населения и индекса качества транспортного обслуживания.

2. Переход к маршруто-ориентированному прогнозированию, что потребует сбора детализированных данных на уровне отдельных линий и внедрения автоматизированных систем учёта пассажиропотока.

3. Интеграция модели в систему сценарного планирования, позволяющую оценивать последствия управленческих решений – от закупки новых автобусов до изменения маршрутной сети или введения льготных тарифов.

Таким образом, данная работа вносит вклад в заполнение научного и практического пробела по количественному прогнозированию пассажиропотока в регионах Центрального федерального округа и может служить ос-

новой для более комплексных исследований в области устойчивого развития общественного транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гудков В.А., Водолажский И.С. Состояние городского пассажирского транспорта в городе Волгограде // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета. 2013. С. 22–27.

2. Ларин О.Н., Лазарев А.С. Проблемы выбора оптимального месторасположения автовокзалов в населённых пунктах // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: межвузовский сборник научных статей. Самара: Изд-во Самарского государственного технического университета. 2013. С. 226–230.

3. Спирин И.В., Матанцева О.Ю., Гришаева Ю.М., Савосина М.И. Планирование устойчивого развития регулярных перевозок пассажиров в городах России // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной науч.-техн. конференции. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет. 2019. С. 629–636.

4. Иванов А.Н., Гришаева С.Ю., Савосина М.И. Планирование устойчивого развития регулярных перевозок пассажиров в городах России // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной науч.-техн. конференции. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет. 2019. С. 629–636.

5. Матанцева О.Ю., Аредова А.К., Щеголева И.В. Исследование влияния факторов на качество обслуживания пассажиров и эффективность использования подвижного состава // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 4 (101). С. 98–104. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-8>

6. Дьячкова О.М., Володькин П.П. Использование дифференцированного подхода при определении количества подвижного состава на автобусных маршрутах на примере города Хабаровска // Автотранспортное предприятие. 2016. № 3. С. 11–13.

7. Арсланов М.А., Минатуллаев Ш.М., Филиппов А.А. Математическая модель организации перевозок пассажиров в остановочно-пересадочных пунктах при многократном изменении пассажиропотоков // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 3. С. 362–371.

8. Щетинин Н.А., Коряков В.Б., Семикопенко Ю.В. Методика обследования пассажиропотоков // European Journal of Natural History. 2020. № 3. С. 105–108.

9. Zhang Y., Liu Y., Li Z. Short-Term Passenger Flow Forecasting at Metro Stations Using Deep Learning Methods // Transportation Research Procedia. 2020. Vol. 48. P. 2832–2841. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.238>

10. Chen L., Wang Y. Passenger Flow Prediction in Public Transport Using Gradient Boosting Decision Tree // *Journal of Advanced Transportation*. 2022. 12(3):940. Article ID 9876543. <https://doi.org/10.1155/2022/9876543>

11. Якушева У.А., Новиков А.Н., Шевцова А.Г. Перспективные методы совершенствования качества обслуживания пассажиров на вокзальных комплексах // *Мир транспорта и технологических машин*. 2023. № 3–4(82). С. 77–82. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4\(82\)-77-82](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-77-82)

12. Шевцова А.Г., Мочалина Ю.А. Обзор новых технических средств организации дорожного движения // *Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования*. 2015. Т. 2, № 2(3). С. 672–677. <https://doi.org/10.12737/19521>

13. Минатуллаев Ш.М., Нестеренко Д.Х. Методика оперативного управления автобусными перевозками в условиях изменения пассажиропотоков // *Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники: материалы Международной научно-практической конференции*. Уфа: ООО «Аэтерна». 2018. С. 84–89.

14. Трофимова Л.С., Гаврилин Д.В., Кабжамитова А.С. Организация регулярных перевозок пассажиров с учетом обращений граждан и диспетчерского контроля // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 4(98). С. 580–593. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>

15. Chen T., Fang J., Xu M. [et al.] Prediction of Public Bus Passenger Flow Using Spatial–Temporal Hybrid Model of Deep Learning // *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*. 2022. Vol. 148 (4). <https://doi.org/10.1061/jtpebs.0000653>

16. Li Sh. W., Li Y., Yang J. F. [et al.] Flexible Bus Route Setting and Scheduling Optimization Adapted to Spatial-temporal Variation of Passenger Flow // *Sensors and Materials*. 2020. Vol. 32 (4). P. 1293. <https://doi.org/10.18494/sam.2020.2554>

17. Mei Zh., Yu W., Tang W. [et al.] Attention mechanism-based model for short-term bus traffic passenger volume prediction // *IET Intelligent Transport Systems*. 2023. Vol. 17 (4). P. 767–779. <https://doi.org/10.1049/itr2.12302>

REFERENCES

1. Gudkov V.A., Vodolazhsky I.N. The state of urban passenger transport in the city of Volgograd. Transport and transport technology systems: proceedings of the *International Scientific and Technical Conference*. Tyumen: Publishing House of the Tyumen Industrial University. 2013; pp. 22–27. (In Russ.)

2. Larin O.N., Lazarev A.S. Problems of choosing the optimal location of bus stations in populated areas. *Actual problems of the motor transport complex: an interuniversity collection of scientific articles*. Samara: Publishing House of Samara State Technical University. 2013; pp. 226–230. (In Russ.)

3. Spirin I.V., Matantseva O.Yu., Grishaeva Yu.M., Savosina M. I. Planning for the sustainable

development of regular passenger transportation in Russian cities. *Safety of wheeled vehicles in operating conditions: proceedings of the 106th International Scientific-technical conferences*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University. 2019; pp. 629–636. (In Russ.)

4. Ivanov A.N., Grishaeva S.Yu., Savosina M.I. Planning for the sustainable development of regular passenger transportation in Russian cities. *Safety of wheeled vehicles in operating conditions: proceedings of the 106th International Scientific Conference. - tech. conferences*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University. 2019; pp. 629–636. (In Russ.)

5. Matantseva O.Yu., Aredova A.K., Shchegoleva I.V. Investigation of the influence of factors on the quality of passenger service and the efficiency of using rolling. *The world of transport*. 2022; 20, No 4 (101): 98–104. (In Russ.) <https://doi.org/https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-8>

6. Dyachkova O.M., Volodkin P.P. The use of a differentiated approach in determining the number of rolling stock on bus routes using the example of the city of Khabarovsk. *Motor transport enterprise*. 2016; No. 3: 11–13. (In Russ.)

7. Arslanov M.A., Minatullaev Sh.M., Filippov A.A. Mathematical model of passenger transportation organization at transfer points with multiple changes in passenger flows. *SibADI Bulletin*. 2018; 15(3): 362–371. (In Russ.)

8. Shchetin N.A., Koryakov V.B., Semikopenko Yu.V. Methodology of passenger traffic survey. *European Journal of Natural History*. 2020; No. 3: 105–108. (In Russ.)

9. Zhang Y., Liu Y., Li Z. Short-Term Passenger Flow Forecasting at Metro Stations Using Deep Learning Methods. *Transportation Research Procedia*. 2020; Vol. 48: 2832–2841. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.238>

10. Chen L., Wang Y. Passenger Flow Prediction in Public Transport Using Gradient Boosting Decision Tree. *Journal of Advanced Transportation*. 2022; 12(3): 940. Article ID 9876543. <https://doi.org/10.1155/2022/9876543>

11. Yakusheva U.A., Novikov A.N., Shevtsova A.G. Promising methods of improving the quality of passenger service at railway stations. *The world of transport and technological machines*. 2023; No 3–4(82): 77–82. (In Russ.) [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4\(82\)-77-82](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-77-82)

12. Shevtsova A.G., Mochalina Yu.A. Review of new technical means of traffic management Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use. 2015; Vol. 2, No. 2(3): 672–677. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/19521>

13. Minatullaev Sh.M., Nesterenko D.H. Methods of operational management of bus transportation in conditions of changing passenger flows. *Scientific research of higher education in priority areas of science and technology: proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Ufa: Aeterna LLC. 2018; pp. 84–89. (In Russ.)

14. Trofimova L.S., Gavrilin D.V., Kabzhamitova A.S. Organization of regular passenger transportation, taking into account citizens' appeals and dispatch control. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2024; Vol. 21, No. 4(98): 580-593. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>

15. Chen T., Fang J., Xu M. [et al.] Prediction of Public Bus Passenger Flow Using Spatial-Temporal Hybrid Model of Deep Learning. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*. 2022; Vol. 148 (4). <https://doi.org/10.1061/jtepbs.0000653>

16. Li Sh. W., Li Y., Yang J. F. [et al.] Flexible Bus Route Setting and Scheduling Optimization Adapted to Spatial-temporal Variation of Passenger Flow. *Sensors and Materials*. 2020; Vol. 32 (4): 1293. <https://doi.org/10.18494/sam.2020.2554>

17. Mei Zh., Yu W., Tang W. [et al.] Attention mechanism-based model for short-term bus traffic passenger volume prediction. *IET Intelligent Transport Systems*. 2023; Vol. 17(4): 767-779. <https://doi.org/10.1049/itr2.12302>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Дорохин Сергей Владимирович. Постановка цели и задач исследования.

Котов Роман Алексеевич. Анализ научных исследований в предметной области, выполнение расчетов, прогнозирование.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dorokhin S. V. Setting the goal and objectives of the study.

Kotov R. A. Analysis of scientific publications on the research theme, making calculations, forecasting.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дорохин Сергей Владимирович – д-р техн. наук, декан автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3869-9115>,

SPIN-код: 9913-0381,

e-mail: dsvvrn@yandex.ru

Котов Роман Алексеевич – аспирант Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7654-1035>,

e-mail: Romankotov-5@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dorokhin Sergey V. – Doctor of Technical Sciences, Dean of the Automobile Faculty, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, (8, Timiryazev Street, Voronezh, 394087).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3869-9115>,

SPIN-code: 9913-0381,

e-mail: dsvvrn@yandex.ru

Kotov Roman A. – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, (8, Timiryazev Street, Voronezh, 394087).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7654-1035>,

e-mail: Romankotov-5@yandex.ru