

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.1

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-1-95>

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО ЗАТОРА НА НЕКОТОРЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

М. Г. Бояршинов^{1,2,3}, А. С. Вавилин^{1,4}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, Пермь, Россия

³ e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

⁴ e-mail: vavilin@tbdd.ru

Аннотация. В качестве показателей заторной ситуации используются, как правило, средняя скорость и плотность автомобильного транспорта, не позволяющие отслеживать эволюцию (стадии формирования, развития и завершения) транспортного затора. Авторами предложен и обоснован количественный показатель транспортного затора, позволяющий в автоматизированном режиме выявлять заторную ситуацию на городской улично-дорожной сети с использованием программно-технических комплексов фото- и видеオフィксации. Целью настоящего исследования является изучение количественных характеристик предложенного показателя на основных типах пересечений городских улично-дорожных сетей с целью разработки научно-обоснованных рекомендаций по прогнозированию заторных ситуаций, обоснованию и принятию рациональных мер оперативного устранения транспортных заторов. Объектом изучения является транспортный поток на трех типах пересечений улично-дорожной сети города Перми, оборудованных программно-техническими комплексами фото- и видеオフィксации. Предмет исследования – закономерности эволюции показателей транспортных потоков, которые можно использовать для оперативного прогнозирования формирования, развития и завершения транспортных заторов. Основой теоретико-методического подхода являются методы математической статистики, использованные для обработки результатов наблюдений транспортных потоков на разных типах пересечений с использованием «скользящего окна», вычисления среднего суточного значения и стандартного отклонения. Исходные данные получены с помощью программно-технических комплексов фото- и видеオフィксации нарушений правил дорожного движения, установленных на улично-дорожной сети города Перми. В результате исследования определены рациональные параметры «скользящего окна», обеспечивающие структурирование функции показателя транспортного затора; выявлены факты образования заторных ситуаций; определены особенности эволюции заторов и наличие проблемных направлений движения, для которых целесообразно изменить режим светофорного регулирования. Теоретическая и практическая значимость работы заключается в проверке работоспособности предложенного количественного показателя и критерия транспортного затора, что представляет практический интерес с точки зрения прогнозирования аномалий движения транспортных средств по улично-дорожной сети, корректировке режимов работы светофорных объектов и проч. Использование предложенного показателя транспортного затора возможно для оценки эффективности светофорного регулирования на улично-дорожной сети города Перми. Направление дальнейшего исследования – изучение закономерностей показателя транспортного затора на пересечениях городской улично-дорожной сети, различных типов, не вошедших в настоящее исследование.

Ключевые слова: транспортный поток, транспортный затор, показатель и критерий транспортного затора.

Для цитирования: Бояршинов М. Г., Вавилин А. С. Закономерности показателя транспортного затора на некоторых пересечениях улично-дорожной сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 1. – С. 95–115. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-1-95>.

Original article

PATTERNS OF TRAFFIC CONGESTION INDICATOR AT SOME INTERSECTIONS OF THE ROAD NETWORK

M. G. Boyarshinov^{1,2,3}, A. S. Vavilin^{1,4}

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² Perm military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, Perm, Russia

³ e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

⁴ e-mail: vavilin@tbdd.ru

Abstract. The average speed and density of road transport are used as indicators of the congestion situation, but do not allow tracking the evolution (stages of formatting, progressing, and vanishing) of traffic congestion. The authors proposed and justified a quantitative indicator of traffic congestion, which allows in an automated mode to identify the congestion situation on the urban road network using hardware and software video recording systems. The purpose of this study is due to the need to study the quantitative characteristics of the proposed indicator at characteristic intersections of urban roads, which will allow us to develop scientifically based recommendations for predicting congestion situations, substantiating, and making optimal decisions on measures to promptly eliminate traffic congestion. The object of study is the traffic flow at three types of intersections of the Perm city road network, equipped with a photo and video recording software and hardware complex. The subject of the study is the regularities of the evolution of the listed deterministic indicators of traffic flows, which can be used for operational forecasting of the formation, development, and elimination of traffic congestion. The theoretical and methodological approach is based on the methods of mathematical statistics used to process the results of observations of traffic flows at different types of intersections using a «sliding window», calculating the average daily value and standard deviation. The initial data were obtained with the help of hardware and software complexes for fixing violations of traffic rules installed on the street and road network of the Perm city. As a result of the study, the rational parameters of the “sliding window” were determined, ensuring the structuring of the traffic congestion indicator; the facts of the congestion situations formation were revealed; the features of the congestion evolution and the presence of problematic traffic directions for which it is advisable to change the traffic light regulation mode were determined. The theoretical and practical significance of the work consists in checking the operability of the proposed indicator and criterion of traffic congestion, which is of practical interest from the point of view of predicting anomalies in the movement of vehicles on the road network, adjusting the operating modes of traffic lights, etc. It is also possible to use the proposed traffic congestion indicator to assess the effectiveness of traffic light regulation on the Perm city road network. The direction of further research is to study the patterns of traffic congestion at intersections of the urban road network, of various types that are not included in this study.

Key words: traffic flow, traffic congestion, indicator and criterion of traffic congestion.

Cite as: Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. (2024) [Patterns of traffic congestion indicator at some intersections of the road network]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 95–115. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-1-95>.

Введение

Заторы автомобильного транспорта – одна из основных проблем развития транспортной отрасли [13; 5]. Транспортные заторы являются, с одной стороны, явлением объективным, проявляющимся в создании автомобильным транспортом препятствий друг другу в результате превышения спроса на ограниченное пространство дороги до уровня, близкого к пропускной способности участка дороги, и, с другой стороны, субъективным, связанным с ожиданиями пользователей в отношении эффективности исполнения дорожной системой возложенных на нее функций. Задача снижения остроты этого явления имеет социальную, экологическую, техническую, информационную, фи-

нансовую, законодательную, экономическую и даже политическую составляющие, затрагивает отношения собственности и землепользования [16].

В качестве факторов, обуславливающих образование транспортных заторов, признаны быстрый рост количества автомобилей [23] и соответствующее повышение их плотности на дорогах [29], снижение пропускной способности автомобильных дорог [19; 24; 38], в том числе из-за дорожно-транспортных происшествий [33], увеличение объемов перевозок и парка грузовых автомобилей [16; 35], наличие нерегулируемых въездов, пересечений, пешеходных переходов [4], регулируемые пересечения со светофорными объектами с большим количеством фаз [3], несогласован-

ность работы светофоров на смежных перекрестках [14], строительно-монтажные и ремонтные работы на дорогах [32], неудовлетворительная работа постов взимания платы за проезд [21], влияние психологических и физиологических особенностей водителей [5; 4; 37] и некоторые другие.

Заторные ситуации уменьшают скорость движения, что ведет к росту времени в пути [28], повышают расход топлива и стоимость перевозок [2; 36], приводят к загрязнению окружающей среды отработавшими газами, увеличивают аварийность и уровень шума, способствуют падению производительности труда и качества обслуживания, создают угрозу здоровью и снижают безопасность участников дорожного движения [36; 39], ухудшают психологическое состояние пассажиров и водителей, и проч.

До недавнего времени понятие «транспортный затор» не было юридически закреплено, поэтому как российские, так и зарубежные исследователи предлагали собственные определения этого понятия, позволяющие исследовать и анализировать факторы, получать количественные показатели транспортных заторов, фиксирующие их формирование, эволюцию и завершение. Как результат, в Российской Федерации отсутствовало общепринятое определение, позволяющее корректно устанавливать количественные показатели заторных ситуаций на автомобильных дорогах.

Имеется целый ряд отечественных и зарубежных публикаций, исследующих транспортные потоки на городских дорогах с целью выявления количественных показателей, способных фиксировать и предсказывать образование заторных ситуаций. В качестве основных индикаторов транспортных заторов рассматриваются средняя скорость, плотность автомобилей, функция, описывающая взаимозависимость этих величин, и некоторые другие.

$$T_{cpj} = \frac{1}{n} \sum_{t \in [t_j - \Delta/2, t_j + \Delta/2]} T_i(t), \quad (1)$$

где

t_i и $t_{i+1} = t_i + \delta$ – два последовательных момента времени наблюдения;

δ – сдвиг по времени «скользящего окна»;

Δ – ширина «скользящего окна» (интервал осреднения);

$T_i(t)$ – продолжительность движения i -го автомобиля между рубежами контроля;

n – количество автомобилей, зафиксированных за период $[t_j - \Delta/2, t_j + \Delta/2]$ программно-техническими комплексами фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения [10], установленными на рассматриваемом участке городской улично-дорожной сети.

Предварительное исследование [7] показало, что формирование транспортных заторов обнаруживается по быстрому нарастанию осредненных продолжительностей движения автомобилей между рубежами

Для этого активно применяются математическое [12; 26] и имитационное [1; 32] моделирования, современные способы обработки информации: метод нормированного размаха [8;6], статистический [10;18], фрактальный [17; 34], гармонический [11; 22; 30], Фурье- [11] и вейвлет-анализ [8; 25; 31] данных, получаемых в режиме реального времени от программно-технических комплексов фото- и видеофиксации [7; 20; 27].

Целью настоящего исследования является изучение введенных авторами количественного показателя транспортного затора и критерия, позволяющего фиксировать стадии его образования, развития и завершения на примере основных типов пересечений на улично-дорожной сети города Перми.

Из-за ограниченного объема статьи сопоставление с опубликованными ранее результатами, полученными другими исследователями, здесь не приводится. С обзором подходов к изучению характеристик транспортных заторов можно ознакомиться в публикации [7] авторов.

Количественный показатель транспортного затора

Для определения возможности формирования заторной ситуации используется разработанный авторами алгоритм [7] определения количественного показателя транспортного затора на основе измерения продолжительностей движения отдельных автомобилей в случайном потоке транспорта. Поскольку продолжительности движения транспортных средств между двумя рубежами контроля являются случайными величинами, для исследования закономерностей формирования транспортного затора используется операция статистического осреднения с использованием «скользящего окна»

контроля. Завершение транспортного затора сопровождается возвращением осредненных продолжительностей движения автомобилей к установившемуся среднему значению, характерному для этого

участка дороги (рисунок 1, а).

Критерий состояния транспортного затора

Рассматривая значения T_{cpj} , определяемые в течение

всего времени наблюдения, как случайные величины, можно определить среднюю (установившуюся для данного участка дороги) продолжительность движения автомобилей

$$T_{cp}^{уст} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i \quad (2)$$

и среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (T_i - T_{cp}^{уст})^2} \quad (3)$$

осредненных продолжительностей T_{cpj} от среднего значения $T_{cp}^{уст}$ на промежутке времени наблюдения (например, сутки либо период свободного движения при отсутствии заторной ситуации) за движением потока автомобилей между рубежами контроля. Здесь m – количество автомобилей за период наблюдения.

Выявление стадий формирования транспортного затора основывается на фиксации факта превышения текущим значением T_{cpj} установившегося значения $T_{cp}^{уст}$ на величину, кратную среднеквадратичному отклонению σ определяемых согласно выражениям (2) и (3), аналогично применяемому в теории математической статистики правилу «трёх сигм» (3σ). Согласно этому правилу (в предположении о нормальном распределении вероятностей распределения случай-

ных значений T_{cpj}) в диапазон $[T_{cp}^{уст} - \sigma, T_{cp}^{уст} + \sigma]$ попадает 68% значений случайной величины T_{cpj} ; в диапазоне $[T_{cp}^{уст} - 2\sigma, T_{cp}^{уст} + 2\sigma]$ содержатся 95% случайных значений T_{cpj} ; и, наконец, диапазон $[T_{cp}^{уст} - 3\sigma, T_{cp}^{уст} + 3\sigma]$ охватывает 99,7% всех значений случайной величины T_{cpj} . На рисунке 1б показаны теоретическое (нормальное) и эмпирическое распределения P вероятности осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей между рубежами контроля по данным за 9 мая 2022 года.

Таким образом, для количественного определения критерия, указывающего на уровень сформированности транспортного затора, предлагается использовать величины $T_{cp}^{уст}$, σ , 2σ и 3σ , определяемые выражениями (2) и (3) в ходе мониторинга транспортного потока:

$T_{cpj} \leq T_{cp}^{уст} + \sigma$ – транспортный затор отсутствует;

$T_{cp}^{уст} + \sigma < T_{cpj} \leq T_{cp}^{уст} + 2\sigma$ – существует опасность формирования транспортного затора;

$T_{cp}^{уст} + 2\sigma < T_{cpj} \leq T_{cp}^{уст} + 3\sigma$ – необходимо срочно принимать меры по предупреждению транспортного затора;

$T_{cpj} > T_{cp}^{уст} + 3\sigma$ – транспортный затор сформировался.

На примере данных за 9 мая 2022 года, представленных в работе [7], определены значения $T_{cp}^{уст} = 98,8$ с и $\sigma = 36,1$ с. Эмпирическое распределение P вероятности осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей между рубежами контроля (рисунок 1, б) за эту же дату свидетельствует о его удовлетворительной близости к нормальному распределению, что позволяет воспользоваться правилом «трех сигм». Пороговые отклонения для осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей между рубежами контроля от $T_{cp}^{уст}$ на величины σ , 2σ

и 3σ соответственно представлены на рисунке 1, а.

Алгоритм исследования показателя и критерия состояния транспортного затора

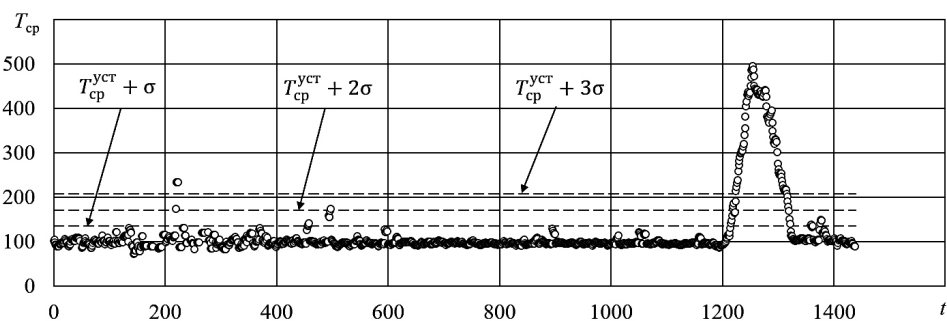
Представляется важным установить закономерности эволюции количественного показателя T_{cpj} транспортного затора, оценить способность и эффективность предлагаемого критерия предсказывать этапы транспортных заторов, которые могут формироваться на пересечениях городской улично-дорожной сети. Проверка количественного показателя и критерия

транспортного затора выполнена для некоторых пересечений улично-дорожной сети города Пермь в следующей последовательности.

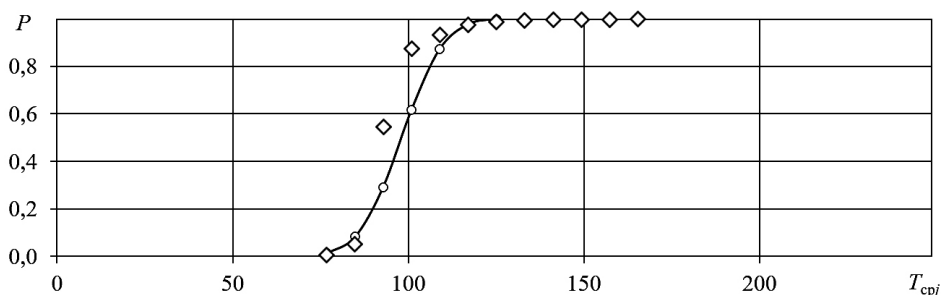
1. Проведен анализ улично-дорожной сети города Пермь для выявления основных типов пересечений дорог, оборудованных программно-техническими

комплексами фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения.

2. Назначены периоды наблюдения транспортных потоков продолжительностью не менее 1 месяца на каждом пересечении для определения количественных значений показателя и критерия транспортных заторов.



а



б

Рисунок 1. Осредненные продолжительности T_{cpj} (с) движения автомобилей (—o—) и пороговые значения (---) их отклонения на σ , 2σ и 3σ значений от $T_{cp}^{уст}$ (а); теоретическое (—o—) и эмпирическое (—◇—) распределения P вероятности осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей между рубежами контроля (б); наблюдение в течение суток 9 мая 2022 года

Источник: разработано авторами

3. Собраны и систематизированы цифровые данные за выбранные периоды.

4. Выполнена обработка данных о движении автомобилей между контрольными рубежами на рассматриваемых пересечениях для определения рациональных параметров Δ и времени δ сдвига «скользящего окна» для корректного выполнения вычислительных работ.

5. При выбранных значениях параметров Δ и δ выполнена обработка данных с использованием выражения (1); получены временные ряды осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей между контрольными рубежами; с помощью соотношений (2) и (3) определены среднесуточные установившиеся значения $T_{cp}^{уст}$ и среднеквадратичные отклонения σ для всех рассматриваемых периодов наблюдения на каждом из выбранных пересечений городской улично-дорожной сети.

6. Выполнен анализ полученных временных рядов осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей и их соответствие критериальным значениям $T_{cp}^{уст} + \sigma$, $T_{cp}^{уст} + 2\sigma$, $T_{cp}^{уст} + 3\sigma$.

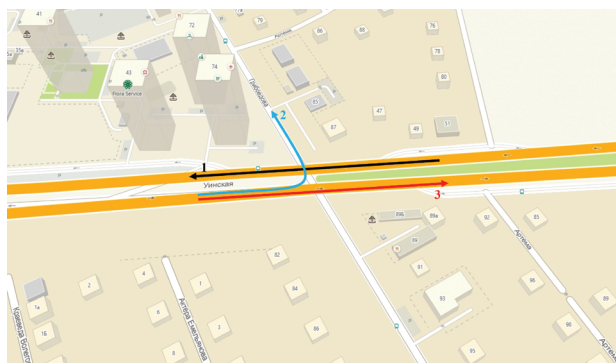
7. Сформулирован вывод об обоснованности и возможности использования разработанного количественного показателя в качестве количественной характеристики транспортного затора, предложенного критерия – для определения ситуации отсутствия, начала формирования, развития и завершения заторной ситуации.

Основные типы пересечений улично-дорожной сети города Перми

Анализ улично-дорожной сети города Пермь и размещения программно-технических комплексов фиксации нарушений правил дорожного движения показал целесообразность изучения транспортных потоков на основных типах пересечений городских дорог: Х-образном (рисунок 2, а), кольцевом (рисунок 2, б) и Т-образном (рисунок 2, в).

Результаты исследования

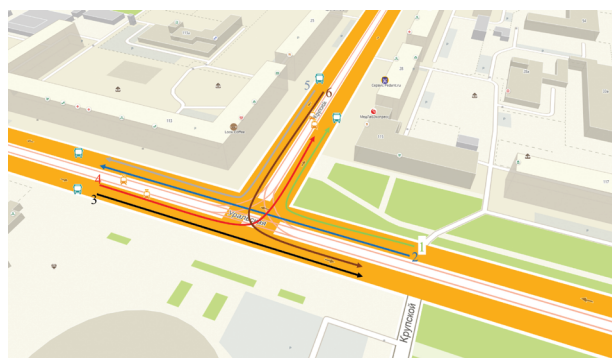
Данные, представленные на рисунке 1, а, показали, что на интервале времени от 0:00 до 20:00 при отсутствии транспортного затора критериальную величину $T_{срj}^{уст} + \sigma$ превышают всего 0,999% значений $T_{срj}$, за границу $T_{срj}^{уст} + 2\sigma$ попадают не более 0,499% значений $T_{срj}$ и выше $T_{срj}^{уст} + 3\sigma$ находятся около 0,333% значений $T_{срj}$ что в удовлетворительной степени соответствует условиям использования правила «трех сигм».



а



б



в

Рисунок 2. Типы основных пересечений улично-дорожной сети в городе Перми: Х-образное (а; пересечение «улица Уинская – улица Грибоедова»), кольцевое (б; пересечение «улица Уинская – улица Тургенева – улица Макаренко») и Т-образное (в; пересечение «улица Крупской – улица Уральская»); стрелками и цифрами указаны направление возможного движения (комментарии в тексте)

Источник: разработано авторами с использованием ресурсов 2GIS¹

При формировании транспортного затора (после 20:00) значения $T_{срj}$ быстро возрастают. При достижении первого порогового значения $T_{срj}^{уст} + \sigma$ среднее время движения автомобилей по рассматриваемому участку дороги увеличивается до $T_{срj} = 135$ с, то есть возрастает в 1,37 раза. При достижении второго порогового значения $T_{срj}^{уст} + 2\sigma$ среднее

время движения автомобилей возрастает до $T_{срj} = 171,1$ с, то есть в 1,73 раза по сравнению со свободным движением потока автомобилей. И наконец, при достижении третьего порогового значения $T_{срj}^{уст} + 3\sigma$ среднее время движения автомобилей становится равным $T_{срj} = 207,2$ с, возрастая в 2,1 раза. Пиковое значение продолжительности $T_{срj}$ движения ав-

¹ ООО «ДубльГИС» – URL: <https://2gis.ru/perm>. (дата обращения: 06.06.2023).

томобилей (в 20:55) становится равным $T_{срj} = 498,5$ с, что превышает продолжительность свободного движения в 5,04 раза.

Х-образное регулируемое пересечение дорог

Наблюдения за движением транспорта на Х-образном регулируемом пересечении «улица Уинская – улица Грибоедова» (см. рисунок 2, а) проводились с 1 мая по 1 июня 2022 года: направление движения 1 – «Восточный обход – улица Старцева»; направление движе-

ния 2 – «улица Уинская – улица Грибоедова»; направление движения 3 – «улицы Старцева – Восточный обход». На рисунке 3 представлены зависимости от времени осредненных продолжительностей $T_{срj}$ движения транспортных средств, вычисленных с разными значениями ширины Δ и сдвига δ по времени «скользящего окна», в направлении «Восточный обход – улица Старцева» (направление движения 1, рисунок 2, а) по данным за произвольно выбранный день 16 мая 2022 года (середина периода наблюдения).

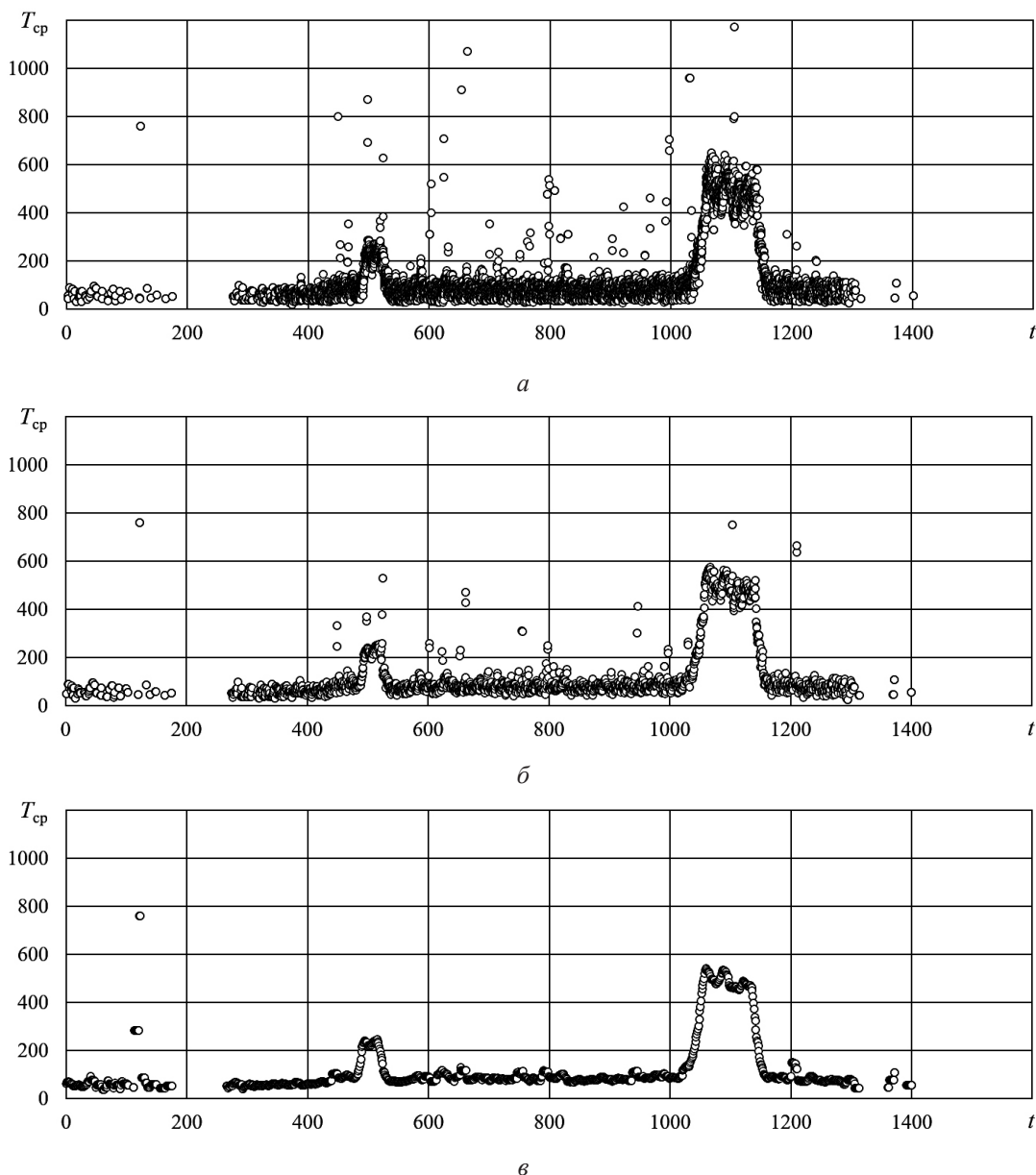


Рисунок 3. Продолжительности $T_{срj}$ (с) движения автомобилей при интервале осреднения $\Delta = 10$ с и сдвиге $\delta = 5$ с (а); $\Delta = 1$ мин и $\delta = 30$ с (б); $\Delta = 10$ мин и $\delta = 1$ мин (в); направление 1 «Восточный обход – улица Старцева», 16 мая 2022 г.

Источник: разработано авторами

Анализ распределения осредненных продолжительностей $T_{срj}$ движения автомобилей в транспортном потоке при $\Delta = 10$ с и $\delta = 5$ с (рисунок 3, а) показывает, что распределение анализируемой величины $T_{срj}$ имеет рассеянную структуру, принимая в течение суток случайные значения в диапазо-

не $T_{срj} \in [19, 2940]$ с. Среднее суточное значение $T_{ср}^{уст} = 84,2$ с, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 69,9$ с. Количество значений $T_{срj}$, превышающих пороговую величину $T_{ср}^{уст} + \sigma$, составляет 9,2%, выше $T_{ср}^{уст} + 2\sigma$ находятся 7,1% значений $T_{срj}$, и выше $T_{ср}^{уст} + 3\sigma$ – не более 5,6% всех значений $T_{срj}$.

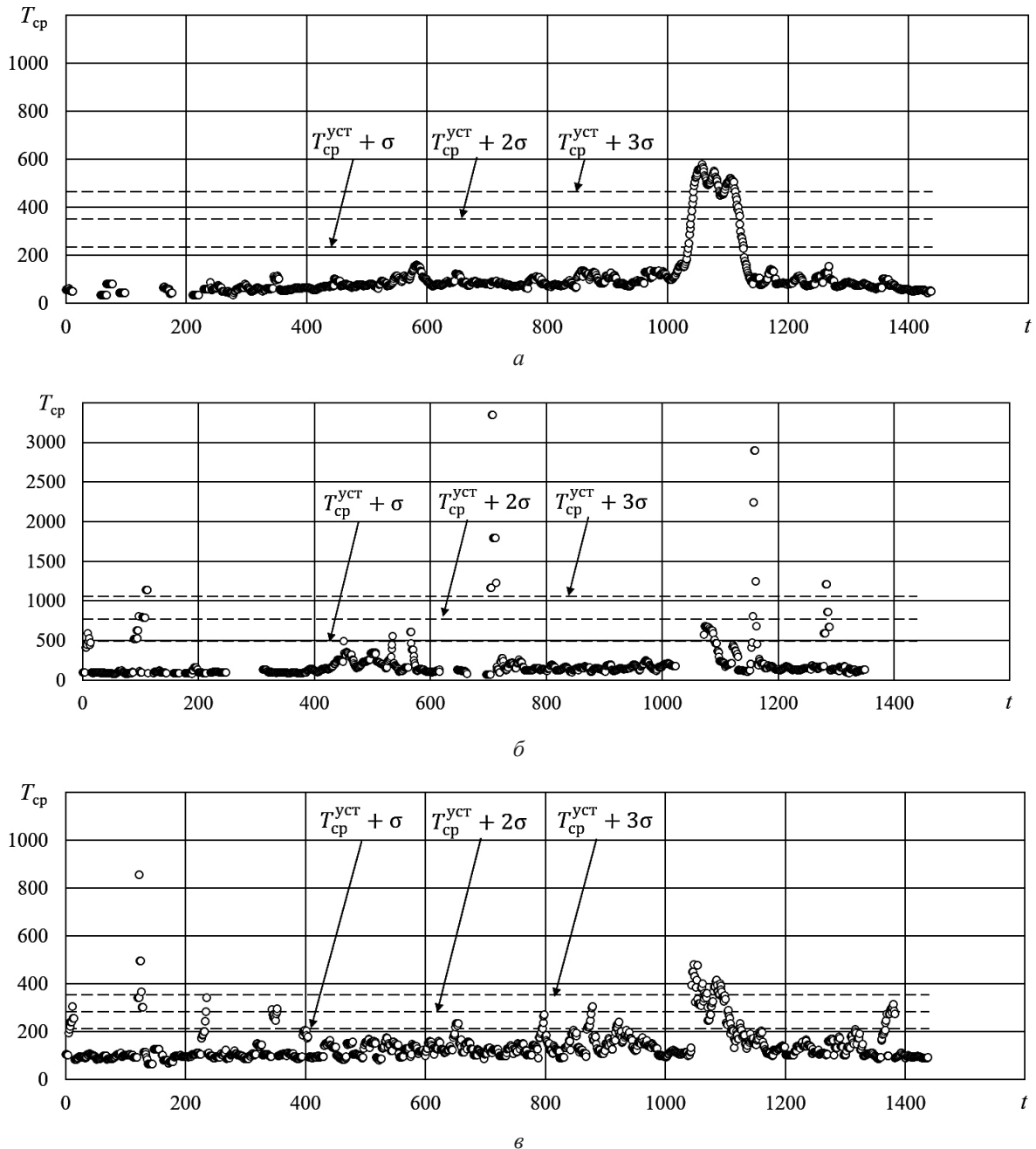


Рисунок 4. Осредненные продолжительности $T_{срj}$ (с) движения автомобилей; а – направление движения 1, б – направление движения 2, в – направление движения 3 (см. рисунок 2, а); данные за 27 мая 2022 года
 Источник: разработано авторами

Ширина «скользящего окна» $\Delta = 1$ мин и сдвиг $\delta = 30$ с (рисунок 3, б) существенно сокращают диапазон значений продолжительностей движения автомобилей, $T_{cpj} \in [24, 758]$. Рассеянность распределения анализируемой величины в диапазоне наблюдения снижается, среднее суточное значение $T_{cp}^{уст} = 84,4$ с, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 33,9$ с. Количество значений T_{cpj} , превышающих пороговую величину $T_{cp}^{уст} + \sigma$, составляет 14,0%, выше $T_{cp}^{уст} + 2\sigma$ расположены 11,4% значений T_{cpj} , и выше $T_{cp}^{уст} + 3\sigma$ – не более 10,7% всех T_{cpj} .

Увеличение ширины «скользящего окна» до $\Delta = 10$ мин и величины сдвига до $\delta = 1$ мин (рисунок 3, в) в незначительной степени сужают диапазон значений, $T_{cpj} \in [37, 758]$. Распределение анализируемой величины хорошо структурировано, рассеяние продолжительностей движения T_{cpj} практически отсутствует. Среднее суточное значение $T_{cp}^{уст} = 86,5$ с, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 13,0$ с. Количество значений T_{cpj} , превышающих пороговую величину $T_{cp}^{уст} + \sigma$, составляет 22,1%, выше $T_{cp}^{уст} + 2\sigma$ расположены 16,7% значений T_{cpj} , и выше $T_{cp}^{уст} + 3\sigma$ – менее 15,0% значений T_{cpj} .

Сопоставление результатов, представленных на рисунке 3 показывает, что увеличение ширины Δ «скользящего окна» с 15 с до 10 минут приводит к сужению суточного диапазона изменения T_{cpj} с [19, 2940] до [37, 758], то есть в 4,1 раза, следствием чего является сокращение объема информации о продолжительности движения автомобилей в транспортном

потоке между рубежами контроля. Вместе с тем увеличение ширины «скользящего окна» позволяет выявить четкую структуру распределения осредненных значений продолжительности T_{cpj} движения автомобилей в транспортном потоке, установить моменты времени как начала, так и завершения транспортного затора. В дальнейшем для выполнения мониторинга транспортного потока ширина «скользящего окна» принята равной $\Delta = 10$ мин при временном сдвиге $\delta = 1$ мин. Благодаря принятым параметрам «скользящего окна», на X-образном пересечении улиц для всех направлений движения и всех периодов наблюдения распределения значений T_{cpj} хорошо структурированы.

На рисунке 4 приведены результаты натурного исследования зависимости осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей от времени наблюдения за транспортным потоком на X-образном пересечении (см. рисунок 2, а) по направлению 1 («Восточный обход – улица Старцева»), направлению 2 («улица Уинская – улица Грибоедова») и направлению 3 («улица Старцева – Восточный обход») за 27 мая 2022 года.

В таблице 1 приведены диапазоны T_{cp}^{min} и T_{cp}^{max} изменения значений T_{cpj} за 9, 10, 20, 23 и 27 мая 2022 года (в указанные дни зафиксированы транспортные заторы), средние суточные значения $T_{cp}^{уст}$, среднеквадратичные отклонения σ , а также показатели относительного количества значений T_{cpj} , превышающих пороговые величины $T_{cp}^{уст} + \sigma$, $T_{cp}^{уст} + 2\sigma$ и $T_{cp}^{уст} + 3\sigma$.

Таблица 1. Показатели осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей на X-образном пересечении «улица Уинская – улица Грибоедова» за 9, 10, 20, 23 и 27 мая 2022 г.

Дата, 2022 год	Направление движения	T_{cp}^{min} , с	T_{cp}^{max} , с	$T_{cp}^{уст}$, с	σ , с	Количество T_{cpj} выше пороговых значений, %		
						$T_{cp}^{уст} + \sigma$	$T_{cp}^{уст} + 2\sigma$	$T_{cp}^{уст} + 3\sigma$
9 мая	Восточный обход – Старцева	33	1148	96,2	75,9	9,2	4,9	0,9
	Уинская – Грибоедова	62	3277	196,9	388,5	2,5	2,2	1,4
	Старцева – Восточный обход	64	1104	132,1	107,6	4,7	3,1	1,7
10 мая	Восточный обход – Старцева	26	501	102,3	89,0	10,4	7,0	3,6
	Уинская – Грибоедова	58	2366	162,5	172	4,5	3,5	1,7
	Старцева – Восточный обход	47	664	119,1	64,1	12,1	3,8	2,6
20 мая	Восточный обход – Старцева	44	671	100,4	71,3	4,0	2,7	1,9
	Уинская – Грибоедова	71	3092	297,0	514,4	3,8	3,2	2,9
	Старцева – Восточный обход	73	1495	150,2	115,9	5,1	2,9	2,3
23 мая	Восточный обход – Старцева	32	292	93,5	38,2	11,2	3,1	1,4
	Уинская – Грибоедова	57	2383	175,9	70,1	14,3	2,7	0,2
	Старцева – Восточный обход	63	827	136,8	73,9	6,2	2,2	1,6

Продолжение таблицы 1

Дата, 2022 год	Направление движения	$T_{ср}^{min}$, с	$T_{ср}^{max}$, с	$T_{ср}^{уст}$, с	σ , с	Количество $T_{срj}$ выше пороговых значений, %		
						$T_{ср}^{уст} + \sigma$	$T_{ср}^{уст} + 2\sigma$	$T_{ср}^{уст} + 3\sigma$
27 мая	Восточный обход – Старцева	32	577	118,4	115,2	7,6	6,7	4,9
	Уинская – Грибоедова	73	3349	211,3	281,5	5,2	2,2	1,6
	Старцева – Восточный обход	65	855	141,1	70,4	10,3	5,9	2,8

Источник: разработано авторами

Минимальные величины осредненных продолжительностей $T_{срj}$ движения автомобилей в транспортном потоке принимают значения от 26 с («Восточный обход – улица Старцева», 10 мая) до 73 с («улица Старцева – Восточный обход», 20 мая; «улица Уинская – улица Грибоедова», 27 мая). Локальные максимумы значений $T_{срj}$ находятся в пределах от 292 с («Восточный обход – улица Старцева», 23 мая) до 3349 с («улица Уинская – улица Грибоедова», 27 мая). Средние суточные величины $T_{ср}^{уст}$ для временных рядов $T_{срj}$ принимают значения от 93,5 с («Восточный обход – улица Старцева», 23 мая) до 297,0 с («улица Уинская – улица Грибоедова», 20 мая), среднеквадратичные отклонения σ изменяются в пределах от 38,2 с («Восточный обход – улица Старцева», 23 мая) до 514,4 с («улица Уинская – улица Грибоедова», 20 мая).

Превышение величиной $T_{ср}$ первого порогового значения, равного $T_{ср}^{уст} + \sigma$, не превышает 14,3% от всех значений $T_{срj}$, определенных для каждого из рассматриваемых направлений движения; наибольшее значение зафиксировано 23 мая 2022 года на направлении «улица Уинская – улица Грибоедова». Превышение величиной $T_{срj}$ второго порогового значения, равного $T_{ср}^{уст} + 2\sigma$, не превышает 7,0% от всех значений $T_{срj}$; наибольшее значение зафиксировано 10 мая 2022 года на направлении «Восточный обход – улица Старцева».

Превышение третьего порогового значения $T_{ср}^{уст} + 3\sigma$ зафиксировано не более чем у 4,9% от всех значений $T_{срj}$; наибольшее значение отмечено 27 мая 2022 года на направлении «Восточный обход – улица Старцева».

Анализ рисунка 4 и данных таблицы 1 показал, что на направлении 1 движения «Восточный обход – улица Старцева» практически для всех рассмотренных периодов наблюдения имеет место периодическое превышение пороговых величин $T_{ср}^{уст} + 3\sigma$ пиковыми значениями осредненных продолжительностей $T_{срj}$. Использование разработанного критерия позволило обнаруживать транспортные заторы (рисунок 4, а), характерные для движения транспор-

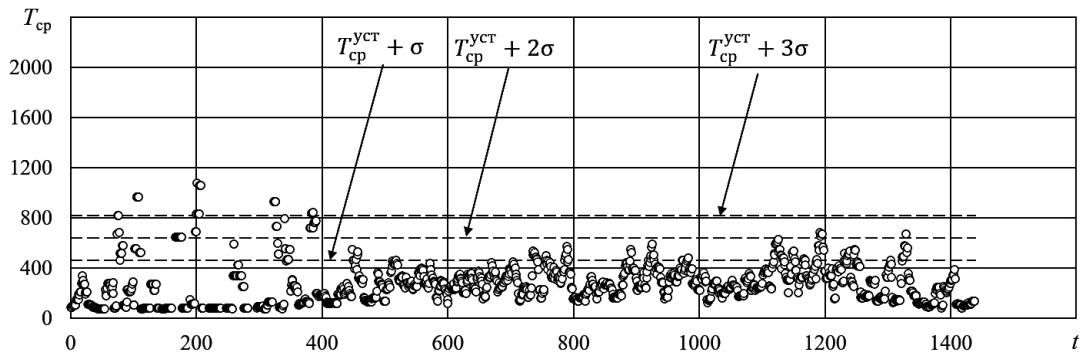
та в направлении 1 «Восточный обход – улица Старцева» (рисунок 2, а), образующийся, как правило, не ранее 16:00 часов. Видно (рисунок 4, в), что 27 мая на 3 направлении «улица Старцева – Восточный обход» имеет место заторная ситуация, движение транспорта затруднено в период с 17:30 до 18:40.

Рассмотрение дорожной ситуации на рассмотренном X-образном регулируемом пересечении «улица Уинская – улица Грибоедова» приводит к выводу о необходимости снижения остроты ситуации с загруженностью направления 1 «Восточный обход – улица Старцева» путем изменения жесткого режима работы светофора или за счет применения технологии адаптивного регулирования на этом пересечении дорог.

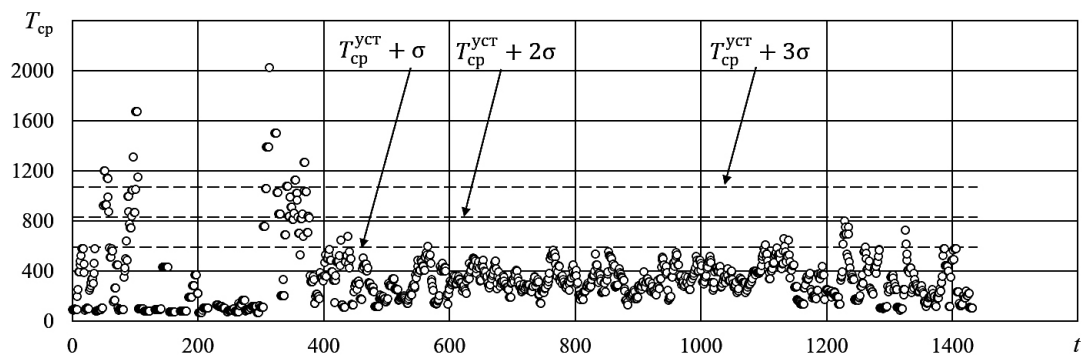
Кольцевое нерегулируемое пересечение дорог

Наблюдение за движением транспорта на кольцевом нерегулируемом пересечении «улица Макаренко – улица Уинская – улица Тургенева» в городе Пермь (см. рисунок 2, б) проводилось с 15 января по 22 февраля 2023 года; направление движения 1 – «улица Макаренко – улица Уинская»; направление движения 2 – «улица Макаренко – улица Тургенева»; направление движения 3 – «улица Уинская – улица Тургенева»; направление движения 4 – «улица Уинская – улица Макаренко»; направление движения 5 – «улица Тургенева – улица Макаренко»; направление движения 6 – «улица Тургенева – улица Уинская».

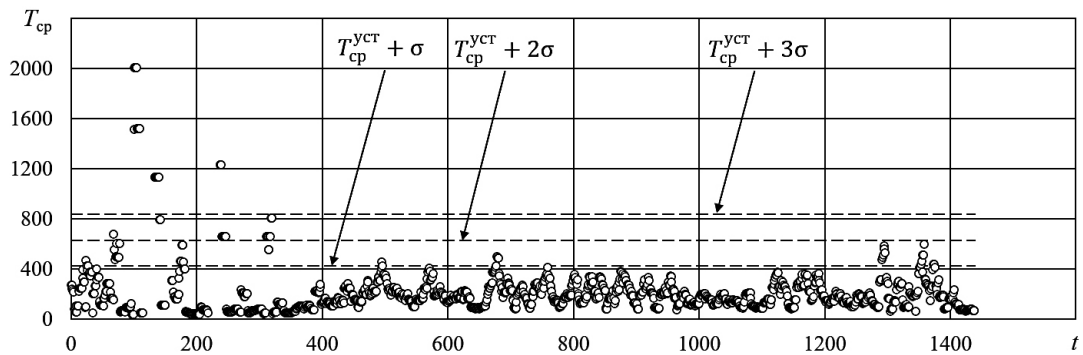
На рисунке 5 приведены данные о зависимостях от времени наблюдения осредненных продолжительностей $T_{срj}$ движения автомобилей в транспортном потоке на кольцевом пересечении «улица Уинская – улица Тургенева – улица Макаренко» в течение суток 21 февраля 2023 года; здесь же показаны критериальные величины $T_{ср}^{уст} + \sigma$, $T_{ср}^{уст} + 2\sigma$ и $T_{ср}^{уст} + 3\sigma$ для оценки стадий транспортных заторов. Для всех рассматриваемых направлений движения по кольцевому пересечению распределения величин $T_{срj}$ являются структурированными благодаря подходящим параметрам «скользящего окна».



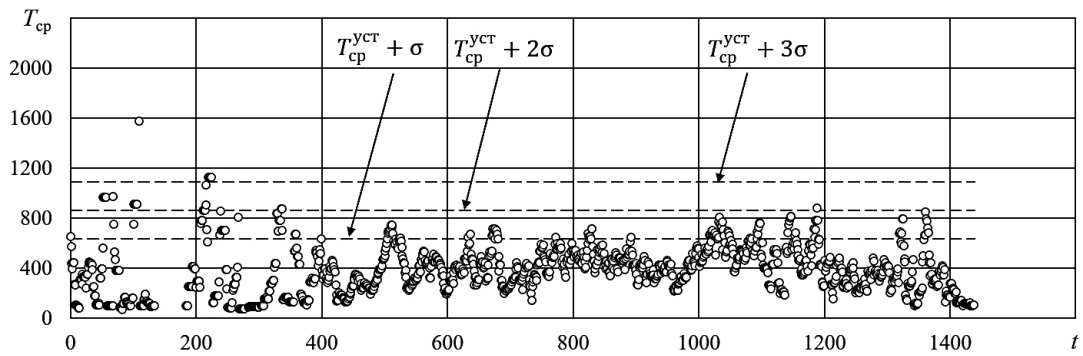
a



б



в



г

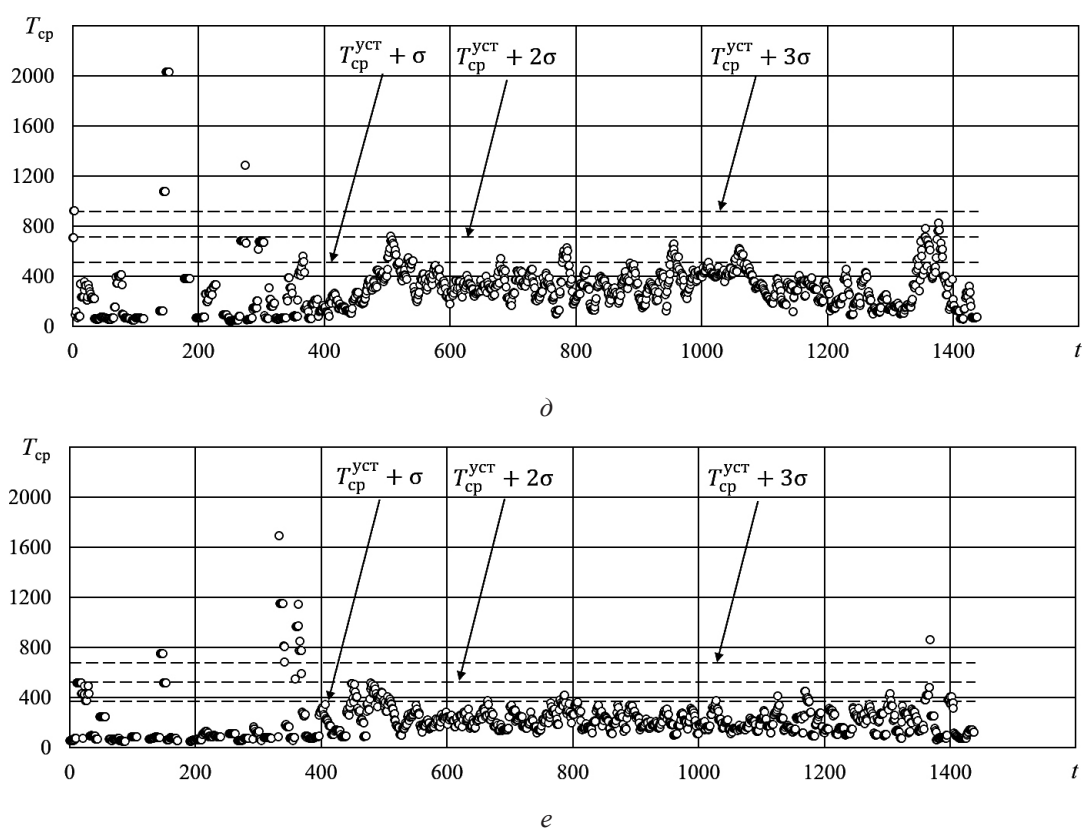


Рисунок 5. Осредненные продолжительности T_{cpj} (с) движения автомобилей; а – направление движения 1, б – направление движения 2, в – направление движения 3, г – направление движения 4, д – направление движения 5, е – направление движения 6 (см. рисунок 2, б); период наблюдения 21 февраля 2023 года

Источник: разработано авторами

Диапазоны T_{cp}^{min} и T_{cp}^{max} изменения значений T_{cpj} значений T_{cpj} , превышающих пороговые величины, в течение суток наблюдения, средние значения $T_{cp}^{уст}$, $T_{cp}^{уст} + \sigma$, $T_{cp}^{уст} + 2\sigma$ и $T_{cp}^{уст} + 3\sigma$, для кольцевого рассма- среднеквадратичные отклонения σ от средних значе- триваемого пересечения приведены в таблице 2. ний, а также показатели относительного количества

Таблица 2. Показатели осредненных продолжительностей T_{cpj} движения автомобилей в транспортном потоке на кольцевом пересечении «улица Уинская – улица Тургенева – улица Макаренко» (город Пермь) 21 февраля 2023 г.

На- прав- ление	Пересечение улиц	T_{cp}^{min} , с	T_{cp}^{max} , с	$T_{cp}^{уст}$, с	σ , с	Количество T_{cpj} выше пороговых значений, %		
						$T_{cp}^{уст} + \sigma$	$T_{cp}^{уст} + 2\sigma$	$T_{cp}^{уст} + 3\sigma$
1	улица Макаренко – улица Уинская	71	2637	284,0	178,9	10,9	4,2	1,7
2	улица Макаренко – улица Тургенева	68	2027	348,4	239,8	7,8	5,5	2,1
3	улица Уинская – улица Тургенева	38	2007	215,3	206,4	5,4	3,2	1,7
4	улица Уинская – улица Макаренко	69	3054	404,8	227,7	11,1	2,1	0,7
5	улица Тургенева – улица Макаренко	43	2031	307,3	203,8	7,6	1,2	1,1
6	улица Тургенева – улица Уинская	47	1693	215,8	153,3	8,2	2,2	2,0

Источник: разработано авторами

Анализ рисунка 5 и данных таблицы 2 свидетельствует, что для всех направлений движения расположение пиковых значений осредненной продолжительности $T_{срj}$ локализовано. Это означает, что высокие значения $T_{срj}$ не следует квалифицировать в качестве длительных задержек движения значительного количества автомобилей, то есть как транспортные заторы. Таким образом, на кольцевом пересечении улиц Уинская, Тургенева и Макаренко транспортные заторы 21 февраля 2023 года не зафиксированы.

Т-образное регулируемое пересечение дорог

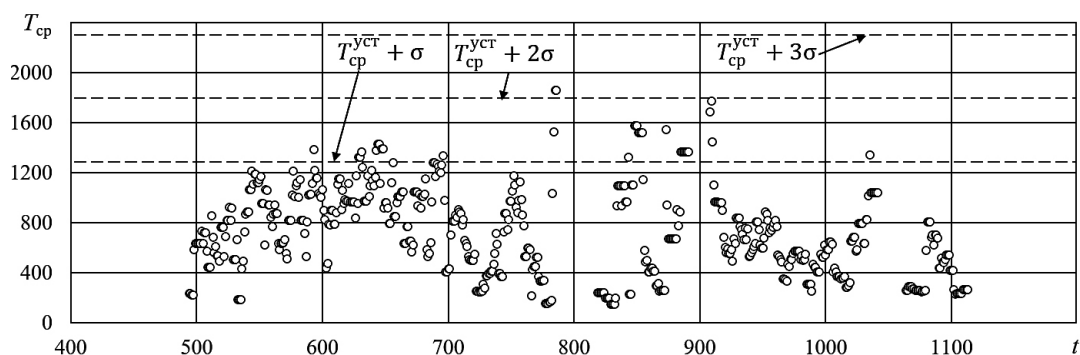
Регулируемое пересечение «улица Крупской – улица Уральская» (город Пермь) показано на рисунке 2, в. Наблюдение за движением транспорта проводилось в период с 15 января по 22 февраля 2023 года; направление движения 1 – «Северная дамба – улица Крупской», направление движения 2 – «улица Уральская» (от Северной дамбы до улицы Землячки), направление движения 3 – «улица Уральская» (от улицы Землячки до Северной дамбы), направление движения 4 – «улица Землячки – улица Крупской», направление движения 5 – «улица Крупской – улица Землячки», направление движения 6 – «улица Крупской – Северная дамба»).

На рисунке 6 показаны зависимости от времени наблюдения осредненных продолжительностей $T_{срj}$ движения автомобилей в транспортном потоке на Т-

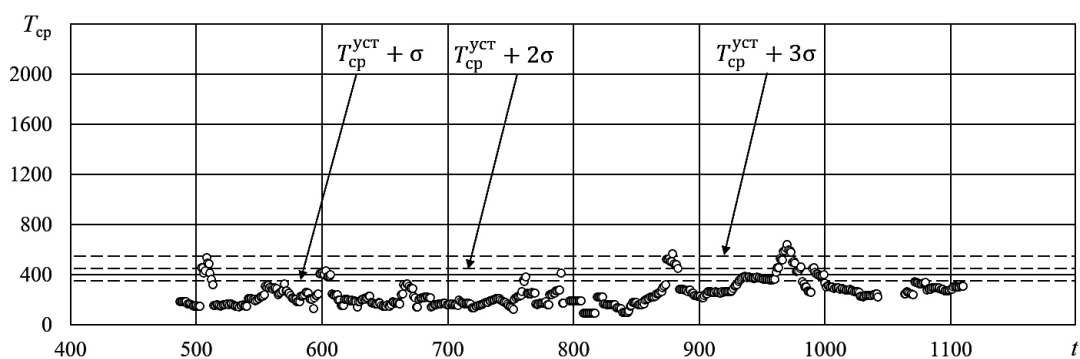
образном пересечении «улица Уральская – улица Крупской» по направлениям 1, 2, 3, 4, 5 и 6 в течение суточного наблюдения 22 февраля 2023 года. Из рисунка 6 следует, что несмотря на рациональные параметры «скользящего окна» на рассмотренном Т-образном пересечении для направления движения 1 (рисунок 6, а) распределение значений $T_{срj}$ является практически неструктурированным (хаотичным) и слабо структурированными на направлениях 4, 5 и 6 (соответственно, рисунки 6, з, д и е). На направлениях 2 и 3 (рисунок 6, б и в) распределения значений $T_{срj}$ хорошо структурированы (рассеяние минимально).

Диапазоны $T_{срj}^{min}$ и $T_{срj}^{max}$ изменения значений $T_{срj}$ в течение суток наблюдения, средние суточные значения $T_{срj}^{уст}$ среднеквадратичные отклонения σ от средних значений, а также показатели относительного количества значений $T_{срj}$, превышающих пороговые величины $T_{срj}^{уст} + \sigma$, $T_{срj}^{уст} + 2\sigma$ и $T_{срj}^{уст} + 3\sigma$, соответствующие выбранному периоду наблюдения 22 февраля 2023 года, приведены в таблице 3.

Анализ рисунка 6 и данных таблицы 3 показывает, что для направлений движения 1, 4 и 6 (рисунки 6, а, з и е) пиковые значения осредненных продолжительностей $T_{срj}$ локализованы и не превышают критического значения $T_{срj}^{уст} + 3\sigma$, то есть транспортные заторы на этих направлениях 22 февраля 2023 года не зафиксированы.



а



б

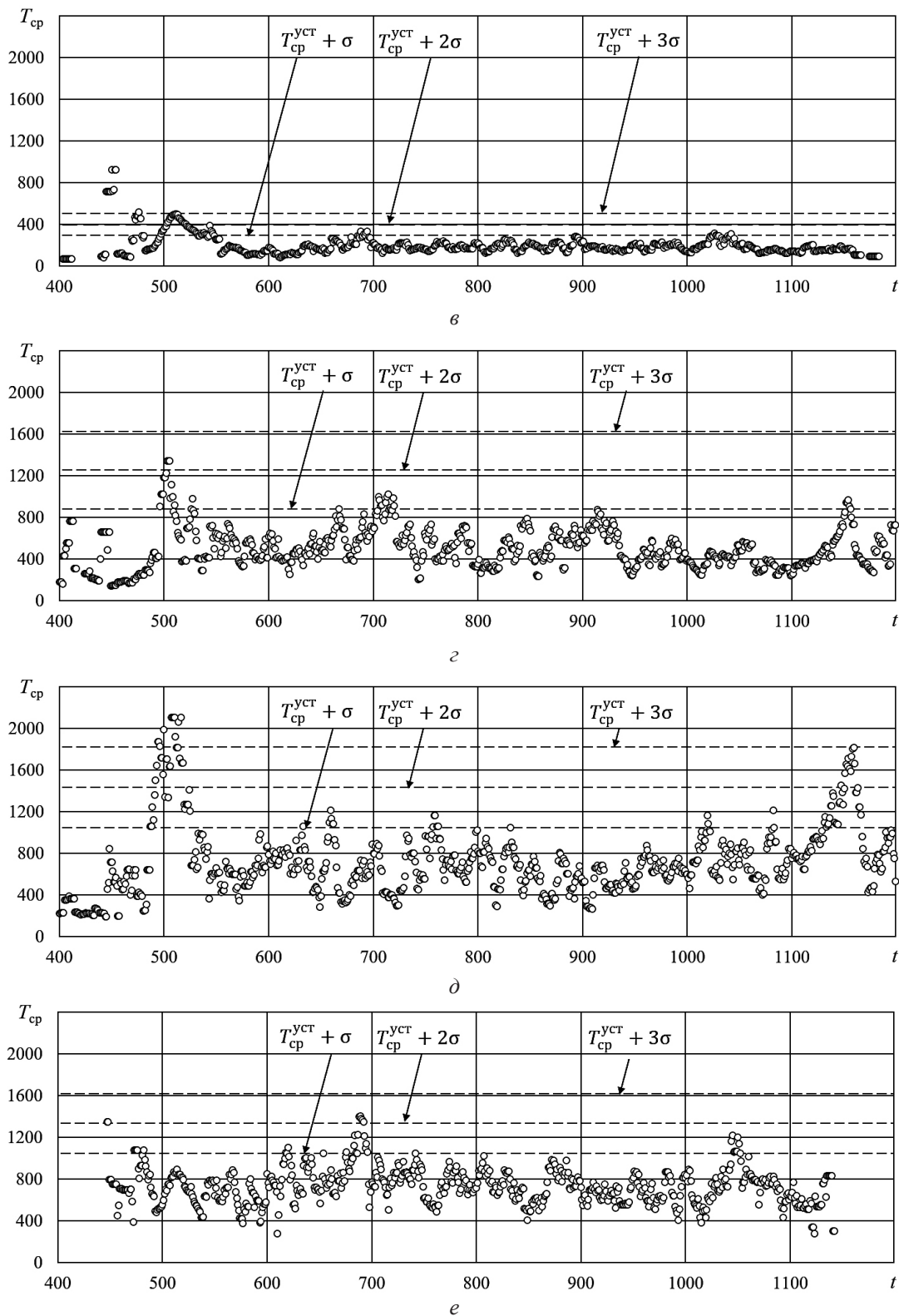


Рисунок 6. Осредненные продолжительности T_{cpj} (с) движения автомобилей; а – направление движения 1, б – направление движения 2, в – направление движения 3 (рисунок 2, в), г – направление движения 4, д – направление движения 5, е – направление движения 6 (см. рисунок 2, в); период наблюдения 22 февраля 2023 года
 Источник: разработано авторами

На направлениях 2, 3 и 5 (рисунки 6, б, в, д) осредненные продолжительности $T_{срj}$ принимают значения, достигающие и даже превышающие критические значения $T_{ср}^{уст} + 3\sigma$, однако имеют локальный (кратковременный) характер, и не означают длительных задержек движения значительного количества автомобилей и, таким образом, их не следует квалифици-

ровать как транспортные заторы. Следовательно, на Т-образном пересечении «улица Уральская – улица Крупской» транспортные заторы 22 февраля 2023 года не зафиксированы. Светофорное регулирование на рассмотренном Т-образном пересечении организовано удовлетворительно.

Таблица 3. Показатели осредненных продолжительностей $T_{срj}$ движения автомобилей в транспортном потоке на Т-образном пересечении «улица Уральская – улица Крупской» (город Пермь) 22 февраля 2023 г.

Направление	Пересечение улиц	$T_{ср}^{min}, c$	$T_{ср}^{max}, c$	$T_{ср}^{уст}, c$	σ, c	Количество $T_{срj}$ выше пороговых значений, %		
						$T_{ср}^{уст} + \sigma$	$T_{ср}^{уст} + 2\sigma$	$T_{ср}^{уст} + 3\sigma$
1	Северная дамба – улица Крупской	143	3540	778,6	508,0	3,9	1,3	1,2
2	Северная дамба – улица Землячки	90	641	249,5	99,1	7,7	2,7	0,7
3	улица Землячки – Северная дамба	67	924	194,3	102,5	5,8	2,9	0,9
4	улица Землячки – улица Крупской	121	3569	511,4	371,1	5,6	2,3	1,3
5	улица Крупской – улица Землячки	116	2309	661,4	386,0	10,5	4,8	1,3
6	улица Крупской – Северная дамба	273	2681	759,3	286,5	3,6	1,4	0,8

Источник: разработано авторами

Выводы

Анализ данных о движении транспортных средств в транспортном потоке, полученных в режиме реального времени с использованием данных аппаратно-программных комплексов фиксации нарушений правил дорожного движения, выявил существенную разницу в поведении средних продолжительностей движения автомобилей между рубежами контроля при отсутствии и наличии транспортного затора на участках дорог, выбранных для наблюдения.

Начало формирования транспортных заторов сопровождается резким увеличением осредненной продолжительности движения автомобилей в случайном потоке транспортных средств на исследуемом участке, определяемой с использованием методики «скользящего окна»; окончание транспортного затора сопровождается снижением этой величины и возвращением ее к среднему суточному значению, характерному для режима движения при отсутствии заторной ситуации. Осредненная продолжительность движения автомобилей между рубежами контроля предложена в качестве количественного показателя для автоматизированного мониторинга транспортного затора. Разработан и обоснован критерий оценки стадий образования транспортно-

го затора. На основе данных натуральных наблюдений в течение продолжительного времени выполнено исследование особенностей эволюции предложенного показателя на примере трех типов пересечений дорог, характерных для города Перми.

Разработанный критерий рекомендуется применять для мониторинга транспортных заторов при движении транспортных средств по городским улично-дорожным сетям, а также в качестве критерия оценки эффективности светофорного регулирования, использовать как основу для разработки средств прогнозирования заторной ситуации, обоснования и принятия управленческих решений по превентивным мерам устранения условий образования транспортных заторов.

Предложенные показатель и критерий мониторинга транспортных заторов является экономичным, поскольку основан на использовании существующей разветвленной сети аппаратно-программных комплексов для фото- и видеofиксации нарушений правил дорожного движения, установленных на городских улично-дорожных сетях, и не требует значительных материальных затрат. Внедрение алгоритма обнаружения заторов на городских магистралях в программное обеспечение, используемое в службах

дорожного движения, также не требует значительных затрат, позволяет в автоматизированном режиме предупреждать о возможности образования транспортного затора, что делает разработанный подход рациональным и эффективным.

В настоящее время программно-технические комплексы фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения не в полной мере контр-

олируют городскую улично-дорожную сеть, и нет возможности выполнять мониторинг транспортных заторов по всей территории города, однако дальнейшее расширение зоны покрытия программно-техническими комплексами городских улично-дорожных сетей будет способствовать полному контролю ситуаций с заторами на городских дорогах.

Литература

1. Анализ динамической модели «Оптимизация дорожного движения на участке дороги» в среде STATISTICA и ANYLOGIC / В. В. Мокшин [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22. – № 5. – С. 119–127. – EDN: RUASEA.
2. Ананьева Е. Ю. Информационные транспортные сервисы: инструмент преодоления заторов // Мир дорог. – 2021. – № 139. – С. 102–104.
3. Андронов Р. В., Елькин Б. П., Гензе Д. А. Понятие затора и формирование очередей на регулируемом пересечении в условиях плотного транспортного потока // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 39–41. – EDN: ТМНТМЗ.
4. Басков В. Н., Игнатов А. В. Зависимость риска возникновения транспортного затора от параметров транспортного потока // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – № Т. 35. – С. 1–5. – EDN: VCHAFT.
5. Басков В. Н., Красникова Д. А., Исаева Е. И. Влияние поведенческого фактора водителя на образование транспортного затора // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 4(83). – С. 272–281. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-272-281> – EDN: LQUBOC.
6. Бояршинов М. Г. Метод нормированного размаха для анализа интенсивности транспортного потока // Вестник НЦБЖД. – 2020. – 4(46). – С. 35–46. – EDN: ZOUVIN.
7. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С. Характеристики транспортного затора на основе данных системы фото- и видеофиксации // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 3. – С. 83–106. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-3-83>. – EDN: VJFNTJ.
8. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Васькина Е. В. Применение вейвлет-анализа для исследования интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 4. – С. 88–103. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-88> – EDN: BBHFDH.
9. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Васькина Е. В. Применение показателя Хёрста для исследования интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 2. – С. 68–81. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-68> – EDN: RXHDQO.
10. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Использование комплекса фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения для выделения детерминированной и стохастической составляющих интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 3. – С. 61–71. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-3-61>. – EDN: BSXWOY.
11. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Фурье-анализ интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 4. – С. 46–59. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-4-46> – EDN: SJOPEL.
12. Ветрогон А. А., Крипак М. Н. Транспортное моделирование как инструмент для эффективного решения задач в области управления транспортными потоками // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3(59). – С. 82–91. – [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1\(57\).82-91](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1(57).82-91) – EDN: YSFXUL.
13. Владимиров С. Н. Транспортные заторы в условиях мегаполиса // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – Т. 3. – № 1(19). – С. 77–84. – EDN: STXZCR.
14. Власов А. А., Горелов А. М. Управление светофорными объектами в условиях транспортных заторов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2014. – № 3(38). – С. 112–117. – EDN: SLPFIR.
15. Дрю Д. Р. Теория транспортных потоков и управление ими / Пер. с англ. Е. Г. Коваленко и Г. Д. Шермана; Под ред. чл.-кор. АН СССР Н. П. Бусленко. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.

16. Европейская конференция министров транспорта. Управление заторами в городах / Т. Уорсли, Л. Мартин, Б. Мур и др.; перевод с англ. Ботвиньевой Я. Е. и Донченко В. В. – СПб: Ассоциация транспортных инженеров, 2020. – 336 с.
17. Караблин О. В. О фрактальном характере автомобильного трафика города // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2018. – Т. 8. – № 9А. – С. 287–292. – EDN: YSZQDJ.
18. Кашталинский А. С., Петров В. В. Влияние дорожно-транспортных факторов на неравномерность транспортных потоков в городах // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 1(108). – С. 116–123. – EDN: VHISPF.
19. Корнев А. В., Шабуров С. С. Транспортные заторы. Варианты решения проблемы // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2021. – Т.11. – № 1. – С. 58–63. – EDN: PJVUKF.
20. Костарев А. Ф., Постановов И. С. Использование технологий bigdata для анализа транспортных потоков на основе данных потока фотофиксации // Вестник НЦБЖД. – 2016. – № 2 (28). – С. 30–35. – EDN: WHFIZH.
21. Ласкин М. Б., Талавирия А. Ю. Оценка плотности транспортного потока на основе имитационного моделирования пункта взимания платы // Материалы 10 Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021), 20–22 октября 2021 г., Санкт-Петербург. – СПб, 2021. – С. 272–278. – EDN: ZOKRTI.
22. Макарецкий Е. А., Нгуен Л. Х. Исследование Фурье и вейвлет спектров изображений транспортных средств // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 12. – С. 80–81. – EDN: ISDION.
23. Обследование городской транспортной сети с применением измерительного комплекса / А. С. Евтеева [и др.] // Транспортное дело России. – 2018. – № 1. – С. 132–134. – EDN: YWZXUX.
24. Планирование дорожного трафика в контексте системы «устойчивый городской транспорт» / В. Д. Шепелев [и др.] // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2020. – Т. 14. – № 2. – С. 177–186. – <https://doi.org/10.14529/em200218> – EDN: RESUGN.
25. Распределение скорости движения автомобилей перед стоп-линией городского регулируемого перекрестка / А. В. Макаричев [и др.] // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2019. – № 85. – С. 107–116. – <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.107>. – EDN: YIOWRX.
26. Сильянов В. В., Елисеева С. А., Уткин А. В. Моделирование цепных критических ситуаций в плотном транспортном потоке // Вестник НЦБЖД. – 2010. – № 5. – С. 65–70. – EDN: NUOATX.
27. Шамлицкий Я. И., Охота А. С., Мироненко С. Н. Сравнение адаптивного и жесткого алгоритмов управления дорожным движением на базе имитационной модели в среде ANYLOGIC // Программные продукты и системы. – 2018. – № 2. – С. 403–408. – EDN: XYOAXJ.
28. Щеголева Н. В., Гусев В. А., Ворожейкин М. А. Образование заторов в транспортном потоке // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2016. – № 5(19). – С. 25–28. – EDN: XHWVXD.
29. Aftabuzzaman Md. Measuring Traffic Congestion – A Critical Review URL: [https:// australasiantransportresearchforum.org.au/wp-content/uploads/2022/03/2007_Aftabuzzaman.pdf](https://australasiantransportresearchforum.org.au/wp-content/uploads/2022/03/2007_Aftabuzzaman.pdf). (accessed 10.11.2022) (In Eng.).
30. Black W. R. (2003) Transportation: a geographical analysis. – New York: The Guilford Press, 375 p. (In Eng.).
31. Boyarshinov M. G., Vavilin A. S. (2021) The deterministic component of the traffic flow intensity. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020) 27th-29th October 2020, Saint-Petersburg, Russian Federation. – 1111. – 012013. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1111/1/012013>. (In Eng.).
32. Karimi H. R., Pawlus W., Robbersmyr K. G. (2012) Signal Reconstruction, Modeling and Simulation of a Vehicle Full-scale Crash Test Based on Morlet Wavelets. Neurocomputing. Vol. 93. No. 15, pp. 88–99. – <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.04.010>. (In Eng.).
33. Kazhaev A. et al. (2018) Modelling urban route transport network parameters with traffic, demand and infrastructural limitations being considered. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 177. Pp. 012018. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/177/1/012018>. – EDN: YBWTIL (In Eng.).
34. Kumar P., Kumar S. V., Priya L. (2023) Smart and Safety Traffic System for the Vehicles on the Road, IoT with Smart Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer, Singapore. Vol. 312. pp. 509–522. – https://doi.org/10.1007/978-981-19-3575-6_51. (In Eng.).
35. Li L. et al. (2012) A Mixed-Fractal Traffic Flow Model Whose Hurst Exponent Appears Crossover, 2012 Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 23–26 June 2012. Harbin, China, <https://doi.org/10.1109/CSO.2012.103> (In Eng.).

36. Sathiyaraj R., Bharathi A. (2020) An efficient intelligent traffic light control and deviation system for traffic congestion avoidance using multiagent system, *Transport*, Vol. 35, No 3. pp. 327–335. – <https://doi.org/10.3846/transport.2019.11115>. (In Eng.).
37. Shepelev V. et al. (2020) A study of the travel time of intersections by vehicles using computer vision, *Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Pp. 653–658, <https://doi.org/10.5220/0009806206530658> EDN: FDQOOO (In Eng.).
38. Shepelev V. et al. (2020) The use of multi-sensor video surveillance system to assess the capacity of the road network, *Transport and Telecommunication*, Vol. 21, No. 1, pp. 15–31, <https://doi.org/10.2478/ttj-2020-0002>. (In Eng.).
39. Xomidov A., Tursunboyev M. (2022) Eliminating congestion on internal roads, *Universum: технические науки*, Vol. 2(95), available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13079>, (accessed 20.11.2022) (In Eng.).
40. Yasir R. M. et al. (2022) Traffic Congestion Prediction Using Machine Learning Techniques, available at: https://www.researchgate.net/publication/361479832_Traffic_Congestion_Prediction_Using_Machine_Learning_Techniques <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.10983>. (In Eng.).

References

1. Mokshin, V. V. et al. (2019) [Analysis of the dynamic model «Optimization of traffic on a road section» in the environment of STATISTICA and ANYLOGIC]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University]. Vol. 22, No. 5, pp. 119–127. (In Russ.).
2. Anan'eva, E. Yu. (2021) [Information transport services: a tool for overcoming congestion]. *Mir dorog* [The world of roads]. Vol. 139, pp. 102–104. EDN: RUASEA. (In Russ.).
3. Andronov, R. V., El'kin, B. P., Genze, D. A. (2015) [The concept of a gate and the formation of queues at a controlled intersection in conditions of dense traffic flow]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region]. Vol. 1, pp. 39–41. (In Russ.).
4. Baskov, V. N., Ignatov, A. V. (2015) [Dependence of the risk of traffic congestion on the parameters of the traffic flow]. *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal Koncept* [Scientific and methodological electronic journal Concept]. Vol. 35, pp. 1–5. EDN: VCHAFT. (In Russ.).
5. Baskov, V. N., Krasnikova, D. A., Isaeva, E. I. (2019) [The influence of the driver's behavioral factor on the formation of traffic congestion]. *Mir transporta* [The world of transport]. Vol. 17, No. 4(83), pp. 272–281. EDN: TMHTMZ. (In Russ.).
6. Boyarshinov, M. G. (2020) [The normalized span method for analyzing the intensity of traffic flow]. *Vestnik GBU «Nauchnyj centr bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti»* [Bulletin of GBU «Scientific Center for Life Safety»]. No. 2(46), pp. 35–46. EDN: ZOUVIH. (In Russ.).
7. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. (2023) [Characteristics of traffic congestion based on data from the photo and video recording system]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovation. Investment]. Vol. 3, pp. 83–106. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-3-83>. (In Russ.).
8. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vas'kina, E. V. (2022) [Application of wavelet analysis to study the intensity of traffic flow]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovation. Investment]. Vol. 4, pp. 72–87. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-88>. – EDN: VJFNTJ. (In Russ.).
9. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vas'kina, E. V. (2022) [Application of the Hurst index to study the intensity of traffic flow]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovation. Investment]. Vol. 2, pp. 68–81. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-68> – EDN: BBHFDH. (In Russ.).
10. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. (2021) [The use of a complex of photovideofixation of traffic violations to isolate deterministic and stochastic components of traffic flow intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovation. Investment]. Vol. 3, pp. 61–71. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-3-61>. (In Russ.).
11. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. (2021) [Fourier analysis of traffic flow intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovation. Investment]. Vol. 4, pp. 46–59. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-4-46>. (In Russ.).
12. Vetrogon, A. A., Kripak, M. N. (2018) [Transport modeling as a tool for effective solution of problems in the field of traffic flow management]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. Vol. 3(59), pp. 82–91. – [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1\(57\).82-91](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1(57).82-91) EDN: YSFXUL. (In Russ.).
13. Vladimirov, S. N. (2014) [Traffic congestion in a megalopolis]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo*

mashinostroitel'nogo universiteta (MAMI) [Bulletin of the Moscow State Machine-Building University (MAMI)]. Vol. 3(19), pp. 77–84. EDN: STXZCR. (In Russ.).

14. Vlasov, A. A., Gorelov, A. M. (2014) [Management of traffic light objects in conditions of traffic congestion]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)]. Vol. 3(38), pp. 112–117. EDN: SLPFIR. (In Russ.).

15. Drew, D. R. (1968) *Teoriya transportnykh potokov i upravleniye imi* [Traffic flow theory and control]. New York: MacGraw-Hill Book Company, 467 p.

16. European Conference of Ministers of Transport. Managing congestion in cities T. Worsley, L. Martin, B. Moore et al.; St. Petersburg: Association of Transport Engineers, 336 p. (In Russ., transl. from Engl.).

17. Karablin, O. V. (2018) [On the fractal nature of the city's automobile traffic]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: yesterday, today, tomorrow]. Vol. 8, No. 9A, pp. 287–292. – EDN: YSZQDJ. (In Russ.).

18. Kashtalinskij, A. S., Petrov, V. V. (2016) [The influence of road transport factors on the unevenness of traffic flows in cities]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. Vol. 1(108), pp. 116–123. – EDN: VHISPF. (In Russ.).

19. Kornev, A. V., Shaburov, S. S. (2021) [Traffic congestion. Options for solving the problem]. *Molodezhnyj vestnik IrGTU* [Youth Bulletin of IrSTU]. Vol. 11, No. 1, pp. 58–63. – EDN: PJVUKF. (In Russ.).

20. Kostarev, A. F., Postanogov, I. C. (2016) [Using bigdata technologies for analyzing traffic flows based on photofixation flow data]. *Vestnik Nauchnogo centra bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of the Scientific Center for Life Safety]. No. 2(28), pp. 30–35. – EDN: WHFIZH. (In Russ.).

21. Laskin, M. B., Talavirya, A. Yu. (2021) [Estimation of traffic flow density based on simulation modeling of toll collection point]. *Materialy 10 Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii po imitacionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti «Imitacionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2021). 20–22 oktyabrya 2021 g., Sankt-Peterburg* [Materials of the 10th All-Russian Scientific and practical Conference on simulation modeling and its application in science and industry “Simulation modeling. Theory and practice” (IMMOD-2021). October 20–22, St. Petersburg]. pp. 272–278. – EDN: ZOKRTI. (In Russ.).

22. Makareckij, E. A., Nguen, Liem Hieu (2006) [Investigation of Fourier and wavelet spectra of images of vehicles]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research]. Vol. 12, pp. 80–81. – EDN: ISDION. (In Russ.).

23. Evteeva, A. S. et al. (2018) [Examination of the urban transport network using a measuring complex]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. Vol. 1, pp. 132–134. (In Russ.).

24. Shepelev, V. D. et al. (2020) [Road traffic planning in the context of the “sustainable urban transport” system]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ekonomika i Menedzhment* [Bulletin of the South Ural State University. Economics and Management]. Vol. 14, No. 2, pp. 177–186. (In Russ.).

25. Makarichev, A. V. et al. (2019) [Distribution of the speed of cars in front of the stop line of the urban regulated intersection]. *Vicnik Harkivs'kogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universitetu* [The bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University]. Iss. 85, pp. 107–116. – <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.107>. (In Russ.).

26. Sil'yanov, V. V., Eliseeva, S. A., Utkin, A. V. (2010) [Modeling of chain critical situations in dense traffic flow]. *Vestnik NCBZhD* [Bulletin of the National Railways]. Vol. 5, pp. 65–70. (In Russ.).

27. Shamlickij, Ya. I., Ohota, A. S., Mironenko, S. N. (2018) [Comparison of adaptive and rigid traffic control algorithms based on a simulation model in the ANYLOGIC environment]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. No. 2, pp. 403–408. (In Russ.).

28. Shchegoleva, N. V., Gusev, V. A., Vorozhejkin, M. A. (2016) [Formation of congestion in the traffic flow]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve* [Technical regulation in transport construction]. No. 5(19), pp. 25–28. (In Russ.).

29. Aftabuzzaman, Md. (2007) Measuring Traffic Congestion – A Critical Review. Proceedings of the 30th Australasian Transport Research Forum, China, February 2007. 16 p. Available at: https://australasiantransportresearchforum.org.au/wp-content/uploads/2022/03/2007_Aftabuzzaman.pdf. (accessed 10.11.2022). (In Engl.).

30. Black, W. R. (2003) *Transportation: A geographical analysis*. New York: *The Guilford Press*, 408 p. (In Engl.).

31. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. (2021) The deterministic component of the traffic flow intensity. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020) 27th-29th October 2020, Saint-Petersburg, Russian Federation*. 1111, 012013(10 p). – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1111/1/012013>. (In Engl.).

32. Karimi, H. R., Pawlus, W., Robbersmyr, K. G. (2012) Signal Reconstruction, Modeling and Simulation of a Vehicle Full-Scale Crash Test Based on Morlet Wavelets. *Neurocomputing*. Vol. 93, pp. 88–99. – <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.04.010>. (In Engl.).
33. Kazhaev, A. et al. (2018) Modelling urban route transport network parameters with traffic, demand and infrastructural limitations being considered. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 177, 012018. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/177/1/012018>. (In Engl.).
34. Kumar, P., Kumar, V. S., Priya, L. (2023) Smart and Safety Traffic System for the Vehicles on the Road. IoT with Smart Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies. *Springer*, Singapore. Vol. 312. – https://doi.org/10.1007/978-981-19-3575-6_51. (In Engl.).
35. Li, L. et al. (2012) A Mixed-Fractal Traffic Flow Model Whose Hurst Exponent Appears Crossover. *Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, 23–26 June 2012. Harbin, China. – <https://doi.org/10.1109/CSO.2012.103>. (In Engl.).
36. Sathiyaraj, R., Bharathi, A. (2020) An efficient intelligent traffic light control and deviation system for traffic congestion avoidance using multiagent system. *Transport*. Vol. 35, No. 3, pp. 327–335. – <https://doi.org/10.3846/transport.2019.11115>. (In Engl.).
37. Shepelev, V. et al. (2020) A study of the travel time of intersections by vehicles using computer vision. *Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*. iMLTrans. Vol. 1, pp. 653–658. – <https://doi.org/10.5220/0009806206530658>. (In Engl.).
38. Shepelev, V. et al. (2020) The use of multi-sensor video surveillance system to assess the capacity of the road network. *Transport and Telecommunication*. Vol. 21(1), pp. 15–31. – <https://doi.org/10.2478/ttj-2020-0002>. (In Engl.).
39. Xomidov, A., Tursunboyev, M. (2022) Eliminating congestion on internal roads. *Universum: technical sciences: electron. scientific. journal*. Vol. 2(95). Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13079>. (accessed 20.11.2022). (In Engl.).
40. Yasir, R. M., Nower, N., Shoyaib, M. (2020) Traffic Congestion Prediction Using Machine Learning Techniques. arXiv:2206.10983 [cs.LG]. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.10983>. (In Engl.).

Информация об авторах:

Михаил Геннадьевич Бояршинов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобилей и технологических машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет; профессор кафедры общинженерных дисциплин, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, Пермь, Россия

ORCID ID: 0000-0003-4473-6776, **SPIN:** 5958-2345, **AuthorID:** 79853, **ResearcherID:** ACE-0166-2022, **ScopusID:** 6506008407

e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

Александр Сергеевич Вавилин, аспирант, научная специальность 2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ORCID ID: 0000-0003-4473-6792, **AuthorID:** 566592

e-mail: vavilin@tbdd.ru

Вклад соавторов:

Бояршинов М. Г. – постановка цели и задач исследования, обзор литературных источников, разработка методики проведения исследования, анализ и обсуждение результатов, формулировка выводов.

Вавилин А. С. – реализация задач исследования, обзор литературных источников, проведение натурных наблюдений, проведение вычислительных работ, анализ и обсуждение результатов, формулировка выводов.

Статья поступила в редакцию: 31.10.2023; принята в печать: 29.01.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Mikhail Gennadyevich Boyarshinov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University; Professor of the Department of General Engineering Disciplines, Perm military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, Perm, Russia

ORCID ID: 0000-0003-4473-6776, **SPIN:** 5958-2345, **AuthorID:** 79853, **ResearcherID:** ACE-0166-2022,
ScopusID: 6506008407
e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

Alexander Sergeevich Vavilin, postgraduate student, scientific specialty 2.9.5 Operation of road transport, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
ORCID ID: 0000-0003-4473-6792, **AuthorID:** 566592
e-mail: vavilin@tbdd.ru

Contribution of the authors:

Boyarshinov M. G. – setting the goals and objectives of the study, reviewing literature sources, developing research methodology, analysis and discussion of results, formulation of conclusions.

Vavilin A. S. – implementation of research objectives, review of literature sources, carrying out field observations, carrying out computational work, analysis and discussion of results, formulation of conclusions.

The paper was submitted: 31.10.2023.

Accepted for publication: 29.01.2024.

The authors have read and approved the final manuscript.