

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.1

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-3-83>

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАТОРА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СИСТЕМЫ ФОТО- И ВИДЕОФИКСАЦИИ

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. Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска научно-обоснованного критерия формирования, развития и ликвидации транспортного затора с использованием современных высокоэффективных математических способов обработки информации. Представляется необходимым изучить результаты использования метода нормированного размаха, статистического, фрактального, гармонического, вейвлет-анализа временных рядов, образованных временем (продолжительностью) движения автомобилей в потоке по участку дороги при отсутствии и наличии транспортного затора. Объектом изучения является участок улично-дорожной сети, оборудованный программно-техническим комплексом, позволяющим измерять характеристики автомобилей в потоке транспорта. Предмет исследования – закономерности изменения продолжительности движения отдельных автомобилей при отсутствии и наличии заторной ситуации. Цель настоящего исследования – количественный показатель формирования, развития и ликвидации транспортного затора. Основой теоретико-методического подхода является применение современных высокоэффективных математических способов обработки информации о транспортных потоках, получаемой от стационарных комплексов фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения. В результате исследования временных рядов построены разложения анализируемых временных рядов по гармоникам, вейвлетам, определены статистические и фрактальные характеристики рассматриваемых временных рядов. Выполнен анализ полученных результатов, выявлены особенности полученных зависимостей. Теоретическая и практическая значимость работы заключается в научном обосновании количественной характеристики транспортного затора, что представляет практический интерес с точки зрения прогнозирования аномалий движения транспортных средств по улично-дорожной сети, принятия решений по управлению работой светофорных объектов и проч. Направление дальнейшего исследования – углубленный анализ выявленного показателя и определение на его основе критерия для определения стадий формирования, развития и ликвидации транспортного затора на пересечениях улично-дорожной сети крупного промышленного города.

Ключевые слова: транспортный затор, поток транспорта, интенсивность движения.

Для цитирования: 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>.

Original article

TRAFFIC CONGESTION CHARACTERISTICS BASED ON DATA OF THE PHOTO AND VIDEO RECORDING SYSTEM

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 relevance of the present paper is justified by the need to search for a scientifically based criterion for the formation, development and elimination of traffic congestion using modern highly efficient mathematical methods of information processing. It seems necessary to study the results of using the rescaled range, statistical, fractal, harmonic, and wavelet analysis of time series formed by the time (duration) of the movement of cars in a stream along a road section in the absence and presence of traffic congestion. The object of study is a section of the road network equipped with a software and hardware complex that allows measuring the characteristics of any car in the flow of transport. The subject of the study is the patterns of changes in the duration of movement of individual cars in the absence and presence of a congestion situation. The purpose of this study is a quantitative indicator of the formation, evolution, and elimination of traffic congestion. The basis of the theoretical and methodological approach is the use of modern highly efficient mathematical methods for processing information about traffic flows received from stationary complexes of photo and video recording of traffic violations. As a result of the study of time series, decompositions of the analyzed time series by harmonics and wavelets are constructed, statistical and fractal characteristics of the time series under consideration are determined. The analysis of the obtained results is carried out, the features of the obtained dependencies are revealed. The theoretical and practical significance of the work lies in the scientific substantiation of the quantitative characteristics 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, making decisions on managing the operation of traffic lights, etc. The direction of further research is an in-depth analysis of the identified indicator and determination on its basis of a criterion for determining the stages of formation, evolution, and elimination of traffic congestion at intersections of the street and road network of a large industrial city.

Key words: traffic congestion, traffic flow, traffic intensity.

Cite as: Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. (2023) [Traffic congestion characteristics based on data of the photo and video recording system]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 3, pp. 83–106, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-3-83>.

Введение

Заторы для транспортной системы являются общепризнанной и приоритетной проблемой [10; 16]. Причинами образования транспортных заторов считаются общий рост числа автомобилей [17], дорожно-транспортные происшествия [44], уменьшение пропускной способности проезжей части [21; 34; 53], повышение плотности автомобилей на участке дороги [37], увеличение грузового автомобильного парка и объема перевозок [49], наличие нерегулируемых пересечений, въездов и пешеходных переходов [5], регулируемые пересечения с большим количеством фаз [3] и несогласованность работы светофоров [11], строительные-ремонтные дорожные работы [40], человеческий фактор [4; 5; 51] и другие.

Транспортные заторы ведут к снижению скорости движения и увеличению времени в пути [35], повышению расхода топлива и стоимости перевозок [1; 51], увеличению загрязняющих выбросов в окружающую среду, аварийности и уровня шума, росту опасностей для здоровья [51], снижению производительности труда и качества транспортного обслуживания, безопасности участников дорожного движения [55], ухудшению психологического состояния водителей и пассажиров и так далее.

В настоящее время в РФ понятие транспортного затора закреплено стандартом¹: «Затор (*traffic impediment*): скопление транспортных средств, вынужденных существенно снижать скорость движения вплоть до полного его прекращения в пределах одной или нескольких полос движения из-за каких-либо помех движению».

Необходимо отметить, что нормативное понятие определяет только качественное содержание представления о транспортном заторе. Есть настоятельная необходимость также определить его количественные показатели, выявляя и принимая во внимание основные причины появления заторной ситуации, её эволюции и ликвидации (исчезновения), которые позволят сформулировать методические основы моделирования транспортного затора, и на этом фундаменте сделать возможным прогнозирование его появления и принятие операторами дорожных служб превентивных мер по его своевременному предупреждению или оперативной ликвидации.

Обзор литературы

Для характеристики и анализа транспортных потоков в отечественных и зарубежных исследованиях традиционно используются равномерность [25] и скорость движения [24] автомобилей, загруз-

¹ ГОСТ Р 55691-2013/ISO/TS 15624:2001. Системы управления и информации на транспорте. Системы оповещения о дорожных происшествиях (TIWS). Требования к системе. Москва, Стандартинформ, 2014. – 24 с.

женность улично-дорожной сети [29], интенсивность движения [2; 16; 31] и некоторые другие показатели. Для получения требуемой информации активно используются спутниковый мониторинг [39], квадрокоптеры, регистраторы акустического излучения автомобилей [32] и иные технические средства. Программно-технические комплексы фото- и видеofиксации нарушений правил дорожного движения [22] позволяют собирать и анализировать в режиме реального времени значительные массивы информации («big data» [33]) о развитии во времени основных показателей движения транспортных потоков по улично-дорожной сети в целом или на отдельных участках дорог и их пересечениях, формировать матрицы корреспонденций и пр. Необходимо отметить, что объемы информации, накопленные в течение многих лет применения программно-технических комплексов фото- и видеofиксации нарушений правил дорожного движения, в настоящее время в России практически не используются для решения практически важных задач.

Активное использование современных высокоэффективных математических способов обработки информации (метод нормированного размаха, статистический, фрактальный, гармонический, вейвлет-анализ и другие), получаемой в режиме реального времени от стационарных комплексов фото- и видеofиксации, позволит формулировать и решать задачи оптимизации [52] и управления [27] транспортными потоками, принимать научно обоснованные управленческие решения для снижения количества заторов на улично-дорожных сетях, уменьшить антропогенную экологическую нагрузку на окружающую среду.

Описательная статистика, дисперсионный и регрессионный анализ, статистическое моделирование, метод Монте-Карло, способы обработки больших массивов информации в настоящее время являются основой исследования и контроля транспортных процессов. В [19; 30] рассмотрено влияние случайного характера транспортного потока на степень насыщенности регулируемых пересечений и продолжительность задержки транспортных средств. Модель [28] регулируемого перекрестка с несколькими случайными транспортными потоками использована при расчете светофорного регулирования для снижения вероятности возникновения заторов на улично-дорожной сети. Математическая модель [43], учитывающая стохастический характер движения потока автомобилей, позволяет определять критерии эффективности систем мониторинга движения транспортных средств.

Фурье-анализ значительно упрощает изучение транспортных, технических и иных процессов. В автомобильной отрасли с использованием амплитудно-частотного анализа [23] исследуются пространственные и спектральные характеристики агрегатов, узлов и деталей автомобилей. Анализ интенсивности потоков транспортных средств с использованием Фурье-анализа выполнен в [6]. Подход к обнаружению автомобильных номерных знаков, основанный на преобразовании Фурье, представлен в [36].

Математический аппарат вейвлет-анализа используется при анализе причин ошибок при управлении транспортом в условиях интенсивного движения, для изучения [23] пространственных и спектральных характеристик транспортных средств и прогнозирования их скорости [54], оценки неоднородности потока автомобилей [48], частотного и частотно-временного анализа [42] последствий дорожно-транспортных происшествий, вибродиагностики узлов транспортных средств [12], изучения характеристик средней скорости, числа транспортных средств, среднего времени прохождения участка улично-дорожной сети [14].

Метод нормированного размаха (подход Хёрста) [41] – активно развивающееся направление анализа стохастических временных рядов. В [57] предложено использовать показатель Хёрста для оценки состояния дорожного движения на городской магистрали. Обработка данных методом нормированного размаха [20] позволила сделать вывод об эффективности прогнозирования поведения временного ряда с данными об ускорении автомобиля в трех направлениях.

Временные ряды случайных процессов представляют собой особый класс функций, которые проявляют свойства фрактальности. Аппроксимация мультифракталами контактных поверхностей оказалось целесообразной при контроле и оценке шероховатости поверхностей рессор и полимерных вкладышей шаровых опор [13]. С помощью показателя Хёрста установлено [47], что закономерность появления автомобилей на магистралях проявляет фрактальные свойства. В [45; 46] даны описания фрактальности транспортного потока. Фрактальный анализ [56] частот сокращений сердечной мышцы водителя, вращения вала двигателя и ускорения автомобиля используется для предупреждения дорожно-транспортных происшествий. Фрактальные характеристики автомобильного трафика исследованы в [18; 50]. Исследования [47] данных о дорожном движении подтверждают, что количественные характеристики появления транспортных средств на автомобильных дорогах

в большей степени соответствуют фрактальному поведению, а не классическому стохастическому процессу. Мультифрактальный спектр транспортных потоков [46] может использоваться для классификации потоков автомобилей. Метод [57] определения индекса эволюции дорожного движения на основе фрактального анализа предлагается для точного и объективного описания потока транспорта.

Метод исследования

На научных и практических конференциях, в журнальных публикациях и монографиях обсуждаются определения *нормальной* скорости, *нормальной* интенсивности транспортного потока, *нормальной* плотности автомобилей, которые должны подразумевать некоторые конкретные значения, ниже (или выше) которых можно считать эти величины *ненормальными* или, другими словами, характеризующими (определяющими) образование транспортного затора. Очевидно, что *нормальные*, или допустимые, значения параметров транспортного потока не являются универсальными, и для каждого конкретного участка улично-дорожной сети должны определяться индивидуально. Это связано с особенностями устройства проезжей части, ограничениями скорости, наличием регулируемых и нерегулируемых пересечений, общим количеством и наличием выделенных полос движения, метеорологическими и сезонными условиями, а также иными факторами.

Следует ожидать, что при формировании, эволюции и ликвидации транспортного затора в результате дорожно-транспортного происшествия, ремонта проезжей части, нарушения правил дорожного движения, причин случайного (спонтанного) характера или вследствие иных обстоятельств основные показатели транспортного потока принимают специфические (критические) значения, отличающие их от *нормальных* значений, уникальных для каждого конкретного участка дорожно-транспортной сети. Оперативное обнаружение таких специфических значений позволит операторам служб контроля дорожного движения своевременно принимать обоснованные решения и осуществлять оптимальные действия по управлению транспортными потоками для исключения негативных последствий образования транспортных заторов.

Объектом изучения в настоящей работе является набор показателей потока автомобилей на участке улично-дорожной сети (рисунок 1), оборудованном программно-техническим комплексом, позволяющим измерять характеристики каждого

автомобиля, следующего в составе транспортного потока. Предметом исследования является зависимость продолжительности движения отдельного автомобиля при отсутствии и наличии заторной ситуации. В качестве методологической основы изучения продолжительности движения автомобилей используется математический аппарат статистического анализа. Цель настоящего исследования – формирование количественного показателя возникновения, развития и ликвидации (исчезновения) транспортного затора.

Для объективного и корректного определения специфических значений транспортного потока, указывающих на формирование (эволюцию, ликвидацию) транспортного затора, необходимо выполнить следующие задачи:

- собрать данные о *нормальных* показателях транспортного потока на исследуемом участке (например, интенсивность, средняя скорость потока транспорта, время проезда, характерные для свободного движения автомобилей);
- определить *аномальные* (критические) значения тех же параметров транспортного потока при формировании, развитии и ликвидации (исчезновении) транспортного затора, когда наблюдается затрудненное движение транспорта;
- выполнить сопоставление и анализ показателей транспортного потока при свободном движении автомобильного транспорта и в случае транспортного затора;
- сформировать критерий выявления аномальных значений показателей транспортного потока для оценки вероятности образования дорожного затора.

Объект исследования

Изучение формирования и эволюции транспортного затора выполнялось на свободном от перекрестков участке дороги протяженностью 2,2 км (рисунок 1). На этом участке образование транспортного затора, как правило, наблюдается во второй половине дня. В настоящей работе собраны и анализируются данные о транспортных потоках за 8 мая 2022 года (в течение суток транспортный затор отсутствовал) и 9 мая 2022 года (транспортный затор зафиксирован в период с 20:00 до 22:00). Исходная информация для исследования получена с помощью аппаратно-программных комплексов фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения, установленных на изучаемом участке в контрольных точках, отмеченных на рисунке 1.



Рисунок 1. Участок дороги, выбранный для исследования; маркеры указывают рубежи наблюдения, стрелка – направление движения

Источник: разработано с использованием ресурсов 2GIS, ООО «ДубльГИС»

Результаты исследования

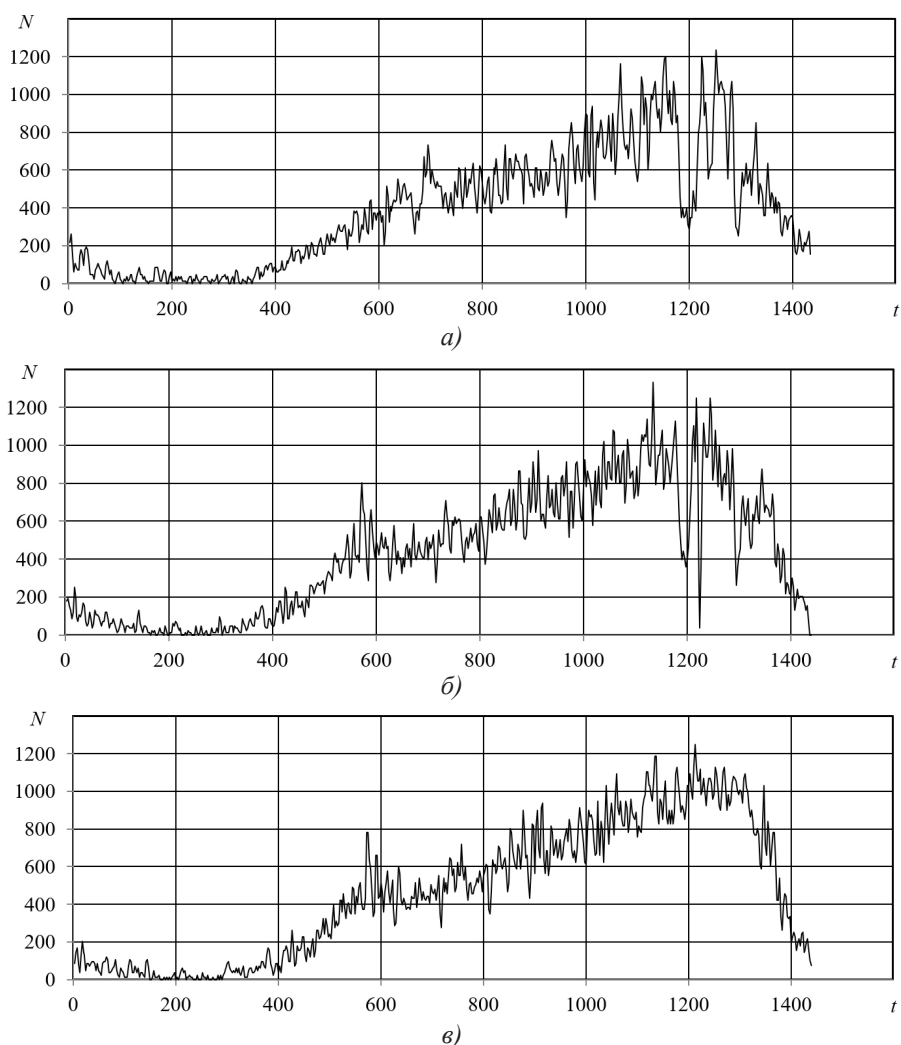


Рисунок 2. Зависимости интенсивности транспортного потока N (авт/ч) от времени t (мин) 08 мая (а – входной рубеж) и 09 мая 2022 года (б – входной, в – выходной рубежи)

Источник: разработано авторами

И. На рисунке 2 представлены зависимости интенсивности транспортного потока на выбранном участке дороги за 8 мая (рисунок 2а – входной рубеж) и 9 мая 2022 года (рисунок 2б – входной, в – выходной рубежи), полученные с использованием подхода [9; 38]. Из представленных рисунков видно

отсутствие принципиальных различий в суточной интенсивности транспортного потока при отсутствии транспортного затора и его наличии. Это означает, что интенсивность транспортного потока на этом участке дороги не содержит значимую информацию об отсутствии или наличии транспортного затора.

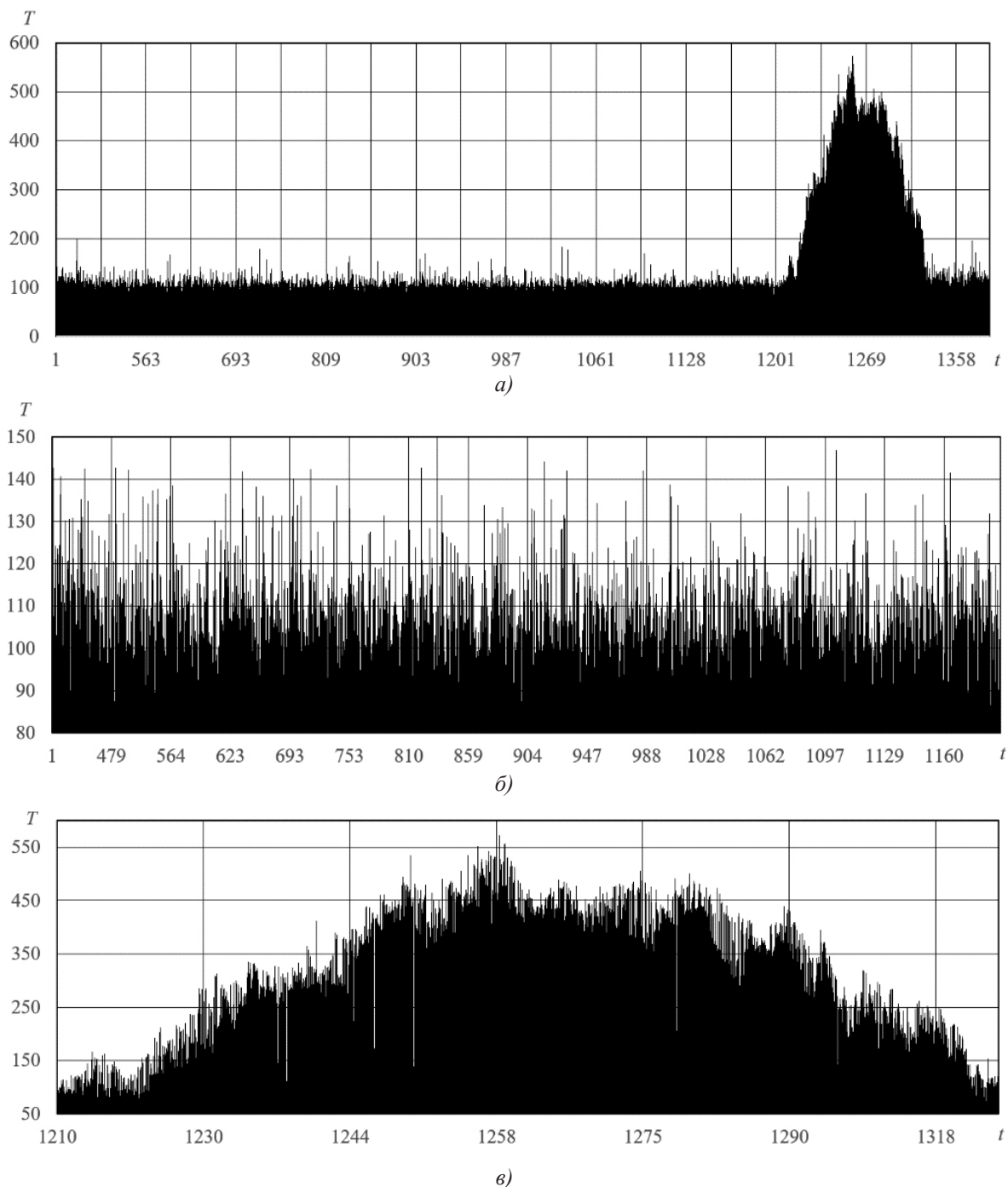


Рисунок 3. Зависимость продолжительности T_i (с) движения отдельных автомобилей от момента времени t (мин) появления автомобилей в начале участка в течение суток (9 мая 2022 года); периоды наблюдения 0:00-24:00 (а), 0:00-20:00 (б), 20:00-22:00 (в)

Источник: разработано авторами

Необходимо рассмотреть другой показатель движения потока автомобилей, соответствующий нормативному определению транспортного затора. Согласно определению, количественной основой для построения критерия транспортного затора следует рассматривать скорость движения отдельных автомобилей в потоке транспорта, которая изменяется от максимально разрешенного значения вплоть до нуля, то есть до полной остановки. Истинную, или мгновенную, скорость автомобиля определить в каждый момент времени без применения специальных технических средств на практике не представляется возможным. Современные аппаратно-программные комплексы фото- и видеofиксации нарушений правил дорожного движения позволяют фиксировать государственный регистрационный знак (то есть идентифицировать каждый автомобиль), моменты начала и окончания его перемещения по исследуемому участку, что позволяет определять среднюю скорость движения каждого автомобиля, движущегося между рубежами въезда и выезда с контрольного участка [9].

Средняя скорость v_i^{cp} и время T_i проезда i -м автомобиля между контрольными рубежами эквивалентны с точки зрения информационной содержа-

тельности и связаны соотношением $v_i^{cp} = S/T_i$, где S – расстояние между рубежами контроля. Однако для сокращения времени вычислительной работы аппаратно-программного комплекса целесообразно ограничиться определением времени T_i и не загружать процессор вычислением v_i^{cp} .

На рисунке 3а представлена зависимость продолжительности T_i движения отдельных автомобилей между рубежами контроля 9 мая 2022 года от момента времени t их появления в начале участка в период с 0:00 до 24:00. Резкое возрастание продолжительности движения автомобилей в период с 20:00 до 22:00 отражает образование транспортного затора на дороге. Рисунок 3б показывает продолжительность T_i свободного движения между рубежами контроля автомобилей в период времени с 0:00 до 20:00, то есть при отсутствии затора. Рисунок 3в – продолжительность T_i движения на том же участке автомобилей в период с 20:00 до 22:00 при формировании затора и последующей его ликвидации. Статистические показатели продолжительности движения автомобилей по рассматриваемому участку дороги для различных периодов наблюдения за указанную дату приведены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические характеристики распределения продолжительности T_i движения автомобилей по рассматриваемому участку дороги 9 мая 2022 года для различных периодов наблюдения

Статистические показатели	Периоды наблюдения, часы		
	00:00-24:00	00:00-20:00	20:00-22:00
Среднее значение T_{cp} , с	130,81	95,62	317,48
Мода, с	96,00	94,50	435,50
Медиана, с	98,53	95,21	332,78
Дисперсия, с ²	9038,57	162,07	15742,24
Среднеквадратичное отклонение, с	95,07	12,73	125,47
Коэффициент вариации, %	72,68	13,31	39,52
Асимметрия	2,60	0,29	-0,30
Экцесс	5,62	0,23	-1,11

Источник: разработано авторами

Приведенные в таблице данные позволили сравнить основные детерминированные показатели распределения случайной величины продолжительности T_i движения автомобилей между рубежами контроля при наличии и отсутствии транспортного затора на выбранном для наблюдения участке дороги для интервалов времени 00:00-20:00 (отсутствие транспортного затора) и 20:00-22:00 (зафиксирован транспортный затор):

- мода возросла в 4,61 раза;
- среднее значение продолжительности T_{cp} движения автомобилей увеличилось в 3,32 раза при наличии затора по сравнению с движением автомобилей при его отсутствии;
- медиана изменилась в 3,50 раза;
- дисперсия увеличилась в 97,13 раза;
- среднеквадратичное отклонение возросло в 9,86 раза;

- коэффициент вариации изменился в 2,97 раза;
- показатель асимметрии эволюционировал с 0,29 до –0,30;
- показатель эксцесса изменился с 0,23 до –1,11.

Таким образом, детерминированные показатели распределения случайной продолжительности T_i движения автомобилей при наличии дорожного затора существенно изменились по сравнению

с теми же показателями при отсутствии заторной ситуации. Можно предположить, что некоторые из указанных показателей могут оказаться эффективными индикаторами, наблюдение за которыми позволит прогнозировать формирование, развитие и ликвидацию транспортных заторов на городских улично-дорожных сетях, транспортных магистралях и междугородных трассах.

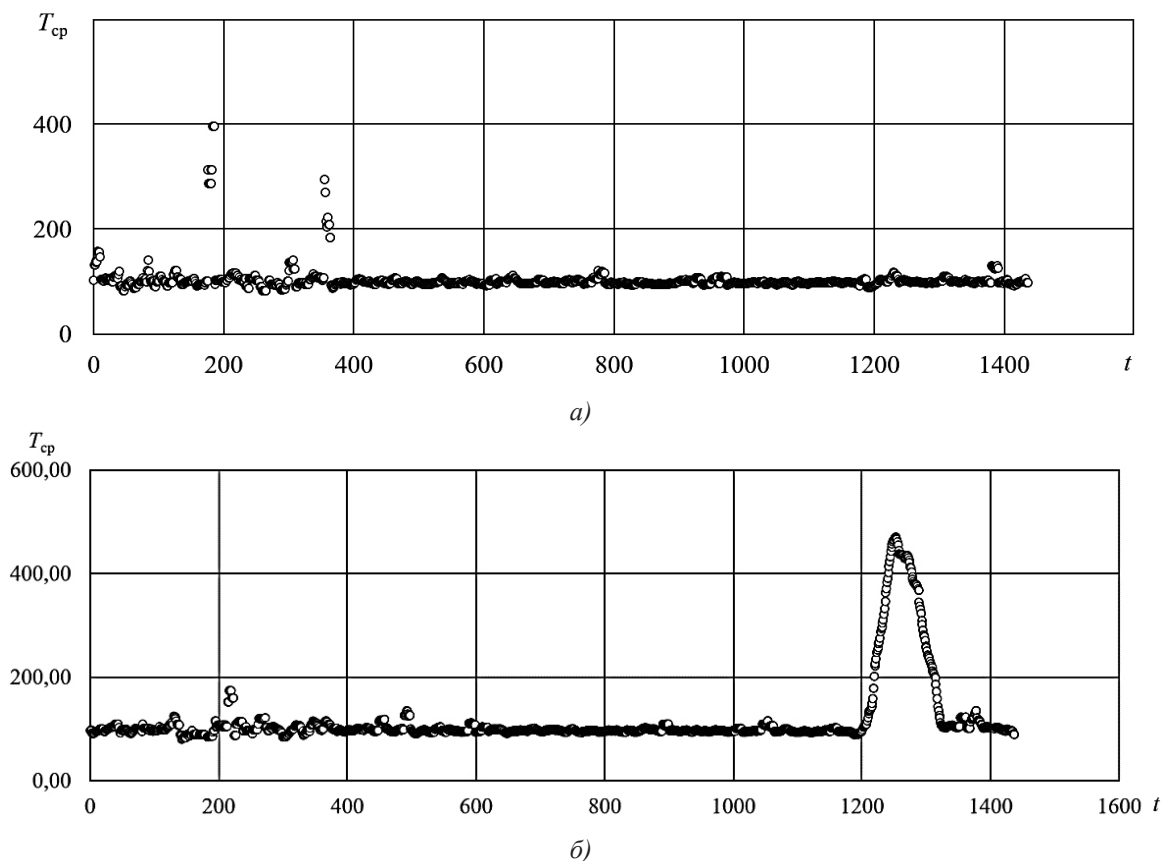


Рисунок 4. Осредненные продолжительности T_{cp} (с) движения автомобилей 8 мая (а) и 9 мая 2022 года (б) в зависимости от момента времени t (мин) появления автомобилей в начале участка

Источник: разработано авторами

Зависимости от времени t продолжительности T_i движения отдельных автомобилей в потоке транспорта за оба дня наблюдения представляют собой временные ряды, анализ которых целесообразно выполнить с использованием современных высокоэффективных математических методов статистической обработки. На рисунке 4 показаны средние продолжительности T_{cp} движения автомобилей по выбранному участку дороги в течение суток за 8 (транспортный затор отсутствует) и 9 мая (зафиксирован транспортный затор) 2022 года в зависимости от времени их появления t на входном рубеже. Осреднение проводилось по 10-минутным «скользя-

щим» временным интервалам с последовательным сдвигом этих интервалов на 1 минуту.

Формирование транспортного затора обнаруживается по быстрому росту средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей между рубежами контроля. Нормализация транспортной ситуации (исчезновение транспортного затора) также определяется по возвращению продолжительности T_{cp} движения автомобилей к установившемуся значению, характерному для этого участка дороги в предшествующее образованию затора время.

Сопоставление рисунков 2 и 4 объясняет сравнительно высокие значения T_{cp} в начале суток от

3:00 до 3:20 часов утра (от 180 до 200 минут, рис. 4а), которые обусловлены, видимо, низкой скоростью отдельных автомобилей в темное время суток из-за психо-физиологических особенностей водителей этих автомобилей, поскольку интенсивность движения автомобилей в это время незначительна (рисунок 2а).

Осцилляция значений T_i для отдельных автомобилей с течением времени (рисунок 3) не позволяет однозначно фиксировать начало формирования транспортного затора по отдельным значениям T_i временного ряда, поэтому использование осреднения посредством скользящего окна представляется рациональной и обоснованной процедурой, что

подтверждается сопоставлением данных, представленных на рисунках 2, 3 и 4.

II. В таблицах 2 и 3 представлены результаты разложения по гармоническим функциям (Фурье-анализ) временных рядов, построенных на значениях средних продолжительностей T_{cp} движения автомобилей по исследуемому участку дороги в течение суток (за 8 и 9 мая 2022 года соответственно) при отсутствии и наличии транспортного затора на рассматриваемом участке дороги. Подход к исследованию характеристик транспортных потоков с использованием гармонического анализа предложен в [6].

Таблица 2. Амплитуды, периоды и сдвиги фаз первых гармоник разложения временного ряда T_{cp} в ряд Фурье при отсутствии транспортного затора 8 мая 2022 года

Номер k гармоники	Амплитуда a_k , авт/ч	Период τ_k , мин	Сдвиг фазы φ_k , рад
0	99,1414	–	–
1	0,8691	1023,0000	0,1258
2	1,2593	511,5000	1,6101
3	1,0295	341,0000	1,7816
4	0,6525	255,7500	-0,9108
5	1,0549	204,6000	1,9591
6	0,7273	170,5000	-0,1373
7	1,5913	146,1429	2,8721
8	0,5116	127,8750	2,3764
9	0,7669	113,6667	-1,4814
10	0,4870	102,3000	-1,9035

Источник: разработано авторами

Таблица 3. Амплитуды, периоды и сдвиги фаз первых гармоник разложения временного ряда T_{cp} в ряд Фурье при наличии транспортного затора 9 мая 2022 года

Номер k гармоники	Амплитуда a_k , авт/ч	Период τ_k , мин	Сдвиг фазы φ_k , рад
0	123,0766	–	–
1	50,0331	1023,0000	1,0183
2	45,9154	511,5000	2,0824
3	43,4300	341,0000	-3,1159
4	39,6158	255,7500	-2,0398
5	35,9829	204,6000	-0,9639
6	30,2797	170,5000	0,1632
7	24,9341	146,1429	1,2683
8	22,8135	127,8750	2,3584
9	18,6286	113,6667	-2,8903
10	13,1598	102,3000	-1,7920

Источник: разработано авторами

Сравнение таблиц показывает существенное увеличение практически для всех периодов τ_k значений амплитуд a_k этих гармоник для ситуации, имеющей место при транспортном заторе. По-видимому, это является следствием наличия выраженного пика функции средних продолжительностей T_{cp} транспортного потока в интервале времени от 20:00 (1200 мин) до 22:00 (1320 мин).

Отмеченное повышение амплитудных значений гармоник может служить одним из индикаторов образования транспортного затора. Недостатком использования амплитудно-частотного анализа является необходимость представления анализируемой функции на всем 24-часовом интервале наблюдения, что, по-видимому, не позволит получать информацию о начале формирования транспортного затора в оперативном режиме.

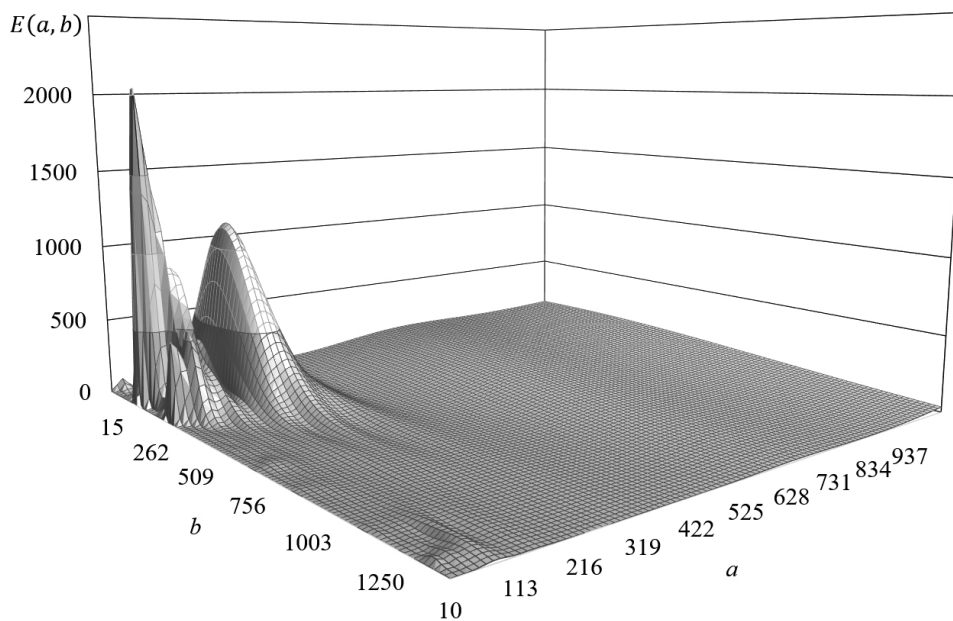
III. На рисунке 5 представлены плотности спектров энергии (скалограммы) для функции средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей, полученные по данным за 8 и 9 мая 2022 года с использованием вейвлета Морле. Возможность применения вейвлетов для изучения характеристик транспортных потоков обоснована в [7].

При отсутствии транспортного затора 8 мая 2022 года (рисунок 5а) плотность спектра энергии выявляет всплеск функции средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей в диапазоне $a \in [21, 62]$ мин и $b \in [145, 203]$ мин, точка экстремума имеет координаты $a = 31$ мин, $b = 189$ мин, экстремальное значение плотности спектра энергии в этой точке

равно $2,4 \times 10^3$. Согласно рисунку 4а, анализируемая функция средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей в этот день достигает наибольшего значения $T_{cp} = 395,7$ с в момент времени $t = 185$ мин, что удовлетворительно согласуется с результатами вейвлет-анализа; относительная погрешность 2,1%. Наибольшему значению функции средней продолжительности T_{cp} в указанный момент времени соответствует интенсивность транспортного потока 72 авт/час.

Анализ показал наличие сопутствующих всплесков плотности спектра энергии с меньшими значениями, расположенных вблизи пикового значения. Эти значения плотности спектра энергии соответствуют относительно высоким значениям функции T_{cp} в моменты времени 176 мин, 182 мин, 355 мин, 362 мин (рисунок 4а) при малой интенсивности транспортного потока от 12 до 96 авт/час (рисунок 2а).

На рисунке 5б показано распределение плотности спектра энергии функции средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей за 9 мая. Плотность спектра энергии фиксирует положение пикового значения функции T_{cp} в диапазоне $a \in [110, 875]$ мин и $b \in [900, 1440]$ мин, точка экстремума имеет координаты $a = 226$ мин, $b = 1265$ мин, экстремальное значение плотности спектра энергии равно $2,81 \times 10^4$. Относительно высокие значения функции средней продолжительности T_{cp} в моменты времени 220 мин, 460 мин, 490 мин (рисунок 4б) этого же дня с соответствующими интенсивностями транспортного потока от 12 до 270 авт/час (рисунок 2б) на рисунке 5б практически не различимы.



а)

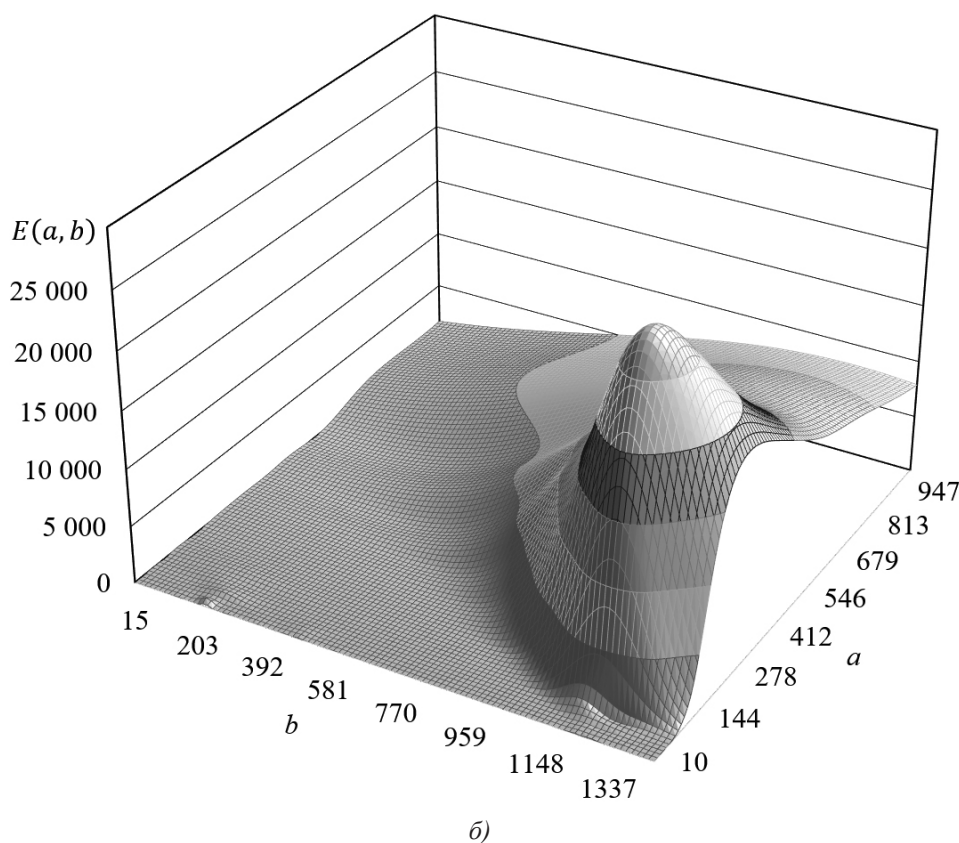


Рисунок 5. Плотности спектров энергии $E(a,b)$ (скалограммы) функции средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей, полученные на основе вейвлета Морле (б); 8 мая (а, транспортный затор отсутствует) и 9 мая 2022 года (б, зафиксирован транспортный затор)

Источник: разработано авторами

Скалограмма на рисунке 5б показывает, что экстремальное значение плотности спектра энергии при транспортном заторе 9 мая 2022 года достигается при $b = 1265$ мин, что практически соответствует достижению экстремального значения $T_{cp} = 495$ с самой функцией T_{cp} в момент времени $t = 1254$ мин (относительная погрешность 0,88%).

Дополнительную информацию о структуре функции T_{cp} по рассматриваемому участку дороги позволяют получить скелетоны [7] на рисунке 6.

Скелетон на рисунке 6а выделяет кривые экстремальных значений скалограммы (рисунок 5а). Линия 1 в моменты времени $b = 35$ и $b = 110$ мин имеет точки бифуркации, при этом верхняя ветвь нижней точки и нижняя ветвь верхней точки впоследствии сходятся и аннигилируют около значения $b = 295$ мин; другие ветви также прекращают свое существование также вблизи этой точки.

Линия 2 существует на протяжении всего наблюдаемого периода времени с мало меняющимся масштабом (частотой). По-видимому, это доминирующая в течение суток наблюдения вейвлет-ком-

понента, которая может быть принята в качестве детерминированной составляющей случайного процесса, описывающего поведение функции T_{cp} . Таким же образом можно охарактеризовать линии 3, 4 и 5 и другие в нижней части рисунка, которые имеют сравнительно малые масштабы a (не более 325 мин), соответствующие более высоким частотам, и практически не меняющиеся со временем, то есть описывают практически стационарные составляющие разложения функции T_{cp} по вейвлетам Морле.

Скелетон функции T_{cp} при образовании транспортного затора 9 мая 2022 года показан на рисунке 6б. Кривые 1 и 2 с плавно меняющимся параметром a масштаба появляются в начальный момент времени и, по-видимому, претерпевая скачки, сливаются вблизи точки $b = 950$ мин в единую кривую 3 с монотонно эволюционирующей масштабом (частотой). Экстремальная кривая 4 в точке бифуркации $b = 1221$ мин получает две практически вертикальные ветви, которые можно интерпретировать как наличие случайного «белого» шума в составе функции средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей.

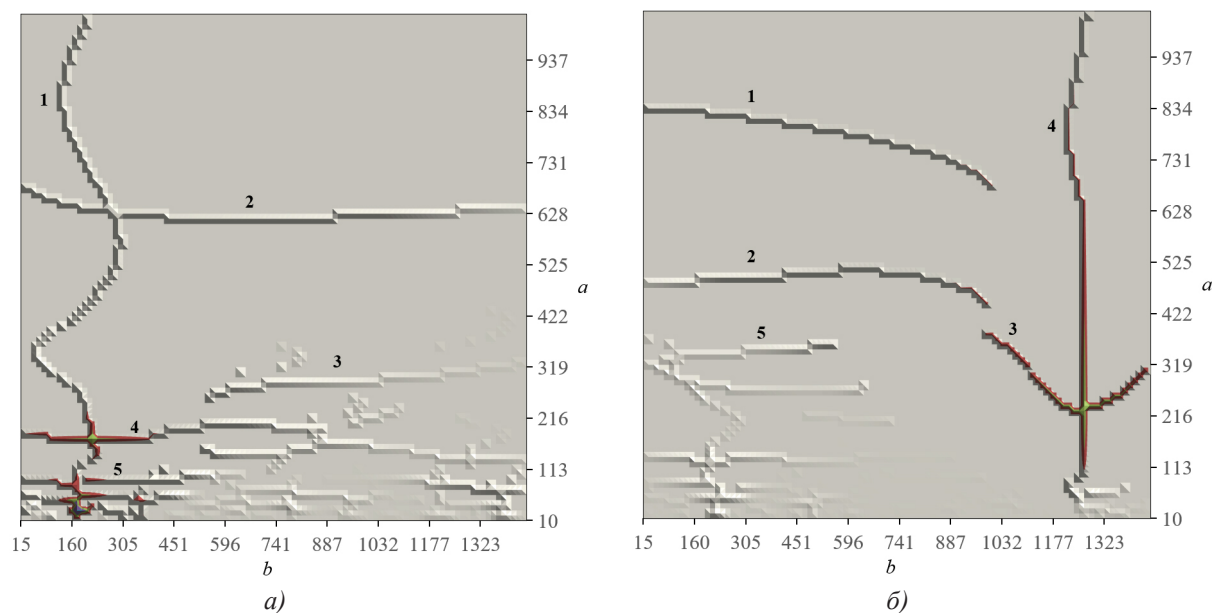


Рисунок 6. Скелетоны функции средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей, полученные на основе вейвлета Морле; 8 мая (а, транспортный затор отсутствует) и 9 мая 2022 года (б, зафиксирован транспортный затор)

Источник: разработано авторами

Практически горизонтальная линия 5 и другие подобные ей кривые в левой нижней части рисунка имеют сравнительно малые масштабы a (не более 350 мин), соответствующие более высоким частотам, мало меняются со временем и описывают составляющие разложения функции T_{cp} по вейвлетам Морле, имеющие постоянные масштабы.

Сопоставление результатов исследования функций средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей по исследуемому участку дороги 8 и 9 мая 2022 года показало, что вейвлет-анализ позволяет надежно идентифицировать транспортный затор во времени и досконально изучить его масштабно-временные характеристики. Вместе с тем необходимо отметить, что вейвлет-анализ, как и Фурье-анализ, требует представления исследуемой функции на всем суточном интервале наблюдения, что также не позволяет получать информацию о начале формирования транспортного затора в оперативном режиме.

IV. Использование метода нормированного размаха для выявления влияния истории эволюции транспортного потока на его развитие (персистентность случайного процесса) рассмотрено в [8]. Для определения показателей Хёрста кривые R/S нормированных размахов функции средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей по рассматриваемой дороге 8 мая (рисунок 7а) и 9 мая 2022 года

(рисунок 7б) отображаются в двойных логарифмических координатах и аппроксимируются степенными зависимостями.

Вычисленные значения показателя Хёрста $H = 0,6527$ для 8 мая и $H = 0,7925$ для 9 мая 2022 года различаются между собой на 32,8%. Вычисленные значения показателя Хёрста в обоих случаях превышают величину 0,5, то есть функции средней продолжительности T_{cp} в течение выбранных суточных периодов наблюдения 8 и 9 мая 2022 года не могут квалифицироваться как полностью случайные и должны быть охарактеризованы как персистентные, то есть в течение обоих дней наблюдения демонстрирует устойчивость наблюдаемых тенденций на рассматриваемой дороге, причем 9 мая даже в большей степени ($H = 0,7925$), чем 8 мая ($H = 0,6527$) 2022 года, и, таким образом, история формирования «предыдущих» слагаемых временных рядов оказывает определённое влияние на «последующие» значения этих же рядов.

Метод нормированного размаха по объему вычислительной работы существенно превышает затраты на проведение Фурье- и вейвлет-анализа рассматриваемых функций. Сравнение результатов анализа функций средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей за 8 и 9 мая 2022 года свидетельствует о незначительных различиях вычисленного значения показателя Херста при отсутствии и наличии транспортного затора.

Возможно, дополнительное исследование метода его для целей мониторинга транспортных заторов. нормированного размаха позволит адаптировать

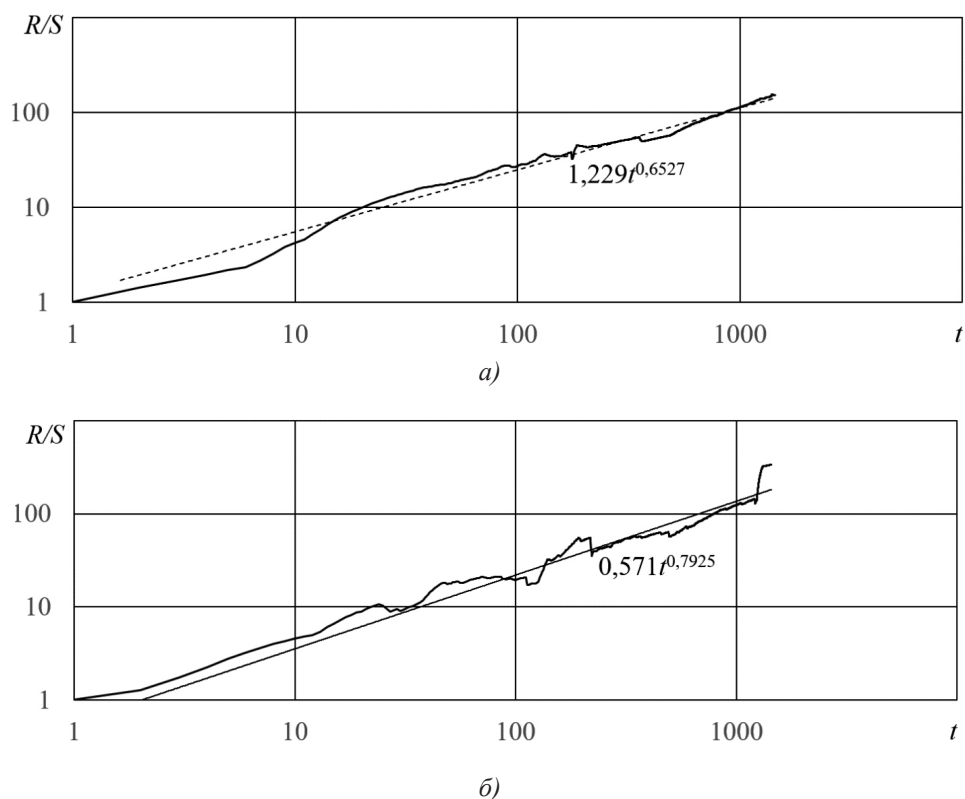
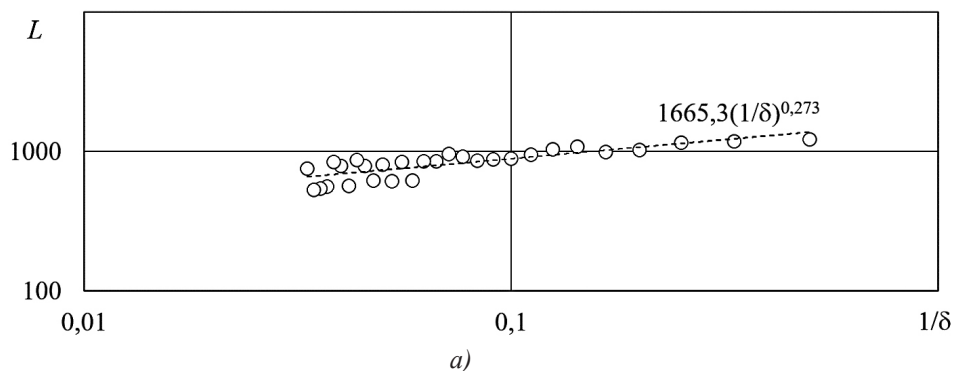


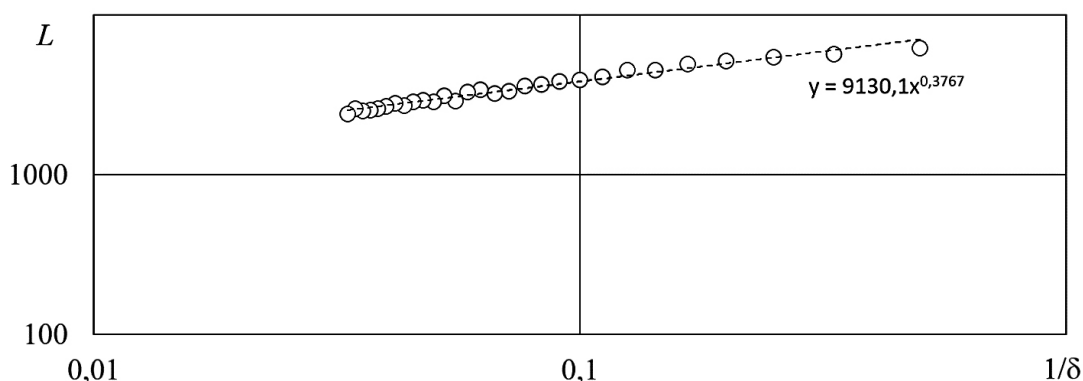
Рисунок 7. Зависимости нормированного размаха функции продолжительности T_{cp} (с) движения автомобилей в двойных логарифмических координатах $R(t)/S(t)$ (а) и значение показателя Хёрста; 8 мая (а, транспортный затор отсутствует) и 9 мая 2022 года (б, зафиксирован транспортный затор)

Источник: разработано авторами

V. На рисунке 8 приведены зависимости, описывающие временные ряды функции средней продолжительности T_{cp} движения автомобилей по рассматриваемой дороге 8 мая (рисунок 8а) и 9 мая (рисунок 8б) 2022 года в координатах $\ln(1/\delta) - \ln L$, где L – длина измеряемой кривой, δ – шаг, принятый для измерения L . На основе расчетов длины L с раз-

личными значениями шага δ (рисунок 8) определены фрактальные размерности этих функций за периоды наблюдения в указанные дни. Фрактальная размерность для данных, полученных 8 мая, равна $d = 1,273$, для данных за 9 мая 2022 года составила $d = 1,377$. Различие значений составляет 8,2%, что меньше различий в значениях показателя Хёрста.





б)

Рисунок 8. Зависимость длины L функции продолжительности T_{cp} движения автомобилей от $1/\delta$ в логарифмических координатах (б) и определение фрактальной размерности; 8 мая (а, транспортный затор отсутствует) и 9 мая 2022 года (б, зафиксирован транспортный затор)

Источник: разработано авторами

Интерес представляет практическая проверка известной зависимости, связывающей фракталь-

ную размерность d и показатель H Хёрста,

$$d = 2 - H,$$

предложенной Мандельбротом [25].

на рисунках 7а и 8а, сумма показателя Хёрста $H = 0,6527$ и фрактальной размерности $d = 1,273$ равна

Для данных за 8 мая 2022 года, приведенных на

$$d + H = 0,6527 + 1,273 = 1,9257 < 2$$

относительная погрешность равна 3,7%. Для данных за 9 мая 2022 года, приведенных на рисун-

ках 7б и 8б, сумма показателя Хёрста $H = 0,7925$ и фрактальной размерности $d = 1,377$ равна

$$d + H = 0,7925 + 1,377 = 2,1695 > 2$$

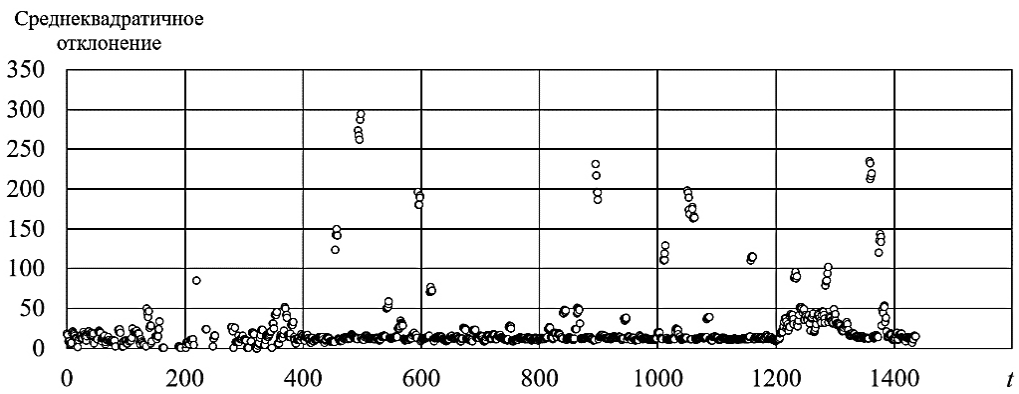
относительная погрешность равна 8,5%. На наличие погрешности при использовании формулы Мандельброта для результатов практических исследований обращено внимание в монографии [15].

зависимости среднеквадратичного отклонения, моды, показателей вариации, асимметрии и эксцесса от времени t наблюдения отличаются значительным разбросом значений и не позволяют однозначно идентифицировать транспортный затор.

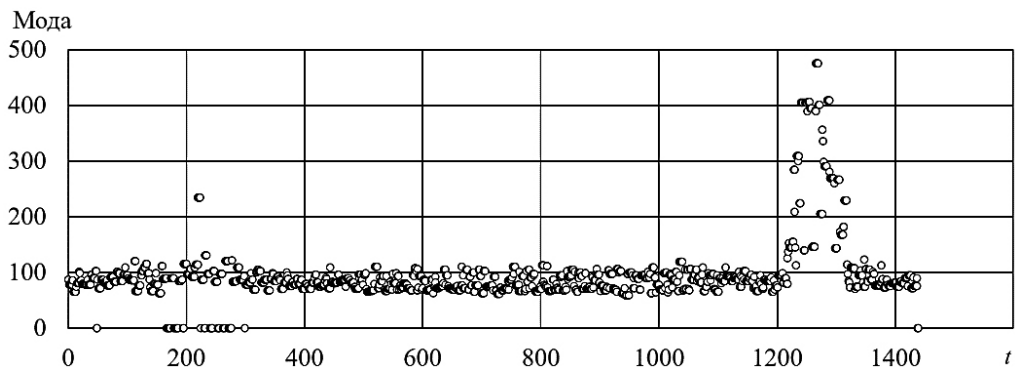
На рисунке 9 представлены детерминированные характеристики случайной функции продолжительности T_i движения автомобилей в транспортном потоке между рубежами контроля: среднеквадратичное отклонение, мода, коэффициент вариации, показатель асимметрии и эксцесс по данным за 9 мая 2022 года. Указанные функции определялись, как и ранее, с использованием «скользящего» 10-минутного временного интервала осреднения с последовательным сдвигом этих интервалов на 1 минуту.

На рисунке 10 показаны характерные средние продолжительности T_{cp} движения автомобилей по исследуемому участку дороги в течение суток в зависимости от времени их появления t на начальном рубеже, выявленные в процессе анализа транспортных потоков на исследуемом участке дороги по данным за весенние (майские) месяцы 2021 и 2022 годов. Образование заторов зафиксировано 9 мая 2021 года (рисунок 10а), 3 мая (рисунок 10б), 16 мая (рисунок 10в) и 27 мая 2022 года (рисунок 10г). Согласно представленным данным начало образования транспортных заторов (с 15 до 20 часов по местному времени) и их продолжительности (от 1 часа 15 минут до 3 часов 20 минут) различны.

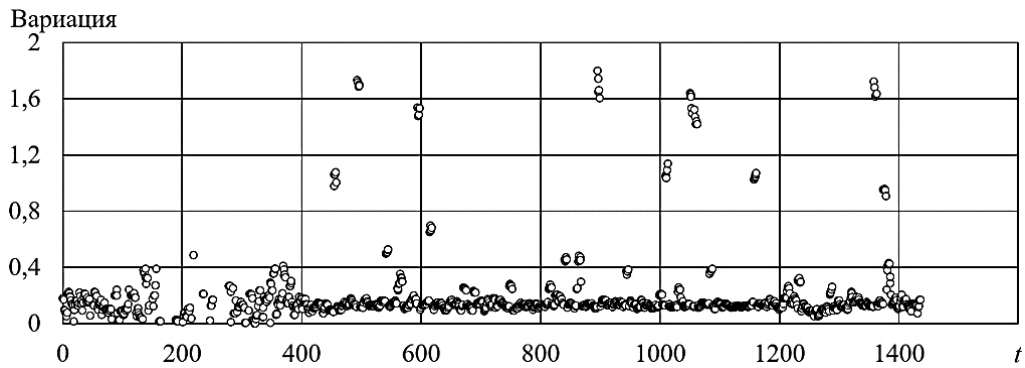
Результаты, представленные на рисунке 9, дополнительно подтверждают целесообразность фиксации начала образования и окончание транспортного затора именно по среднему значению T_{cp} продолжительности движения автомобилей, поскольку



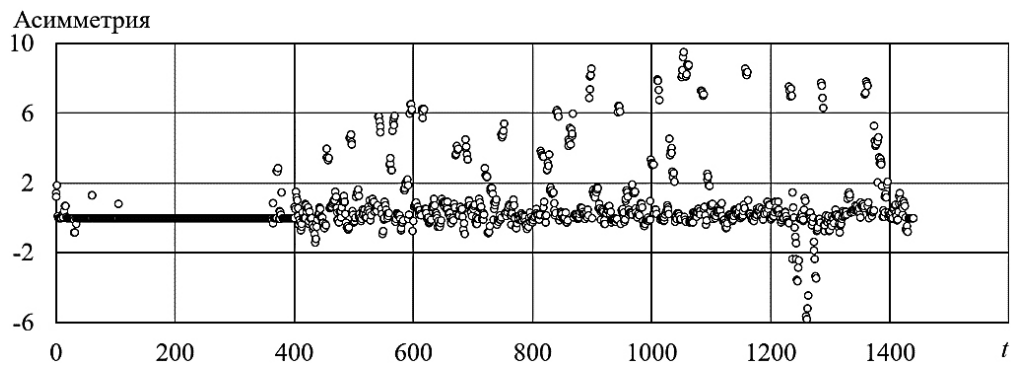
а)



б)



в)



г)

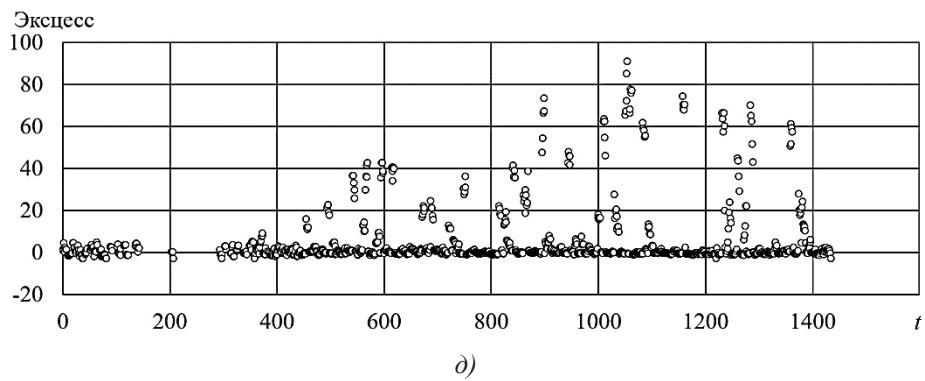
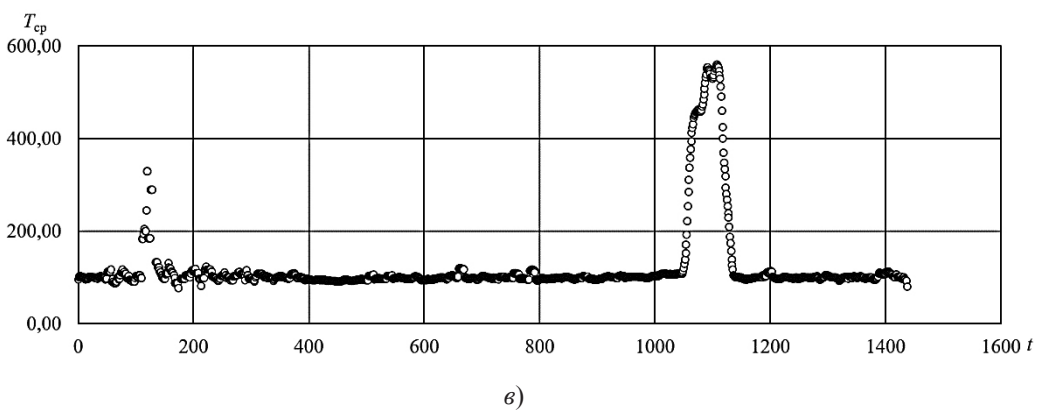
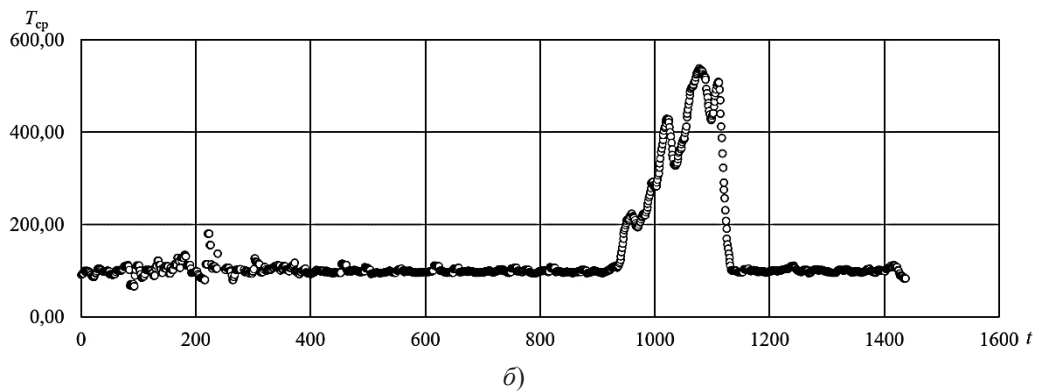
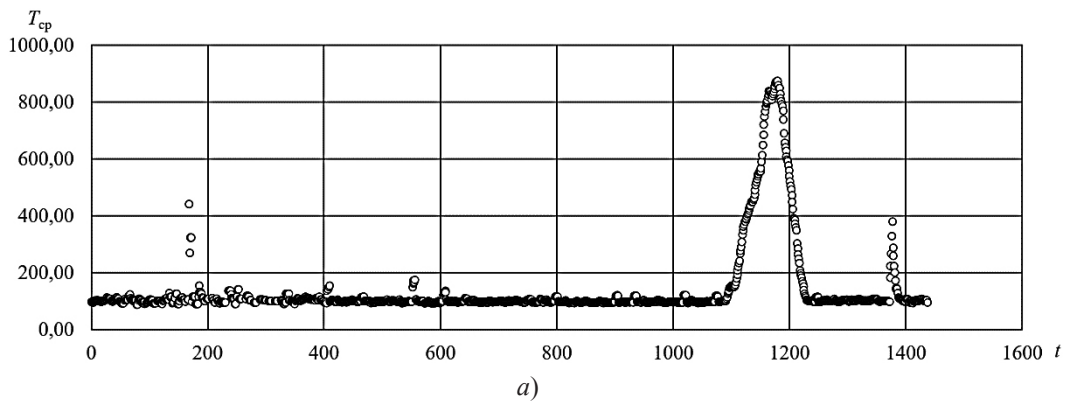


Рисунок 9. Статистические характеристики случайной величины T_i продолжительности движения автомобилей рубежами контроля: среднее квадратичное отклонение (а), мода (б), показатели вариации (в), асимметрии (г) и эксцесса (д); данные за 9 мая 2022 года

Источник: разработано авторами



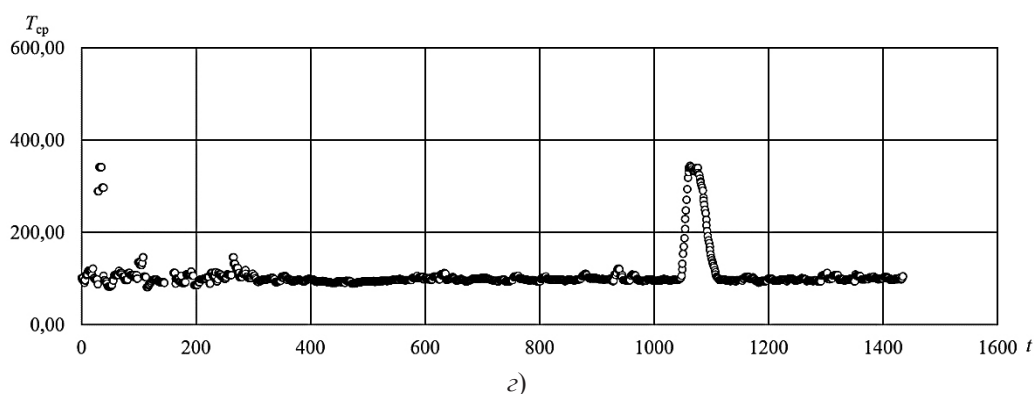


Рисунок 10. Осредненные продолжительности $T_{ср}$ (с) движения автомобилей в зависимости от момента времени t (мин) появления автомобилей в начале участка 9 мая 2021 года (а), 3 мая (б), 16 мая (в) и 27 мая (г) 2022 года

Источник: разработано авторами

Заключение

Программно-технические комплексы фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения, размещаемые на городских улично-дорожных сетях, позволяют получать в режиме реального времени данные о характеристиках каждого автомобиля, движущегося в потоке транспорта. Обработка таких данных с использованием метода нормированного размаха, статистического, фрактального, гармонического и вейвлет-анализа показала, что зависимости от времени детерминированных показателей (среднего значения, среднеквадратичного отклонения, моды, показателей вариации, асимметрии и эксцесса) существенно различаются при свободном движении транспорта и в случае образования заторной ситуации. Анализ результатов продемонстрировал, что осреднённое с помощью скользящего временного интервала среднее значение продолжительности движения автомобилей между рубежами контроля может использоваться в качестве эффективного показателя наличия или отсутствия транспортного затора.

Следовательно, программно-технические комплексы фото- и видеофиксации, размещаемые на городских улично-дорожных сетях, могут использоваться для мониторинга транспортных заторов на городских магистралях.

Использование показателя средней продолжительности движения автомобилей в потоке транспорта с использованием имеющейся сети аппаратно-программных комплексов фото- и видеофиксации экономично (не требует дополнительных материальных вложений), достоверно (используются реальные данные о состоянии транспортных потоков), осуществляется в режиме реального времени (благодаря высокому быстродействию современных вычислительных устройств), обладает повышенной точностью в сравнении с балльной системой (Yandex, Google), позволяет автоматизировать процесс мониторинга транспортных заторов.

Выполненное исследование может служить основой разработки критерия, способного предупредить в режиме реального времени о возможности образования транспортных заторов, а также быть инструментом выработки рекомендаций по оперативному реагированию транспортных служб для предотвращения и ликвидации заторов автомобильного транспорта. Представляется перспективным использование предложенного подхода с точки зрения разработки научно-обоснованных средств моделирования, прогнозирования и перспективного планирования, обоснования и принятия управленческих решений по превентивным мерам ликвидации условий формирования транспортных заторов.

Литература

1. Ананьева Е. Ю. Информационные транспортные сервисы: инструмент преодоления заторов // Мир дорог. – 2021. – № 139. – С. 102–104. – EDN: TBTVJX
2. 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: TMHTMZ
3. Басков В. Н., Игнатов А. В. Зависимость риска возникновения транспортного затора от параметров транспортного потока // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – № Т35. – С. 1–5. – EDN: VCHAFT

4. 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
5. Бояршинов М., 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
6. 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: BVHFDH
7. 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/10.25198/2077-7175-2021-2-68>. – EDN: RXHDQO
8. 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
9. Владимиров С. Н. Транспортные заторы в условиях мегаполиса // Известия Московского МГТУ МАМИ. – 2014. – Т.3. – №1(19). – С. 77–84. – EDN: STXZCR
10. 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
11. Гаязова Н. Т., Зарипов Р. Р. Стохастическая оценка скорости патологического тремора человека с помощью показателя Хёрста // Вестник Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета. – 2008. – 4 (15). – С. 18–20. – EDN: KYLJLL
12. Генералова А. А., Симонов А. С. Исследование поверхности разрушения шаровой опоры автомобиля с использованием теории фракталов // Надежность и качество: труды международного симпозиума: [в 2 т.]. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2009. – Т. 2. – С. 125–126.
13. Головин О. К., Столбова А. А. Вейвлет-анализ как инструмент исследования характеристик дорожного движения для интеллектуальных транспортных систем в условиях недостающих данных // Труды СПИИРАН. – 2019. – Том 18. – № 2. – С. 326–353. <https://doi.org/10.15622/sp.18.2.326-353>. – EDN: OQUJTX
14. Дещеревский А. В. Фрактальная размерность, показатель Херста и угол наклона спектра временного ряда. – М.: Институт сейсмологии Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 1997. – 34 с.
15. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
16. Караблин О. В. О фрактальном характере автомобильного трафика города // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2018. – Том 8. – №9А. – С. 287–292. – EDN: YSZQDJ
17. 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
18. Клевцов С. И. Использование моделей временных рядов для краткосрочного прогнозирования в микроконтроллере изменений параметров объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №11 (148). – С. 194–201. – EDN: RLEFFR
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. Макарецкий Е. А., Нгуен Лиен Хиеу. Исследование Фурье и вейвлет спектров изображений транспортных средств // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 12. – С. 80–81. – EDN: ISDION
22. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
23. Медрес Е. Е., Голов Е. В., Бабенко Т. И. Факторы, влияющие на равномерность движения автомобильного транспорта в условиях насыщенных транспортных потоков // Транспортное дело России. – 2017. – №2. – С. 89–90. – EDN: YQYTKV

24. Михеев С. В. Сетевое управление на основе микро- и макромоделей транспортных потоков// Программные продукты и системы. – 2018. – 1 (31). – С. 19–24. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.031.1.019-024>. – EDN: YPKTVJ
25. Наумова Н. А. Моделирование и оптимизация параметров светофорного регулирования при пересечении многополосных автомобильных дорог// Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 8. – С. 71–76. <https://doi.org/10.17513/snt.39269>. – EDN: DVUBOC
26. Нестеренко Д. Х. Исследование влияния структуры автотранспортного потока на эффективность использования участка улично-дорожной сети// Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1. – С. 90–96. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2019-1-90>. – EDN: YZKKVV
27. Обследование городской транспортной сети с применением измерительного комплекса/ А. С. Евтева [и др.]// Транспортное дело России. – 2018. – №1. – С. 132–134. – EDN: YWZXUX
28. Определение интенсивности транспортных потоков при помощи системы баллов карт пробок/ Р. В. Андронов [и др.]// Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 4. – С. 5–12. <https://doi.org/10.15593/24111678/2019.04.01>. – EDN: IVWBNN
29. Петров В. В., Кашталинский А. С. Влияние стохастичности на степень насыщения и задержку транспортного потока// Транспорт Урала. – 2013. – №4(39). – С. 29–31. – EDN: RSPAFJ
30. 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
31. Распределение скорости движения автомобилей перед стоп-линией городского регулируемого перекрестка/ А. В. Макаричев [и др.]// Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2019. – Вып. 85. – С. 107–116. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.107>. – EDN: YIOWRX
32. Францев С. М. Алгоритм вычисления интенсивности транспортного потока на основе фиксации амплитудной величины акустического излучения автомобиля// Инженерный вестник Дона. – 2017. – №2. – С. 41. – EDN: ZEOMVD
33. 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
34. Aftabuzzaman Md. (2007) Measuring Traffic Congestion – A Critical Review, *Proceedings of the 30th Australasian Transport Research Forum*, Melbourne, Victoria, Australia, 16 p. available at: https://australasiantransportresearchforum.org.au/wp-content/uploads/2022/03/2007_Aftabuzzaman.pdf, (accessed: 10.11.2022).
35. Ashtari A. H., Nordin Md. J., Kahaki S. M. M. (2011) A New Reliable Approach for Persian License Plate on colour images, *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Bandung, Indonesia, 17-19 July 2011, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/ICEEI.2011.6021697>.
36. Black W. R. (2003) *Transportation: A geographical analysis*, New York: The Guilford Press, 408 p.
37. 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, Vol. 1111, 012013, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1111/1/012013>.
38. Fornalchyk Ye., Vikovych I., Royko Yu., Hrytsun O. (2021) Improvement of Methods for Assessing the Effectiveness of Dedicated Lanes for Public Transport, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1(3 (109)), pp. 29–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225397>.
39. Gong Jin-li1, Peng Xian-wu (2014) Determining traffic state evolution index on urban arterial road, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 14, Is. 3, pp. 64–69.
40. Harsha M. M., Mulangi Raviraj H., Kulkarni V. (2022) Visualization and Assessment of the Effect of Roadworks on Traffic Congestion Using AVL Data of Public Transit, *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, Vol. 6, 28, 14 p, <https://doi.org/10.1007/s41651-022-00123-z>.
41. Hurst H. E. C.M.G., M.A., D.Sc., F.Inst.P. (1956) The Problem of Long-Term Storage In Reservoirs, *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, Vol. 1, Is. 3, pp. 13–27, <https://doi.org/10.1080/02626665609493644>.
42. 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>.
43. Kerimov M., Marusin A., Marusin A., Danilov I. (2020) Methodological aspects of building mathematical

model to evaluate efficiency of automated vehicle traffic control systems, *Transportation Research Procedia*, Vol. 50, pp. 253–261, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.031>.

44. 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.

45. Li L., Li Z., Zhang Y., Chen Y. (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, pp. 443–447, <https://doi.org/10.1109/CSO.2012.103>

46. Li X., Shang P. (2007) Multifractal classification of road traffic flows, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 31, Is. 5, pp. 1089–1094, <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.10.109>

47. Meng Q., Khoo H. L. (2009) Self-Similar Characteristics of Vehicle Arrival Pattern on Highways, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 135, Is. 11, pp. 864-872, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:11\(864\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:11(864)).

48. Nishidha T., Janardhanan P. (2013) Traffic Analysis Using Discrete Wavelet Transform and Bayesian Regression, *Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*, Tiruchengode, India, p. 31661.

49. 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>.

50. Shang P., Wan M., Kama S. (2007) Fractal nature of highway traffic data, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 54, Is. 1, pp. 107–116, <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2006.07.017>.

51. 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, <http://dx.doi.org/10.2478/tj-2020-0002>.

52. Wang S., Ahmed N. U., Yeap T. H. (2019) Optimum Management of Urban Traffic Flow Based on a Stochastic Dynamic Model, *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems*, Vol. 20, No.12, pp. 4377–4389, <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2884463>.

53. Xomidov A., Tursunboyev M. (2022) Eliminating congestion on internal roads, *Universum*, Vol. 2(95), available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13079>, (accessed: 20.11.2022).

54. Yang H., Zhang Y., Zhang L., Xu T. (2019) Research on Floating Car Speed Short-Time Prediction with Wavelet-ARIMA Under Data Missing, *International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety GITSS*, 2017, Changchun, China, Vol. 503, pp. 289–298, https://doi.org/10.1007/978-981-13-0302-9_29.

55. Ye C., Li H., Xu G. (2014) An Early Warning Model of Traffic Accidents Based on Fractal Theory, *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* October 8-11, 2014. Qingdao, China, pp. 2280–2285.

References

1. Anan'eva, E. Yu. (2021) [Information transport services: a tool for overcoming congestion]. *Mir dorog* [World of Roads]. Vol. 139, pp. 102–104. (In Russ.).
2. Andronov, R. V., El'kin, B. P., Genze, D. A. (2015) [The concept of congestion and the formation of queues at a regulated 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.).
3. 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. (In Russ.).
4. 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* [World of Transport]. Vol. 17(83), pp. 272–281. (In Russ.).
5. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. (2021) [Fourier Analysis of the Traffic Flow Intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4, pp. 46–59. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-4-46>. (In Russ.).
6. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vaskina, E. V. (2022) [Application of the Wavelet Analysis to Research the Traffic Flow Intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4, pp. 72–87. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-72>. (In Russ.).
7. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vaskina, E. V. (2022) [Application of the Hurst Index to Research

the Traffic Flow Intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 68–81. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-2-68>. (In Russ.).

8. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. (2021) [Using the Complex of Photo and Video Recording of Traffic Violations to Identify Deterministic and Stochastic Components of the Traffic Flow Intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 3, pp. 61–71. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-3-61>. (In Russ.).

9. 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. (In Russ.).

10. Vlasov, A. A., Gorelov, A. M. (2014) [Traffic light object management in traffic congestion conditions]. *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. (In Russ.).

11. Gayazova, N. T., Zaripov, R. R. (2008) [Stochastic estimation of the rate of pathological tremor of a person using the Hurst index]. *Vestnik Tatarskogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo univrsiteta* [Bulletin of the Tatar State Humanitarian Pedagogical University]. Vol. 4(15), pp. 18–20. (In Russ.).

12. Generalova, A. A., Simonov, A. S. (2009) [Investigation of the fracture surface of a ball bearing of a car using fractal theory]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo». Penzenskij gosudarstvennyj universitet* [Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”. Penza State universitet]. Vol. 2, pp. 125–126. (In Russ.).

13. Golovnin, O. K., Stolbova, A. A. (2019) [Wavelet analysis as a tool for studying traffic characteristics for intelligent transport systems in conditions of missing data]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo instituta informatiki i avtomatizacii Rossijskoj akademii nauk. Iskusstvennyj intellekt, inzheneriya dannyh i znaniy* [Proceedings of the St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. Artificial intelligence, data and knowledge engineering]. Vol. 18, No. 2, pp. 326–353. (In Russ.).

14. Deshcherevskij, A. V. (1997) *Fraktal'naya razmernost', pokazatel' Hersta i ugol naklona spektra vremennogo ryada* [Fractal dimension, Hurst exponent, and the angle of inclination of the time series spectrum]. Moscow: Institute of Seismology of the O.Y. Schmidt Joint Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, 34 p.

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

17. 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 Irkutsk State Technical University]. Vol. 1(108), pp. 116–123. (In Engl.).

18. Klevcov, S. I. (2013) [Using time series models for short-term forecasting of changes in object parameters in a microcontroller]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences]. Vol. 11(148), pp. 194–201. (In Russ.).

19. Kornev, A. V., Shaburov, S. S. (2021) [Traffic congestion. Options for solving the problem]. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (IrGTU)* [Youth Bulletin of Irkutsk State Technical University (IrSTU)]. Vol. 1, pp. 58–63. (In Russ.).

20. Kostarev, A. F., Postanogov, I. C. (2016) [Using bigdata technologies to analyze traffic flows based on photofixation flow data]. *Vestnik Nauchnogo centra bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of the Scientific Center for Life Safety]. Vol. 2 (28), pp. 30–35. (In Russ.).

21. Makareckij, E. A., Nguen Liem Hieu (2006) [Investigation of Fourier and wavelet spectra of vehicle images]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. Vol. 12, pp. 80–81. (In Russ.).

22. Mandelbrot, B. B. (1983) *Fraktal'naya geometriya prirody* [The Fractal Geometry of Nature]. San-Francisco: W.H. Freeman, 468 p.

23. Medres, E. E., Golov, E. V., Babenko, T. I. (2017) [Factors affecting the uniformity of road transport in conditions of saturated traffic flows]. *Transportnoe delo v Rossii* [Transport business in Russia]. Vol. 2, pp. 89–90. (In Russ.).

24. Miheev, S. V. (2018) [Network-centric management based on micro- and macro-models of transport flows]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. Vol. 1(31), pp. 19–24. <https://doi.org/10.15827#0236-235X.031.1.019-024>. (In Russ.).

25. Naumova, N. A. (2022) [Modeling and optimization of traffic light regulation parameters at the intersection of multi-lane highways]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. Vol. 8, pp. 71–76. (In Russ.).
26. Nesterenko, D. H. [Investigation of the influence of the structure of the traffic flow on the efficiency of the use of a section of the road network]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 90–96. <https://doi.org/10.25198#2077-7175-2019-1-90>. (In Russ.).
27. Evtheeva, A. S. et al. (2018) [Inspection of the city transport network using the measuring complex]. *Transportnoye delo Rossii* [Transport business of Russia]. Vol. 1, pp. 132–134. (In Russ.).
28. Andronov, R. V. et al. (2019) [Determination of the intensity of traffic flows using a system of plug maps]. *Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport structures. Ecology]. Vol. 4, pp. 5–12. (In Russ.).
29. Petrov, V. V., Kashtalinskij, A. S. (2013) [The effect of stochasticity on the degree of saturation and delay of the transport flow]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. Vol. 4(39), pp. 29–31. (In Russ.).
30. Shepelev, V. D., Al'metova, Z. V., Korzan, M. A., Charbadze, I. G. (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. <https://doi.org/10.14529/em200218>. (In Russ.).
31. Sil'yanov, V. V. (1977) *Teoriya transportnyh potokov v proektirovanii dorog i organizacii dvizheniya* [Theory of traffic flows in road design and traffic management]. Moscow: Transport, 303 p.
32. Francev, S. M. (2017) [Algorithm for calculating the intensity of traffic flow based on fixing the amplitude of the acoustic radiation of the car]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. Vol. 2, 6 p. (In Russ.).
33. Shchegoleva, N. V., Gusev, V. A., Vorozhejkin, M. A. (2016) [The formation of congestion in the traffic flow]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve* [Technical regulation in transport construction]. Vol. 5(19), pp. 25–28. (In Russ.).
34. 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).
35. Ashtari, A. H., Nordin, Md. J., Kahaki, S. M. M. (2011) A New Reliable Approach for Persian License Plate. *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics 17-19 July 2011*, Bandung, Indonesia.
36. Black, W. R. (2003) *Transportation: A geographical analysis*. New York: The Guilford Press, 408 p.
37. 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(10 p). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1111/1/012013>. (In Engl.).
38. Fornalchyk, Ye., Vikovych, I., Royko, Yu., Hrytsun, O. (2021) Improvement of Methods for Assessing the Effectiveness of Dedicated Lanes for Public Transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1#3 (109), pp. 29–37. (In Engl.).
39. Gong, Jin-li1, Peng, Xian-wu (2014) Determining traffic state evolution index on urban arterial road. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. Vol. 14, Is. 3, pp. 64–69. (In Engl.).
40. Harsha, M. M., Raviraj, H. Mulangi, Kulkarni V. (2022) Visualization and Assessment of the Effect of Roadworks on Traffic Congestion Using AVL Data of Public Transit. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*. Vol. 6. No. 28, 14 p. <https://doi.org/10.1007/s41651-022-00123-z>. (In Engl.).
41. Hurst, H. E. (1956) The Problem of Long-Term Storage In Reservoirs. International Association of Scientific Hydrology. *Bulletin*. Vol. 1. Iss. 3, pp. 3–27. <https://doi.org/10.1080#02626665609493644>. (In Russ.).
42. 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.).
43. Kerimov, M., Marusin, A., Marusin, A., Danilov, I. (2020) Methodological aspects of building mathematical model to evaluate efficiency of automated vehicle traffic control systems. *Transportation Research Procedia*. Vol. 50, pp. 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.031>. (In Engl.).
44. Kumar, P., Vinodh, Kumar S., Priya, L. (2023) Smart and Safety Traffic System for the Vehicles on the

Road. *IOT with Smart Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Vol. 312, pp. 509–522. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3575-6_51 (In Engl.).

45. Li, L., Li, Z., Zhang, Y., Chen, Y. (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 Engl.).

46. Li, X., Shang, P. (2007) Multifractal classification of road traffic flows. *Chaos, Solitons and Fractals*. Vol. 31, pp. 1089–1094. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.10.109> (In Engl.).

47. Meng, Q., Khoo, H. L. (2009) Self-Similar Characteristics of Vehicle Arrival Pattern on Highways. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 135. No. 11, pp. 864–872. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:11\(864\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:11(864)). (In Engl.).

48. Nishidha, T., Janardhanan, P. (2013) Traffic Analysis Using Discrete Wavelet Transform and Bayesian Regression. *Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), 2013, Tiruchengode, India*, pp. 31661. (In Engl.).

49. 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.).

50. Shang, P., Wan, M., Kama, S. (2007) Fractal nature of highway traffic data. *Computers and Mathematics with Applications*. Vol. 54, pp. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2006.07.017>. (In Engl.).

51. 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/tj-2020-0002>. (In Engl.).

52. Wang, S., Ahmed, N. U., Yeap, T. H. (2019) Optimum Management of Urban Traffic Flow Based on a Stochastic Dynamic Model. *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems*. Vol. 20. No. 12, pp. 4377–4389. (In Engl.).

53. Xomidov, A., Tursunboyev, M. (2022) Eliminating congestion on internal roads. *Universum: technical sciences: electronic scientific journal*. Vol. 2(95). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item#13079> (accessed: 20.11.2022). (In Engl.).

54. Yang, H., Zhang, Y., Zhang, L., Xu, T. (2017) Research on Floating Car Speed Short-Time Prediction with Wavelet-ARIMA Under Data Missing. *International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety GITSS, 2017, Changchun, China*, pp. 289–298. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0302-9_29. (In Engl.).

55. Ye, C., Li, H., Xu, G. (2014) An Early Warning Model of Traffic Accidents Based on Fractal Theory. *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) October 8-11, 2014. Qingdao, China*, pp. 2280–2285. (In Engl.).

Информация об авторах:

Михаил Геннадьевич Бояршинов, доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования, действительный член РАТ, 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

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

e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

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

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

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, разработка алгоритмов вычислений, проведение вычислительных работ, анализ и обсуждение результатов, формулировка выводов.

Статья поступила в редакцию: 03.03.2023; принята в печать: 01.06.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Mikhail Gennadyevich Boyarshinov, Doctor of Technical Sciences, Professor, honorary professional of higher professional education, full member of the RAT, 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

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

AuthorID: 566592, **ORCID ID:** 0000-0003-4473-6792
e-mail: vavilin@tbdd.ru

Contribution of the authors:

Boyarshinov M. G. – defining of the purpose and objectives of the study, review of literature sources, development of research methodology, analysis and discussion of results, formulation of conclusions.

Vavilin A. S. – execution of research objectives, review of literature sources, development of computational algorithms, carrying out computational work, analysis and discussion of results, formulation of conclusions.

The paper was submitted: 03.03.2023.

Accepted for publication: 01.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.