НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 656.1
DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-11

Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 5 (108). С. 93–105

Продолжительность движения автомобилей в потоке как индикатор транспортного затора

Михаил БОЯРШИНОВ

Александр ВАВИЛИН

Михаил Геннадьевич Бояршинов [1]***,***
Александр Сергеевич Вавилин [2]

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
✉ [1] *mgboyarshinov@pstu.ru.*
[1] *ORCID 0000-0003-4473-6776; Web of Science Researcher ID: ACE-0166-2022; SPIN-code: 5958-2345; Author ID: 79853.*
[2] *ORCID: 0000-0003-4473-6792; Author ID: 566592.*

АННОТАЦИЯ

Актуальность изучения транспортных заторов обусловлена необходимостью поиска научно-обоснованного критерия их формирования, развития и ликвидации с использованием современных способов обработки информации о потоках автомобилей. Целью настоящего исследования является выявление количественного критерия формирования и эволюции транспортного затора на основе детерминированной оценки времени движения отдельных автомобилей в общем потоке между рубежами контроля как случайной величины: среднего значения, моды, медианы, среднеквадратичного отклонения, показателей вариации, асимметрии и эксцесса.

Предмет исследования – закономерности эволюции перечисленных детерминированных показателей транспортных потоков, которые можно использовать для оперативного прогнозирования формирования, развития и ликвидации транспортных заторов. Исходные данные получены с помощью аппаратно-программных комплексов фиксации нарушений правил дорожного движения, установленных на городской улично-дорожной сети. В результате исследования установлено, что для одного и того же участка дороги перечисленные детерминированные показатели случайной величины существенно различаются при свободном движении автомобильного транспорта и в случае образования транспортного затора. Представляется перспективным использование среднего значения продолжительности движения автомобилей для идентификации стадий формирования, развития и исчезновения (ликвидации) транспортного затора. Предлагаемый показатель может служить основой для разработки механизма оценки в режиме реального времени вероятности образования транспортного затора, а также для выработки рекомендаций по оперативному реагированию транспортных служб для их предотвращения и ликвидации.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, транспортный затор, поток транспорта, интенсивность движения, продолжительность движения по дороге.

Для цитирования: Бояршинов М. Г., Вавилин А. С. Продолжительность движения автомобилей в потоке как индикатор транспортного затора // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 5 (108). С. 93–105. DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-11.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

© Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., 2023

ВВЕДЕНИЕ

Изучение факторов и последствий образования заторных ситуаций, математическое, имитационное или вычислительное моделирование и, на этой основе, прогнозирование образования транспортных заторов, является чрезвычайно актуальной проблемой, не получившей должного решения к настоящему времени ни в отечественных, ни в зарубежных исследованиях. До недавнего времени само понятие заторной ситуации авторами исследований трактовалось достаточно вольно, и это отмечается в публикациях [1–3] и других. Следует отметить, что нормативное отечественное определение понятия «транспортного затора» появилось лишь в ГОСТ Р 55691–2013/ISO/TS 15624:2001. Следствием неоднозначности в определении «заторной ситуации» стало отсутствие к настоящему времени корректной количественной шкалы для классификации, фиксации и измерения этого феномена, определения времени начала, продолжительности и окончания транспортного затора. Как результат, отсутствует возможность автоматизированного определения места и времени образования скопления транспортных средств («пробки») на улично-дорожной сети современного города.

Анализ потоков транспортных средств оперирует показателями равномерности и скорости движения транспорта [4; 5], загруженности улично-дорожной сети [6–8], часовой и суточной интенсивности потока автомобилей [9–13], а также детерминированными характеристиками случайных величин [14–16]: средним значением, модой, медианой, дисперсией, среднеквадратичным отклонением, показателями вариации, асимметрии и эксцесса и другими. Для проведения натурных обследований с целью повышения эффективности использования дорог, а также предупреждения заторовых ситуаций, снижения аварийности и негативного воздействия на окружающую среду применяются непосредственное наблюдение и изучение видеозаписей[1] движения автомобилей в транспортном потоке, используются передвижные дорожные лаборатории [17], беспилотные летательные аппараты [18], средства спутникового мониторинга [19; 20], регистраторы акустического излучения транспортных средств [21], встроенные (интрузивные) датчики на дорогах, транспортные средства-зонды, оснащённые акселерометрами, ультразвуковыми излучателями и приёмниками глобальной навигационной спутниковой системы, программно-технические комплексы видеофиксации нарушений правил дорожного движения [22–25]. Помимо этого требуются эффективные технологии сбора, хранения и обработки сведений о ситуации на дорогах [26; 27], высокопроизводительные алгоритмы обработки и анализа данных на основе многомерного масштабирования, методов статистического, регрессионного, кластерного, гармонического, вейвлет- и других видов анализа, что позволяет собирать и изучать в режиме реального времени информацию о развитии во времени основных показателей движения транспортных потоков по улично-дорожной сети для различных временных интервалов, на отдельных участках дорог и их пересечений, формировать матрицы корреспонденций и так далее.

Проблема транспортных заторов является приоритетной для транспортной системы [10; 28; 29]. Причинами их образования являются общий рост числа автомобилей [17], дорожно-транспортные происшествия [30], уменьшение пропускной способности дороги [31–33], повышение плотности автомобилей на участке дороги [34], увеличение грузового автомобильного парка и объёма перевозок [35; 36], наличие нерегулируемых пересечений, въездов и пешеходных переходов [37], установка светофоров с большим количеством фаз [38], несогласованность их работы [39], строительно-ремонтные работы [40], нерациональная организация работы пунктов взимания платы за проезд [41], человеческий фактор [26; 37; 42] и другие факторы.

Транспортные заторы ведут к снижению скорости движения и увеличению времени в пути [43], повышению расхода топлива и стоимости перевозок [12], увеличению загрязняющих выбросов в окружающую среду, аварийности и уровня шума, опасностям для здоровья [26], снижению производительности труда и качества транспортного обслуживания, безопасности участников дорожного движения [44], ухудшению психологического состояния водителей и пассажиров.

Для выявления наличия транспортного затора и определения степени загруженности

[1] ГОСТ 32965-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учёта интенсивности движения транспортного потока. – М.: Стандартинформ, 2019. – 18 с. [Электронный ресурс]: https://docs.cntd.ru/document/1200132267. Доступ 17.04.2023.

дорожной сети в ряде случаев используется среднее время прохождения участка дороги, определяемого с помощью программного обеспечения автомобильных навигаторов[2] [29]. Поскольку транспортные потоки как объекты исследования обладают стохастичностью, в [45; 46] рассмотрено влияние случайного характера транспортного потока на степень насыщенности регулируемых пересечений и продолжительность задержки транспортных средств. Стохастическая модель системы технических средств мониторинга и контроля соблюдения правил дорожного движения представлена в [47] для оценки эффективности управления системой обеспечения безопасности дорожного движения. Модель [48] регулируемого перекрёстка с несколькими случайными транспортными потоками использована при расчёте светофорного регулирования для снижения вероятности возникновения заторов на улично-дорожной сети.

На участках дорожной сети с высокой интенсивностью и волатильностью трафика наиболее эффективны адаптивные подходы [35; 49], основанные на анализе транспортной загруженности и позволяющие изменять фазы работы светофора в режиме реального времени, автоматически подстраиваться под транспортный поток, уменьшать транспортные задержки, время в пути и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Необходимость разработки методики управления транспортными потоками, основанной на мониторинге и прогнозировании очередей транспортных средств в связи с повышенной загрузкой улично-дорожной сети обоснована в [50]. Внедрение интеллектуальных транспортных систем [51] направлено на снижение и ликвидацию транспортных заторов за счёт регулирования движения транспортных средств. Теория когнитивных транспортных систем [52] предполагает внедрение механизмов постоянного исследования и самообучения как самих транспортных систем, так и транспортной инфраструктуры за счёт автоматизированного сбора данных о дорожно-транспортных происшествиях, выполнения их обработки в режиме реального времени для оперативного реагирования на изменение транспортной ситуации.

[2] Как работают Яндекс.Пробки. [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/company/technologies/yaprobki. Доступ 15.11.2022.

В настоящее время в РФ понятие транспортного затора закреплено стандартом[3]: «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». Следует отметить преимущественно качественный характер этого определения и отсутствие в настоящего время количественного показателя, позволяющего оценивать этапы существования транспортного затора.

Следует ожидать, что при формировании, эволюции и ликвидации транспортного затора в результате дорожно-транспортного происшествия, ремонта проезжей части, нарушения скоростного режима или 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 рациональные действия по управлению транспортными потоками для исключения негативных последствий образования транспортных заторов.

Для корректного определения специфических значений транспортного потока, указывающих на формирование (эволюцию, ликвидацию) транспортного затора, необходимо:

• собрать данные о «нормальных» показателях транспортного потока на исследуемом участке (плотность, интенсивность и скорость потока транспорта, время проезда и другие показатели, характерные для свободного движения автомобилей);

• определить аномальные (критические) значения основных параметров транспортного потока при формировании, развитии и ли-

[3] 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. [Электронный ресурс]: https://docs.cntd.ru/document/1200107272. Доступ 28.02.2023.

Рис. 1. Участок дороги, выбранный для исследования; маркеры указывают рубежи наблюдения, стрелка – направление движения [разработано авторами с использованием ресурсов 2GIS ООО «ДубльГИС» [Электронный ресурс]: https://2gis.ru/perm. Доступ 28.02.2023.].

квидации транспортного затора, когда наблюдается затруднённое движение транспорта;

• выполнить сопоставление и анализ показателей транспортного потока при свободном движении автомобильного транспорта и в случае транспортного затора;

• сформировать критерии выявления аномальных значений показателей транспортного потока для оценки вероятности образования дорожного затора.

Предлагаемый авторами научно обоснованный количественный показатель, позволяющий классифицировать типы заторных ситуаций, фиксировать факт образования транспортного затора, время начала, продолжительность и его окончание, будет полезен для предупреждения и оперативного выявления условий формирования заторной ситуации при движении автомобилей по уличнодорожным сетям, послужит основой для выработки рекомендаций по оперативному реагированию транспортных служб для их предотвращения или ликвидации.

Учитывая вышеперечисленное, *целью* настоящего исследования является выявление количественного показателя формирования и эволюции транспортного затора на основе анализа случайных величин продолжительностей движения между контрольными рубежами всех автомобилей в наблюдаемом транспортном потоке на основе определения детерминированных оценок времени их движения, в том числе среднего значения, моды, медианы, среднеквадратичного отклонения, показателей вариации, асимметрии и эксцесса, с использованием *современного математического аппарата статистического анализа.* Целесообразно сопоставить между собой эти детерминированные показатели с точки зрения эффективности выявления транспортного затора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Интенсивность потока транспортных средств

Исследование формирования и эволюции транспортного затора выполнялось на участке дороги длиной 2,2 км, свободном от перекрёстков (рис. 1). Для выбранного участка характерно спонтанное образование транспортного затора, имеющее место, как правило, во второй половине дня. Наблюдения проводились в течение 8 мая (в течение суток транспортный затор отсутствовал) и 9 мая 2022 года (транспортный затор зафиксирован в период с 20:00 до 22:00). Исходные данные для исследования получены с помощью аппаратно-программных комплексов фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения.

На рис. 2 представлены суточные зависимости интенсивности транспортного потока на рассматриваемом участке дороги на 8 мая (рис. 2, *а* – входной рубеж) и 9 мая (рис. 2, *б* – входной, *в* – выходной рубежи). Отсутствуют принципиальные различия в поведении интенсивности транспортного потока при отсутствии транспортного затора 8 мая и его наличии 9 мая в интервале от 20:00 (1200 мин) до 22:00 (1320 мин).

Аномалии в поведении интенсивности автомобильного потока, которые могли бы указать на формирование транспортного затора, не выявлены. Принципиальные отличия, которые могли бы указывать на наличие или отсутствие транспортного затора, на распределении плотностей вероятностей значений интенсивности потока в указанные дни на контрольных рубежах рассматриваемого участка дороги (рис. 3), также отсутствуют.

Детерминированные показатели случайных функций интенсивности транспортного

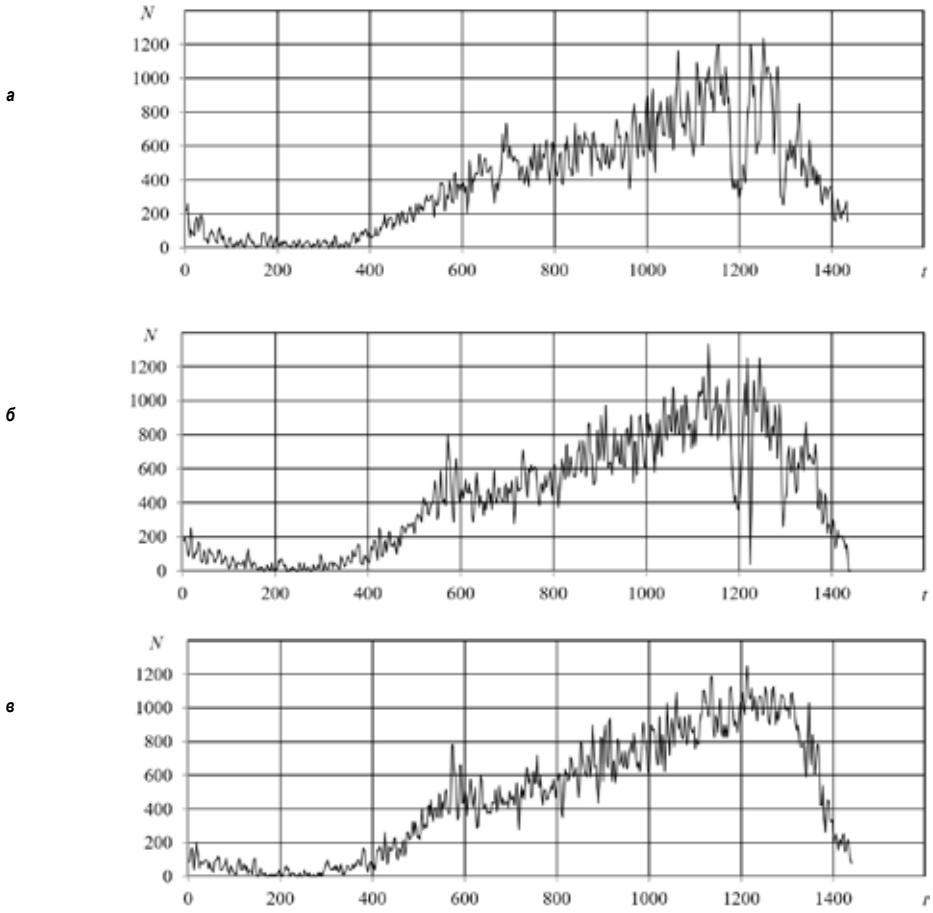

Рис. 2. Зависимости интенсивности транспортного потока N (авт./час) от времени t (мин) 8 мая (а – входной рубеж) и 9 мая 2022 года (б – входной, в – выходной рубежи) [разработано авторами].

потока 8 и 9 мая (табл. 1), также не позволяют обнаружить признаки транспортного затора. Таким образом, анализ функции интенсивности транспортного потока на рассматриваемом участке дороги не позволил различить дорожные ситуации с наличием и отсутствием транспортного затора.

Продолжительность движения автомобилей в потоке транспортных средств

Целесообразно рассмотреть другой показатель движения потока автомобилей, имеющий отношение к нормативному определению транспортного затора.

Таблица 1

Статистические показатели интенсивности транспортного потока 8 и 9 мая 2022 года [разработано авторами]

Показатели интенсивности транспортного потока	Дата		
	08 мая	09 мая	
	Входной рубеж	Входной рубеж	Выходной рубеж
Общее количество автомобилей за сутки, ед.	9518	10591	11312
Среднее значение, авт./час	396,58	441,29	471,33
Медиана, авт/час	372,00	438,00	456,0
Среднеквадратичное отклонение, авт./час	304,10	325,98	353,22
Коэффициент вариации, %	76,68	73,87	74,94
Асимметрия	0,53	0,30	0,22
Эксцесс	-0,56	-1,03	-1,27

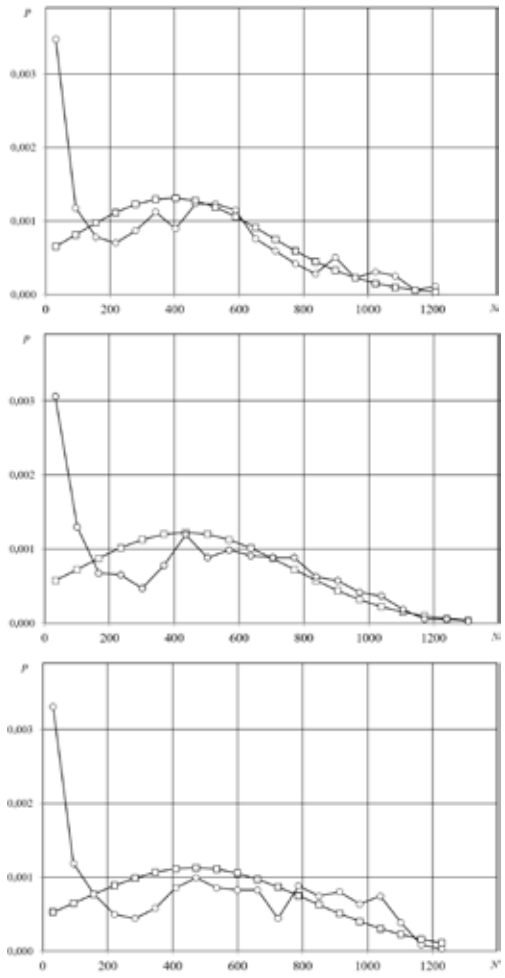

Рис. 3. Распределения плотностей p вероятности интенсивности N транспортного потока 8 мая (а – входной рубеж) и 9 мая 2022 года (б – входной, в – выходной рубежи); экспериментальные (–o–) и теоретические (– ▫ –) кривые распределений [разработано авторами].

Из определения следует, что количественной основой для построения критерия транспортного затора может выступать скорость движения автомобилей в транспортном потоке, изменяющаяся от максимально разрешённого значения вплоть до нуля, то есть до полной остановки. Определить истинную, или мгновенную скорость автомобиля в каждый момент времени без применения специальных технических средств в современных условиях невозможно.

Поскольку аппаратно-программные комплексы фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения позволяют фиксировать государственный регистрационный знак (то есть идентифицировать конкретный автомобиль), моменты начала и окончания его перемещения по исследуемому участку, это позволяет определять среднюю скорость движения каждого автомобиля, движущегося между контрольными рубежами.

Средняя скорость v_i^{cp} и время T_i проезда *i*-го автомобиля между контрольными рубежами по информативности эквивалентны и связаны соотношением $v_i^{cp} = S / T_i$, где S – расстояние между рубежами контроля. Однако, с точки зрения оперативности работы вычислительной части комплекса целесообразно ограничиться определением времени T_i и не загружать процессор вычислением v_i^{cp}.

На рис. 4 показана зависимость продолжительности T_i движения между рубежами контроля отдельных автомобилей от момента времени *t* их появления в начале участка в период с 0:00 до 24:00 (данные получены с комплекса фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения за 9 мая 2022 года). Резкое возрастание продолжитель-

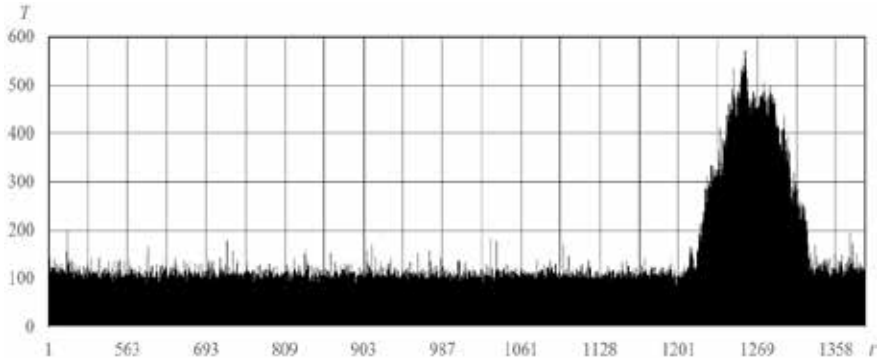

Рис. 4. Зависимость продолжительности T_i (с) движения отдельных автомобилей от момента времени t (мин) появления автомобилей в начале участка в течение суток 9 мая 2022 года [разработано авторами].

ности движения автомобилей в период с 20:00 до 22:00 отражает образование транспортного затора на дороге.

Продолжительности T_i движения отдельных автомобилей можно рассматривать как функцию времени t, представляющую собой временной ряд, что позволило выполнить гармонический анализ (Фурье-анализ) [53], вейвлет-анализ [54], исследование показателя Хёрста [55] данных, представленных на рис. 4. Результаты выполненного анализа позволяют идентифицировать аномалии, указывающие на формирование транспортного затора, однако сами подходы оказались громоздкими и неэкономичными с точки зрения вычислительных затрат.

Рациональным и экономичным оказался способ, основанный на статистическом анализе временного ряда (рис. 4) с использованием «скользящего окна».

На рис. 5 показаны средние продолжительности $T_{ср}$ движения автомобилей по исследуемому участку дороги в течение суток в зависимости от времени их появления t на начальном рубеже по данным, полученным за 8 (транспортный затор отсутствует) и 9 мая (зафиксирован транспортный затор) 2022 года. Осреднение проводилось по десятиминутным временным интервалам с последовательным сдвигом этих интервалов на одну минуту («скользящий» интервал осреднения). Формирование транспортного затора обнаруживается по быстрому росту средней продолжительности $T_{ср}$ движения автомобилей между рубежами контроля. Ликвидация транспортного затора также может быть зафиксирована по возвращению продолжительности движения автомобилей к установившемуся среднему значению, характерному для этого участка дороги.

Сопоставление рисунков 2 и 5 позволяет объяснить высокие значения $T_{ср}$ в начале суток от 0 до 3:20 часов утра, которые, по-видимому, связаны с низкой скоростью движения отдельных автомобилей в тёмное время суток и обусловлены психологическими особенностями водителей этих автомобилей, поскольку интенсивность движения автомобилей в это время незначительна.

Приведённые в табл. 2 данные позволили сравнить основные показатели распределения случайной величины продолжительности T_i движения автомобилей между рубежами контроля при отсутствии (00:00–20:00) и наличии (20:00–22:00) транспортного затора на выбранном для наблюдения участке дороги:

• среднее значение продолжительности $T_{ср}$ движения автомобилей при наличии затора увеличилось в 3,32 раза по сравнению с движением автомобилей при его отсутствии;

• мода возросла в 4,61 раза;

• 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, все показатели распределения случайной продолжительности движения автомобилей при наличии дорожного затора существенно изменились по сравнению с теми же показателями при отсутствии транспортного затора. Можно предположить, что некоторые из указанных показателей могут оказаться эффективными индикаторами, наблюдение за которыми позволит про-

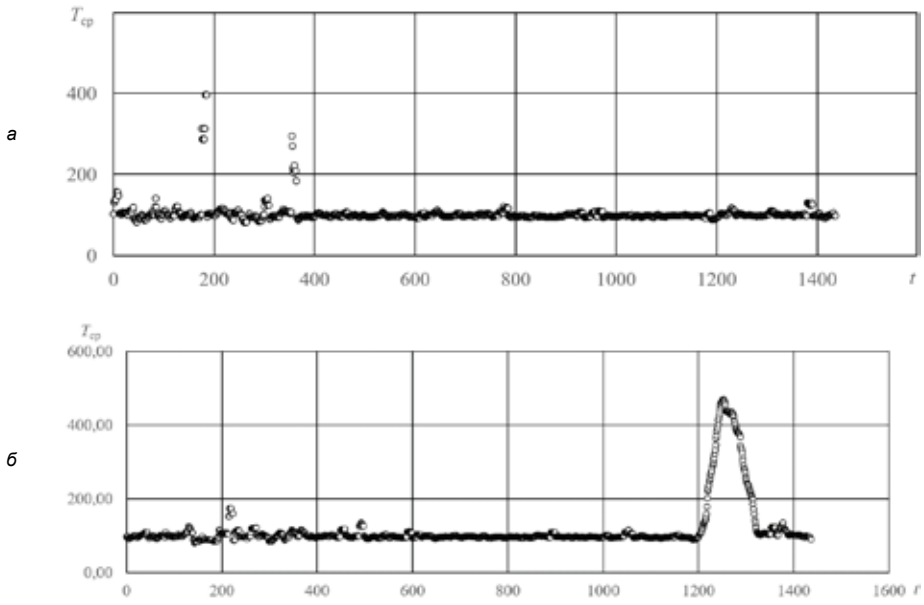

Рис. 5. Осредненные продолжительности $T_{ср}$ (с) движения автомобилей в зависимости от момента времени t (мин) появления автомобилей в начале участка 8 мая (а) и 9 мая 2022 года (б) [разработано авторами].

Таблица 2

Статистические характеристики распределения продолжительности движения автомобилей по участку дороги для различных периодов наблюдения 9 мая 2022 года [разработано авторами]

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

гнозировать формирование, развитие и ликвидацию транспортных заторов на городских улично-дорожных сетях, междугородных трассах и транспортных магистралях.

На рис. 6 показаны средние продолжительности $T_{ср}$ движения автомобилей по исследуемому участку дороги в течение суток в зависимости от времени их появления t на начальном рубеже. Осреднение проводилось по десятиминутным временным интервалам с последовательным сдвигом этих интервалов на одну минуту («скользящий» интервал осреднения). Образование заторов зафиксировано 9 мая 2021 года (рис. 6, *а*), 3 мая (рис. 6, *б*), 16 мая (рис. 6, *в*) и 27 мая 2022 года (рис. 6, *г*).

Согласно представленным данным, начало образования транспортных заторов (с 15 до 20 часов по местному времени) и их продолжительность (от 1 часа 15 минут до 3 часов 20 минут) различны. Как и ранее (рис. 5, *б*), формирование транспортного затора обнаруживается по быстрому росту средней продолжительности $T_{ср}$ движения автомобилей между рубежами контроля. Ликвидация транспортного затора также может быть зафиксирована по возвращению продолжительности движения автомобилей к установившемуся среднему значению, характерному для этого участка дороги.

На рис. 7 и 8 представлены статистические характеристики распределения случайной величины продолжительности T_i движения автомобилей между рубежами контроля: среднеквадратичное отклонение, мода, коэффициент вариации, показатель асимметрии

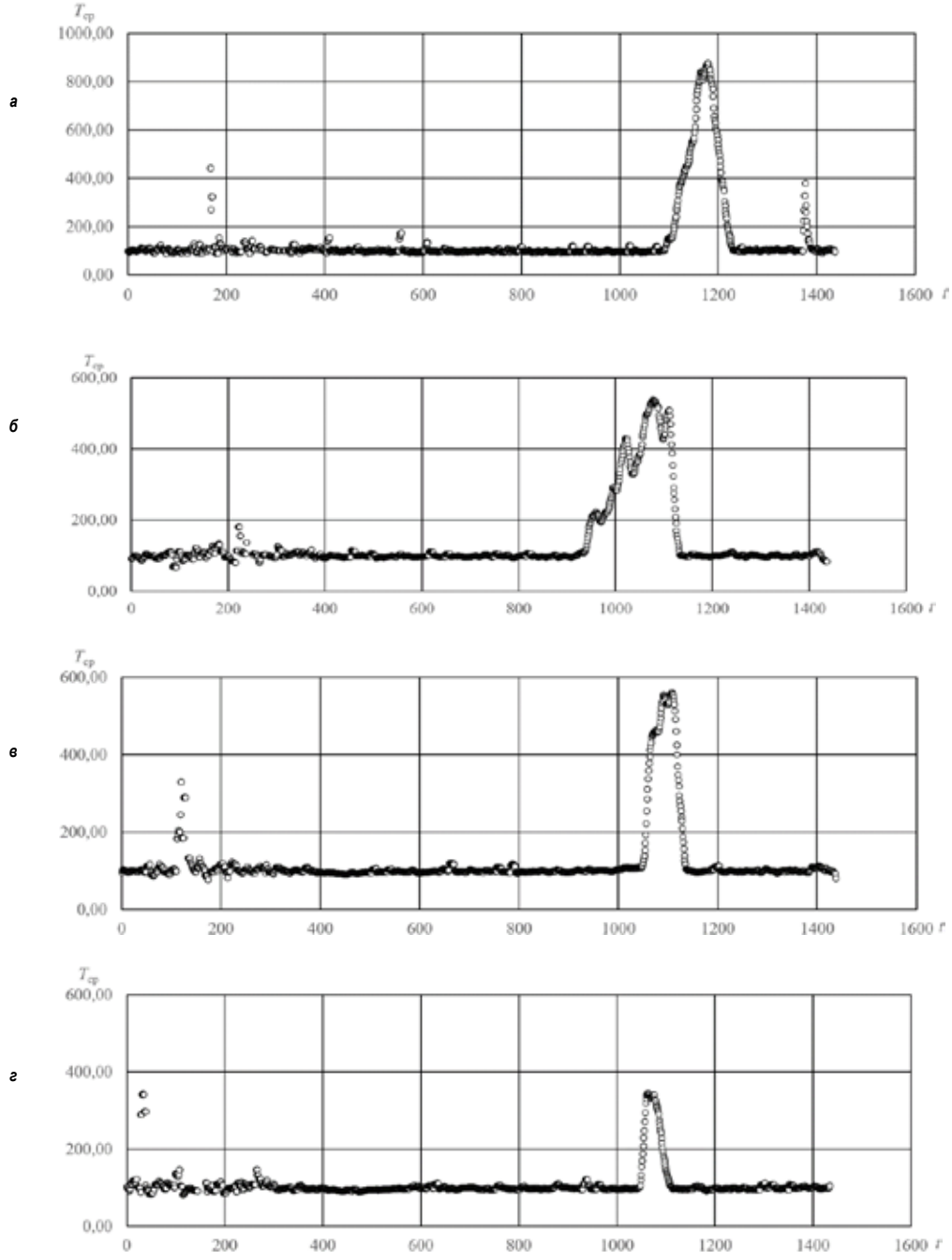

Рис. 6. Осредненные продолжительности $T_{ср}$ (с) движения автомобилей в зависимости от момента времени t (мин) появления автомобилей в начале участка 9 мая 2021 года (а), 3 мая (б), 16 мая (в) и 27 мая (г) 2022 года [разработано авторами].

и эксцесс по данным, полученным за 9 мая 2022 года.

Указанные функции определялись, как и ранее, с использованием осреднения по десятиминутным временным интервалам с последовательным сдвигом этих интервалов на одну минуту («скользящий» интервал).

Представленные результаты показывают, что фиксировать начало образования и окончание транспортного затора целесообразно именно по среднему значению $T_{ср}$ продолжительности движения автомобилей, поскольку зависимости среднеквадратичного отклонения, моды, коэффициента вариации, показателя асимметрии и эксцесса от времени t наблюдения отличаются значительным разбросом значений и не позволяют однозначно идентифицировать транспортный затор.

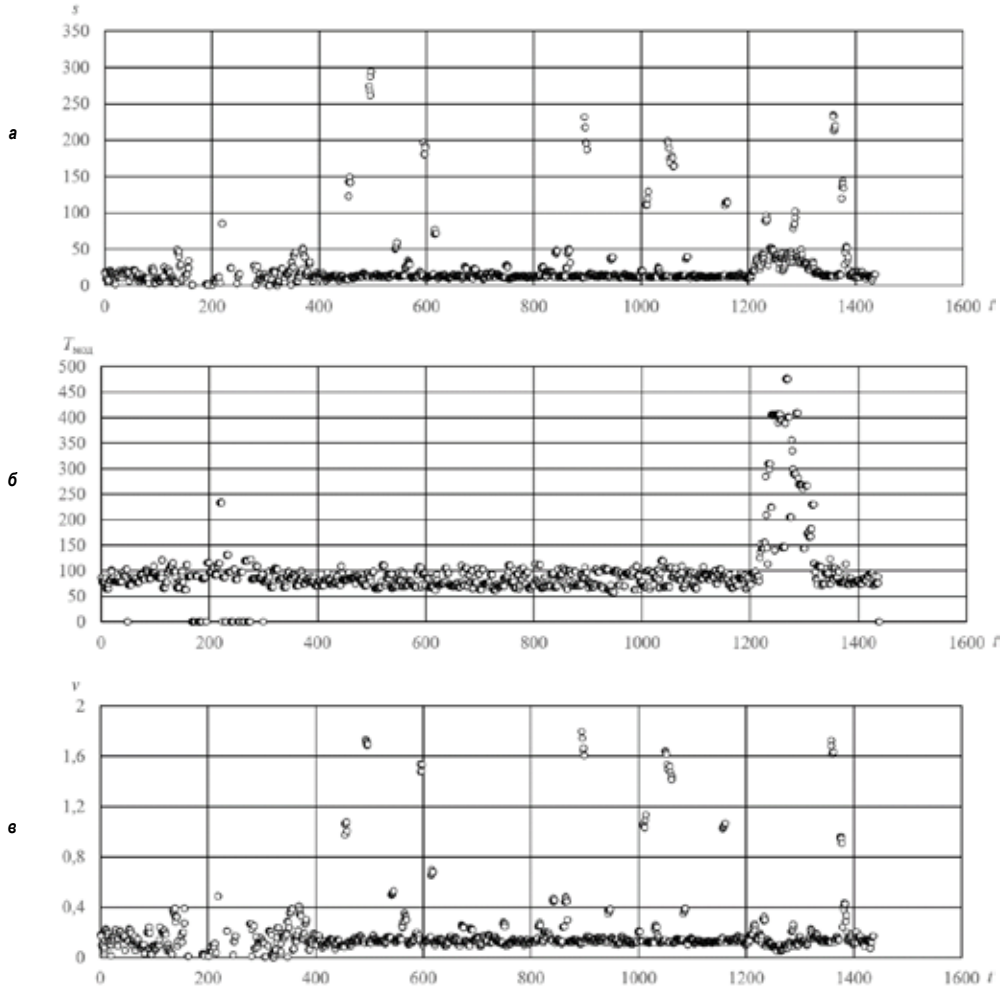

Рис. 7. Статистические характеристики распределения случайной величины T_i продолжительности движения автомобилей между рубежами контроля: среднеквадратичное отклонение (а), мода (б), коэффициент вариации (в); данные за 9 мая 2022 года [разработано авторами].

Сопоставление рис. 4 и 5, *б* также показывает, что определение начала образования транспортного затора следует производить с использованием среднего значения $T_{ср}$ продолжительности движения автомобилей, так как наблюдаемая продолжительность движения T_i каждого конкретного автомобиля зависит от его эксплуатационных характеристик, опыта, навыков вождения и индивидуальных особенностей водителей, и зависимость T_i от времени характеризуется высокой осцилляцией (рис. 4).

ВЫВОДЫ

Обработка данных, полученных с помощью аппаратно-программных комплексов фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения, позволяет получать в режиме реального времени важную и достоверную информацию о состоянии транспортного потока. В результате исследования установлено, что зависимости от времени продолжительности движения автомобилей в потоке между двумя рубежами контроля при свободном движении автомобильного транспорта и в случае образования транспортного затора существенно различаются. Предложенный авторами подход к идентификации транспортного затора целесообразно использовать для предупреждения и оперативного выявления условий формирования заторных ситуаций при движении автомобилей по улично-дорожным сетям.

Выполненное исследование может служить научным и методическим фундаментом для создания прогнозной математической, вычислительной либо имитационной модели фор-

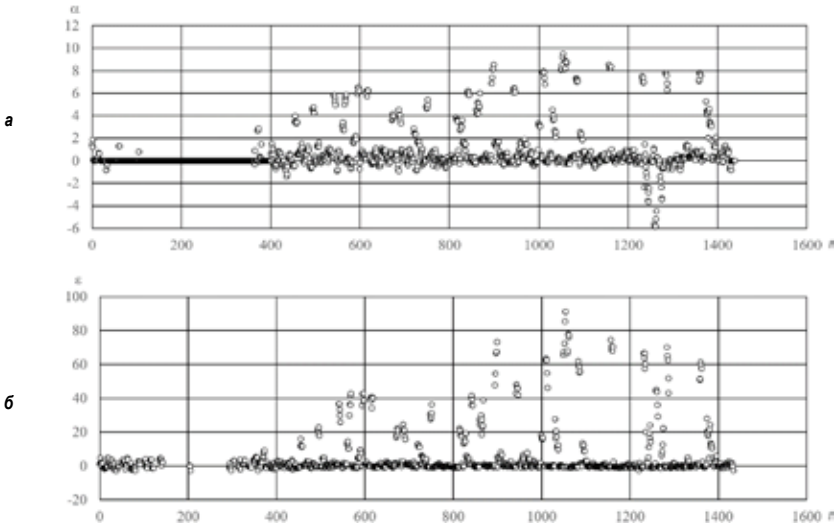

Рис. 8. Статистические характеристики распределения случайной величины T_i продолжительности движения автомобилей между рубежами контроля: показатель асимметрии (а) и эксцесс (б); данные за 9 мая 2022 года [разработано авторами].

мирования, эволюции и завершения транспортного затора с учётом основных факторов (рост числа автомобилей, дорожно-транспортные происшествия, снижение пропускной способности дороги, повышение плотности автомобилей на дороге, наличие нерегулируемых пересечений, въездов и пешеходных переходов, установка светофоров с большим количеством фаз, строительно-ремонтные работы, психологические особенности водителей и прочие факторы), которая послужит основой для дальнейшей разработки инструментария по выработке рекомендаций по оперативному реагированию транспортных служб на заторные ситуации, разработки научно обоснованных средств прогнозирования и перспективного планирования, обоснования и принятия управленческих решений по превентивным мерам ликвидации условий формирования транспортных заторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kerner B. S. The Physics of Traffic. Berlin, Springer-Verlag, 2004, 682 p. DOI: 10.1007/978-3-540-40986-1.

2. Goodwin P. Policy incentives to change behavior in passenger transport // International Transport Forum on «Transport and Energy: The Challenge of Climate Change», May 28–30 2008Leipzig, Germany. Bristol, University of the West of England, 2008, 34 p. [Электронный ресурс]: https://uwe-repository.worktribe.com/output/1012840. Доступ 28.02.2023.

3. Управление заторами в городах / Т. Уорсли, Л. Мартин, Б. Мур и др.; перевод с англ. Ботвиньевой Я.Е. и Донченко В.В. – СПб: Центр транспортных исследований, 2020. – 336 с. ISBN 978-5-91258-454-1.

4. Дуров Р. С., Варнакова Е. В., Кобзев К. О., Кобзева Н. Д. Анализ конфликтных точек, конфликтных ситуаций и расчёт интенсивности движения на заданном участке дорожной сети // Безопасность техногенных и природных систем. – 2020. – № 1. – С. 8–15. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-1-8-15.

5. Макаричев А. В., Горбачёв П. Ф., Ву Д. М, Горбачёва Е. А. // Распределение скорости движения автомобилей перед стоп-линией городского регулируемого перекрёстка // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2019. – № 85. – С. 107–116. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.107.

6. Нестеренко Д. Х. Исследование влияния структуры автотранспортного потока на эффективность использования участка улично-дорожной сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1. – С. 90–96. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-1-90.

7. Павлов С. Н., Грефенштейн А. П. Совершенствование методики оценки целесообразности введения выделенной полосы в крупных городах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (55). – С. 19–25. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44533407. Доступ 28.02.2023.

8. Фоменко Н. А., Нагуманова А. В., Алексиков С. В. Анализ транспортных потоков основных магистралей г. Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2018. – № 54 (73). – С. 121–131. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36813882. Доступ 28.02.2023.

9. Андронов Р. В., Гензе Д. А., Легостаева Е. Н., Белоусова Е. В. // Определение интенсивности транспортных потоков при помощи системы баллов карт пробок // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 4. – С. 5–12. DOI: 10.15593/24111678/2019.04.01

10. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 423 с.

11. Малахов Р. С., Алексиков С. В. Определение интенсивности движения городского транспорта методом краткосрочных наблюдений // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2017. – Вып. 49 (68). – С. 92–98. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30008873_32252480.pdf. Доступ 16.05.2023.

12. Сильянов В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с. [Электронный ресурс]:

https://vk.com/doc31736356_477456143?hash=xWEXbgkpGVc9uGG4kEXRizTeneIR9JuPZcTxzh45R6c. Доступ 16.05.2023.

13. Стасенко Л. Н., Омурбеков Ч. О., Сталбекова Э. С. Оценка часовой интенсивности движения // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры. – 2018. – № 1 (59). – С. 5–13. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35207236_65233437.pdf. Доступ 16.05.2023.

14. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 394 с. ISBN 5-02-014125-9.

15. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Математическая статистика. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 352 с. ISBN 978-5-397-04141-6.

16. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

17. Евтеева А. С., Андреев К. П., Шемякин А. В., Терентьев В. В. Обследование городской транспортной сети с применением измерительного комплекса // Транспортное дело России. – 2018. – № 1. – С. 132–134. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_32851332_44693124.pdf. Доступ 16.05.2023.

18. Evtiukov, S. A., Evtiukov, S. S., Kurakina, E. V. Smart Transport in road transport infrastructure. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 832 (2020), p. 012094. DOI: 10.1088/1757-899X/832/1/012094.

19. Тестешев А. А., Микеладзе Т. Г. Исследование транспортных потоков на улицах с нерегулярным движением методом дистанционного спутникового мониторинга // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 4. – С. 51–57. DOI: 10.15593/24111678/2019.04.06.

20. Fornalchyk, Ye., Vikovych, I., Royko, Yu., Hrytsun, O. Improvement of Methods for Assessing the Effectiveness of Dedicated Lanes for Public Transport. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, Vol. 1, No. 3 (109), pp. 29–37. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225397.

21. Францев С. М. Алгоритм вычисления интенсивности транспортного потока на основе фиксации амплитудной величины акустического излучения автомобиля // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. – 6 с. [Электронный ресурс]: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_50_Francev.pdf_6c26dfc023.pdf. Доступ 16.05.2023.

22. Потехин А. С., Стрельников А. В. Методика оценки транспортного потока на перекрёстке по данным видеонаблюдения // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 129–134. DOI: 10.17587/it.23.129-134.

23. Шумков А. Г., Бояршинов М. Г., Васькина Е. В. Определение параметров транспортного потока с использованием данных камер видеофиксации нарушений правил дорожного движения // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 28–29 ноября 2019 г. – Омск, 2019. – С. 291–295. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42386884_34467599.pdf. Доступ 19.05.2023.

24. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. 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, 2021, Vol. 1111, 012013 (10 p). DOI: 10.1088/1757-899X/1111/1/012013.

25. 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. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-3-61.

26. Shepelev, V., Aliukov, S., Nikolskaya, K., Das, A., Slobodin, I. The use of multi-sensor video surveillance system to assess the capacity of the road network. Transport and Telecommunication, 2020, Vol. 21 (1), pp. 15–31. DOI: 10.2478/ttj-2020-0002.

27. Singh, V., Upadhyay, A., Kumar, A. Integrated Sensor-Based Approach for Traffic Congestion Prediction Using Probe Vehicle. In: Sil, A., N. Kontoni, D. P., Pancharathi, R. K. (eds.). Recent Trends in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, Vol. 274, Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4055-2_64.

28. Владимиров С. Н. Транспортные заторы в условиях мегаполиса // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – Т. 3. – № 1 (19). – С. 77–84. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22296853_20177132.pdf. Доступ 16.05.2023.

29. Лобанов Е. М. Транспортная планировка городов. – М.: Транспорт, 1990. – 239 с. ISBN 5-277-00375-4.

30. Kumar, P., Vinodh Kumar, S., Priya, L. Smart and Safety Traffic System for the Vehicles on the Road. IOT with Smart Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2023, Vol. 312. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-3575-6_51.

31. Корнев А. В., Шабуров С. С. Транспортные заторы. Варианты решения проблемы // Молодёжный вестник ИрГТУ. – 2021. – Т. 11. – № 1. – С. 58–63. [Электронный ресурс]: http://xn – b1agjigi1ai.xn – p1ai/journals/2021/01/articles/09. Доступ 19.05.2023.

32. 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. [Электронный ресурс]: http://trts.esrae.ru/38–205. Доступ 19.05.2023.

33. Xomidov, A., Tursunboyev, M. Eliminating congestion on internal roads. Universum: технические науки: электрон. науч. журн. – 2022. – Vol. 2 (95). – [Электронный ресурс]: https:/#7universum.com/ru/tech/archive/item#13079. Доступ 20.11.2022.

34. Black, W. R. Transportation: A geographical analysis. New York: The Guilford Press, 2003, 408 p. ISBN 1-57230-848-6.

35. Шамлицкий Я. И., Охота А. С., Мироненко С. Н. Сравнение адаптивного и жёсткого алгоритмов управления дорожным движением на базе имитационной модели в среде ANYLOGIC // Программные продукты и системы. – 2018. – № 2. – С. 403–408. DOI: 10.15827/0236-235X.031.3.632-635.

36. Sathiyaraj, R., Bharathi, A. An efficient intelligent traffic light control and deviation system for traffic congestion avoidance using multiagent system. Transport, 2020, Vol. 35, No 3, pp. 327–335. DOI: https://doi.org#10.3846/transport.2019.11115.

37. 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. DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-272-281.

38. 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. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23136607_69272286.pdf. Доступ 19.05.2023.

39. 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. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21915875_27397897.pdf. Доступ 19.05.2023.

40. Harsha, M. M., Raviraj, H. Mulangi, Vrunda Kulkarni. Visualization and Assessment of the Effect of Roadworks on Traffic Congestion Using AVL Data of Public Transit. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 2022, Vol. 6, No. 28, 14 p. DOI: https://doi.org#10.1007/s41651–022–00123-z.

41. Ласкин М. Б., Талавиря 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. 272–78. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47333761_43499734.pdf. Доступ 19.05.2023.

42. Басков В. Н., Игнатов А. В. Зависимость риска возникновения транспортного затора от параметров транспортного потока // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – № 35. – С. 1–5. [Электронный ресурс]: https://e-koncept.ru/2015/95553.htm. Доступ 19.05.2023.

43. Aftabuzzaman, Md. Measuring Traffic Congestion – A Critical Review. Proceedings of the 30th Australasian Transport Research Forum, China, February 2007, 16 p. [Электронный ресурс]: https:// australasiantransportresearchforum.org.au/wp-content/uploads#2022#03#2007_Aftabuzzaman.pdf. Доступ 10.11.2022.

44. Yasir, R. M., Nower, N., Shoyaib, M. Traffic Congestion Prediction Using Machine Learning Techniques. DOI: https://doi.org#10.48550/arXiv.2206.10983.

45. 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. [Электронный ресурс]: http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2016/01/articles/14. Доступ 19.05.2023.

46. Петров В. В., Кашталинский А. С. Влияние стохастичности на степень насыщения и задержку транспортного потока // Транспорт Урала. – 2013. – № 4 (39). – С. 29–31. [Электронный ресурс]: https://c.twirpx.one/file/1697678/. Доступ 19.05.2023.

47. Kerimov, M., Evtiukov, S., Marusin, A. Model of multi-level system managing automated traffic enforcement facilities recording traffic violations. Transportation Research Procedia, 2020, Vol. 50, pp. 242–252. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.030.

48. Наумова Н. А. Моделирование и оптимизация параметров светофорного регулирования при пересечении многополосных автомобильных дорог // Современные наукоёмкие технологии. – 2022. – № 8. – С. 71–76. [Электронный ресурс]: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39269. Доступ 19.05.2023.

49. Плотников А. М. Управление безопасностью дорожного движения на одноуровневых перекрёстках. Теория и практика. – СПб.: ООО «Экспертные решения», 2014. – 404 с. ISBN 978-5-9905189-4-0.

50. Лагерев Р. Ю., Михайлов А. Ю., Лагерева С. В. Методика предупреждения сетевых транспортных заторов // Вестник НЦБЖД. – 2010. – № 5. – С. 82–88. [Электронный ресурс]: https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_85705.pdf. Доступ 19.05.2023.

51. Zhankaziev, S., Gavrilyuk, M., Morozov, D., Zabudsky, A. Scientific and methodological approaches to the development of a feasibility study for intelligent transportation systems. Transportation Research Procedia, 2018, Vol. 36, pp. 841–847. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.068.

52. Malygin, I., Komashinskiy, V., Korolev, O. Cognitive technologies for providing road safety in intelligent transport systems. Transportation Research Procedia, 2018, Vol. 36, pp. 487–492. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.134.

53. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Фурье-анализ интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 4. – С. 46–59. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-4-46.

54. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Васькина Е. В. Применение вейвлет-анализа для исследования интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 4. – С. 72–87. DOI: doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-72.

55. 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. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-68.

Информация об авторах:

Бояршинов Михаил Геннадьевич *– доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, почётный работник ВПО РФ, Пермь, Россия, mgboyarshinov@pstu.ru.*

Вавилин Александр Сергеевич *– аспирант кафедры автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, vavilin@tbdd.ru.*

Статья поступила в редакцию 22.02.2023, одобрена после рецензирования 11.12.2023, принята к публикации 12.12.2023.

От редакции. Представляемая статья, как надеется редакция, может послужить отправной точкой для дальнейшего обсуждения затронутой темы с различных точек зрения. По мнению рецензентов, отметивших оригинальность данных натурных наблюдений с использованием средств фото- и видеофиксации, использование методов статистического анализа характеристик скоростных режимов транспортного потока на перегоне между перекрёстками для оценки вероятности образования затора, признание средней продолжительности движения на участке (или средней скорости) индикатором образования затора является общепризнанным, и, следовательно, анализ других характеристик распределения случайной величины времени проезда/движения может использоваться скорее для других целей, например, для оценки надёжности транспортного сообщения, уровня безопасности движения и др. При этом авторы, признавая важность данных направлений научных исследований, приоритетом своего исследования хотели бы считать создание основы для формирования прогнозной модели транспортного затора для разработки инструментария обоснования и принятия управленческих решений по превентивным мерам ликвидации условий формирования транспортных заторов. В этой связи представляется важным продолжить дискуссию на страницах журнала.