

ТРАНСПОРТ

УДК 656.1

DOI: 10.25198/2077-7175-2021-4-46

ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

М. Г. Бояршинов, А. С. Вавилин, А. Г. Шумков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
e-mail: atm@pstu.ru

Аннотация. Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска современных способов обработки информации о транспортных потоках для регулирования и управления движением транспорта и пешеходов, для снижения заторов, дорожно-транспортных происшествий и проч.

Объектом изучения является участок дороги с интенсивным двусторонним движением, оборудованный программно-техническим комплексом, позволяющим измерять характеристики потока автомобильного транспорта. **Предмет исследования** – ежедневная интенсивность потока автомобилей в течение недели, с понедельника по воскресенье.

Цель настоящего исследования состоит в анализе амплитуд, частот и периодов гармонических функций, получаемых при разложении временных рядов интенсивностей движения автомобильного транспорта, для выявления закономерностей формирования транспортных потоков.

В качестве **теоретико-методического подхода** используется разложение функции интенсивности потока автомобильного транспорта в ряд Фурье по гармоническим функциям. Разработанный авторами подход с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье позволил определить амплитудно-частотные характеристики рассматриваемых временных рядов, что является **научной новизной** выполненного анализа. Предложено вместо традиционно применяемых для анализа зависимостей «частота-амплитуда» использовать характеристики «период-амплитуда» как физически более содержательные.

Обработка данных программно-технических комплексов позволила построить зависимости интенсивности потока автомобилей на одной из дорог города Перми при различных интервалах осреднения, описать особенности движения автомобильного транспорта по рассматриваемой дороге. В **результате исследования** получены амплитудно-частотные характеристики временных рядов. Показано, что отдельные гармоники разложены в ряд Фурье интенсивности потока автомобилей, проявляющей свойства случайной функции, дублируют периодичность глобальных, локальных и промежуточных экстремумов исходной функции и имеют схожие периоды.

Практическая значимость заключается в использовании разложения функции интенсивности потока автотранспорта в ряд Фурье по гармоническим функциям для прогнозирования транспортных потоков, управления работой светофорных объектов, мониторинга работы оборудования, а также при реконструкции, проектировании и строительстве дорог и дорожных объектов.

Направление дальнейшего исследования – получение, обработка и определение характеристик «период-амплитуда» для временных рядов интенсивности транспортных потоков на других участках улично-дорожной сети.

Ключевые слова: интенсивность транспортного потока, гармонический ряд, преобразование Фурье, амплитудно-частотная характеристика.

Для цитирования: 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.

FOURIER ANALYSIS OF THE TRAFFIC FLOW INTENSITY

M. G. Boyarshinov, A. S. Vavilin, A. G. Shumkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
e-mail: atm@pstu.ru

Abstract. The relevance of this work is determined by the need to find modern ways to process the information

about traffic flows for regulating and controlling the movement of transport and pedestrians, to reduce congestion, road accidents, etc. The object of study is a part of road with heavy two-way traffic, equipped with a software and hardware complex that allows to measure the characteristics of the transport flow. The subject of the study is the daily intensity of the cars flow during the week, from Monday to Sunday.

The purpose of this study is to analyze the amplitudes, frequencies, and periods of harmonic functions obtained by decomposing the time series of road traffic intensities to identify the main patterns of traffic flow formation. As a theoretical and methodological approach, the decomposition of the function of the traffic flow intensity in the Fourier series with respect to harmonic functions is used. The approach developed by the authors using the fast Fourier transform procedure made it possible to determine the amplitude-frequency characteristics of the time series under consideration, which is a scientific novelty of the analysis. It is proposed to use the «period-amplitude» characteristics as physically more meaningful instead of the «frequency-amplitude» dependencies traditionally used for the analysis.

The processing of data obtained from software and hardware complexes allowed us to determine dependences of the car flow intensity on the road of the Perm city at different averaging intervals, to describe the features of the motor transport movement on the road under consideration. As a result of the study, the amplitude-frequency characteristics of time series are obtained. It is shown that the individual harmonics of the Fourier series expansion of the traffic flow intensity, which exhibits the properties of a random function, duplicate the periodicity of the global, local, and intermediate extremes of the original function and have similar periods.

The practical significance consists in the use of the decomposition of the function of the traffic flow intensity in the Fourier series of harmonic functions for predicting traffic flows, controlling the operation of traffic lights, monitoring the operation of equipment, as well as in the reconstruction, design and construction of roads and road objects. The study will continue in the direction of obtaining, processing and determining the «period-amplitude» characteristics for time series of traffic flow intensity for other road networks.

Key words: traffic flow intensity, harmonic set, Fourier series, amplitude-frequency characteristics.

Cite as: Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. (2021) [Fourier analysis of the traffic flow intensity]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4, pp. 46–59. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-4-46.

Введение

В центре внимания прикладных исследований движения автомобильного транспорта находится изучение особенностей потоков автомобилей по российским магистралям М-1 и М-4 [22, 23], улицам и дорогам Казани [26], Волгограда [24], Ижевска [18], Душанбе [15], Пекина [40] и других городов. Значительное внимание уделяется эксплуатационной эффективности выделенных полос для общественного транспорта с учетом характеристик улично-дорожной сети [14, 30], вопросам предотвращения и ликвидации заторов на дорогах [36].

В современных исследованиях для анализа потоков транспортных средств, как правило, используются показатели равномерности и скорости движения транспорта [8, 9], загруженности улично-дорожной сети [13, 14, 24], часовой и суточной интенсивности потока автомобилей [3, 7, 10, 19, 20]. Необходимая для анализа информация поступает со средств спутникового мониторинга [21, 30], с регистраторов акустического излучения транспортных средств [25]. Внедрение и использование технических средств видеофиксации нарушений правил дорожного движения [17, 28] позволило собирать и анализировать в режиме реального времени огромные массивы информации («big data» [27]) о развитии во времени основных показателей движения транспортных потоков по улично-дорож-

ной сети для различных временных интервалов, на отдельных участках дорог и их пересечений, формировать матрицы корреспонденций и проч. Одним из инструментов исследования потоков транспорта может оказаться вейвлет-анализ [6].

Ряд работ посвящен математическому описанию транспортных потоков с использованием моделей стохастической перколяции [4], потоков на графе [5], подхода на основе «стайной парадигмы» [2], с применением закономерностей распределения скоростей автомобилей в пределах регулируемого перекрестка [9] и др. Моделирование на основе концепции нейронных сетей [34] позволяет учитывать особенности поведения водителей и показывать реалистичные характеристики транспортного потока. В [38] рассматриваются колебания транспортных потоков, в том числе «дорожные волны», обусловленные в значительной степени особенностями поведения водителей транспортных средств. Модель транспортного потока на улично-дорожной сети [12] разработана на основе геоинформационного анализа и таксономического проектирования. В [39] предложена динамическая модель городского потока транспорта с учетом перекрестков, оборудованных светофорами; для задачи оптимизации предложен целевой функционал, построенный с учетом пропускной способности трафика, загруженности и времени ожидания автомобилей на перекрестке.

Наличие формализованного описания транспортных потоков на улицах, дорогах и магистралях позволяет ставить и решать задачи оптимизации и управления транспортными потоками. В [13] на базе теории пассажирских автоперевозок, теории транспортных процессов и математической статистики показано, что за счет повышения интенсивности использования городского пассажирского автомобильного транспорта можно снизить загруженность улично-дорожной сети. Вопросы управления движением транспорта с учетом средней интенсивности потока, пропускной способности регулируемого перекрестка и количества автомобилей рассмотрены в [1]. Авторами предложен метод оптимизации целевой функции, описывающей работу светофора. Анализ некоторых моделей транспортных потоков и проверка их адекватности содержится в работах [11, 22].

В ряде исследований рассматриваются перспективные вопросы совместного движения автономных и управляемых водителями автомобилей. Модель, построенная с использованием стохастического распределения скоростей автомобилей, позволяет исследовать различные сценарии смешанных перевозок [31]. В [33] отмечается, что информационная асимметрия автономных и управляемых человеком транспортных средств порождает проблемы в управлении транспортными потоками в смешанном движении. В [32] предлагается модель пропускной способности улично-дорожной сети со смешанным движением, учитывающая возможные скорости движения транспортных средств, а также различные модели их следования. В [16] отечественные авторы рассматривают использование автономных транспортных средств как одно из возможных решений для повышения пропускной способности дорог общего пользования.

Важным является вопрос взаимодействия транспорта и окружающей среды: связь интенсивности движения с загрязнением воздуха [29] и гибелью диких и домашних животных в результате столкновений с транспортными средствами [35], возможность управления городскими транспортными потоками с целью снижения загрязнения воздуха в районах с плотной застройкой [37].

Обзор публикаций последних лет свидетельствует о пристальном внимании к анализу влияния автомобилизации на жизнедеятельность человечества, однако явно недостаточно уделяется внимания к способам обработки массивов информации о транспортных потоках, накопленных за многие годы использования специализированных технических средств, установленных на дорогах общего пользования.

Использование программно-технического комплекса

Для анализа транспортных потоков традиционно используется показатель интенсивности [7, 19], то есть количество автомобилей за единицу времени, проезжающих через вертикальную плоскость, перпендикулярную осевой линии дороги. Выбранный для исследования участок двухполосной дороги на одной из оживленных дорог города Перми оборудован комплексом измерительным программно-техническим (КИПТ¹) «Азимут 2», который позволяет измерять скорость транспортных средств в зоне контроля, их среднюю скорость, время проезда участка и др. Интенсивность транспортного потока N определялась по данным КИПТ с использованием выражения

$$N(t) = \frac{\sum(t)}{\Delta},$$

где

$\sum(t)$ – количество автомобилей, зафиксированных комплексом на отдельной полосе дороги за отрезок времени $[t - \Delta/2, t + \Delta/2]$;

Δ – продолжительность интервала наблюдения (осреднения);

$\Delta = 5, 10, 20, 30$ и 60 минут.

Зависимости суточной интенсивности транспортного потока от времени [28] для различных интервалов осреднения показаны на рисунке 1. Согласно рисунку 1 а в начале суток с 0:00 до 2:00 интенсивность движения снижается с 252 авт/ч до наименьших значений и до 6:30 изменяется в пределах от 0 до 85 авт/ч. После 6:35 наблюдается резкий рост интенсивности движения вплоть до максимального (пикового) значения 768 авт/час в 8:32. В промежуток времени с 9:30 до 16:30 транспортный поток варьируется в диапазоне от 228 до 540 авт/ч, после чего вновь наблюдается подъем до второго пикового значения 732 авт/ч в 17:15. При этом около 17 часов наблюдается аномально резкое падение интенсивности транспортного потока до 108 авт/ч. Далее следует постепенное снижение интенсивности движения автотранспорта до значения 24–96 авт/ч в конце суточного интервала наблюдения.

При увеличении интервала осреднения до значений $\Delta = 10, 20, 30$ и 60 мин характер кривых качественно не отличается от приведенного на рисунке 1 а. Однако максимальные (пиковые) интенсивности потока автомобилей снижаются до значений 690, 684, 638 и 579 авт/час в 8:35, 8:40, 8:45 и 8:30 соответственно. Различие пиковых значений интенсивности, определенных для интервалов осреднения $\Delta = 5$ мин и $\Delta = 60$ мин, составляет 24,6%.

¹ КИПТ «Азимут 2» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tbdd.ru/node/162> (дата обращения: 16.02.2021).

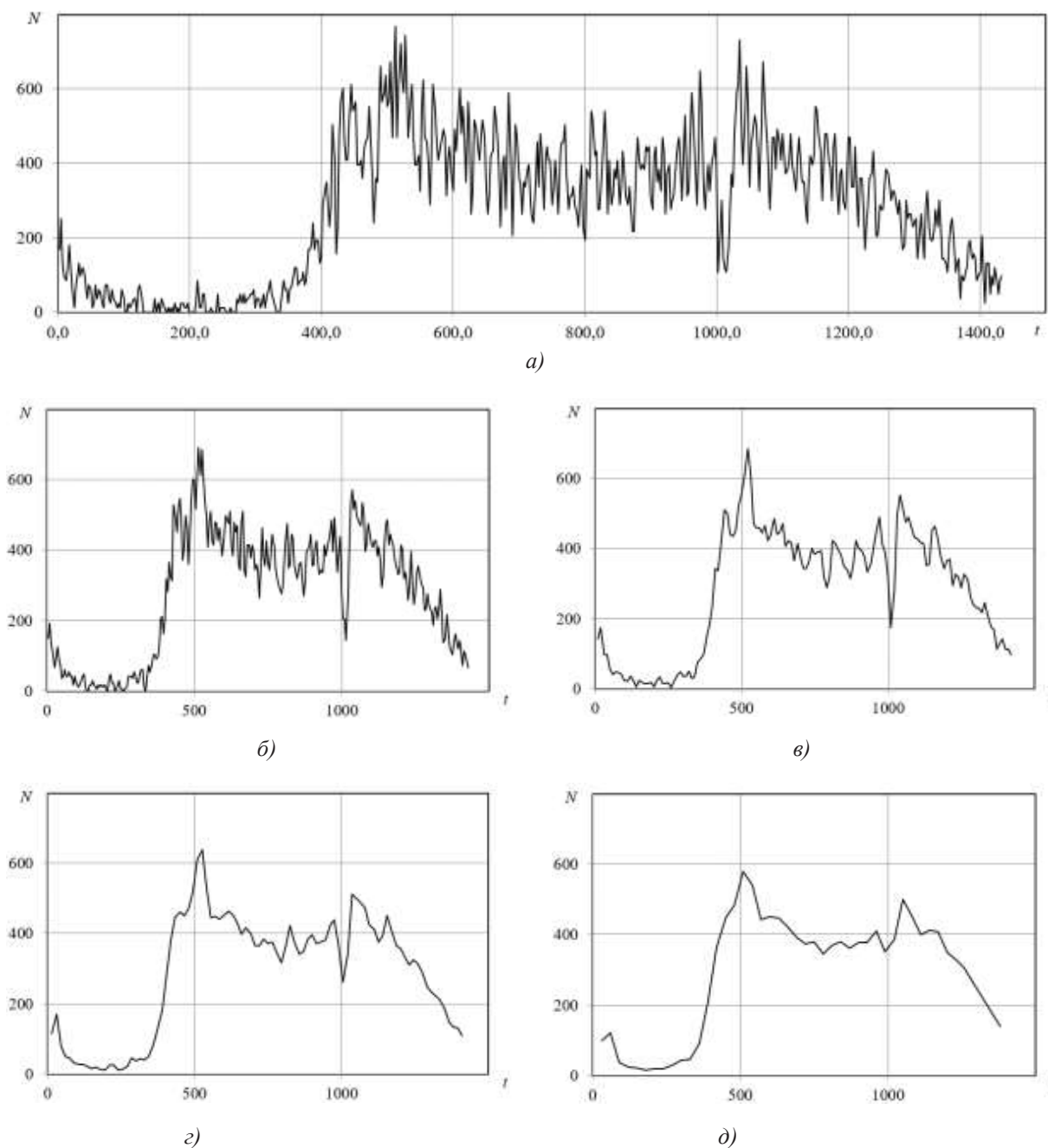


Рисунок 1. Зависимости от времени t (мин) суточной интенсивности N (авт/ч) транспортного потока при интервалах осреднения 5 мин (а), 10 мин (б), 20 мин (в), 30 мин (г) и 60 мин (д)

Источник: разработано авторами

Амплитудно-частотные характеристики интенсивности транспортного потока

Интерес представляет выполнение анализа интенсивности потока автомобилей с использованием разложения функции $N(t)$ в ряд Фурье²

$$N(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi n_k t + \varphi_k),$$

где

a_0 – среднее значение рассматриваемой функции;

a_k – амплитуда;

φ_k – сдвиг фазы гармоники, соответствующей частоте n_k .

Для получения значений амплитуд, частот

² Абрамян Б. Л. и др. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-х т. – Т. 1 / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 464 с. .

и сдвигов фаз используется модуль Excel программного обеспечения Microsoft Office, в котором реализован вычислительный алгоритм, основанный на быстром преобразовании Фурье³. В результате обработки данных, представленных на рисунке 1а, получены значения амплитуд, частот и сдвигов фаз для первых десяти гармоник, приведенные в табли-

це 1. В таблице 2 представлены гармоники с наибольшими значениями амплитуды a_k интенсивности транспортного потока и соответствующие им частоты n_k , определенные при различных интервалах осреднения Δ . Именно гармоники с наибольшими амплитудами вносят основной вклад в разложение анализируемой функции в ряд Фурье.

Таблица 1. Амплитуды a_k (авт/ч), n_k частоты (мин⁻¹) и сдвиги фаз φ_k (рад) первых гармоник разложения интенсивности транспортного $N(t)$ (интервал осреднения $\Delta = 5$ мин) при разложении в ряд Фурье

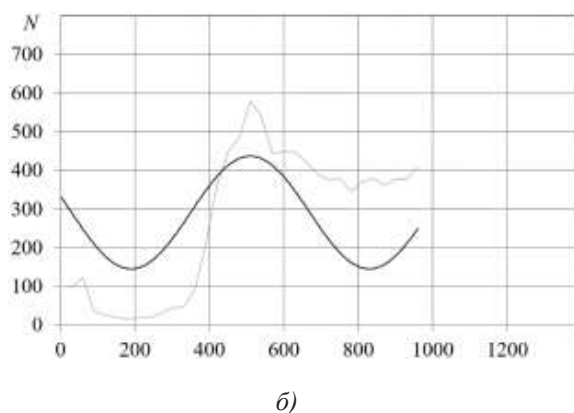
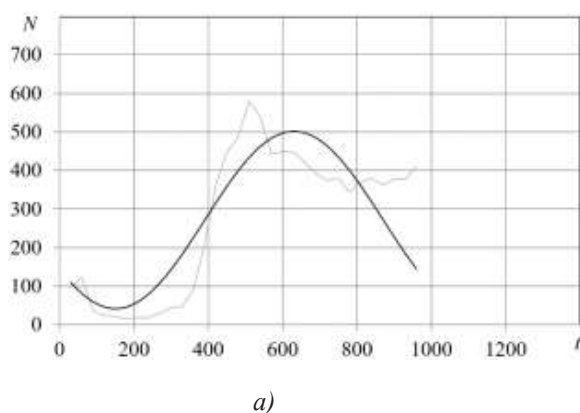
k	Амплитуда a_k	Частота n_k	Сдвиг фазы Δ_k
0	291,61	–	–
1	187,42	0,0008	2,338
2	145,87	0,0016	1,279
3	25,94	0,0023	–1,138
4	43,71	0,0031	2,648
5	27,86	0,0039	1,007
6	14,85	0,0047	–0,598
7	12,36	0,0055	1,884
8	15,69	0,0063	1,356
9	9,130	0,0070	2,472
10	11,79	0,0078	–1,295

Источник: разработано авторами

На рисунке 2 показано сопоставление функции N интенсивности транспортного потока с 1, 2, 4, 12 и 17 гармониками, имеющими наибольшие амплитуды (таблица 2) и полученными при разложении этой функции в ряд Фурье в результате обработки исходных данных с интервалами осреднения $\Delta = 60$ мин и $\Delta = 5$ мин. Для удобства сравнения на этом рисунке гармоники расположены со сдвигом вдоль оси ординат, равным a_0 , то есть в виде

$$a_0 + a_k \cos(2\pi n_k t + \varphi_k).$$

Первая гармоника (рисунок 2 а) качественно верно описывает суточную интенсивность транспортного потока, наличие спадов и подъемов. Вторая гармоника более точно фиксирует наличие экстремумов на кривой интенсивности транспортного потока как для интервала осреднения $\Delta = 60$ мин (рисунок 2 б), так и для интервала осреднения $\Delta = 5$ мин (рисунок 2 в).



³ Артоболовский И. И. и др. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. – Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.

Продолжение рисунка 2

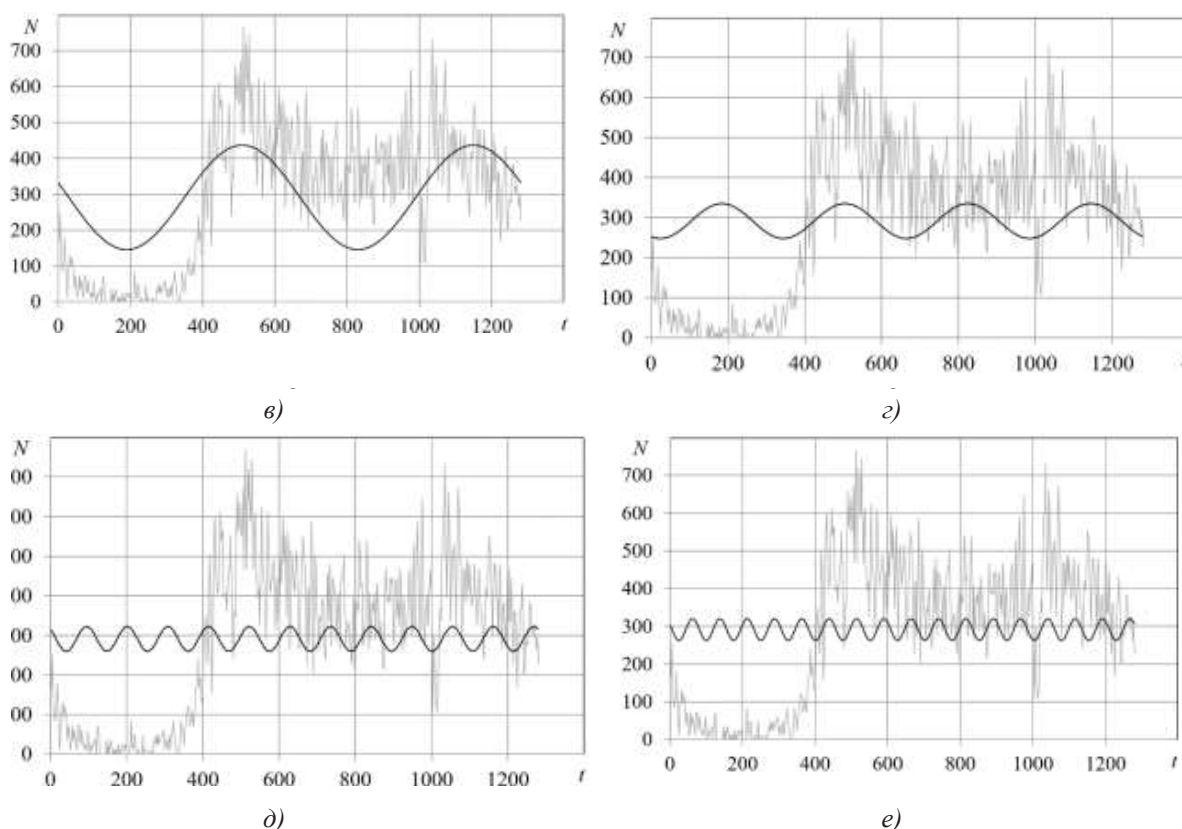


Рисунок 2. Гармоники (—) разложения суточной интенсивности N (авт/ч) транспортного потока в ряд Фурье 1-я (а) и 2-я (б) при интервале осреднения $\Delta = 60$ мин; 2-я (в), 4-я (з), 12-я (д) и 17-я (е) при интервале осреднения $\Delta = 5$ мин

Источник: разработано авторами

Максимумы и минимумы четвертой гармоники (рисунок 2 з) указывают наличие промежуточных максимумов и минимумов суточной интенсивности потока автомобилей со сравнительно небольшой периодичностью. Максимумы и минимумы

двенадцатой и четырнадцатой гармоник (рисунок 2 д и е) позволяют идентифицировать положения локальных максимумов и минимумов суточной интенсивности транспортного потока с малыми амплитудами.

Таблица 2. Гармоники разложения интенсивности транспортного потока $N(t)$ с наибольшими амплитудами a_k (авт/ч) и соответствующие им частоты n_k (мин⁻¹) для различных интервалов осреднения Δ (мин)

$\Delta = 5$ мин		$\Delta = 10$ мин		$\Delta = 20$ мин		$\Delta = 30$ мин		$\Delta = 60$ мин	
a_k	n_k	a_k	n_k	a_k	n_k	a_k	n_k	a_k	n_k
187,42	0,0008	187,21	0,0008	186,37	0,0008	234,03	0,0010	229,78	0,0010
145,87	0,0016	145,83	0,0016	145,83	0,0016	98,05	0,0021	100,26	0,0021
43,71	0,0031	43,71	0,0031	42,46	0,0031	49,85	0,0031	43,78	0,0042
31,32	0,0094	31,53	0,0094	30,86	0,0094	45,39	0,0042	42,92	0,0031
28,82	0,0133	27,67	0,0039	27,56	0,0039	25,68	0,0094	23,33	0,0094
27,86	0,0039	27,49	0,0133	26,45	0,0023	17,39	0,0073	16,94	0,0073
25,94	0,0023	26,04	0,0023	26,26	0,0133	17,15	0,0063	16,56	0,0135
19,07	0,0469	18,36	0,0109	17,37	0,0109	14,96	0,0135	15,54	0,0063
18,44	0,0109	15,94	0,0063	16,15	0,0047	11,89	0,0115	14,28	0,0156
17,59	0,0352	15,68	0,0148	15,85	0,0148	11,28	0,0156	14,14	0,0115

Источник: разработано авторами

Из данных, представленных в таблице 2, следует, что амплитуды для первых и последних гармоник различаются более чем в 10–20 раз. Вклад прочих гармоник в разложение исследуемых функций в ряды Фурье является не слишком значительным, и погрешность представления функции интенсивности рядами, содержащими не более 10 гармоник, может быть оценена величиной 5–10%.

На рисунке 3 выполнено сравнение функций интенсивности транспортного потока, получен-

ных в результате обработки исходных данных при продолжительностях интервалов обработки $\Delta = 5, 10, 20, 30$ и 60 минут, с представлениями соответствующих частичных рядов Фурье, построенных с использованием пяти гармоник, имеющих наибольшие амплитуды. Представляется целесообразным использовать для сглаживания осцилляций временных рядов.

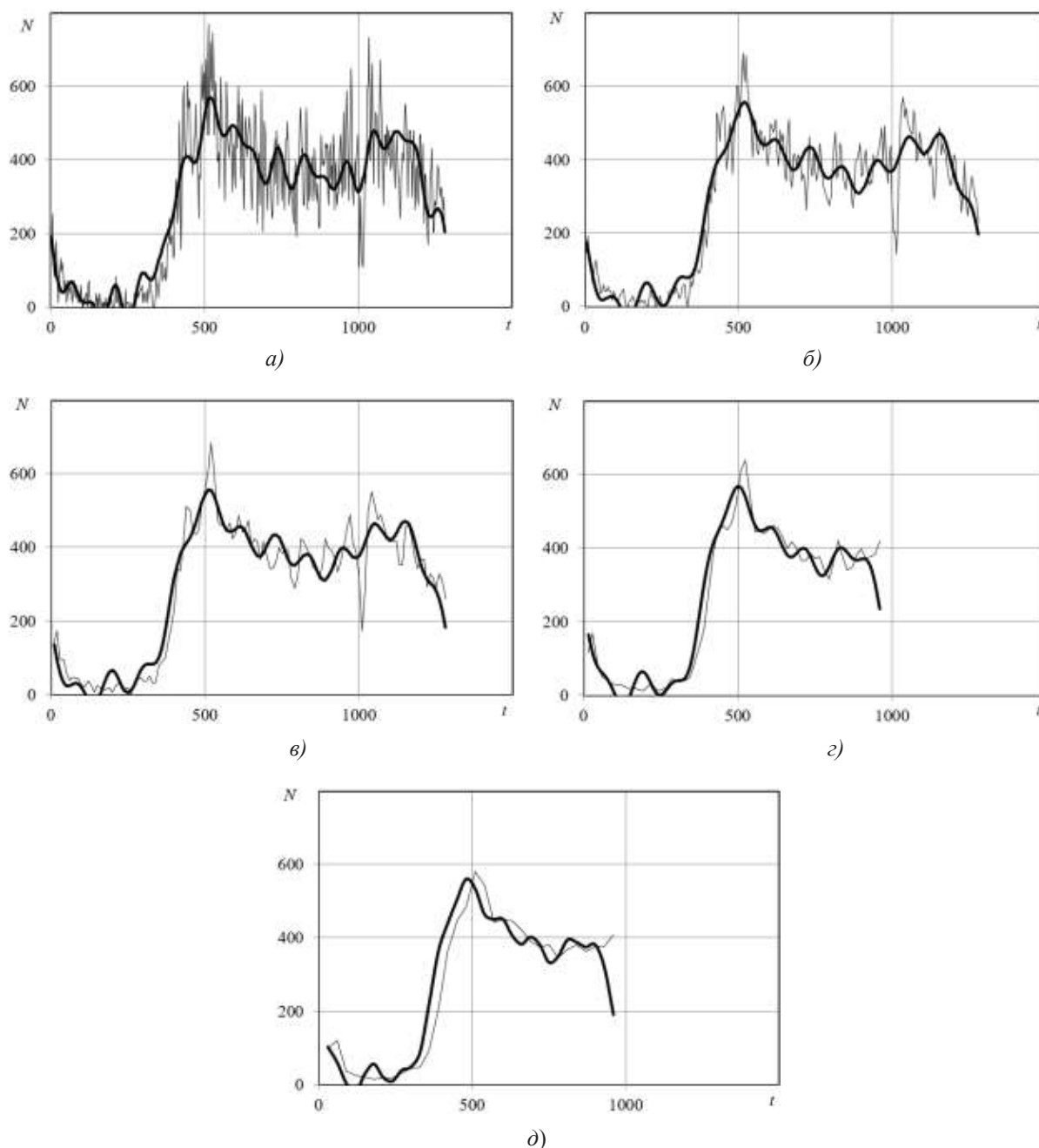


Рисунок 3. Зависимости от времени t (мин) суточной интенсивности N (авт/ч) транспортного потока (—) и частичные суммы рядов Фурье (—) при интервалах осреднения 5 мин (а), 10 мин (б), 20 мин (в), 30 мин (г) и 60 мин (д)

Источник: разработано авторами

Анализ данных в таблице 2 показывает, что амплитудно-частотные спектры для интервалов осреднения $\Delta = 10$ и $\Delta = 20$ мин практически совпадают. Близкие значения можно отметить также для спектров, полученных для интервалов осреднения $\Delta = 30$ и $\Delta = 60$ мин. Этот факт подтверждается близостью кривых, приведенных на рисунке 3 б и в,

рисунке 3 г и д соответственно.

На рисунке 4 а показана амплитудно-частотная характеристика интенсивности функции суточного транспортного потока, полученная при продолжительности интервала осреднения $\Delta = 5$ мин для данных, полученных комплексом КИПТ «Азимут 2.0», на рассматриваемом участке дороги.

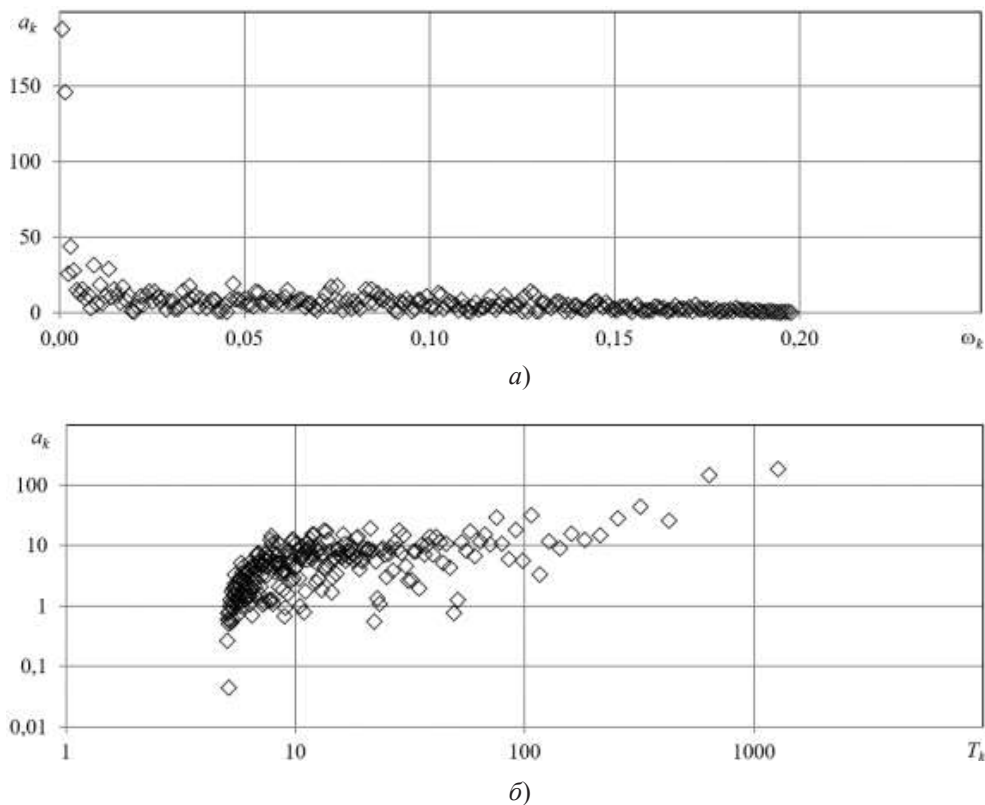


Рисунок 4. Характеристики суточной интенсивности N (авт/ч) транспортного потока с использованием переменных «частота – амплитуда» (а) и «период – амплитуда» (б, логарифмические координаты) при интервале осреднения $\Delta = 5$ мин

Источник: разработано авторами

Исходя из анализа представленных данных, можно сделать вывод, что, в отличие от традиционно используемых амплитудно-частотных характеристик, при исследовании интенсивности транспортного потока преимущественное значение могут иметь не частоты n_k , а периоды $T_k = 1/n_k$ гармоник при разложении анализируемой функции N интенсивности в ряд Фурье. Представляется целесообразным характеристику «частота n_k – амплитуда a_k » преобразовать к виду зависимости амплитуды a_k от периода T_k .

Характеристика «период T_k – амплитуда a_k » интенсивности суточного транспортного потока в логарифмических координатах, полученная при интервале осреднения $\Delta = 5$ мин, показана на рисунке 4 б. Этот рисунок содержит более 250 пар значений «период T_k – амплитуда a_k », причем только 48 из них (около 20%) соответствуют гармоникам со значениями амплитуд в диапазоне от 10 до 200 авт/ч

и соответствующими периодами от 8 мин до 21 часа 20 мин.

Результаты разложения N интенсивности в ряд Фурье, приведенные в таблице 2, позволяют приближенно представить общий поток автомобилей как ряд отдельных условных транспортных потоков («подпотоков» или «субпотоков») с различной интенсивностью: наибольший вклад вносит гармоника с наибольшей амплитудой a_1 , соответствующей условному транспортному подпотоку с интенсивностью 187–188 авт/ч и периодом 21–21,5 часа (более точно, 1280 минут или $T_1 = 21$ час 20 минут).

Следующим по значимости является гармоника (условный транспортный подпоток) с интенсивностью $a_2 = 145$ –146 авт/час и периодом 10,5–11 часов ($T_2 = 10$ часов 40 минут). Затем выделяется гармоника (условный подпоток автомобилей) с интенсивностью $a_4 = 43$ –44 авт/час и периодом 5–5,5 часов ($T_4 = 5$ ча-

сов 22 минуты) и так далее. Гармоника (условный подпоток) с наименьшей интенсивностью $a_{17} = 17-18$

авт/ч, согласно данным, приведенным в таблице 2, имеет период 28–29 мин ($T_4 = 28$ минут 24 секунды).

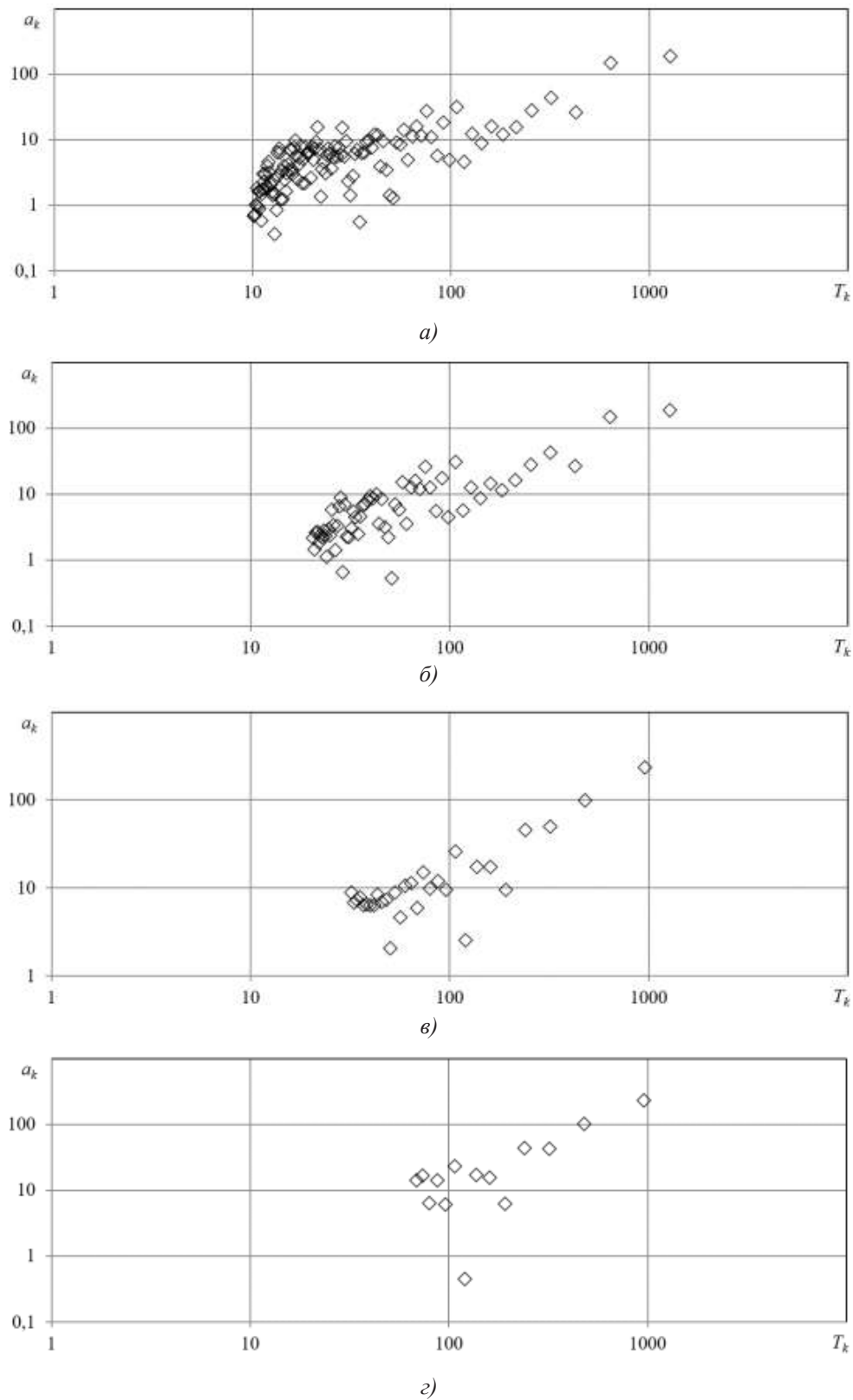


Рисунок 5. Зависимости «амплитуда – период» для суточной интенсивности N (авт/ч) транспортного потока при интервалах осреднения $\Delta = 10$ мин (а), $\Delta = 20$ мин (б), $\Delta = 30$ мин (в) и $\Delta = 60$ мин (г)

Источник: разработано авторами

На рисунке 5 в логарифмических координатах представлены характеристики «период T_k – амплитуда a_k », полученные в результате обработки исходных данных при продолжительностях интервалов обработки $\Delta = 5, 10, 20, 30$ и 60 минут соответственно.

Сокращение объемов данных в спектрах амплитуд и частот (периодов) связано с особенностями вычислительного алгоритма и уменьшением объемов временных рядов суточной интенсивности транспортного потока в связи с увеличением продолжительностей интервалов Δ осреднения.

Заключение

Данные, получаемые в режиме реального времени с помощью КИПТ, размещаемых на улично-дорожной сети, позволяют определять зависимости от времени интенсивности транспортного потока на городских дорогах с использованием различных длительностей интервалов осреднения.

Рассмотрена возможность использования разложения интенсивности движения потока авто-

транспорта в ряд по гармоническим функциям для выявления и анализа особенностей этой функции. Частичные суммы гармонического ряда могут быть рекомендованы в качестве альтернативы использованию обычных процедур сглаживания временных рядов.

Благодаря применению быстрого преобразования Фурье выполнен численный анализ амплитуд, частот и сдвигов фаз гармоник разложения рассматриваемой функции в ряд Фурье. Предложено вместо спектра амплитудно-частотных характеристик использовать зависимости «период-амплитуда» как более информативные с точки зрения задач анализа эволюции интенсивности транспортного потока.

Гармонический анализ временных рядов, получаемых с помощью КИПТ в режиме реального времени, целесообразно использовать для прогнозирования интенсивности движения автомобильного транспорта, управления алгоритмами работы светофорных объектов.

Литература

1. Абдулгасис У. А., Билялова Л. Р., Ситшаева З. З. Управление движением автотранспортных потоков на регулируемом пересечении с учетом динамических и вероятностных параметров // Ученые записки Крымского Инженерно-Педагогического Университета. – 2019. – № 3 (65). – С. 248–251.
2. Андреева М. В., Павловский В. Е., Павловский В. В. Стайная парадигма в моделировании транспортных потоков на дорожной сети // Известия Южного Федерального Университета. Технические науки. – 2019. – № 7. – С. 102–110.
3. Андронов Р. В. [и др.] // Определение интенсивности транспортных потоков при помощи системы баллов карт пробок. – Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 4. – С. 5–12.
4. Баламирзоев А. Г. [и др.] Управление транспортными потоками на основе перколяционной стохастической модели // Системные технологии. – 2019. – 4 (33). – С. 96–109.
5. Баламирзоев А. Г., Игитов Ш. М., Абакаров А. А. Изучение динамических систем на графах с управлением и заторами при эксплуатации автомобильного транспорта // Ученые записки Крымского Инженерно-Педагогического Университета. – 2020. – 2 (68). – С. 242–247.
6. Головин О. К., Столбова А. А. Вейвлет-анализ как инструмент исследования характеристик дорожного движения для интеллектуальных транспортных систем в условиях недостающих данных // Труды СПИИ РАН. – 2019. – 18(2). – С. 326–353.
7. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 423 с.
8. Дуров Р. С. [и др.] Анализ конфликтных точек, конфликтных ситуаций и расчет интенсивности движения на заданном участке дорожной сети // Безопасность техногенных и природных систем. – 2020. – № 1. – С. 8–15.
9. Макаричев А. В. [и др.] // Распределение скорости движения автомобилей перед стоп-линией городского регулируемого перекрестка. – Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2019. – Вып. 85. – С. 107–116. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.107.
10. 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.
11. Михайлов А. Ю., Попова Е. Л. Анализ математических моделей расчета интервалов следования в главных потоках для преобладающих дорожных условий Российской Федерации // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ). – 2020. – 17 (6). – С. 714–725.
12. Михеев С. В. Сетевое управление на основе микро- и макромоделей транспортных потоков // Программные продукты и системы. – 2018. – 1 (31). – С. 19–24.
13. Нестеренко Д. Х. Исследование влияния структуры автотранспортного потока на эффективность использования участка улично-дорожной сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1. – С. 90–96.

14. Павлов С. Н., Грешенштейн А. П. Совершенствование методики оценки целесообразности введения выделенной полосы в крупных городах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (55). – С. 19–25.
15. Пиров Ж. Т., Михайлов А. Ю. Влияние распределения транспортных потоков на скорость сообщения на сегментах городских улиц с регулируемым движением // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 2. – С. 115–124.
16. Полтавская Ю. О., Каргапольцев С. К., Хоменко А. П. Исследование влияния автономных транспортных средств на пропускную способность транспортных сетей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3 (67). – С. 146–152.
17. Потехин А. С., Стрельников А. В. Методика оценки транспортного потока на перекрестке по данным видеонаблюдения // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 129–134.
18. Сидоров В. П., Ситников П. Ю., Рубцов В. А. Оценка и прогноз величины транспортных потоков в новостройках крупных городов (на примере города Ижевск) // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о земле. – 2019. – Т. 29. – Вып. 2. – С. 300–309.
19. Сильянов В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
20. 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.
21. 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.
22. Углова Е. В., Саенко С. С. Распределение транспортных потоков по полосам движения на автомагистралях // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – Вып. 1 (48). – С. 98–105.
23. Углова Е. В. [и др.] Оценка годового распределения параметров транспортного потока // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2018. – № 3. – С. 87–95.
24. 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. – Вып. 54 (73). – С. 121–131.
25. Францев С. М. Алгоритм вычисления интенсивности транспортного потока на основе фиксации амплитудной величины акустического излучения автомобиля // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. – 6 с.
26. Хафизов Э. Р. [и др.] Определение интенсивности движения и состава потока на улично-дорожной сети г. Казани в рамках исследования образования дефектов на дорожных покрытиях // Известия Казанского Государственного Архитектурно-Строительного Университета. – 2017. – № 2 (40). – С. 297–304.
27. Шепелев В. Д. [и др.] Планирование дорожного трафика в контексте системы «устойчивый городской транспорт» // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Экономика и менеджмент. – 2020. – Т. 14. – № 2. – С. 177–186.
28. Шумков А. Г., Бояршинов М. Г., Васькина Е. В. Определение параметров транспортного потока с использованием данных камер видеонаблюдения 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.
29. Awan F. M., Minerva R., Crespi N. Improving Road Traffic Forecasting Using Air Pollution and Atmospheric Data: Experiments Based on LSTM Recurrent Neural Networks // Sensors. – 2020. – 20(13). – P. 3749.
30. Fornalchyk Ye. et al // Improvement of Methods for Assessing the Effectiveness of Dedicated Lanes for Public Transport. – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – 1/3 (109). – Pp. 29–37.
31. Ghiasi A et al. A Mixed Traffic Capacity Analysis and Lane Management Model for Connected Automated Vehicles: A Markov Chain Method // Transportation Research. Part B: Methodological. 2017. – 106. – Pp. 266–292.
32. Hu G. et al. Analytical Approximation for Macroscopic Fundamental Diagram of Urban Corridor with Mixed Human and Connected and Autonomous Traffic // IET Intelligent Transport Systems. – 2021. – 15. – Pp. 261–272.
33. Hu G. et al. Cooperative bypassing algorithm for connected and autonomous vehicles in mixed traffic // IET Intelligent Transport Systems. – 2020. – Vol. 14. – Iss. 8. – Pp. 915–923.
34. Huang X., Sun J., Sun J. A Car-Following Model Considering Asymmetric Driving Behavior Based on Long Short-Term Memory Neural Networks // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. – 2018. – 95. – Pp. 346–362.

35. Kušta T. et al. The Effect of Traffic Intensity and Animal Activity on Probability of Ungulate-Vehicle Collisions in the Czech Republic // *Safety Science*. – 2017. – 91. – Pp. 105–113.
36. Nguyena T. T. et al. Feature Extraction and Clustering Analysis of Highway Congestion // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. – 2019. – 100. – Pp. 238–258.
37. Perez-Prada F., Monzon A., Valdes C. Managing Traffic Flows for Cleaner Cities: The Role of Green Navigation Systems // *Energies*. – 2017. – 10(6). – P. 791.
38. Treiber M., Kesting A. The Intelligent Driver Model with stochasticity – New insights into traffic flow oscillations // *Transportation Research. Part B: Methodological*. – 2018. – 117. – Pp. 613–623.
39. Wang S., Ahmed N. U., Yeap T. H. Optimum Management of Urban Traffic Flow Based on a Stochastic Dynamic Model // *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems*. – 2019. – Vol. 20. – № 12. – Pp. 4377–4389.
40. Yuan G. et al. Recognition of Functional Areas Based on Call Detail Records and Point of Interest Data // *Journal of Advanced Transportation*. – Vol. 2020. – 16 p.

References

1. Abdulgaziz, U. A., Bilyalova, L. R., Sitshaeva, Z. Z. (2019) [Traffic flow control at a controlled intersection, taking into account dynamic and probabilistic parameters]. *Uchenye zapiski Krymskogo Inzhenerno-Pedagogicheskogo Universiteta* [Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University]. No. 3 (65), pp. 248–251. (In Russ.).
2. Andreeva, M. V., Pavlovskij, V. E., Pavlovskij, V. V. (2019) [The pack paradigm in the traffic flow modeling on the road network]. *Izvestiya Izvestiya Yuzhnogo Federal'nogo Universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Southern Federal University. Technical sciences]. No. 7, pp. 102–110. (In Russ.).
3. Andronov, R. V. et al (2019) [Determining the intensity of transport flows using the system of points of traffic jams maps]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology]. No. 4, pp. 5–12. (In Russ.).
4. Balamirzoev, A. G. et al (2020) [Traffic flow management based on a percolation stochastic model], *Sistemnye tekhnologii* [System Technologies]. No. 4 (33), pp. 96–109. (In Russ.).
5. Balamirzoev, A. G., Igitov, Sh. M., Abakarov, A. A. (2020) [Study of dynamic systems on graphs with control and congestion in the operation of road transport], *Uchenye zapiski Krymskogo Inzhenerno-Pedagogicheskogo Universiteta* [Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University]. No. 2 (68), pp. 242–247. (In Russ.).
6. Golovnin, O. K., Stolbova, A. A. (2019) [Wavelet analysis as a tool for studying the characteristics of road traffic for intelligent transport systems in the conditions of missing data], *Trudy SPII RAN* [Works of SPII RAN]. No. 18(2), pp. 326–353. (In Russ.).
7. Drew, D. (1972) *Teoriya transportnyh potokov i upravlenie imi* [Traffic flow. Theory and control]. Moscow: Transport, 423 p.
8. Durov, R. S. et al (2020) [Analysis of conflict points, conflict situations and calculation of traffic intensity on a given section of the road network]. *Bezopasnost' tekhnogennyh i prirodnyh sistem* [Safety of Technogenic and natural Systems]. No.1, pp. 8–15. (In Russ.).
9. Makarichev, A. V. et al (2019) [Distribution of the speed of movement of cars before the stop line of the city regulated intersection]. *Vestnik Harkivs'kogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universitetu* [Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University]. Iss. 85, pp. 107–116. – DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.107. (In Russ.).
10. Malahov, R. S., Aleksikov, S. V. (2017) [Determination of the traffic intensity of urban transport by the method of short-term observations]. *Vestnik Volgogradskogo Gosudarstvennogo Arhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i Arhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. Iss. 49 (68), pp. 92–98. (In Russ.).
11. Mihajlov, A. Yu., Popova, E. L. (2020) [Analysis of mathematical models for calculating the intervals of following in the main flows for the prevailing road conditions of the Russian Federation]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta (SibADI)* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal]. Vol. 17 (6), pp. 714–725. (In Russ.).
12. Miheev, S. V. (2018) [Setecentric management based on micro-and macromodels of transport flows]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. Vol. 1 (31), pp. 19–24. (In Russ.).
13. Nesterenko, D. H. (2019) [Investigation of the influence of the structure of road traffic flow on the efficiency of the use of a section of the road network] *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intelligence. Innovations. Investment]. Vol. 1, pp. 90–96. (In Russ.).
14. Pavlov, S. N., Grefenshtejn, A. P. (2020) [Improving the methodology for assessing the feasibility of in-

roducing a dedicated lane in large cities], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport]. Vol. 4 (55), pp. 19–25. (In Russ.).

15. Pirov, Zh. T., Mihajlov, A. Yu. (2020) [Influence of the distribution of traffic flows on the speed of communication on segments of city streets with regulated traffic], *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intelligence. Innovations. Investment]. Vol. 2, pp. 115–124. (In Russ.).

16. Poltavskaya, Yu. O., Kargapol'cev, S. K., Homenko, A. P. (2020) [Study of the impact of autonomous vehicles on the capacity of transport networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Simulation]. Vol. 3 (67), pp. 146–152. (In Russ.).

17. Potekhin, A. S., Strel'nikov, A. V. (2017) [Methodology for assessing the traffic flow at the intersection according to video surveillance data]. *Informacionnye tekhnologii* [Information Technologies]. Vol. 23. No. 2, pp. 129–134. (In Russ.).

18. Sidorov, V. P., Sitnikov P. Yu., Rubcov V. A. (2019) [Estimation and forecast of traffic flows in new buildings of large cities (on the example of the city of Izhevsk)]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o zemle* [Bulletin of the Udmurt University. Biology. Earth Sciences]. Vol. 29. Iss. 2, pp. 300–309. (In Russ.).

19. 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. (In Russ.).

20. Stasenko, L. N., Omurbekov, Ch. O., Stalbekova, E. S. (2018) [Estimation of hourly traffic intensity]. *Vestnik Kyrgyzskogo Gosudarstvennogo Universiteta Stroitel'stva, Transporta i Arhitektury* [Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture]. Vol. 1 (59), pp. 5–13. (In Russ.).

21. Testeshev, A. A., Mikeladze, T. G. (2019) [Investigation of traffic flows on streets with irregular traffic by remote satellite monitoring method]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology]. Vol. 4, pp. 51–57. (In Russ.).

22. Uglova, E. V., Saenko, S. S. (2017) [Distribution of traffic flows by traffic lanes on motorways]. *Vestnik Moskovskogo Avtomobil'no-Dorozhnogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta (MADI)* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)]. Iss. 1 (48), pp. 98–105. (In Russ.).

23. Uglova, E. V. et al (2018) [Estimation of the annual distribution of transport flow parameters], *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology]. Vol.3, pp. 87–95. (In Russ.).

24. Fomenko, N. A., Nagumanova, A. V., Aleksikov, S. V. (2018) [Analysis of transport flows of the main highways of Volgograd]. *Vestnik Volgogradskogo Gosudarstvennogo Arhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i Arhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. Iss. 54 (73), pp. 121–131. (In Russ.).

25. Francev, S. M. (2017) [Algorithm for calculating the intensity of the traffic flow based on fixing the amplitude value of the acoustic radiation of the car]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. Vol. 2, 6 p. (In Russ.).

26. Hafizov, E. R. et al (2017) [Determination of traffic intensity and flow composition on the street and road network of Kazan in the framework of the study of the formation of defects 24 on road surfaces]. *Izvestiya Kazanskogo Gosudarstvennogo Arhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta* [Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. Vol. 2 (40), pp. 297–304. (In Russ.).

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

28. Shumkov, A. G., Boyarshinov, M. G., Vas'kina, E. V. (2019) [Determination of traffic flow parameters using data from traffic violation video cameras] *Arhitekturno-stroitel'nyj i dorozhno-transportnyj kompleksy: problemy, perspektivy, innovacii: materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Architectural, construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations: materials of the IV International Scientific and Practical Conference, Omsk, November 28–29, 2019]. Omsk: Sibirskij gos. avtomob. dor. un-t «SibADI», pp. 291–295. (In Russ.).

29. Awan, F. M., Minerva, R., Crespi, N. (2020) Improving Road Traffic Forecasting Using Air Pollution and Atmospheric Data: Experiments Based on LSTM Recurrent Neural Networks. *Sensors*. Vol. 20(13), pp. 3749. (In Engl.).

30. Fornalchuk, Ye. et al (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.).

31. Ghiasi, A. et al (2017) A Mixed Traffic Capacity Analysis and Lane Management Model for Connected Automated Vehicles: A Markov Chain Method. *Transportation Research. Part B: Methodological*. Vol. 106, pp. 266–292. (In Engl.).

32. Hu, G. et al (2021) Analytical Approximation for Macroscopic Fundamental Diagram of Urban Corridor with Mixed Human and Connected and Autonomous Traffic. *IET Intelligent Transport Systems*. Vol. 15, pp. 261–272. (In Engl.).

33. Hu, G. et al (2020) Cooperative bypassing algorithm for connected and autonomous vehicles in mixed traffic. *IET Intelligent Transport Systems*. Vol. 14.Iss. 8, pp. 915–923. (In Engl.).
34. Huang, X., Sun, J., Sun, J. (2018) A Car-Following Model Considering Asymmetric Driving Behavior Based on Long Short-Term Memory Neural Networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 95, pp. 346–362. (In Engl.).
35. Kušta, T. et al (2017) The Effect of Traffic Intensity and Animal Activity on Probability of Ungulate-Vehicle Collisions in the Czech Republic. *Safety Science*. Vol. 91, pp. 105–113. (In Engl.).
36. Nguyena, T.T. et al (2019) Feature Extraction and Clustering Analysis of Highway Congestion. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 100, pp. 238–258. (In Engl.).
37. Perez-Prada, F., Monzon, A., Valdes, C. (2017) Managing Traffic Flows for Cleaner Cities: The Role of Green Navigation. *Energies*. Vol. 10(6), pp. 791. (In Engl.).
38. Treiber, M., Kesting, A. (2018) The Intelligent Driver Model with stochasticity – New insights into traffic flow oscillations. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 117, pp. 613–623. (In Engl.).
39. 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.).
40. Yuan, G. et al (2020) Recognition of Functional Areas Based on Call Detail Records and Point of Interest Data. *Journal of Advanced Transportation*. Vol. 2020 Article ID 8956910, 16 p. (In Engl.).

Информация об авторах:

Михаил Геннадьевич Бояршинов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобилей и технологических машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
e-mail: atm@pstu.ru

Александр Сергеевич Вавилин, аспирант, направление подготовки 23.06.01 Техника и технологии наземного транспорта, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Арсений Геннадьевич Шумков, аспирант, направление подготовки 15.06.01 Машиностроение, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Статья поступила в редакцию: 29.05.2021; принята в печать: 02.08.2021.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Mikhail Gennadyevich Boyarshinov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Automobiles and Technological Machines», Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Alexander Sergeevich Vavilin, post-graduate student, training program 23.06.01 Equipment and technologies of ground transport, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Arseniy Gennadyevich Shumkov, post-graduate student, training program 15.06.01 Mechanical engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The paper was submitted: 29.05.2021.
Accepted for publication: 02.08.2021.
The authors have read and approved the final manuscript.