

## ГОСТИ НОМЕРА

Обзорная статья  
УДК 656.1

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2026-1-11>

### ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ТРАНСПОРТНЫЕ ЗАДАЧИ



#### М. Г. Бояршинов

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

***Аннотация.** Обработка данных мониторинга потоков транспортных средств является основой построения интеллектуальных транспортных систем, оптимизации и управления транспортными процессами, обеспечения безопасности дорожного движения. В предлагаемой работе выполнен обзор некоторых современных методов обработки данных, поступающих от комплексов фото- и видеофиксации, установленных на транспортных магистралях, а также представлены решения задач математического моделирования процессов, связанных с движением автомобильного транспорта по дорогам промышленного города. Объектом изучения является поток автомобильного транспорта по улично-дорожной сети, предмет исследования – количественное описание закономерностей движения случайного*

*потока автомобилей, а также влияние этих потоков транспорта на экологию территорий, прилегающих к транспортным магистралям, и благополучие жителей этих территорий. Основой теоретико-методологического подхода являются подходы математической статистики, Фурье-, вейвлет- и фрактального анализа, метод нормированного размаха, точные и численные решения фундаментальных уравнений газовой динамики. В результате исследования выявлены новые закономерности детерминированных и стохастических показателей движения потока автомобилей и их количественные взаимозависимости. Теоретическая и практическая значимость работы заключается в применении известных математических методов анализа временных рядов для обработки данных, получаемых в режиме реального времени от комплексов фото- и видеофиксации, в представлении новых решений задач газовой динамики для применения в области транспортных процессов. Направление дальнейших исследований – адаптация современных методов анализа временных рядов для использования в интеллектуальных транспортных системах, автоматизированных системах управления дорожным движением, оптимальном управлении светофорными объектами, построении новых решений в задачах транспортных процессов со случайными характеристиками.*

***Ключевые слова:** транспортный поток, амплитудно-частотный анализ, вейвлет-анализ, фрактальный анализ, метод нормированного размаха, концентрация отработавших газов, давление звуковой волны.*

***Благодарности.** Автор благодарит кандидата технических наук, доцента Щелудякова Алексея Михайловича, соискателей Вавилина Александра Сергеевича, Шукина Юрия Алексеевича за помощь в сборе, хранении, систематизации и обработке данных. ООО «Технология безопасности дорожного движения» в лице генерального директора Сычкова Дмитрия Васильевича за моральную, техническую и материальную поддержку проводимых исследований.*

***Для цитирования:** Бояршинов М. Г. Прикладная математика и транспортные задачи // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2026. – № 1. – С. 11–44. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2026-1-11>.*

## APPLIED MATHEMATICS AND TRANSPORTATION PROBLEMS

**M. G. Boyarshinov**

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

**Abstract.** *The processing of traffic flow monitoring data is the basis for constructing intelligent transport systems for optimizing and managing transport processes and ensuring road safety. The proposed paper provides an overview of some modern methods of processing data from photo and video recording systems installed on highways. Solutions to the problems of mathematical modeling of processes related to the movement of vehicles along industrial city roads are presented. The object of the study is the flow of vehicles along the road network. The subject of the study is a quantitative description of the movement patterns of a random stream of vehicles, as well as the impact of these traffic flows on the ecology of territories adjacent to highways and the well-being of residents of these territories. The theoretical and methodological approach is based on the approaches of mathematical statistics, Fourier, wavelet and fractal analysis, the normalized range method, exact and numerical solutions of fundamental equations of gas dynamics. As a result of the study, new patterns of deterministic and stochastic indicators of the vehicles flow and their quantitative interdependencies were revealed. The theoretical and practical significance of the work lies in the application of well-known mathematical methods of time series analysis for processing data obtained in real time from photo and video recording complexes, in obtaining new solutions to problems of gas dynamics for use in the field of transport processes. The direction of further research is the adaptation of modern methods of time series analysis for use in intelligent transport systems, automated traffic management systems, optimal control of traffic lights, and the construction of new solutions to problems of transport processes with random characteristics.*

**Key words:** *traffic flow, amplitude-frequency analysis, wavelet analysis, fractal analysis, normalized range method, exhaust gas concentration, sound wave pressure.*

**Acknowledgements.** The author thanks Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Alexey Mikhailovich Shcheludyakov, applicants Alexander Sergeevich Vavilin, Yuri Alekseevich Shchukin for their help in collecting, storing, systematizing and processing data. ООО «Technology of Road Safety» represented by Dmitry Vasilyevich Sychikov, General Director, for the moral, technical and material support of ongoing research.

**Cite as:** Boyarshinov, M. G. (2026) [Applied Mathematics and Transportation Problems]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 11–44. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2026-1-11>.

В исследованиях транспортных потоков традиционно используются показатели интенсивности, плотности, занятости полосы, осреднённой скорости движения. Наиболее полно теоретические вопросы количественного описания транспортных процессов рассмотрены в монографиях Д. Дрю [28] и В. В. Сильянова [44; 45; 46]. Появление автономных видов транспорта, организация коммуникационных каналов между отдельными автомобилями и светофорными объектами, внедрение интеллектуальных транспортных систем требует строгой формализации задач оптимизации [94] и управления [1; 37] транспортными процессами, новых методов и подходов к обеспечению безопасности дорожного движения [17; 70; 74]. Необходимость решения таких задач обуславливает необходимость применения

современных способов и методик сбора, хранения, обработки и представления информации, поступающей с комплексов<sup>1</sup> фото- и видеофиксации, установленных на улично-дорожных сетях. Это, в свою очередь, требует анализа огромных массивов данных, синтеза результатов аналитических исследований, создания методологической базы для разработки математических, вычислительных [55], имитационных [43; 41; 55] моделей движения автомобильного транспорта [51], изучения стохастических характеристик транспортных потоков [36], оценки эффективности использования улично-дорожных сетей [18], обоснования управленческих решений для снижения риска заторовых ситуаций, уменьшения антропогенной экологической нагрузки на окружающую среду.

<sup>1</sup> КИПТ «Азимут 2» // Технологии безопасности дорожного движения. – URL: <https://tbdd.ru/node/224> (дата обращения: 11.11.2025).

**Математические методы  
обработки данных**

**Методы статистического анализа.** В качестве основных характеристик случайных величин используются среднее значение, мода, медиана, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, показатели вариации и асимметрии эксцесса, показатели корреляции, а также критерии Пирсона и Колмогорова для оценки соответствия эмпирических распределений случайных величин гауссову, экспоненциальному, логнормальному, пуассоновскому и другим.

**Амплитудно-частотный (Фурье) анализ.** В последние годы вырос интерес к анализу движения автомобильных потоков на основе амплитудно-частотных характеристик интенсивности  $N(t)$  потока автомобилей  $N(t) = \Delta K / \Delta t$ , с использованием подхода Фурье [42; 19].

Здесь  $t$  – текущее время,  $\Delta K$  – количество автомобилей, зафиксированных комплексами фото- и видеofиксации за интервал  $[t, t + \Delta t]$ .

Используется классическое разложение в ряд по гармоникам

$$N(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos 2\pi v_i t + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \sin 2\pi v_i t,$$

где амплитудные значения

$$a_i = \frac{2}{T} \int_0^T N(t) \cos 2\pi v_i t dt, \quad b_i = \frac{2}{T} \int_0^T N(t) \sin 2\pi v_i t dt.$$

Здесь

$v$  – частота гармоник,  
 $T$  – их период.

Анализ результатов построения рядов Фурье показывает, что отдельные гармоники разложения в ряды Фурье случайной функции интенсивностей потоков автомобильного транспорта моделируют глобальные, локальные и промежуточные экстрему-

мы исходных временных рядов.

**Вейвлет-анализ.** Вейвлет-анализ является развитием идеи Фурье-анализа и использует интегральное преобразование [20]

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} N(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \tag{1}$$

где

$a$  – масштаб вейвлета,  
 $b$  – его сдвиг,  
символ \* – операция комплексного сопряжения.

Наиболее популярно использование вейвлетов *MHat* (Mexican Hat)

$$\psi(t) = \left(1 - t^2\right) e^{-\frac{t^2}{2}}$$

и Морле (Morlet)

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{2\pi i t}.$$

В последней формуле символом  $i$  обозначена мнимая единица.

**Фрактальный анализ.** Определение фрактальной размерности интенсивностей  $N(t)$  транспортных потоков основано на методе клеточного покрытия [34]. Изучаемая кривая покрывается квадратными ячейками с размерами  $\delta \times \delta$ . Уменьшение размера  $\delta$  приводит к росту количества клеток  $M$ , покрывающих кривую, причем

$$M(\delta) \sim (1/\delta)^d,$$

где показатель  $d$  интерпретируется как *фрактальная* размерность изучаемой кривой. Эмпирически или расчетным путем строится последовательность  $\delta_1 M_1, \delta_2 M_2, \delta_3 M_3, \dots$ , моделирующая зависимость длины изучаемой кривой  $L$  от  $\delta$ , которая с использованием метода наименьших квадратов аппроксимируется степенной функцией вида  $a(1/\delta)^D$ .

Фрактальная размерность  $d$  определяется значением показателя степени  $D, d = 1 + D$ .

**Метод нормированного размаха.** Метод основан на аппроксимации безразмерной величины  $R/S_x$  степенной зависимостью вида  $at^H$ , где  $a$  – константа,  $H$  – показатель (индекс) Хёрста. Здесь использованы обозначения: среднее квадратичное отклонение

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [x_i - \langle X \rangle]^2};$$

размах отклонений текущей выборки

$$R(\tau) = \max_{t_0 \leq t_i \leq \tau} Z(t_i, \tau) - \min_{t_0 \leq t_i \leq \tau} Z(t_i, \tau),$$

где

$$Z(t_i, \tau) = \sum_{j=1}^i [x_j - \langle X(\tau) \rangle].$$

Показатель  $H$  Хёрста позволяет различать виды временных рядов [9; 31; 91]:

- $H \approx 0,5$  – рассматриваемый процесс является *случайным*, не имеющим тренда; история изменения предыдущих слагаемых временного ряда не влияет на последующие значения;

- $0 \leq H \leq 0,5$  – *антиперсистентный* процесс; ему присуща знакопеременность слагаемых, то есть неустойчивость временного ряда;

- $0,5 \leq H \leq 1,0$  – *персистентный* процесс; характеризуется сохранением тренда, история формирования предыдущих слагаемых оказывает влияние на последующие значения.

**Результаты обработки данных фото и видеоконтроля движения автомобилей.** На рисунке 1 представлены эмпирические плотность вероятности  $p$  и накопленная  $P$  вероятность функции распределения скорости, а также распределения теоретических гауссовых распределений плотности  $p$  вероятности и вероятности  $P$  соответственно.

На рисунке 2 приведены кривые эмпирического распределения плотности  $p$  вероятностей и вероятностей  $P$  интервалов времени между заездами автомобилей на парковочную территорию и аппроксимирующие их кривые экспоненциального распределения [15].

На рисунке 3 показаны распределения эмпирических и теоретических вероятностей заезда автомобилей на парковку за заданный интервал времени в предположении о реализации пуассоновского потока событий [15].

При анализе интенсивностей потока автомобильного транспорта делается предположение, что в каждый момент времени интенсивность  $N$  потока автомобильного транспорта можно представить в виде

$$N = N_D + N_S$$

для выделения детерминированной  $N_D$  и стохастической  $N_S$  составляющих [14; 59].

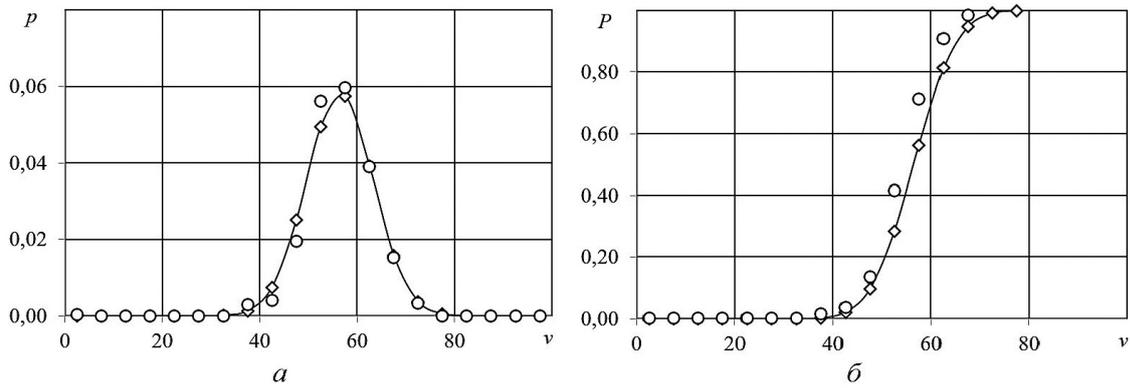


Рисунок 1. Распределения теоретического (—◇—) и эмпирического (—○—) распределений плотности  $p$  вероятности (а) и вероятности  $P$  (б) скорости  $v$  (км/ч) автомобилей при максимально разрешенной скорости движения 60 км/ч  
 Источник: разработано автором

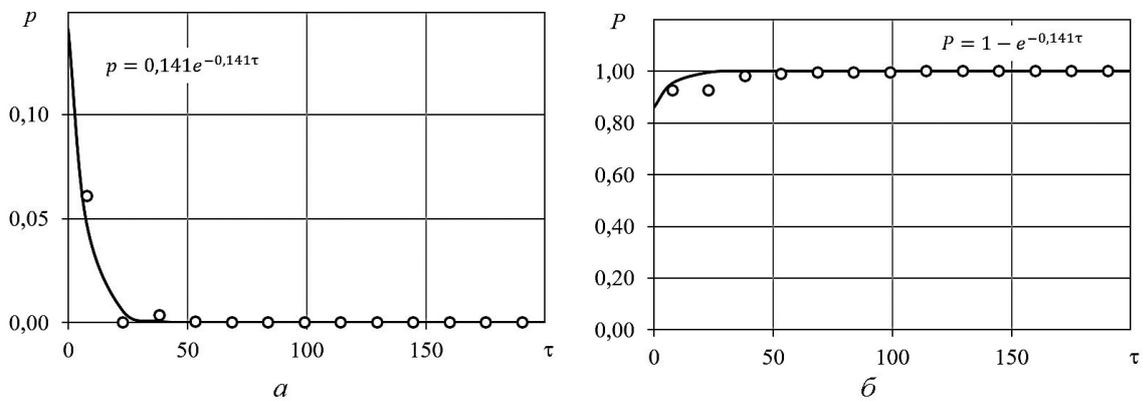


Рисунок 2. Эмпирические (○) и экспоненциальные (—) распределения плотностей  $p$  вероятностей (а) и вероятностей  $P$  (б) интервалов времени  $\tau$  между заездами автомобилей на парковку  
 Источник: разработано автором

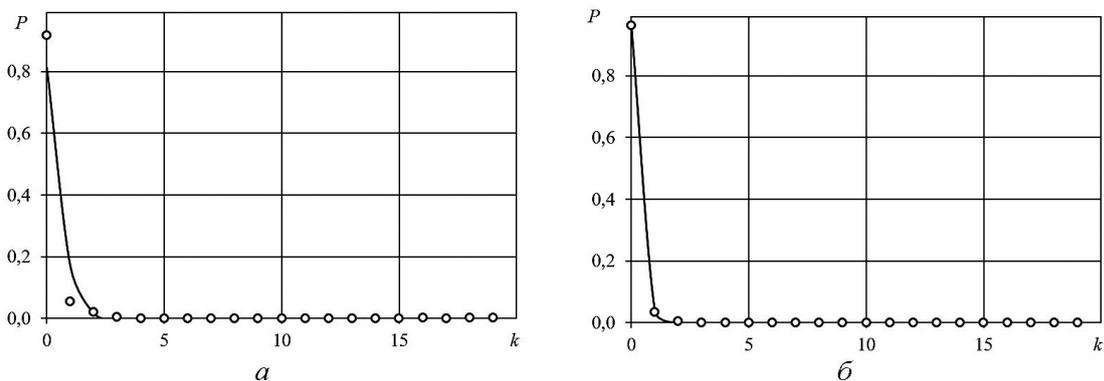


Рисунок 3. Эмпирические (○) и пуассоновские (—) распределения вероятностей  $P$  заезда  $k$  автомобилей на парковочную территорию в течение 2 мин; а – рабочий, б – нерабочий дни; октябрь 2024 года  
 Источник: разработано автором

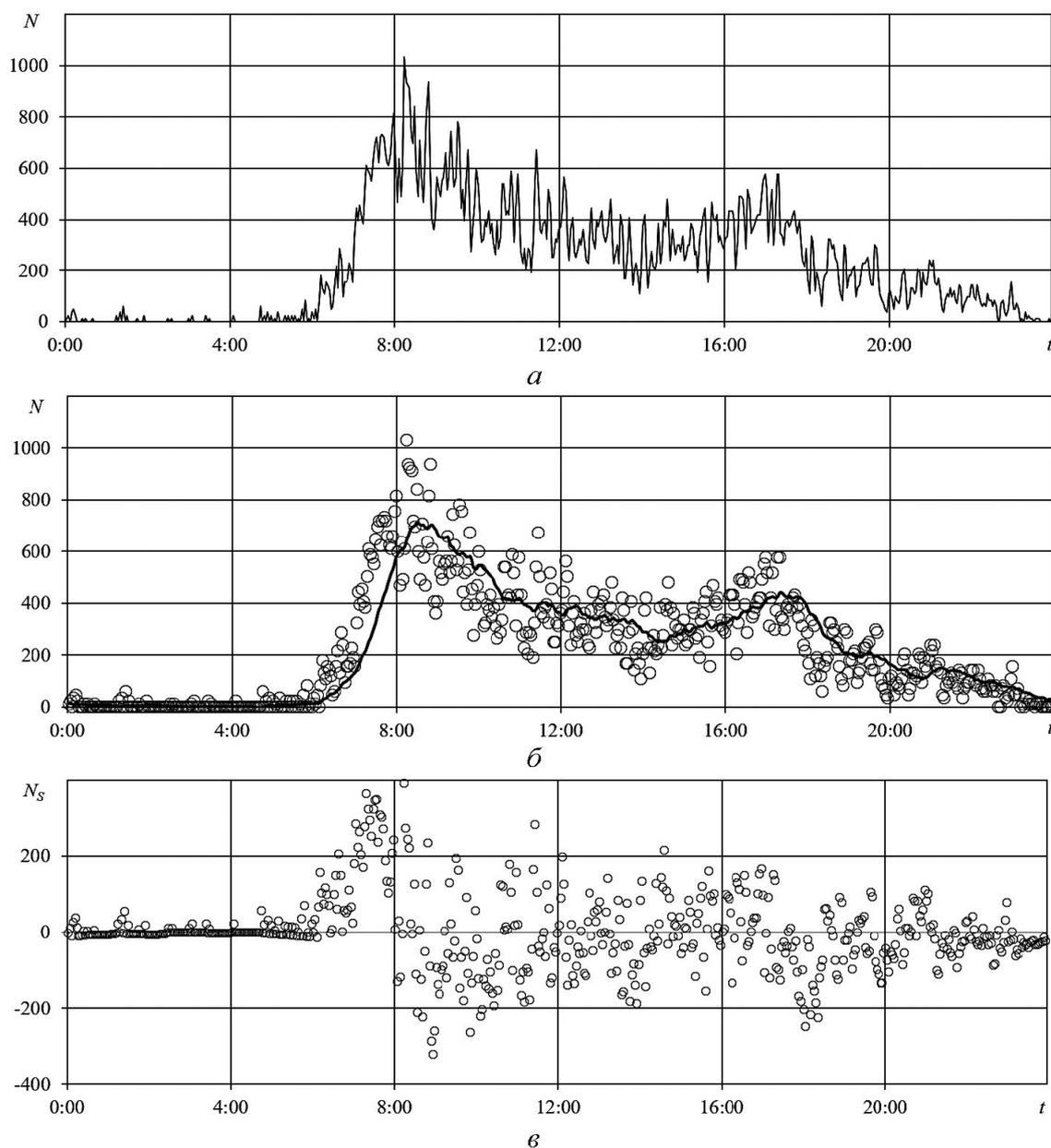


Рисунок 4. Зависимости от времени  $t$  эмпирической интенсивности  $N$  (авт/ч) транспортного потока (а), сглаженная методом скользящей средней составляющая  $N_D$  (б, сплошная кривая) и случайная составляющая  $N_S$  (в)  
 Источник: разработано автором

На рисунке 4 отражены зависимости от времени интенсивности транспортного потока, его детерминированной и стохастической составляющих. На рисунке 5 показаны эмпирические и теоретические кривые распределения плотности  $p$  вероятностей и  $P$  вероятностей для стохастического отклонения  $N_S$  интенсивности от сглаженной кривой  $N_D$ .

На рисунке 6 представлены составляющие  $N_D$  интенсивностей транспортных потоков в рабочие и нерабочие дни. Детерминированные составляющие  $N_D$  как в рабочие, так и в нерабочие дни близки между собой, и в то же время рисунок 6, а и рисунок 6, б качественно отличаются друг от друга.

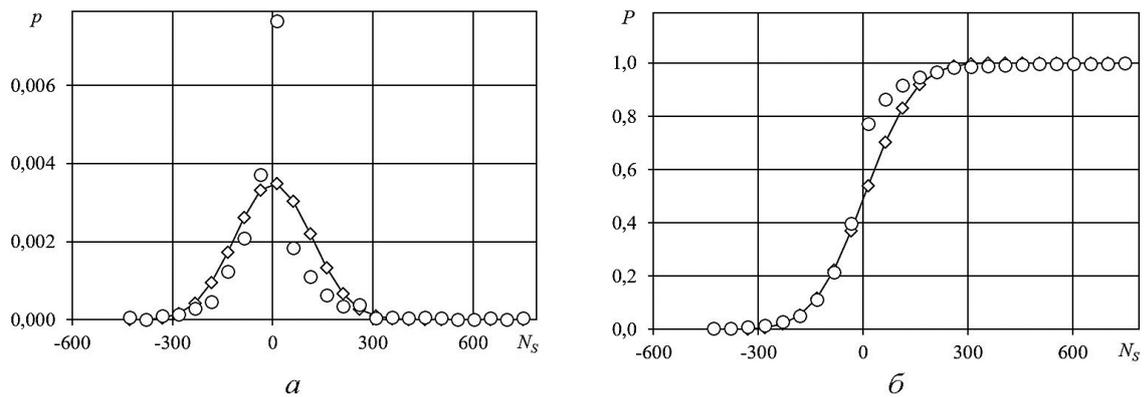


Рисунок 5. Экспериментальная (o) и теоретическая (—◇—) кривые плотности  $p$  распределения вероятности (a) и вероятности  $P$  (б) случайного отклонения  $N_s$  транспортного потока от сглаженной кривой  $N_D$   
 Источник: разработано автором

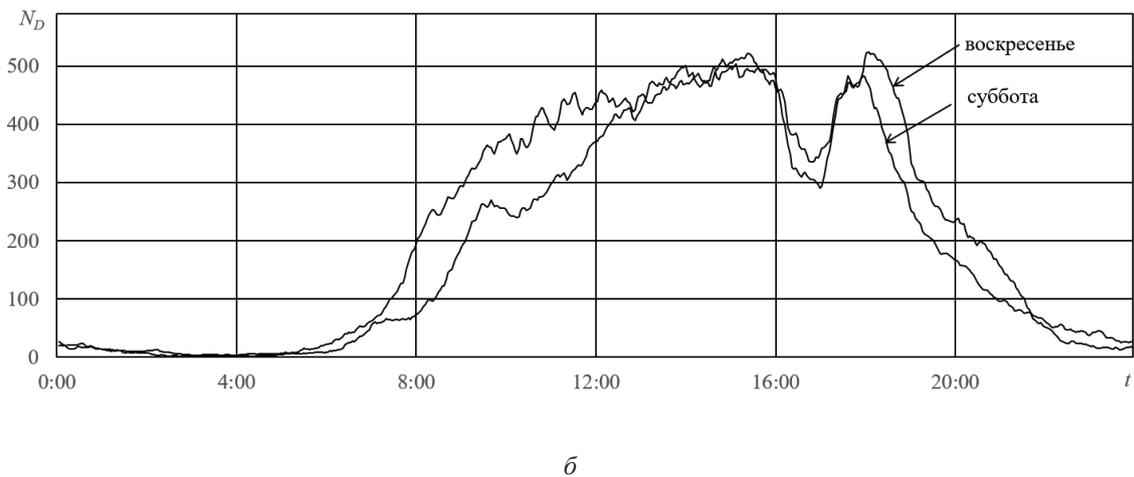
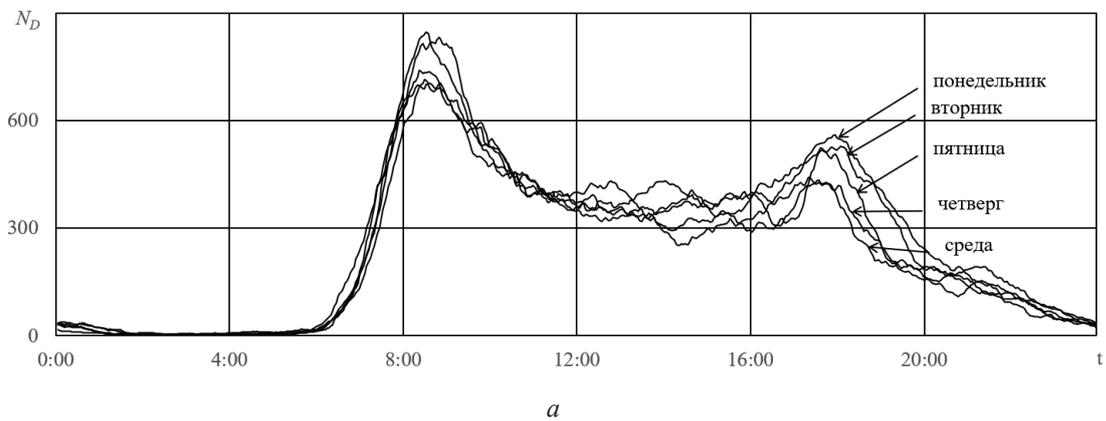


Рисунок 6. Детерминированные составляющие  $N_D$  интенсивности  $N$  транспортных потоков в рабочие (a) и нерабочие (б) дни  
 Источник: разработано автором

Изучение данных мониторинга потоков транспорта на загруженных магистралях [10; 8; 11] показало, что формирование транспортных заторов обнару-

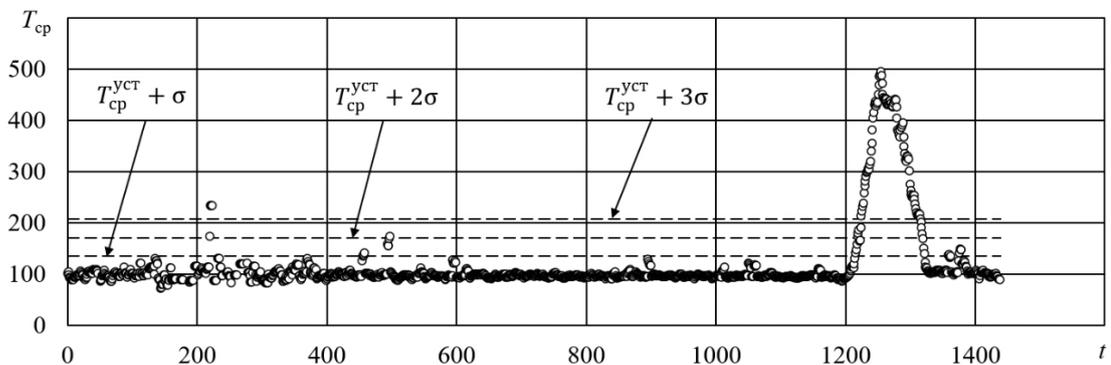
живается по быстрому нарастанию осредненных продолжительностей

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

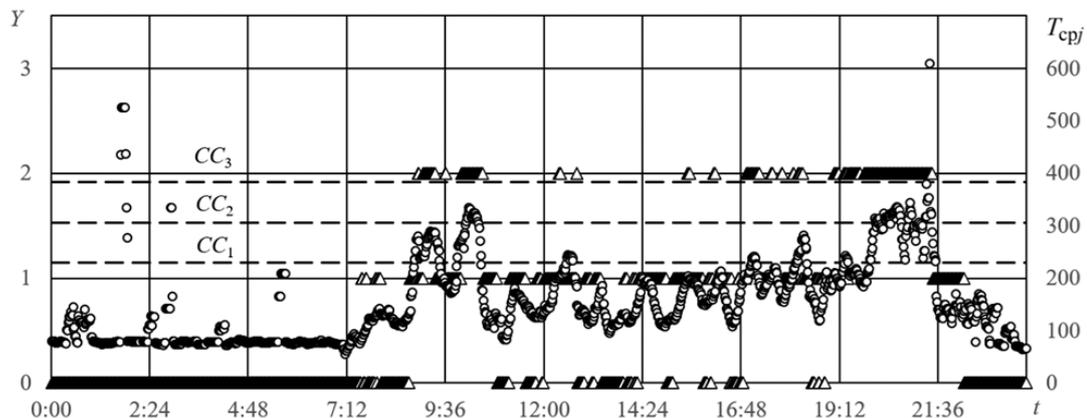
движения автомобилей между рубежами въезда и выезда, где  $t_j$  и  $t_{j+1}$  – два последовательных момента времени с промежутком  $\Delta$  между ними. Завершение заторовой ситуации сопровождается возвращением

величины  $T_{cpj}$  к установившемуся среднему значению, характерному для этого участка дороги, показанному на рисунке 7, а,

$$T_{cp}^{ycm} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m T_{cpj}$$



а



б

Рисунок 7. Осредненные продолжительности  $T_{cpj}$  (с) движения транспортных средств между рубежами контроля (—o—) и критериальные пороговые значения стадий заторовой ситуации (---) и отклонения  $T_{cpj}$  от  $T_{cp}^{уст}$  на  $\sigma$ ,  $2\sigma$  и  $3\sigma$  значений (а); значения  $CC_1$ ,  $CC_2$  и  $CC_3$  (---) критерия транспортного затора, осредненные продолжительности  $T_{cpj}$  (маркеры «о», шкала справа) движения автомобилей на изучаемом пересечении и баллы  $Y$  (маркеры  $\Delta$ , шкала слева) сервиса Яндекс.Пробки (б)

Источник: разработано автором

Для критерия возможности формирования транспортного затора используется сумма  $T_{cp}^{уст}$  и значений,

кратных среднеквадратичному отклонению,

$$CC_1 = T_{cp}^{уст} + \sigma, \quad CC_2 = T_{cp}^{уст} + 2\sigma, \quad CC_3 = T_{cp}^{уст} + 3\sigma.$$

Согласно этому определению, критерий выявления стадий транспортного затора принимает вид:

- $T_{cpj} \leq CC_1$  – свободное движение транспортных средств, затор отсутствует;
- $CC_1 < T_{cpj} \leq CC_2$  – движение транспортных средств затруднено, высокая вероятность формирования заторовой ситуации;
- $CC_2 < T_{cpj} \leq CC_3$  – формируется транспортный затор, необходимо принимать экстренные меры по его недопущению;
- $T_{cpj} > CC_3$  – затор транспортных средств сформировался.

Рисунок 7, а показывает зависимости от времени осредненных продолжительностей  $T_{cpj}$  движения транспортных средств между рубежами контроля и критериальные значения  $CC_1$ ,  $CC_2$  и  $CC_3$  стадий заторовой ситуации для одного из участков улично-дорожной сети. На рисунке 7, б приведено сопоставление [9] значений показателя  $T_{cpj}$ , пороговых значений  $CC_1$ ,  $CC_2$  и  $CC_3$  с индикаторными значениями (баллами) сервиса Яндекс.Пробки.

На рисунке 8 представлены зависимости от времени интенсивностей потока транспортных средств по прилегающей дороге и заезда автомобилей на парковочную территорию [16]. На этом же рисунке приведены зависимость  $N^{in}$  ( $N$ ), полученная за счет исключения времени, линейная аппроксимация этой зависимости, коэффициент корреляции между множествами значений  $N$  и  $N^{in}$ , показатель Стьюдента надежности определения коэффициента корреляции.

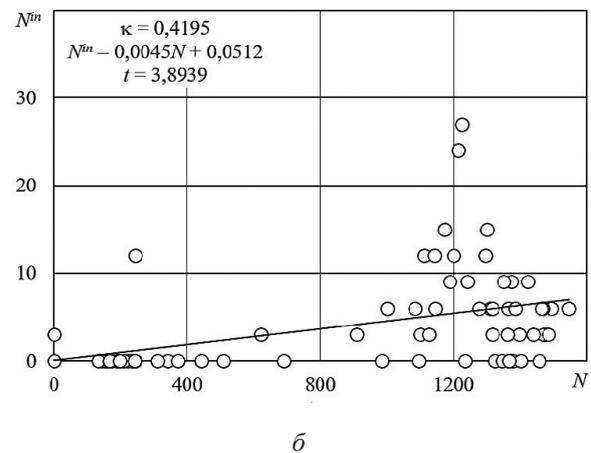
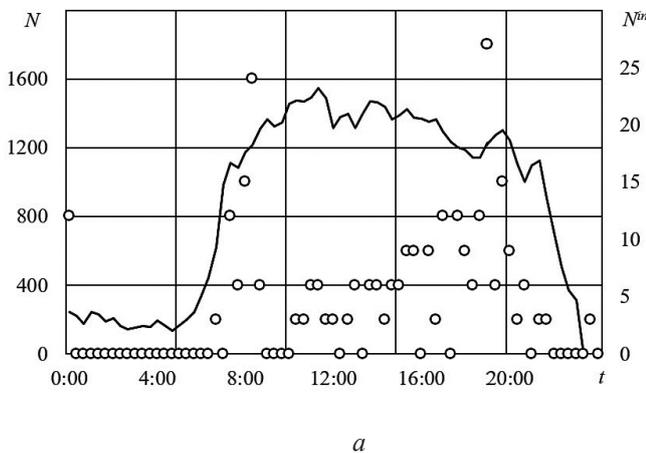


Рисунок 8. Зависимости интенсивности  $N$  (–, авт/час) транспортного потока на прилегающей дороге, интенсивности  $N^{in}$  (а, маркеры «о», авт/час) заезда автомобилей на придорожную парковочную территорию; зависимость между  $N$  и  $N^{in}$  (б), линейная аппроксимация (–) этой зависимости, коэффициент корреляции  $k$  и коэффициент надежности  $t$  Стьюдента

Источник: разработано автором

На рисунке 9 отражена амплитудно-частотная характеристика интенсивностей  $N$  потока автомобильного транспорта, а также зависимость от времени

интенсивности  $N$  автомобильного потока и ряд Фурье с использованием суммы десяти слагаемых с наибольшими амплитудами [14].

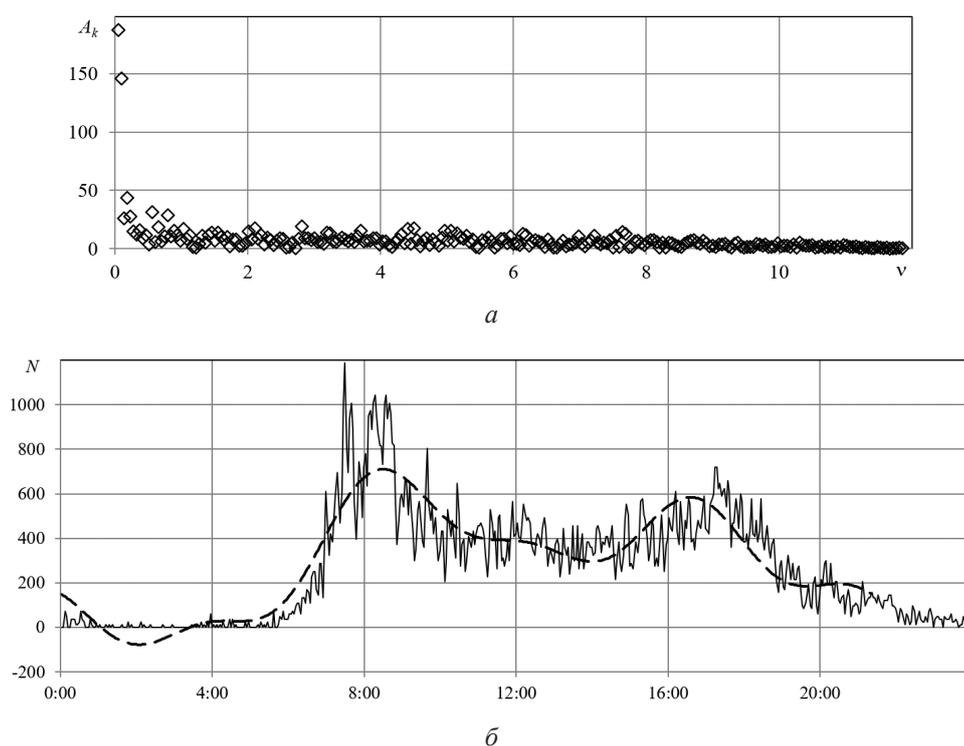


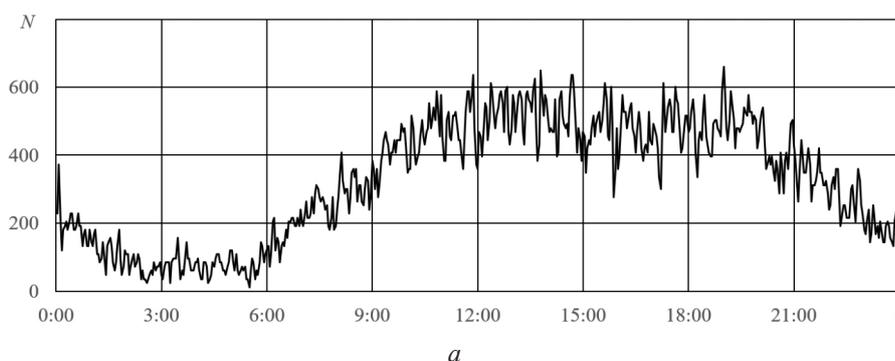
Рисунок 9. Зависимости амплитуд  $A_k$  (авт/ч) от частот  $v_k$  (а) и интенсивности транспортного потока  $N$  (б, —) от времени  $t$ ; и частичные суммы рядов Фурье (б, ---)

Источник: разработано автором

На рисунке 10 приведена анализируемая кривая интенсивности транспортного потока, вейвлет-образы этой кривой, полученные при использовании вейвлетов МНат и Морле [12]. При малых значениях масштаба  $a$  практически для всего диапазона сдвигов  $b$  у вейвлет-образа МНат наблюдаются колебания малой амплитуды с высокой частотой, что соответствует наличию у исходной функции высокочастотных осцилляций (рисунок 10, а). Зоны отрицательных значений вейвлет-образа отражают падение интенсивности транспортного потока в интервалах времени с 1:30 до 6:00 и с 18:00 до 24:00. «Холм» с максимальным

значением соответствует наибольшим значениям интенсивности транспортного потока в период с 11:30 до 15:00.

Структуры вещественного и мнимого вейвлет-образов Морле подобны друг другу и при этом сильно отличаются от структуры вейвлет-образа МНат. Следует отметить наличие у вейвлет-образов Морле самоподобных ветвящихся образований, напоминающих древовидные фрактальные структуры, а также существенный рост количества гармоник при  $a < 450$  мин, сопровождающийся снижением амплитудных значений этих гармоник.



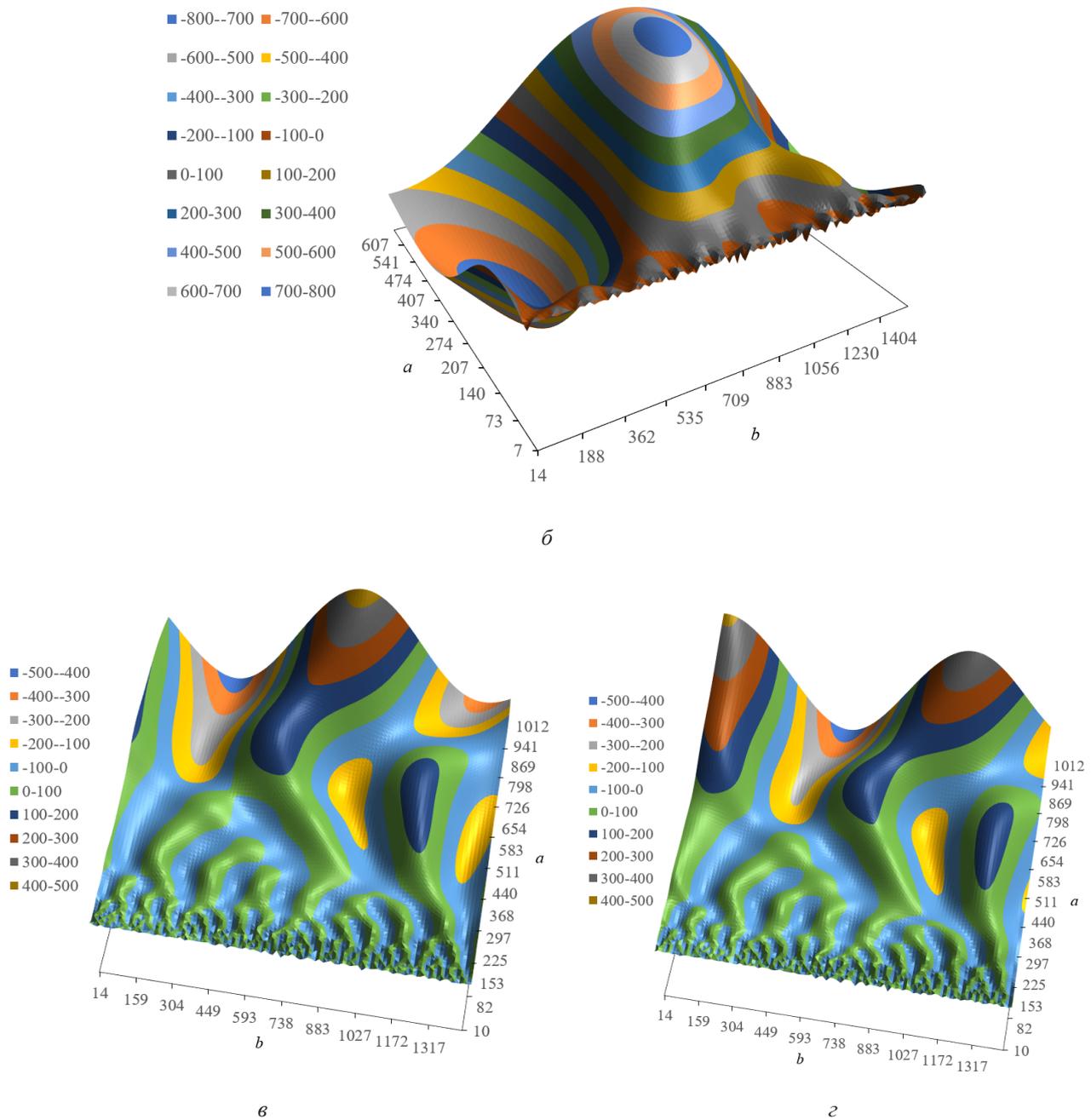


Рисунок 10. Зависимость от времени  $t$  (мин) интенсивности  $N$  (авт/ч) транспортного потока (а); вейвлет-образы, полученные с использованием вейвлетов MhAT (б) и Морле ( $\nu$  – вещественная,  $z$  – комплексная составляющие)

Источник: разработано автором

На рисунке 11 показана интенсивность потока автомобилей и данные для определения фрактальной

размерности, полученные при суточном наблюдении за движением транспорта.

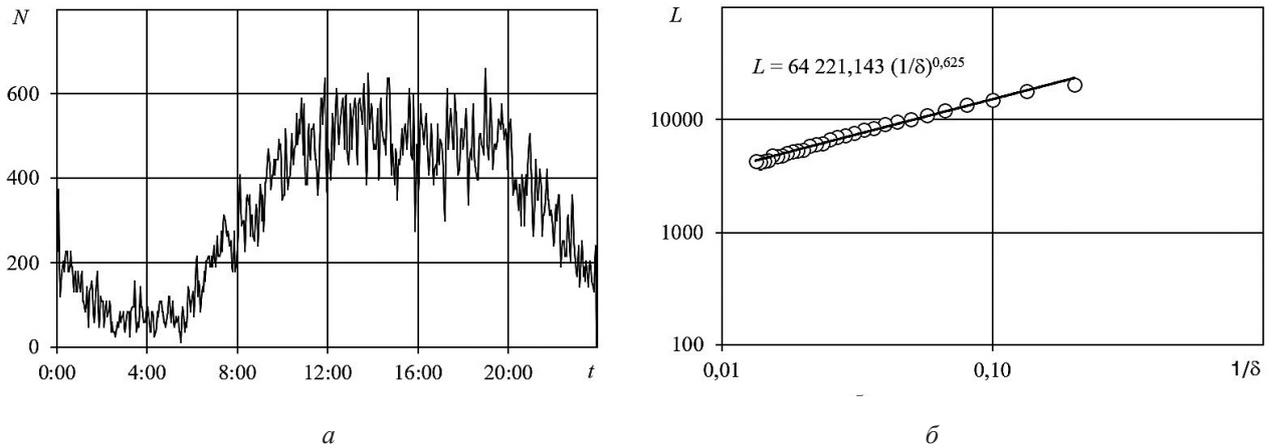


Рисунок 11. Зависимости от времени  $t$  (мин) интенсивности  $N$  транспортного потока ( $a$ , авт/час), длины кривых, описывающих интенсивность  $N$  ( $b$ , логарифмические координаты), а также аппроксимирующая степенная функция при интервалах осреднения

Источник: разработано автором

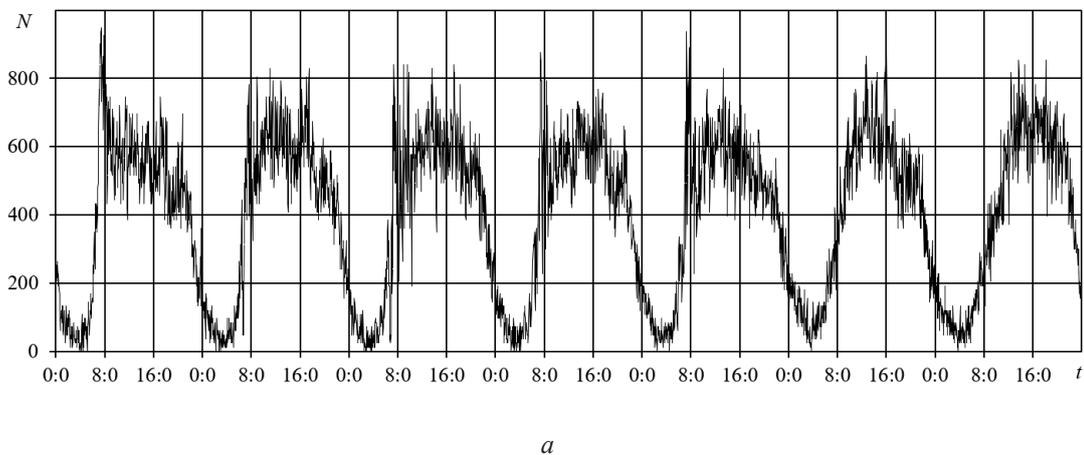
На рисунке 12 представлены зависимости от времени интенсивности потока автомобилей, нормированного размаха и показателя Хёрста, а также изменение этого показателя в течение недели наблюдения [13]. Рисунок 12,  $z$  отражает аппроксимацию показателя Хёрста степенной функцией и значение этого показателя для всего интервала недельного наблюдения.

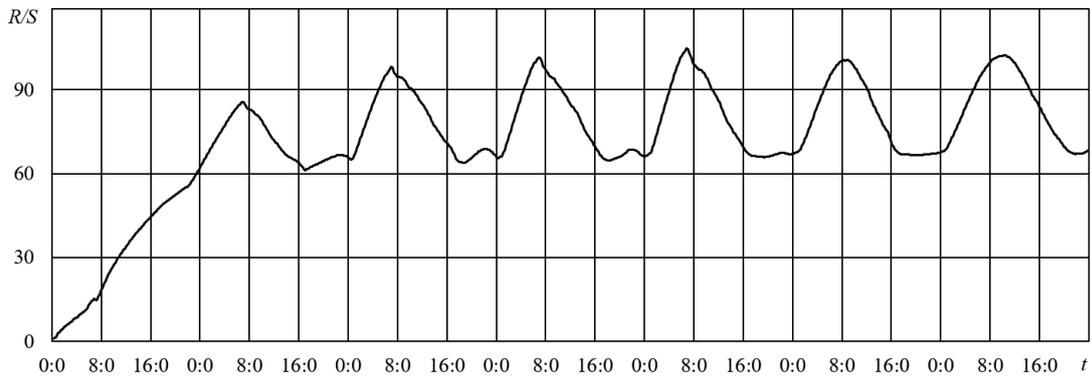
В течение первых двух суток показатель  $H$  быстро возрастает от 0,749 до значения 1,043, что соответствует диапазону персистентности, и затем плавно снижается до значения 0,479, соответствующего случайным процессам, не имеющих какого-либо определенного тренда. На рисунке 12,  $z$  показана та же функция

нормированного размаха в логарифмических координатах и степенная аппроксимация этой функции.

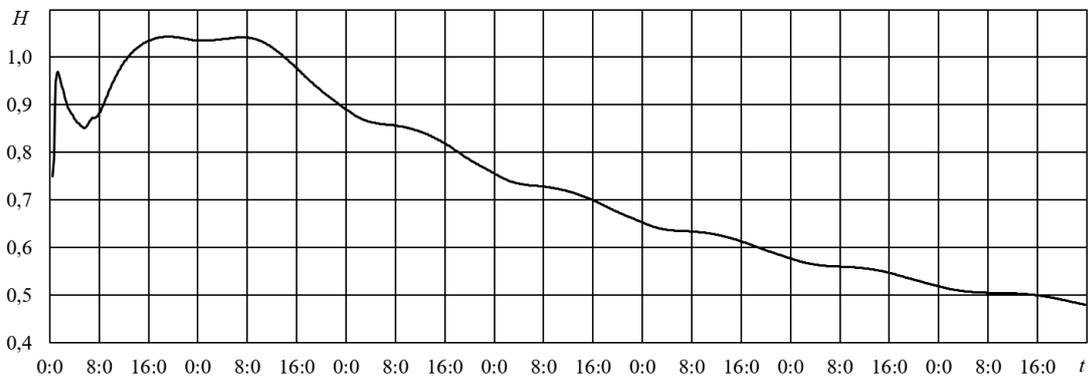
На рисунке 13 показаны зависимости от времени наблюдения среднеквадратичных отклонений, размахов, нормированных размахов и показателей Хёрста для каждого дня недели.

Несмотря на то, что функции интенсивностей транспортных потоков (рисунок 12,  $a$ ), среднеквадратичных отклонений (рисунок 13,  $a$ ) и размахов (рисунок 13,  $b$ ) значительно различаются, кривые нормированных размахов (рисунок 13,  $в$ ) оказываются близкими на всех интервалах наблюдения. Показатели Хёрста (рисунок 13,  $z$ ) к концу каждого дня принимают близкие значения.

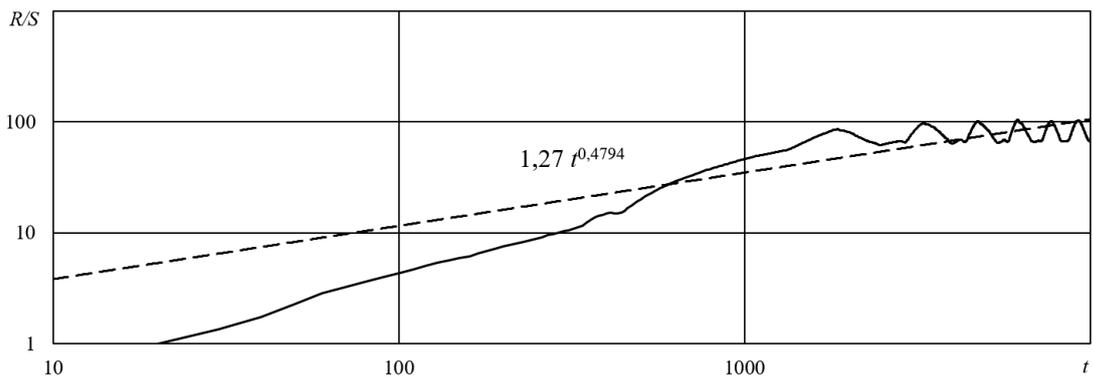




б



в



г

Рисунок 12. Зависимости от времени  $t$  (мин) недельной интенсивности  $N$  транспортного потока ( $a$ , авт/ч), нормированного размаха  $R/S$  (б), показателя  $H$  Хёрста (в); нормированный размах  $R/S$  и его аппроксимация степенной функцией  $at^H$  в логарифмических координатах в течение недели (г)

Источник: разработано автором

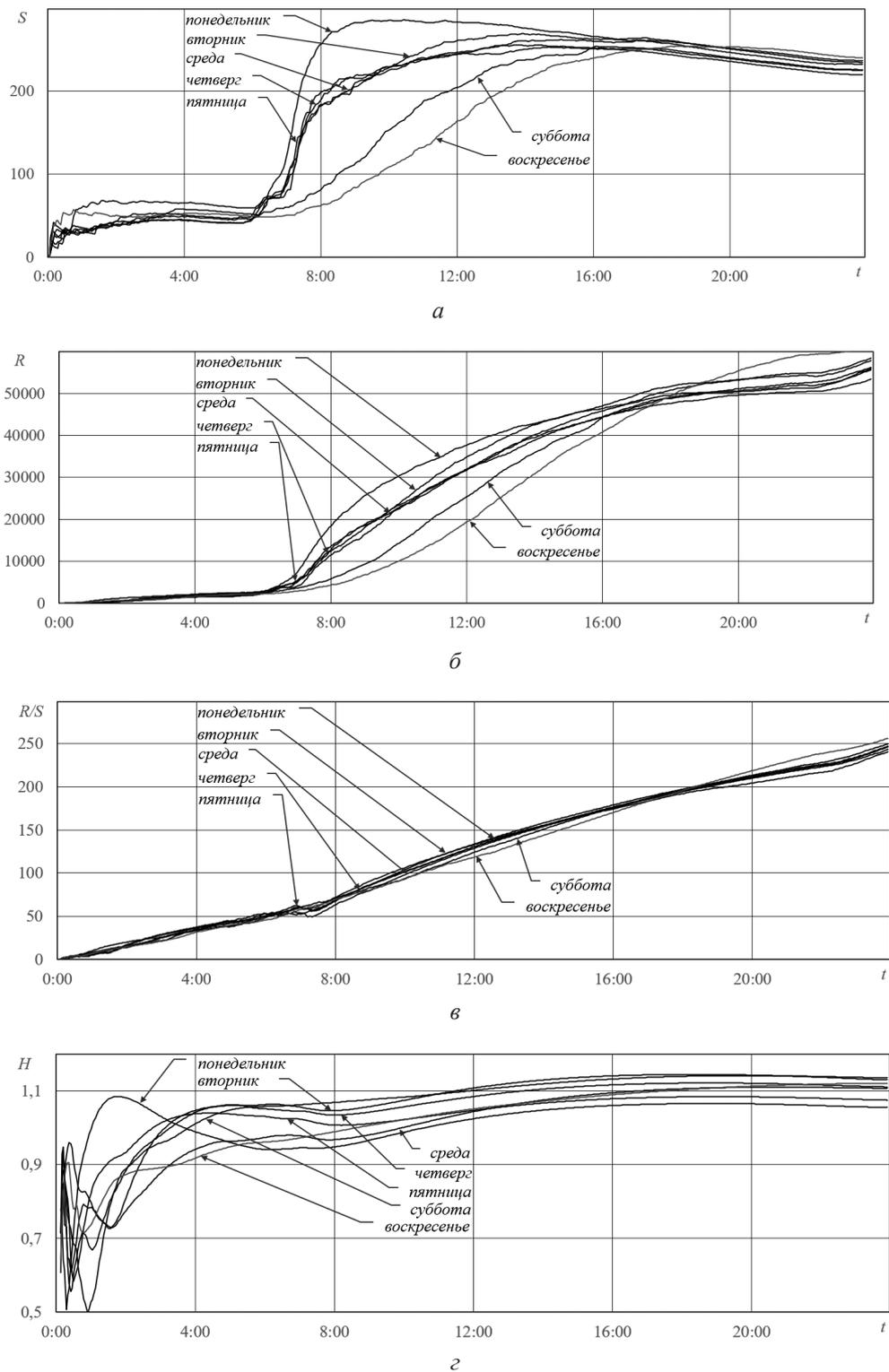


Рисунок 13. Зависимости от времени  $t$  наблюдения среднеквадратичных отклонений  $S_N$  (а), размахов  $R$  (б), нормированных размахов  $R/S$  (в) и показателей  $H$  Хёрста (г) интенсивностей  $N$  транспортных потоков по дням недели

Источник: разработано автором

**Особенности использования фрактального анализа и метода нормированного размаха.** В большинстве случаев прямое нахождение фрактальной размерности или показателя Хёрста затруднено или невозможно, поэтому приходится пользоваться специальными алгоритмами [53; 34; 71] для косвенного вычисления требуемых величин. Связь между фрактальной размерностью и показателем Хёрста достаточно подробно изучена в работах [2; 6; 27]. В частности, показатель  $H$  Хёрста связан с фрактальной размерностью  $d$  известным соотношением Мандельброта [34]

$$d = 2 - H.$$

Соотношение Мандельброта в настоящее время активно используется для определения показателя  $H$  Хёрста по известному значению фрактальной размерности или, наоборот, для определения фрактальной размерности по найденному значению показателя Хёрста. Это соотношение широко используется в теоретических исследованиях [2; 25; 71], в публикациях по физике [3], экономике [24; 32; 38; 47], медицине [50], сетевым технологиям [23; 76; 82; 85], отраслевому развитию [30; 33; 57], транспортным задачам [95; 86] и в других исследованиях. Анализ корректности соотношения Мандельброта на большом количестве фактических данных посвящена монография [27], в которой отмечается наличие определенного несоответствия

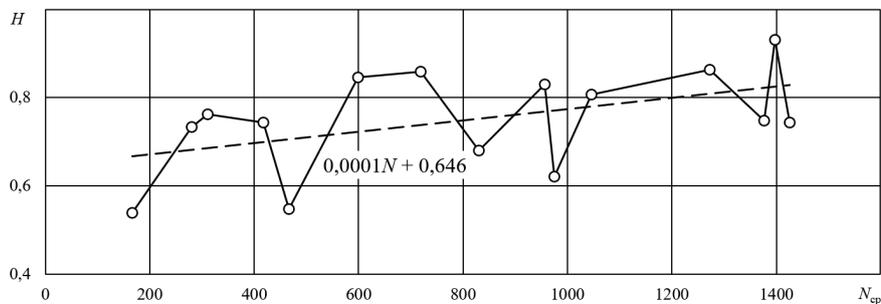
этого соотношения результатам натуральных измерений.

Для проверки корректности этого соотношения рассмотрены фрактальные характеристики и показатели Хёрста интенсивностей потоков автомобилей на пятнадцати участках дорог с различными значениями средней интенсивности  $N_{cp}$  движения.

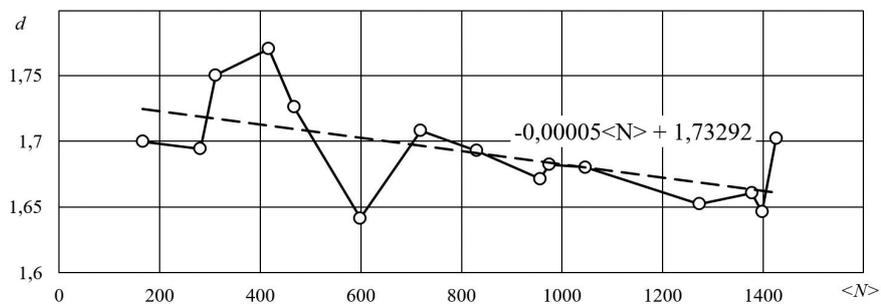
На рисунке 14 приведены зависимости от средних интенсивностей  $N_{cp}$  потоков транспортных средств показателей Хёрста, фрактальных размерностей, а также суммы  $d + H$  [6]. При увеличении средней интенсивности  $N_{cp}$  показатель Хёрста ведет себя хаотично, но имеет тренд на возрастание, увеличиваясь от  $H = 0,5392$ , соответствующего случайному характеру изменения  $N$  при  $N_{cp} = 166$  авт/ч, до  $H = 0,9296$  при  $N_{cp} = 1398$  авт/ч, что может характеризовать характер изменения интенсивности  $N(t)$  как персистентный.

Показатель  $d$  фрактальных размерностей демонстрирует иную тенденцию, уменьшаясь от  $d = 1,6998$  при  $N_{cp} = 166$  авт/ч до  $d = 1,6463$  при  $N_{cp} = 1398$  авт/ч. В то же время сумма показателей  $d + H$  изменяется в пределах от 2,239 до 2,5759 практически при всех значениях  $N_{cp}$ , отклоняясь от значения 2,0, предсказываемого соотношением Мандельброта, на величину до 28,8%.

В монографии [34] указывается, что соотношение Мандельброта получено в предположении о соответствии изучаемого случайного процесса гауссову распределению вероятностей.



а



б

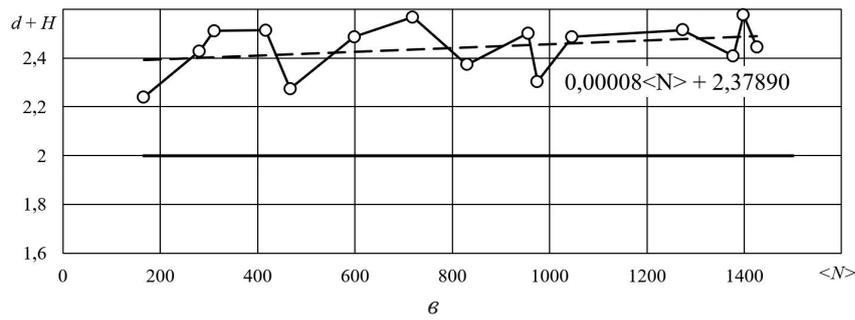


Рисунок 14. Эмпирические (—○—) и трендовые (— — —) зависимости показателей  $H$  Хёрста ( $a$ ), фрактальной размерности  $d$  ( $b$ ) и суммы  $d + H$  ( $v$ ) от среднего значения  $N_{cp}$  (авт/ч) интенсивности транспортных потоков

Источник: разработано автором

На рисунке 15 представлены данные о распределении эмпирических и нормальных (гауссовых) распределений плотностей  $p$  вероятностей интенсивностей  $N$  транспортных потоков на некоторых участках улично-дорожной сети. Во всех указанных случаях распределения плотностей вероятностей нельзя считать нормальными. Этим, по-видимому, объясняется расхождение значений соотношения Мандельброта

с результатами натурных наблюдений.

Очевидно, что для использования соотношения Мандельброта необходимо убедиться в нормальном (или близком к нему) распределении вероятностей слагаемых изучаемых временных рядов. В противном случае погрешность при использовании соотношения Мандельброта может быть значительной.

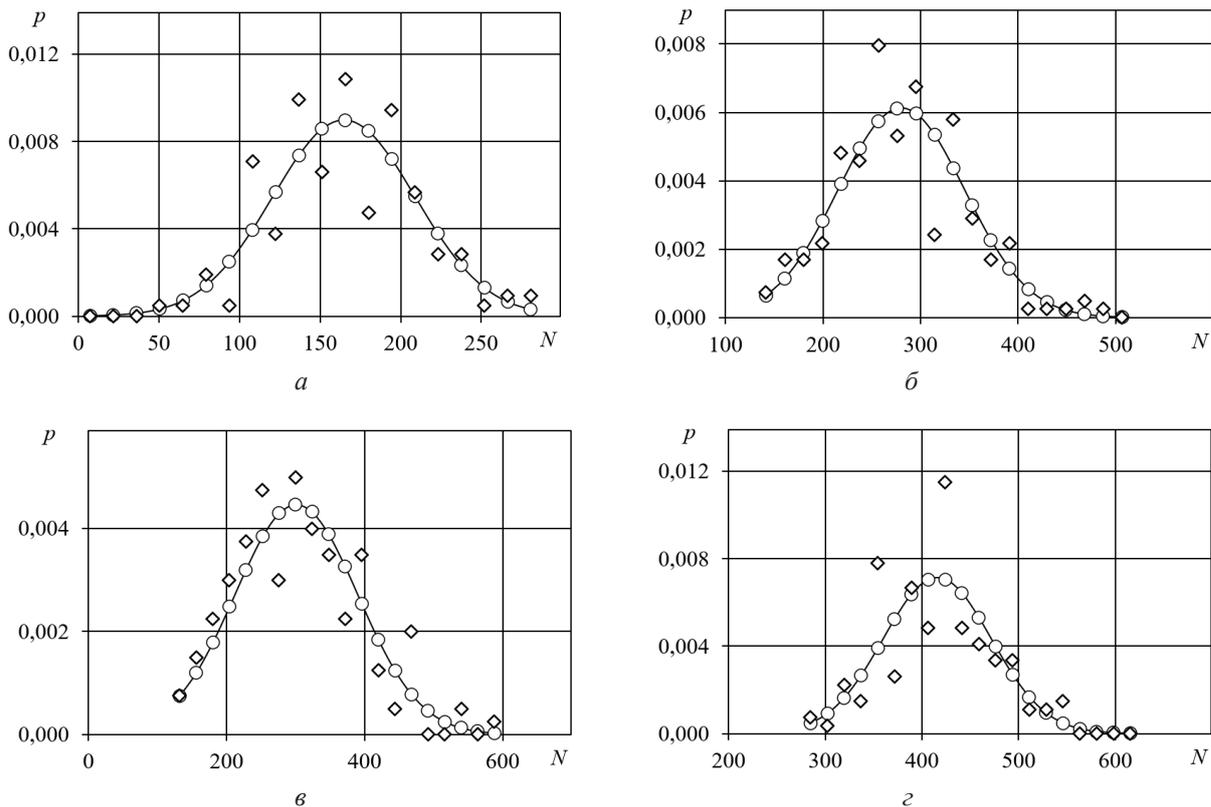


Рисунок 15. Распределения теоретических (—○—) и эмпирических (◇) распределений плотностей  $p$  вероятностей интенсивностей  $N$  транспортных потоков; средние интенсивности  $N_{cp}$  транспортных потоков: 166 ( $a$ ), 281 ( $b$ ), 311 ( $v$ ) и 417 ( $z$ ) авт/ч

Источник: разработано автором

### Математическое моделирование транспортных процессов

Интенсивный рост потоков транспортных средств на улично-дорожных сетях обусловил проведение множества исследований уровней загрязнения отработавшими газами атмосферного воздуха мегаполисов. В работе [83] оценено содержание газовых примесей и твердых частиц в выхлопах различных типов автомобилей. Влияние отработавших газов автомобильного транспорта на загрязнение лесной экосистемы изучено в труде [21].

Определение концентрации отработавших газов базируется, в основном, на натурном моделировании распределения загрязнения воздушной среды от линейных источников, расположенных вдоль автомобильных дорог и имитирующих выбросы автомобильных отработавших газов [62; 65; 84; 89]. Автор работы [65] указывает, что модель источников загрязнения конечной длины применима в случае, если направление ветра ортогонально дороге. Модель конечного линейного источника, учитывающая направление ветра, предложена в труде [89]. Решение, полученное для модели с линейным источником [62], дает концентрацию отработавших газов вблизи автомобильной трассы, завышенную в сравнении с результатами натуральных измерений.

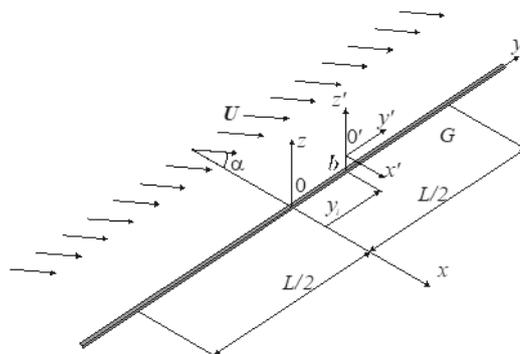


Рисунок 16. Схема задачи о рассеянии отработавших газов при движении потока автомобилей

Источник: разработано автором

На рисунке 16 рассматривается протяженный (в направлении оси  $Oy$ ) участок односторонней однополосной дороги в пространственной области  $G$ . Трасса обдувается горизонтальным потоком воздуха, имеющим постоянную скорость  $\mathbf{w} = \{w_x, w_y, 0\}$ . Концентрация загрязняющих веществ в каждой точке  $G$  зависит от объема отработавших газов, эмитируемых всеми автомобилями, одновременно находящимися на рассматриваемом участке и являющимися подвижными точечными источниками загрязнения с постоянной интенсивностью  $q$ . Принимается, что скорость

Для моделирования переноса загрязняющих веществ атмосферными потоками возможно использование аэродинамической трубы [73]. С помощью вычислительного моделирования [87] определяется скорость воздушного потока и локальные концентрации отработавших газов автомобилей. Для моделирования переноса загрязняющих веществ от бесконечно длинного источника [77] используется метод конечных элементов.

Известны математические модели для ветра с постоянной скоростью и независимыми диффузионными свойствами [35; 49]. В работе [26] принимаются линейные или степенные [22] зависимости коэффициентов диффузии и скорости ветра высоты. Наиболее общими являются модели [4; 29; 39], построенные с использованием численных методов, позволяющих произвольные распределения входных данных.

**Концентрация отработавших газов автомобилей вблизи транспортной магистрали.** Для определения концентрации отработавших газов от случайного потока автомобилей предложено точное решение [7] задачи о переносе атмосферными потоками отработавших газов, полученное с использованием классического дифференциального уравнения диффузии.

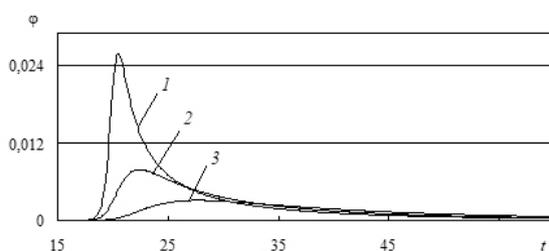
каждого автомобиля постоянна и равна  $\mathbf{V} = \{0, V_y, 0\}$ , появление автомобиля в начале рассматриваемого участка трассы является случайным и описывается пуассоновским потоком событий [48].

Использование подвижной системы координат  $x'y'z'$ , связанной с движущимся с постоянной скоростью  $\mathbf{V}$  автомобилем (рисунок 16), позволило применить точное решение уравнения диффузии от точечного источника [35] и построить точное решение распространения загрязнения от подвижного источника отработавших газов:

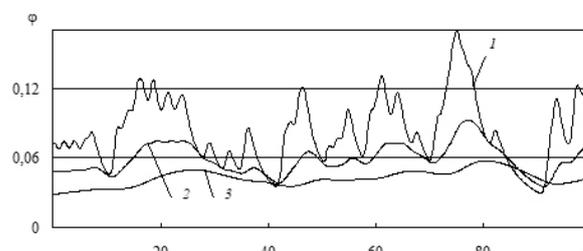
$$\varphi(y_i, x, y, z) = \frac{q \exp \left[ \frac{w_x x \cos \alpha}{2K_x} + \frac{(w_y - V_y)(y - y_i)}{2K_y} + \frac{w_z(z - b)}{2K_z} \right]}{4\pi \sqrt{K_x K_y K_z} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(y - y_i)^2}{K_y} + \frac{(z - b)^2}{K_z}}} \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(y - y_i)^2}{K_y} + \frac{(z - b)^2}{K_z}} \sqrt{\frac{w_x^2}{K_x} + \frac{(w_y - V_y)^2}{K_y} + \frac{w_z^2}{K_z}} \right]$$

На рисунке 17, а приведены зависимости от времени концентрации отработавших газов в атмосферном воздухе от одного автомобиля в контрольных точках, удаленных от дороги на расстояния 10, 25 и 50 м и расположенных на высоте 2 м от поверхности. Для

тех же точек на рисунке 17, б определены зависимости концентраций загрязняющих примесей от случайного потока автомобилей, движение которых соответствует пуассоновскому процессу.



а



б

Рисунок 17. Зависимости от времени  $t$  (с) концентрации  $\varphi$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) отработавших газов от единичного автомобиля (а) и от случайного автомобильного потока (б) на расстояниях от дороги 10 м (1); 25 м (2) и 50 м (3)

Источник: разработано автором

**Концентрация отработавших газов автотранспорта над городским кварталом.** Оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, углеводороды в составе отработавших газов опасны для здоровья человека. В исследованиях [7; 21; 40; 52; 56; 62; 65; 68; 77; 84; 89] предлагаются модели переноса и рассеяния отработавших газов, в том числе над городской территорией.

В этих работах, как правило, не учитываются скорость и направление ветра, рельеф местности, застройка территории, организация потоков транспорта, случайный характер движения автомобилей и прочие факторы.

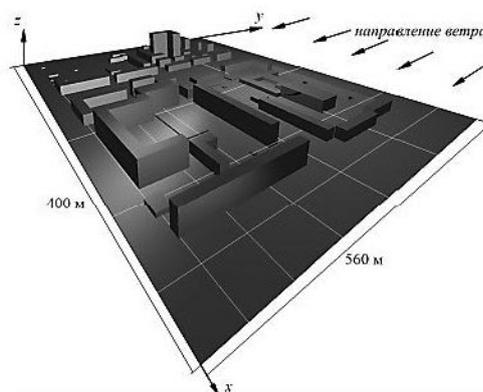


Рисунок 18. Расчетная модель городского квартала

Источник: разработано автором

Типичная схема застройки и транспортно-дорожной сети городского квартала показана на рисунке 18. Предполагается, что в рассматриваемой области известны распределения температуры, плотности и давления воздуха, направление и скорость ветра. Поток транспортных средств моделируется упорядоченным множеством подвижных точечных источников, эмитирующих загрязняющие вещества. Для каждого источника известна интенсивность выброса отработавших газов. Скорость движения точечных источников, а также их количество задаются согласно данным натурных наблюдений [40].

Решение задачи о движении воздуха, переносе и рассеянии отработавших газов над урбанизированной территорией осуществлено с использованием метода крупных частиц [54] и технологии параллельного программирования. Для получения достоверной картины загрязнения городского воздуха учитывался

режим работы светофорных объектов. Транспортные потоки по улично-дорожной сети описывались с помощью случайного процесса пуассоновского типа [48]. Верификация программного обеспечения проведена с использованием точных решений задач газовой динамики о движении потока сжимаемого вязкого нетеплопроводного газа и переноса и рассеяния газовой примеси от подвижного точечного источника [7; 8].

Согласно результатам вычислительного эксперимента, высокая концентрация отработавших газов от потока автомобильного транспорта наблюдается вблизи зданий со стороны автомобильных дорог, представленных на рисунке 19. Наибольшая концентрация угарного газа сосредоточена в приземных слоях в непосредственной близости от транспортных магистралей. С увеличением высоты концентрация загрязняющего вещества быстро снижается.

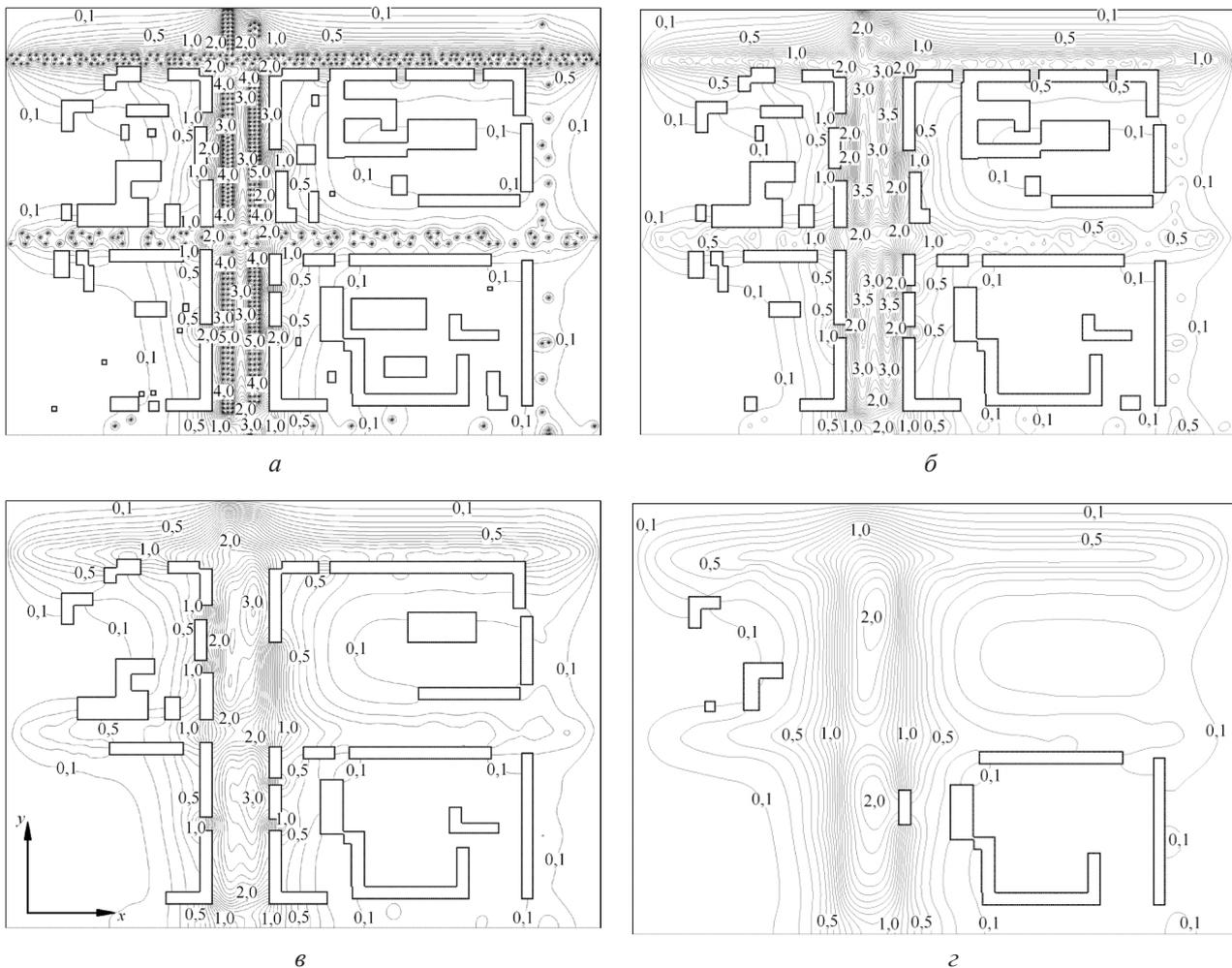


Рисунок 19. Концентрация угарного газа ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в сечениях  $z = 2 \text{ м}$  (а),  $5 \text{ м}$  (б),  $10 \text{ м}$  (в) и  $20 \text{ м}$  (г)

Источник: разработано автором

**Распространение звуковой волны от подвижного источника при наличии ветра.** В России и за рубежом актуальна проблема контроля и снижения транспортного шума. Разрабатывают способы управления на стадии проектирования автомобильных дорог и искусственных транспортных сооружений [78; 61; 66; 64; 68; 80; 69]. Рассматриваются способы уменьшения шумового воздействия транспортных средств, находящихся в эксплуатации на дорогах общего пользования, модернизируются конструкции систем выпуска, разрабатываются двигатели с пониженным уровнем шума, корпуса автомобилей с низким лобовым сопротивлением [72; 90; 63; 75; 79; 81].

Авторы публикаций [92; 60; 93; 67] предлагают способы управления потоками автомобилей и внедрение защитных сооружений для снижения акустического воздействия на участников дорожного движения и жителей мегаполисов.

Для описания акустических колебаний принимается, что изменения скорости  $v$ , плотности  $\rho$  и давления  $p$ , возникающих при распространении звуковой волны, малы в сравнении со скоростью, плотностью и давлением газовой среды в рассматриваемой области.

Полагая, что скорость ветра имеет компоненты  $W_x$  и  $W_y$ , и вводя потенциал  $\Phi$  скорости колебаний звуковой волны,

$$v_x = -\frac{\delta\Phi}{\delta x}, \quad v_y = -\frac{\delta\Phi}{\delta y},$$

можно записать дифференциальное уравнение для нахождения потенциала в форме [5]

$$\begin{aligned} & \frac{1}{c_s^2} \frac{\delta^2\Phi}{\delta t^2} + \frac{2}{c_s} \left( \beta_x \frac{\delta^2\Phi}{\delta x \delta t} + \beta_y \frac{\delta^2\Phi}{\delta y \delta t} \right) + (\beta_x^2 - 1) \frac{\delta^2\Phi}{\delta x^2} + \\ & + (\beta_y^2 - 1) \frac{\delta^2\Phi}{\delta y^2} - \frac{\delta^2\Phi}{\delta z^2} + 2\beta_y\beta_x \frac{\delta^2\Phi}{\delta y \delta x} = a_g \cos(2\pi vt + \varphi) \delta(x, y, z), \end{aligned}$$

где

$$\beta_x = \frac{w_x}{c_s}, \quad \beta_y = \frac{w_y}{c_s}, \quad \beta^2 = \beta_x^2 + \beta_y^2,$$

$\delta(x, y, z)$  – дельта-функция Дирака;  $C_s$  – скорость звука,  $a_g$  – амплитудное значение,  $\nu$  – частота колебаний,  $\varphi$  – сдвиг фазы источника потенциала  $\Phi$ .

Для давления акустической волны от подвижно-

го точечного источника, движущегося со скоростью, имеющей компоненты  $V_x$  и  $V_y$ , при наличии ветра с компонентами скорости  $W_x$  и  $W_y$ , получено решение

$$\begin{aligned} p = & -a_g \frac{a_g p_0 \nu}{2c_s^2 R'} \left[ \sin(2\pi \nu t + \varphi) + \frac{c_s \sqrt{1-\beta^2}}{2\pi \nu R'} \cos(2\pi \nu t + \varphi) \right] \times \\ & \times \left\{ 1 - \frac{\beta_x(v_x - V_x) + \beta_y(v_y - V_y)}{c_s \beta^2 \sqrt{(1-\beta^2)}(1-\beta^2) R'} \left( \beta_x(x - V_x t) + \beta_y(y - V_y t) - \beta^2 \sqrt{1-\beta^2} R' \right) - \right. \\ & \left. - \frac{\beta_x(v_y - V_y) - \beta_y(v_x - V_x)}{c_s \beta^2 \sqrt{(1-\beta^2)} R'} \left[ \beta_x(y - V_y t) - \beta_y(x - V_x t) \right] \right\}. \end{aligned}$$

В этом выражении  $\rho_0$  – плотность воздуха,

$$u = t - \frac{1}{c_s \sqrt{1 - \beta^2}} \left[ \sqrt{\frac{1}{\beta^2} (\beta_x x' + \beta_y y')^2 + \frac{1 - \beta^2}{\beta^2} (y' \beta_x - x' \beta_y)^2 + z^2} - (x' \beta_x + y' \beta_y) \right],$$

$$R' = \sqrt{\frac{1}{\beta^2} (\beta_x x' + \beta_y y')^2 + \frac{1 - \beta^2}{\beta^2} (y' \beta_x - x' \beta_y)^2 + z^2},$$

$$x' = \frac{x}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = \frac{y}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

На рисунке 20 приведена развертка во времени звукового сигнала, полученного с использованием приведенного решения для автомобиля ВАЗ, движущегося по дороге со скоростью 72 км/час при наличии попутного ветра 10 м/с. Звуковой сигнал регистрировался в точке на высоте 4 м над дорогой на расстоянии

60 м от рубежа появления автомобиля на дороге. Для генерации источника сигнала использовался звуковой амплитудно-частотный спектр автомобиля, зарегистрированный с помощью высокочувствительного узконаправленного микрофона [58].

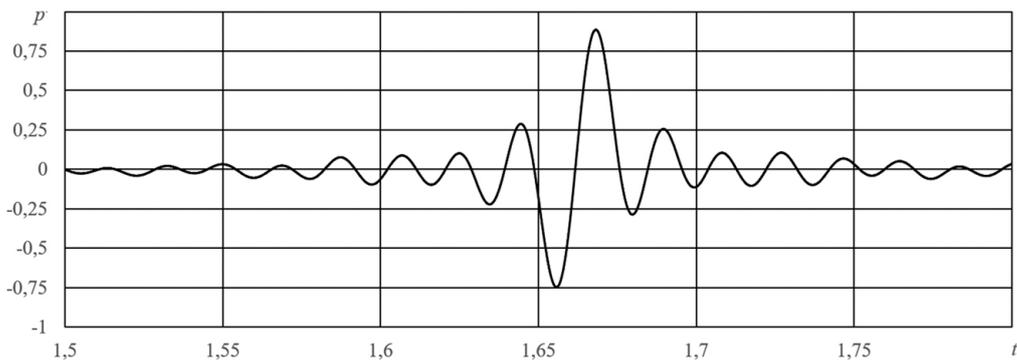


Рисунок 20. Зависимость от времени  $t$  (с) акустического давления  $p$  (Па) при моделировании звукового сигнала с использованием амплитудно-частотной характеристики автомобиля ВАЗ;  $V_x = 72$  км/час,  $V_y = 0$  км/ч,  $v_x = 10$  м/с,  $v_y = 0$  м/с; положение регистратора звука  $x = 60$ ,  $y = 0$ ,  $z = 4$  (м)

Источник: разработано автором

### Заключение

Современные математические методы обработки данных фото- и видеофиксации позволяют эффективно исследовать детерминированные показатели стохастических распределений интенсивностей потоков транспортных средств, выделять детерминированную и случайную составляющие функции интенсивности потока автомобилей.

Статистические методы анализа целесообразно использовать для сбора, хранения, обработки и обобщения данных о движении транспортных потоков на участках улично-дорожной сети, для моделирования и прогнозирования интенсивности потоков автомобиль-

ного транспорта, управления алгоритмами работы светофорных объектов, выявления аномалий в работе оборудования, а также можно рассматривать в качестве исходных данных при реконструкции, проектировании и строительстве дорог и дорожных объектов.

Гармонический анализ получаемых временных рядов следует использовать для прогнозирования интенсивности движения автомобильного транспорта, управления алгоритмами работы светофорных объектов. Вейвлеты можно рассматривать как тонкие инструменты анализа, позволяющие локализовать, «прощупать» и «измерить» отдельные «впадины» и «возвышенности» исследуемых временных рядов.

Вейвлет-анализ полезен для глубокого понимания и корректного описания интенсивности движения автомобилей по автомобильным магистралям современных городов. Этот подход может оказаться перспективным с точки зрения разработки средств прогнозирования.

Метод нормированного размаха Хёрста полезен для выявления наличия трендов в изменении характера движения автомобилей по дорогам. Этот подход можно применять для разработки средств прогнозирования и перспективного планирования, как инструмент для обоснования управленческих решений по реконструкции существующих улично-дорожных сетей и проектирования новых транспортных магистралей.

Фрактальный анализ целесообразно использовать для планирования и прогнозирования алгоритмов управления дорожным движением, анализа риска дорожно-транспортных происшествий, в качестве инструмента обоснования и принятия решений по управлению транспортными и пешеходными потоками.

Исследование пространственного распределения концентрации загрязняющих атмосферу антропогенных загрязнителей позволяет разрабатывать меры по защите здоровья населения, проживающего в непосредственной близости от автомобильных дорог, нацелено на изучение влияния интенсивности транспортных потоков и мощностей выбросов автомобилями отработавших газов, направления и скорости ветра на формирование атмосферного загрязнения. Постро-

ение математических моделей на основе уравнений газовой динамики является важным как с научной, так и с практической точек зрения и направлено на охрану здоровья жителей мегаполисов.

Вычислительная модель переноса и рассеяния над городской территорией отработавших газов автомобильного транспорта позволяет изучать перенос и рассеяние загрязняющих веществ в сложной пространственной области, содержащей здания, сооружения и транспортные магистрали, позволяет определять распределение концентрации загрязнителя в атмосферном воздухе. Эта модель может использоваться для объективного и обоснованного принятия решений по рационализации транспортных потоков, реконструкции дорог, проектированию и строительству новых транспортных магистралей с целью снижения техногенной нагрузки на жителей мегаполисов.

Исследование с использованием точного решения акустической волны особенностей формирования шума от потоков транспорта направлено на изучение амплитудно-частотных характеристик и формирование на этой основе уникальных звуковых профилей транспортных средств, на фундаментальное исследование особенностей формирования и пространственного распределения вблизи автомобильных дорог звукового фона от подвижных источников звука с нормативными и сверхнормативными мощностями. Предлагается решение задач, значимых как с научной точки зрения, так и обладающих практической пользой для охраны здоровья населения.

### 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. – EDN: FTCGRA.
2. Анисимов И. А., Осипов Г. С. Сравнение классического и модифицированного методов расчета фрактальной размерности временных рядов с помощью показателя Херста // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2020. – № 10–2(49). – С. 6–10. – <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2020-11104>. – EDN: VYWRKI.
3. Барабаш Т. К., Масловская А. Г. Компьютерное моделирование фрактальных временных рядов // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2010. – № 49. – С. 31–38. – EDN: PZMJRB.
4. Белов П. Н., Карлова З. Л. Траекторная модель переноса загрязнений // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 12. – С. 67–74.
5. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981. – 203 с.
6. Бояршинов М. Г. Особенности использования метода нормированного размаха и фрактального анализа при изучении интенсивности потока автомобильного транспорта // Мир транспорта. – 2024. – Т. 22, № 3 (112). – С. 12–21. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-2>. – EDN: ZBMWVY.
7. Бояршинов М. Г. Распределение концентрации выхлопных газов вблизи автотрассы со случайным потоком транспорта // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 6. – С. 128–140. – EDN: PBRDGR.
8. Бояршинов М. Г. Решение системы уравнений Эйлера для установившегося течения идеального газа из точечного источника // Вестник Челябинского государственного университета. – 2010. – № 24 (205). – С. 5–8. – EDN: MWJLWD.

9. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С. Закономерности показателя транспортного затора на некоторых пересечениях улично-дорожной сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 1. – С. 95–115. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-1-95>. – EDN: VQABMV.
10. 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. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-11>. – EDN: LMYNCK.
11. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С. Характеристики транспортного затора на основе данных системы фото- и видеofиксации // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 3. – С. 83–106. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-3-83>. – EDN: VJFNTJ.
12. 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: VBHFDH.
13. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Васькина Е. В. Применение показателя Хёрста для исследования интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 2. – С. 68–81. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-68>. – EDN: RXHDQO.
14. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Фурье-анализ интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 4. – С. 46–59. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-4-46>. – EDN: SJOPEL.
15. Бояршинов М. Г., Щукин Ю. А. Особенности функционирования придорожного парковочного пространства // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 6. – С. 89–108. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-89>. – EDN: YSVAZK.
16. Бояршинов М. Г., Щукин Ю. А., Артеменко Д. В. Количественные характеристики использования придорожного парковочного пространства // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1–2 (88). – С. 63–70. – [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-1-2\(88\)-63-70](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-1-2(88)-63-70). – EDN: PKUACK.
17. Вахрамеева М. В., Чуприкова З. В. Направления статистического изучения развития транспортных экосистем // Транспортное дело в России. – 2020. – № 4. – С. 60–62. – EDN: HXZKWB.
18. Ветрогон А. А., Крипак М. Н. Транспортное моделирование как инструмент для эффективного решения задач в области управления транспортными потоками // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 82–91. – [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1\(57\).82-91](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1(57).82-91) – EDN: YSFXUL.
19. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / И. И. Артоболевский [и др.] – Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
20. Витязев В. В. Вейвлет-анализ временных рядов: учебное пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. – 58 с.
21. Волкова О. Д., Самойлова Т. С. Методология экологического нормирования нагрузок выбросов автотранспорта на лесные экосистемы // Экологическое нормирование: проблемы и методы. – М., 1992. – С. 35–37.
22. Гандин Л. С., Соловейчик Р. Э. О распространении дыма из фабричных труб // Труды главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. – 1958. – Вып. 77 Вопросы физики приземного слоя воздуха. – С. 84–94.
23. Главацкий С. П. Статистический анализ трафика социальных сетей // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2013. – № 2. – С. 94–99. – EDN: SEQAQZ
24. Голубь Ю. Я. Аналитическое рассмотрение фрактальной размерности кросс-курсов одной валюты по отношению к другой // Наука и бизнес: пути развития. – 2014. – № 7(37). – С. 42–45. – EDN: SUFBVT.
25. Голубь Ю. Я. Изучение фрактальной размерности произведения временного ряда на число и умножения временных рядов // Наука и бизнес: пути развития. – 2016. – № 5(59). – С. 72–76. – EDN: WFJNCD.
26. Денисов А. И. О распространении пыли и газов из дымовых труб // Изв. АН СССР, геофизика. – 1957. – № 6. – С. 834–837.
27. Дещеревский А. В. Фрактальная размерность, показатель Херста и угол наклона спектра временного ряда: монография. – М.: Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, 1997. – 36 с. – EDN: WLESYZ.
28. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
29. Едигаров А. С. Численный расчет турбулентного течения холодного тяжелого газа в атмосфере // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1991. – Т. 31, № 9. – С. 1369–1380.
30. Жмурко Д. Ю., Осипов А. К. Прогнозирование показателей развития сахарной отрасли с применением

методов фрактального анализа // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 185–193. – EDN: LVBFMT.

31. Калуж Ю. А., Логинов В. М. Показатель Хёрста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – Т. 5, № 4 (12). – С. 29–37. – EDN: HZOKUN.

32. Кривоносова Е. К., Первадчук В. П., Кривоносова Е. А. Сравнение фрактальных характеристик временных рядов экономических показателей // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 113. – EDN: TGQDAZ.

33. Лопухин А. М. Применение методов фрактального анализа к прогнозированию показателей развития предприятий кофейной отрасли // Continuum. Математика. Информатика. Образование. – 2020. – № 4 (20). – С. 70–79. – <https://doi.org/10.24888/2500-1957-2020-4-70-79>. – EDN: NKFVHH.

34. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

35. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 319 с.

36. 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. – 2020. – Т. 17, № 6 (76). – С. 714–725. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-714-725>. – EDN: RYOHPR.

37. Михеев С. В. Сетевое управление на основе микро- и макромоделей транспортных потоков // Программные продукты и системы. – 2018. – № 1. – С. 19–24. – EDN: YPKTVJ.

38. Некрасова И. В. Показатель Хёрста как мера фрактальной структуры и долгосрочной памяти финансовых рынков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 7–3 (38). – С. 87–91. – EDN: UCQPHD.

39. Новые эффективные численные методики моделирования процесса распространения радионуклидов в атмосфере и их практическое использование / Р. В. Арутюнян [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 1995. – № 4. – С. 19–30. – EDN: VZBLUV.

40. Петров В. Ю., Петухов М. Ю., Якимов М. Р. Анализ режимов работы улично-дорожной сети крупных городов на примере города Перми: монография. – Пермь: ПГТУ, 2004. – 275 с. – EDN: RXRRBT.

41. 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. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-2-115>. – EDN: YAHUBX.

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

43. Распределение потоков индивидуального автотранспорта в городских сетях на основе задержек на перекрестках / Д. М. Ву [и др.] // Автомобильный транспорт (Харьков). – 2020. – № 46. – С. 47–62. – <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.47>. – EDN: ECSIHZ.

44. Сильянов В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.

45. Сильянов В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1984. – 287 с.

46. Сильянов В. В., Домке Э. Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 352 с.

47. Симонов П. М., Гарафутдинов Р. В. Моделирование и прогнозирование динамики курсов финансовых инструментов с применением эконометрических моделей и фрактального анализа // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. – 2019. – Т. 14, № 2. – С. 268–288. – <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2019-2-268-288>. – EDN: NHKAMR.

48. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 511 с.

49. Сравнение моделей распространения загрязнений в атмосфере / И. В. Белов [и др.] // Математическое моделирование. – 1999. – Т. 11, № 8. – С. 52–64.

50. Структурно-функциональный анализ твёрдых тканей зубов в оценке качества технологий отбеливания / Е. С. Ерофеева [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2010. – Т. 14, № 2. – С. 47–55. – EDN: MSONWL.

51. Углова Е. В., Саенко С. С. Распределение транспортных потоков по полосам движения на автомагистралях // Вестник МАДИ. – 2017. – № 1 (48). – С. 98–105. – EDN: YGTWLH.

52. Фельдман Ю. Г. Гигиеническая оценка автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха. – М.: Медицина. – 1975. – 160 с.
53. Цветков И. В., Крылова О. И. Комплекс программ и алгоритм расчета фрактальной размерности и линейного тренда временных рядов // Программные продукты и системы. – 2012. – № 4. – С. 21. – EDN: OXSJMU.
54. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц: в 5 томах / Под. ред. Ю. М. Давыдова. – М.: Национальная академия прикладных наук, 1995. – 1658 с.
55. Шамлицкий Я. И., Охота А. С., Мироненко С. Н. Моделирование транспортных потоков в среде AnyLogic // Программные продукты и системы. – 2018. – № 3. – С. 632–635. – EDN: UYSVPQ.
56. Шатров А. В., Шварц К. Г. Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса примесей в окрестности города Кирова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 117–125. – EDN: NTKDNL.
57. Шмырин А. М., Седых И. А., Щербаков А. П. Методы нелинейного анализа при исследовании характеристик производства клинкера // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, № 3. – С. 923–926. – EDN: SJSQBH.
58. Щелудяков А. М., Бояршинов М. Г. Аудио-идентификация транспортного средства // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2–3 (89). – С. 45–54. – [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-3\(89\)-45-54](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-3(89)-45-54). – EDN: OAJDBT.
59. 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. – No. 012013, 10 p. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1111/1/012013>. (In Eng.).
60. Chandra D., et al. (2023) The Effect of Traffic Characteristics on Noise Level in Padang City. Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 2582. – No. 012037. – <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2582/1/012037>. (In Eng.).
61. Chauhan B. S., et al. (2024) Comparison of Analytical and Machine Learning Models in Traffic Noise Modeling and Predictions. MAPAN-Journal of Metrology Society of India. – Vol. 39. – No. 2, pp. 397–415. – <https://doi.org/10.1007/s12647-023-00692-4>. (In Eng.).
62. Chock D. P. (1988) A simple line-source model for dispersion near roadways. Atmos. Environ. – Vol. 6. – No. 1, pp. 221–232. (In Eng.).
63. Chouksey A. K., et al. (2023) Heterogeneous road traffic noise modeling at mid block sections of mid sized city in India. Environmental Monitoring Assessment. – Vol. 195. – No. 1349. – <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11924-0>. (In Eng.).
64. Coensel B. D., Botteldooren D. (2007) Microsimulation Based Corrections on the Road Traffic Noise Emission Near Intersections. Acta Acustica United With Acustica. – Vol. 93, pp. 241–252. (In Eng.).
65. Csanady G. T. (1981) Crosswind shear quality model performance – a summary of the AMS workshop on dispersion model performance. Bulletin of the American Meteorological Society. – Vol. 61, pp. 599–609. (In Eng.).
66. Das S., Kalidoss V., Bakshi S. (2023) Noise levels at traffic intersections and awareness of noise pollution among traffic policemen and automobile drivers. International Journal of Occupational Safety and Health. – Vol. 13. – No. 3, pp. 353–360. (In Eng.).
67. Deryabin I., et al. (2022) Traffic lights as a factor in the regulation of traffic noise. Transportation Research Procedia. – Vol. 63(2), pp. 436–440. – <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.032>. (In Eng.).
68. Desarnaulds V., Monay G., Carvalho A. (2004) Noise Reduction by Urban Traffic Management. Th. P2. 23, IV, pp. 3257–3260. – URL: <https://pages.up.pt/~up209614/ica04.pdf> (accessed: 04.02.2025).
69. Elkafoury A., Elboshy B., Darwish A. M. (2023) Development of response surface method prediction model for traffic related roadside noise levels based on traffic characteristics. Environmental Science and Pollution Research. – Vol. 30, pp. 94229–94241. – <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28934-7>. (In Eng.).
70. 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. – No. 8, pp. 266–292. – <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.09.022>. (In Eng.).
71. Grassberger P., Procaccia I. (1983) Characterization of Strange Attractors. Physical Review Letters. – Vol. 50, pp. 346–349. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.346>. (In Eng.).
72. Hałucha M., Bohatkiewicz J., Mioduszewski P. (2023) Modeling the effect of electric vehicles on noise levels in the vicinity of rural road sections. Archives of Civil Engineering. – Vol. LXIX. – No. 3, pp. 573–586. – <https://doi.org/10.24425/ace.2023.146098>. (In Eng.).

73. Heidorn K. C., Davies A. E., Murphy M. C. (1991) Wind tunnel modelling of roadways: comparison with mathematical models. *J. Air and Waste Manag. Assoc.* – Vol. 41. – No. 11, pp. 1469–1475. (In Eng.).
74. Hu G., et al. (2020) Analytical approximation for macroscopic fundamental diagram of urban corridor with mixed human and connected and autonomous traffic. *IET Intelligent Transport Systems.* – Vol. 15. – No. 3, pp. 261–272. – <https://doi.org/10.1049/itr2.12020>. (In Eng.).
75. Itaa C. M., Ugwoha E., Yorkor B. (2023) Evaluation of Daily Vehicular Traffic Flows and Noise Levels at Major Junctions in Port Harcourt Metropolis, Nigeria. *Journal of Scientific Research and Reports.* – Vol. 29. – No. 10, pp. 71–84. – <https://doi.org/10.9734/jsrr/2023/v29i101799>. (In Eng.).
76. Kaklauskas L., Sakalauskas L. (2013) Study of on-line measurement of traffic self-similarity. *Central European Journal of Operations Research.* – Vol. 21, pp. 63–84. (In Eng.).
77. Kasibhatla P. S., Peters L. K., Fairweather G. (1988) Numerical simulation of transport from an infinite line source: Error analysis. *Atmos. Environ.* – Vol. 22. – No. 1, pp. 75–82. (In Eng.).
78. Kedri F. K., et al. (2023) Assessment of traffic noise pollution at residential and school areas in Jeli, Kelantan. *BIO Web of Conferences.* – Vol. 73. – No. 05024, pp. 1–7. – <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237305024>. (In Eng.).
79. Kotzen B. (2009) *Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design.* London, New York. – 294 p.
80. Kowalski M., et al. (2023) Effects of speed limits introduced to curb road noise on the performance of the urban transport system. *Journal of Transport & Health.* – Vol. 30. – No. 101592, pp. 1–16. – <https://doi.org/10.1016/j.jth.2023.101592>. (In Eng.).
81. Lakawa I., Hujiyanto H., Haryono H. (2023) A study of heterogeneous traffic noise trigger parameters for urban areas. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology.* – Vol. 13, pp. 79–87. – <https://doi.org/10.47577/technium.v13i.9572>. (In Eng.).
82. Li L., et al. (2012) A Mixed-Fractal Traffic Flow Model Whose Hurst Exponent Appears Crossover. *Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 23-26 June 2012. Harbin, China.* – <https://doi.org/10.1109/CSO.2012.103>. (In Eng.).
83. Luhar A. K., Patil R. S. (1986) Estimation of emission factors for Indian Vehicles. *Indian J. of Air Pollution Control.* – Vol. 7, pp. 155–160. (In Eng.).
84. Luhar A. K., Patil R. S. (1989) A general finite line source model for vehicular pollution prediction. *Atmospheric Environment.* – Vol. 23, pp. 555–562. – [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90004-8). (In Eng.).
85. Mehrvar H. R., Le-Ngoc T. (1995) Estimation of Degree of Self-Similarity for Traffic Control in Broadband Satellite Communications. *Proceedings 1995 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 5–8 Sept., 1995. Montreal, Quebec, Canada.* – <https://doi.org/10.1109/CCECE.1995.528187>. (In Eng.).
86. 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 Eng.).
87. Moriguchi Y., Uehara K. (1986) Numerical and experimental simulation of vehicle exhaust gas dispersion for complex urban roadways and their surroundings. *Journal of Wind Engineering.* – No. 25, pp. 102–107. (In Eng.).
88. Sippel I., Magdin K., Evtyukov S. (2023) Noise pollution of the road network of the city by road transport. *APEC-VI. E3S Web of Conferences.* – Vol. 411. – No. 02038. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341102038>. (In Eng.).
89. Sivacoumar R., Thanasekaran K. (1999) Line source model for vehicular pollution prediction near roadways and model evaluation through statistical analysis. *Environmental Pollution.* – Vol. 104. – No. 3, pp. 389–395. – EDN: ACEPSP.
90. Sørensen M., et al. (2023) Health position paper and redox perspectives – Disease burden by transportation noise. *Redox Biology.* – Vol. 69. – No. 102995. – <https://doi.org/10.1016/j.redox.2023.102995>. (In Eng.).
91. Sutcliffe J., et al. (2016) Harold Edwin Hurst: the Nile and Egypt, past and future. *Hydrological Sciences Journal.* – Vol. 61. – No. 9, pp. 1557–1570. – <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1019508>. (In Eng.).
92. Svensson T. (2002) Konsekvenser av traffic calming – Kunskapsöversikt och forskningsbehov. *Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University.* – Vol. 9(1). – <https://doi.org/10.5278/ojs.td.v9i1.4587>.
93. Totouom A., et al. (2023) Residential traffic noise exposure and health in Cameroon. *Journal of Environmental Economics and Policy.* – Vol. 13. – No. 2, pp. 259–273. – <https://doi.org/10.1080/21606544.2023.2241408>. (In Eng.).
94. 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 Eng.).

95. 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. – <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6958055>. (In Eng.).

### References

1. Abdulgazis, U. A., Bilyalova, L. R., Sitshaeva, Z. Z. (2019) [Traffic control at a controlled intersection, considering dynamic and probabilistic parameters]. *Uchenye zapiski KIPU* [Scientific notes of KIPU]. Vol. 3 (65), pp. 248–251. (In Russ.).
2. Anisimov, I. A., Osipov, G. S. (2020) [Comparison of classical and modified methods for calculating the fractal dimension of time series using the Hurst exponent]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i yestestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences]. Vol. 10–2(49), pp. 6–10. – <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2020-11104>. (In Russ.).
3. Barabash, T. K., Maslovskaya, A. G. (2010) [Computer modeling of fractal time series]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye i ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Amur State University. Natural and economic sciences]. Vol. 49, pp. 31–38. (In Russ.).
4. Belov, P. N., Karlova, Z. L. (1990) [Trajectory model of pollution transfer]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology]. Vol. 12, pp. 67–74. (In Russ.).
5. Blohincev, D. I. (1981) *Akustika neodnorodnoy dvizhushcheyasya sredy* [Acoustics of an inhomogeneous moving medium]. Moscow: Science, 203 p.
6. Boyarshinov, M. G. (2024) [Features of using the method of normalized range and fractal analysis in studying the intensity of the flow of motor transport]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation]. Vol. 22. No. 3, pp. 12–21. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-2>. (In Russ.).
7. Boyarshinov, M. G. (2006) [Distribution of exhaust gas concentrations near a highway with a random flow of cars]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of engineering physics and thermo-physics] Vol. 79. No. 6, pp. 128–140. (In Russ.).
8. Boyarshinov, M. G. (2010) [Solution of the system of Euler equations for steady flow of an ideal gas from a point source]. *Vestnik Chelyabinskogo gos. un-ta* [Bulletin of the Chelyabinsk State University]. Vol. 205. No. 24, pp. 5–8. (In Russ.).
9. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. (2024) [Patterns of traffic congestion at some intersections of the road network]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 95–115. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-1-95>. (In Russ.).
10. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. (2023) [The duration of the movement of cars in traffic as an indicator of traffic congestion]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation]. Vol. 21. No. 5, p. 93–105. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-11>. (In Russ.).
11. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S. (2023) [Characteristics of traffic congestion based on data from the photo and video recording system]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 3, pp. 83–106. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-3-83>. (In Russ.).
12. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vas'kina, E. V. (2022) [Application of wavelet analysis to study traffic flow intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4, pp. 88–103. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-88>. (In Russ.).
13. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vas'kina, E. V. (2022) [Application of the Hurst index to study the intensity of traffic flow]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 68–81. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-68>. (In Russ.).
14. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. (2021) [Fourier analysis of 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.).
15. Boyarshinov, M. G., Shchukin, Yu. A. (2024) [Features of the functioning of the roadside parking space]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 6, pp. 89–108. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-89>. (In Russ.).
16. Boyarshinov, M. G., Shchukin, Yu. A., Artemenko, D. V. (2025) [Quantitative characteristics of roadside parking space use]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [The world of transport and technological machines]. Vol. 1–2 (88), pp. 63–70. – [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-1-2\(88\)-63-70](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-1-2(88)-63-70). (In Russ.).
17. Vahrameeva, M. V., Chuprikova, Z. V. (2020) [Directions of statistical study of the development of transport

- ecosystems]. *Transportnoe delo v Rossii* [Transport business in Russia]. Vol. 4, pp. 60–62. (In Russ.).
18. Vetrogon, A. A., Kripak, M. N. (2018) [Transport modeling as a tool for effective solution of problems in the field of traffic management]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Simulation]. Vol. 3 (59), pp. 82–91. – [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1\(57\)](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1(57)). (In Russ.).
19. Artobolevskij, I. I., et al. (1978) *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti t.* [Vibrations in technology: A reference book. In 6 volumes]. Vol. 1. Oscillations of linear systems. Moscow: Machine building, 352 p.
20. Vityazev, V. V. (2001) *Veyvlet-analiz vremennykh ryadov* [Wavelet analysis of time series]. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 58 p.
21. Volkova, O. D., Samojlova, T. S. (1992) [Methodology of ecological rationing of vehicle emissions loads on forest ecosystems]. *Ekologicheskoe normirovanie: problemy i metody* [Environmental rationing: problems and methods]. Moscow, pp. 35–37. (In Russ.).
22. Gandin, L. S., Solovejchik, R. E. (1958) [On the spread of smoke from factory pipes]. *Nauchnye trudy. Glavnaya geofiz. Observatoriya* [Main geofiz. observatory]. Vol. 77, pp. 84–94. (In Russ.).
23. Glavackij, S. P. (2013) [Statistical analysis of social network traffic]. *Naukovi praci ONAZ im. O.S.* [Scientific works of the A. S. Popov ONAS]. Vol. 2, pp. 94–99. (In Russ.).
24. Golub', Yu. Ya. (2014) [Analytical consideration of the fractal dimension of the cross-rates of one currency in relation to another]. *Nauka i biznes: puti razvitiya. Matematicheskie metody i modeli* [Science and Business: ways of development. Mathematical methods and models]. Vol. 7(37), pp. 42–45. (In Russ.).
25. Golub', Yu. Ya. (2016) [The study of the fractal dimension of the product of a time series by a number and the multiplication of time series]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: ways of development.]. Vol. 5(59), pp. 72–76. (In Russ.).
26. Denisov, A. I. (1957) [On the Spread of Dust and Gases from Chimneys]. *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Geofizicheskaya* [News of the USSR Academy of Sciences. The Geophysical Series]. Vol. 6, pp. 834–837. (In Russ.).
27. Deshcherevskij, A. V. (1997) *Fraktal'naya razmernost', pokazatel' Khersta i ugol naklona spektra vremennogo ryada* [Fractal Dimension, Hearst Exponent and the Angle of Inclination of the Time Series Spectrum]. Seismology Institute of United Institute of Physics of the Earth named after O.Y. Schmidt, Russian Academy of Sciences, 36 p.
28. Drew, D. D. (1972) *Teoriya transportnykh potokov i upravleniye imi* [Theory of Transport Flows and Their Management]. Moscow: Transport, 424 p.
29. Edigarov, A. S. (1991) [Numerical Calculation Of The Turbulent Flow Of Cold Heavy Gas In The Atmosphere]. *Zhurn. vychislit. matematiki i mat. fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics]. Vol. 31. No. 9, pp. 1369–1380. (In Russ.).
30. Zhmurko, D. Yu., Osipov, A. K. (2018) [Forecasting Sugar Industry Development Indicators Using Fractal Analysis Methods]. *Vestnik Udmurtskogo un-ta. Ekonomika i pravo* [Bulletin of the Udmurt University. Economics and law]. Vol. 28. No. 2, pp. 185–193. (In Russ.).
31. Kalush, Yu. A., Loginov, V. M. (2002) [The Hurst Exponent and its Hidden Properties]. *Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki* [Siberian Journal of Industrial Mathematics]. Vol. V. No. 4 (12), pp. 29–37. (In Russ.).
32. Krivonosova, E. K., Pervadchuk, V. P., Krivonosova, E. A. (2014) [Comparison of Fractal Characteristics of Time Series of Economic Indicators]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. Vol. 6, p. 113. (In Russ.).
33. Lopuhin, A. M. (2020) [Application of Fractal Analysis Methods to Forecasting the Development Indicators of Coffee Industry Enterprises]. *Continuum. Matematika. Informatika. Obrazovanie* [Continuum. Mathematics. Computer science. Education]. Vol. 4, pp. 70–79. (In Russ.).
34. Mandelbrot, B. (2002) *Fraktal'naya geometriya prirody* [The Fractal Geometry of Nature]. Moscow: Institute of Computer Research, 656 p.
35. Marchuk, G. I. (1982) *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical Modeling in the Problem of the Environment]. Moscow: Science, 319 p.
36. Mikhailov, A. Yu., Popova, E. L. (2020) [Analysis of Mathematical Models for Calculating the Following Intervals in the Main Streams for the Prevailing Road Conditions of the Russian Federation]. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. Vol. 17 (6), pp. 714–725. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-714-725>. (In Russ.).
37. Mikheev, S. V. (2018) [Network-Centric 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.).
38. Nekrasova, I. V. (2015) [Hearst index as a measure of fractal structure and long-term memory of financial markets]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Scientific Research Journal]. Vol. 7(38). Part 3, pp. 87–91. (In Russ.).

39. Arutyunyan, R. V., et al. (1995) [New Effective Numerical Methods for Modeling the Process of Radionuclide Propagation in the Atmosphere and Their Practical Use]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings RAS. Energy]. Vol. 4, pp. 19–30. (In Russ.).
40. Petrov, V. Yu., Petuhov, M. Yu., Yakimov, M. R. (2004) *Analiz rezhimov raboty ulichno-dorozhnoy seti krupnykh gorodov na primere goroda Permi* [Analysis of the Modes of Operation of the Street and Road Network of Large Cities on the Example of the City of Perm]. Publishing house of PSTU, 275 p.
41. Pirov, Zh. T., Mihajlov, A. Yu. (2020) [The influence of the distribution of traffic flows on the speed of communication on segments of urban streets with controlled traffic]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 115–124. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-2-115>. (In Russ.).
42. Abramyan, B. L., et al. (1986) *Prochnost', ustoychivost', kolebaniya: Spravochnik v 3-kh t.* [Strength, Stability, Fluctuations: A handbook in 3 volumes]. Vol. 1 Moscow: Machnedubuilding, 464 p.
43. Wu, D. M., et al. (2020) [Distribution of Individual Vehicle Flows in Urban Networks Based on Delays at Intersections]. *Avtomobil'niy transport* [Automobile transport]. Vol. 46, pp. 47–62. – <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.47>. (In Russ.).
44. Sil'yanov, V. V. (1977) [Distribution of Individual Vehicle Flows in Urban Networks Based on Delays at Intersections]. *Moscow: Transport* [Transport], 303 p.
45. Sil'yanov, V. V. (1984) [Transport and Operational Qualities of Highways]. *Moscow: Transport* [Transport], 287 p.
46. Sil'yanov, V. V., Domke, E. R. (2008) *Transportno-ekspluatatsionnyye kachestva avtomobil'nykh dorog i gorodskikh ulits* [Transport and Operational Qualities of Highways and City Streets]. Moscow: Publishing Center «Academy», 352 p.
47. Simonov, P. M., Garafutdinov, R. V. (2019) [Modeling and Forecasting the Dynamics of Financial Instruments Using Econometric Models and Fractal Analysis]. *Vestnik Permskogo universiteta. Ekonomika* [Bulletin of Perm University. Economy]. Vol. 14. No. 2, pp. 268–288. – <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2019-2-268-288>. (In Russ.).
48. Smirnov, N. V., Dunin-Barkovskij, I. V. (1969) *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy* [Course of Probability Theory and Mathematical Statistics for Technical Applications]. Moscow: Science, 511 p. (In Russ.).
49. Belov, I. V., et al. (1999) [Comparison of Models of Pollution Distribution in the Atmosphere]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling]. Vol. 11. No. 8, pp. 52–64. (In Russ.).
50. Yerofeyeva, E. S., et al. (2010) [Structural and Functional Analysis of Dental Hard Tissues in Assessing the Quality of Whitening Technologies]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* [Russian Journal of Biomechanics]. Vol. 14. No. 2(48), pp. 47–55. (In Russ.).
51. Uglova, E. V., Saenko, S. S. (2017) [Distribution of Traffic Flows by Lanes on Motorways]. *Vestnik MADI* [Bulletin of MADI]. Vol. 1(48), pp. 98–105. (In Russ.).
52. Feldman, Yu. G. (1975) *Gigiyenicheskaya otsenka avtotransporta kak istochnika zagryazneniya atmosfernogo vozdukha* [Hygienic Assessment of Motor Transport as a Source of Atmospheric Air Pollution]. Moscow: Medicine, 160 p.
53. Cvetkov, I. V., Krylova, O. I. (2012) [Software Package and Algorithm for Calculating Fractal Dimension and Linear Trend of Time Series]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. Vol. 4, p. 21. (In Russ.).
54. Davydov, Yu. M. (1995) *Chislennoye issledovaniye aktual'nykh problem mashinostroyeniya i mekhaniki sploshnykh i syuchnykh sred metodom krupnykh chastits: v 5 tomakh* [Numerical Study of Actual Problems of Mechanical Engineering and Mechanics of Continuous and Bulk Media by the Method of Large Particles: in 5 volumes]. Moscow: National Academy of Applied Sciences, 1658 p.
55. Shamlitsky, Ya. I., Okhota, A. S., Mironenko, S. N. (2018) [Modeling of Traffic Flows in the Anylogic Environment]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. Vol. 3 (31), pp. 632–635. (In Russ.).
56. Shatrov, A. V., Schwartz, K. G. (2010) [Numerical Modeling of Atmospheric Mesoscale Impurity Transfer Processes in the Vicinity of the City of Kirov]. *Vychisl. mekh. splosh. sred* [Computational continuum mechanics]. Vol. 3. No. 3, pp. 117–125. (In Russ.).
57. Shmyrin, A. M., Sedyh, I. A., Shcherbakov, A. P. (2014) [Methods of Nonlinear Analysis in the Study of Clinker Production Characteristics]. *Vestnik TGU* [Bulletin of TSU]. Vol. 19. No. 3, pp. 923–926. (In Russ.).
58. Shcheludyakov, A. M., Boyarshinov, M. G. (2025) [Audio identification of a vehicle]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [The world of transport and technological machines]. Vol. 2–3 (89), pp. 45–54. – [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-3\(89\)-45-54](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-2-3(89)-45-54). (In Russ.).

- 
59. 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. No. 012013, 10 p. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1111/1/012013>. (In Eng.).
60. Chandra, D., et al. (2023) The Effect of Traffic Characteristics on Noise Level in Padang City. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2582. No. 012037. – <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2582/1/012037>. (In Eng.).
61. Chauhan, B. S., et al. (2024) Comparison of Analytical and Machine Learning Models in Traffic Noise Modeling and Predictions. *MAPAN-Journal of Metrology Society of India*. Vol. 39. No. 2, pp. 397–415. – <https://doi.org/10.1007/s12647-023-00692-4>. (In Eng.).
62. Chock, D. P. (1988) A simple line-source model for dispersion near roadways. *Atmos. Environ.* Vol. 6. No. 1, pp. 221–232. (In Eng.).
63. Chouksey, A. K., et al. (2023) Heterogeneous road traffic noise modeling at mid block sections of mid sized city in India. *Environmental Monitoring Assessment*. Vol. 195. No. 1349. – <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11924-0>. (In Eng.).
64. Coensel, B. D., Botteldooren, D. (2007) Microsimulation Based Corrections on the Road Traffic Noise Emission Near Intersections. *Acta Acustica United With Acustica*. Vol. 93, pp. 241–252. (In Eng.).
65. Csanady, G. T. (1981) Crosswind shear quality model performance – a summary of the AMS workshop on dispersion model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 61, pp. 599–609. (In Eng.).
66. Das, S., Kalidoss, V., Bakshi, S. (2023) Noise levels at traffic intersections and awareness of noise pollution among traffic policemen and automobile drivers. *International Journal of Occupational Safety and Health*. Vol. 13. No. 3, pp. 353–360. (In Eng.).
67. Deryabin, I., et al. (2022) Traffic lights as a factor in the regulation of traffic noise. *Transportation Research Procedia*. Vol. 63(2), pp. 436–440. – <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.032>. (In Eng.).
68. Desarnaulds, V., Monay, G., Carvalho, A. (2004) Noise Reduction by Urban Traffic Management. Th. P2. 23, IV, pp. 3257–3260. Available at: <https://pages.up.pt/~up209614/ica04.pdf> (accessed: 04.02.2025).
69. Elkafoury, A., Elboshy, B., Darwish, A. M. (2023) Development of response surface method prediction model for traffic-related roadside noise levels based on traffic characteristics. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 30, pp. 94229–94241. – <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28934-7>. (In Eng.).
70. 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. No. 8, pp. 266–292. – <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.09.022>. (In Eng.).
71. Grassberger, P., Procaccia, I. (1983) Characterization of Strange Attractors. *Physical Review Letters*. Vol. 50, pp. 346–349. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.346>. (In Eng.).
72. Hałucha, M., Bohatkiewicz, J., Mioduszewski, P. (2023) Modeling the effect of electric vehicles on noise levels in the vicinity of rural road sections. *Archives of Civil Engineering*. Vol. LXIX. No. 3, pp. 573–586. – <https://doi.org/10.24425/ace.2023.146098>. (In Eng.).
73. Heidorn, K. C., Davies, A. E., Murphy, M. C. (1991) Wind tunnel modelling of roadways: comparison with mathematical models. *J. Air and Waste Manag. Assoc.* Vol. 41. No. 11, pp. 1469–1475. (In Eng.).
74. Hu, G., et al. (2020) Analytical approximation for macroscopic fundamental diagram of urban corridor with mixed human and connected and autonomous traffic. *IET Intelligent Transport Systems*. Vol. 15. No. 3, pp. 261–272. – <https://doi.org/10.1049/itr2.12020>. (In Eng.).
75. Itaa, C. M., Ugwoha, E., Yorkor, B. (2023) Evaluation of Daily Vehicular Traffic Flows and Noise Levels at Major Junctions in Port Harcourt Metropolis, Nigeria. *Journal of Scientific Research and Reports*. Vol. 29. No. 10, pp. 71–84. – <https://doi.org/10.9734/jsrr/2023/v29i101799>. (In Eng.).
76. Kaklauskas, L., Sakalauskas, L. (2013) Study of on-line measurement of traffic self-similarity. *Central European Journal of Operations Research*. Vol. 21, pp. 63–84. (In Eng.).
77. Kasibhatla, P. S., Peters, L. K., Fairweather, G. (1988) Numerical simulation of transport from an infinite line source: Error analysis. *Atmos. Environ.* Vol. 22. No. 1, pp. 75–82. (In Eng.).
78. Kedri, F. K., et al. (2023) Assessment of traffic noise pollution at residential and school areas in Jeli, Kelantan. *BIO Web of Conferences*. Vol. 73. No. 05024, pp. 1–7. – <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237305024>. (In Eng.).
79. Kotzen, B. (2009) *Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design*. London, New York, 294 p.
80. Kowalski, M., et al. (2023) Effects of speed limits introduced to curb road noise on the performance of the

urban transport system . *Journal of Transport & Health*. Vol. 30. No. 101592, pp. 1–16. – <https://doi.org/10.1016/j.jth.2023.101592>. (In Eng.).

81. Lakawa, I., Hujiyanto, H., Haryono, H. (2023) A study of heterogeneous traffic noise trigger parameters for urban areas. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. Vol. 13, pp. 79–87. – <https://doi.org/10.47577/technium.v13i.9572>. (In Eng.).

82. Li, L., et al. (2012) A Mixed-Fractal Traffic Flow Model Whose Hurst Exponent Appears Crossover. Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 23-26 June 2012. Harbin, China. – <https://doi.org/10.1109/CSO.2012.103>. (In Eng.).

83. Luhar, A. K., Patil, R. S. (1986) Estimation of emission factors for Indian Vehicles. *Indian J. of Air Pollution Control*. Vol. 7, pp. 155–160. (In Eng.).

84. Luhar, A. K., Patil, R. S. (1989) A general finite line source model for vehicular pollution prediction. *Atmospheric Environment*. Vol. 23, pp. 555–562. – [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90004-8). (In Eng.).

85. Mehrvar, H. R., Le-Ngoc, T. (1995) Estimation of Degree of Self-Similarity for Traffic Control in Broad-band Satellite Communications. *Proceedings 1995 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 5–8 Sept., 1995. Montreal, Quebec, Canada*. – <https://doi.org/10.1109/CCECE.1995.528187>. (In Eng.).

86. 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 Eng.).

87. Moriguchi, Y., Uehara, K. (1986) Numerical and experimental simulation of vehicle exhaust gas dispersion for complex urban roadways and their surroundings. *Journal of Wind Engineering*. No. 25, pp. 102–107. (In Eng.).

88. Sippel, I., Magdin, K., Evtyukov, S. (2023) Noise pollution of the road network of the city by road transport. *APEC-VI. E3S Web of Conferences*. Vol. 411. No. 02038. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341102038>. (In Eng.).

89. Sivacoumar, R., Thanasekaran, K. (1999) Line source model for vehicular pollution prediction near roadways and model evaluation through statistical analysis. *Environmental Pollution*. Vol. 104. No. 3, pp. 389–395. (In Eng.).

90. Sørensen, M., et al. (2023) Health position paper and redox perspectives – Disease burden by transportation noise. *Redox Biology*. Vol. 69. No. 102995. – <https://doi.org/10.1016/j.redox.2023.102995>. (In Eng.).

91. Sutcliffe, J., et al. (2016) Harold Edwin Hurst: the Nile and Egypt, past and future. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 61. No. 9, pp. 1557–1570. – <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1019508>. (In Eng.).

92. Svensson, T. (2002) Konsekvenser av traffic calming – Kunskapsöversikt och forskningsbehov. *Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University*. Vol. 9(1). – <https://doi.org/10.5278/ojs.td.v9i1.4587>.

93. Totouom, A., et al. (2023) Residential traffic noise exposure and health in Cameroon . *Journal of Environmental Economics and Policy*. Vol. 13. No. 2, pp. 259–273. – <https://doi.org/10.1080/21606544.2023.2241408>. (In Eng.).

94. 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 Eng.).

95. 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*. – <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6958055>. (In Eng.).

#### Информация об авторе:

**Михаил Геннадьевич Бояршинов**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобили и технологические машины», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ORCID iD:** 0000-0003-4473-6776, **ResearcherID:** ACE-0166-2022, **Scopus Author ID:** 6506008407

e-mail: [mgboyarshinov@pstu.ru](mailto:mgboyarshinov@pstu.ru)

Михаил Геннадьевич Бояршинов после окончания Пермского политехнического института (ППИ) по специальности «Динамика и прочность машин» в 1980 году поступил на работу в ППИ. В 1985 году в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана он защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Механика деформируемого твердого тела», а в 2000 году докторскую диссертацию по специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в Красноярском государственном техническом университете. В 2008 году получил ученое звание профессора по кафедре вычислительной математики и механики.

С 2015 по 2022 годы Бояршинов М. Г. был заведующим кафедрой «Автомобили и технологические машины». Михаил Геннадьевич – член редколлегии журнала «Транспорт. Транспортные сооружения. Экология», а также рецензент ряда журналов по вопросам механики деформируемого твердого тела, механики жидкостей и газа.

Он является членом диссертационного совета 99.0.067.02 по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, созданного на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Михаил Геннадьевич имеет более 400 публикаций в журналах «Известия АН СССР. Металлы», «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия», «Математическое моделирование», «Вычислительная механика сплошных сред», «Журнал вычислительной математики и математической физики», «Прикладная механика и техническая физика», «Инженерная экология», «Мир транспорта», «Интеллект. Инновации. Инвестиции», «Мир транспорта и технологических машин», «Транспорт Российской Федерации», «Вестник СибАДИ», «International Journal of Mechanical Science», «Lecture Notes in Mechanical Engineering», «Solid State Phenomena», «Journal of engineering physics and thermo-physics», «Hydraulic Engineering Software» и других.

Его научной школой разработаны уникальные математические модели реальных процессов знакопеременного изгиба с натяжением, петлеобразования тяжелой полосы, расчета теплового режима системы энергообеспечения, подъема и рассеяния легкого газа в атмосфере, распространения продуктов сгорания ракетного топлива при огневых испытаниях, трансформации воздушных потоков растительным массивом, эволюции концентрации отработавших газов автотранспорта, эмиссия тяжелых металлов в водные объекты. Получены точные решения задач изгиба с растяжением длинномерного изделия, установившегося течения идеального газа из точечного источника, переноса и рассеяния отработавших газов из подвижного точечного источника при наличии ветра, распространение звуковой волны от подвижного источника при наличии ветра. Им был предложен способ построения инвариантных векторных и тензорных интервальных объектов и определены операции над ними, был решен ряд задач механики деформируемого твердого тела с использованием разработанного подхода. Применяются методы математической статистики, Фурье-, вейвлет- и фрактального анализа, метод нормированного размаха для анализа данных мониторинга транспортных потоков.

Он ведет активную просветительскую работу и читает обзорные лекции для учащихся школ и студентов Пермского национального исследовательского политехнического университета, Российского университета транспорта, Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, Белорусского национального технического университета, Оренбургского государственного университета и других высших учебных заведений России.

Под руководством профессора М. Г. Бояршинова аспиранты изучили процессы переноса и рассеяния отработавших газов автомобильного транспорта, детально проанализировали работу системы выпуска отработавших газов автомобиля при отрицательных температурах окружающего воздуха, разработали количественные показатели и критерий транспортных заторов, выявили закономерности функционирования парковочных территорий и выполнили другие диссертационные исследования.

За время работы в Пермском национальном исследовательском политехническом университете Михаил Геннадьевич читал курсы лекций по теоретической механике, сопротивлению материалов, механике жидкости и газа, механике контактного взаимодействия, основам механики разрушения, специальным главам механики, эволюционным задачам механики; современным технологиям программирования, программированию на языке высокого уровня, пакетам прикладных программ в динамике и прочности конструкций; численным методам, вычислительной математике, вычислительным методам прикладной механики, научно-техническим расчетам в прикладных задачах механики и управления, анализу численных моделей в механике; математическим моделям технических систем, методологии научных исследований, вычислительному моделированию узлов и элементов строительных и дорожных машин и комплексов, оптимизации и управлению в технических системах.

Им опубликовано более 30 учебных, методических и научных изданий, в том числе 16 учебников и учебных пособий, 9 монографий. Бояршинов М. Г. разработал учебные курсы «Численные методы», «Научно-исследовательская работа», «Методология теоретических и экспериментальных исследований», «Вычислительное моделирование узлов и систем строительных и дорожных машин и комплексов», «Оптимизация и управление в технических системах».

Бояршинову М. Г. присвоено почетное звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Михаил Геннадьевич является экспертом Российской академии наук и действительным членом Российской академии транспорта.

Статья поступила в редакцию: 12.01.2026; принята в печать: 27.01.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

**Information about the author:**

**Mikhail Gennadievich Boyarshinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

**ORCID iD:** 0000-0003-4473-6776, **ResearcherID:** ACE-0166-2022, **Scopus Author ID:** 6506008407

e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

Mikhail Gennadievich Boyarshinov graduated in February 1980 with a degree in Dynamics and Strength of Machines from Perm Polytechnic Institute and he joined PPI (PSTU, PNRPU). In 1985, he defended his thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty «Mechanics of Deformable solids» (Bauman Moscow State Technical University). In 2000, he defended his thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty «Mathematical modeling, numerical methods and software packages» (Krasnoyarsk State Technical University). In 2008, he was awarded the academic title of Professor in the Department of Computational Mathematics and Mechanics.

From 2015 to 2022, Mikhail Boyarshinov was the Head of the Department «Automobiles and Technological Machines». Mikhail Gennadievich is a member of the Editorial Board of the journal «Transport. Transport Facilities. Ecology», as well as a reviewer for several journals on the mechanics of deformable solids, fluid mechanics, and gas mechanics.

He is a member of the Dissertation Council 99.0.067.02, specializing in 1.1.8. Mechanics of deformable solids, established on the basis of Perm National Research Polytechnic University.

Mikhail Gennadievich has more than 400 publications in the journals «Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals», «News of higher educational institutions. Ferrous Metallurgy», «Mathematical Modeling», «Computational Continuum Mechanics», «Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics», «Applied Mechanics and Technical Physics», «Engineering Ecology», «World of Transport and Transportation», «Intelligence. Innovation. Investments», «World of Transport and Technological Machines», «Transport of the Russian Federation», «Bulletin of SibADI», «International Journal of Mechanical Science», «Lecture Notes in Mechanical Engineering», «Solid State Phenomenon», «Journal of engineering physics and thermo-physics», «Hydraulic Engineering Software» and others.

In his scientific work, M.G. Boyarshinov developed unique mathematical models of real processes of alternating bending with tension, looping of a heavy strip, calculation of the thermal regime of the energy supply system, lifting and scattering of light gas in the atmosphere, distribution of rocket fuel combustion products during fire tests, transformation of air flows by vegetation, evolution of exhaust gas concentrations of vehicles, emission of heavy metals in water bodies. In the theoretical field, precise solutions have been obtained for bending and stretching a long-length product, steady-state flow of an ideal gas from a point source, transferring and scattering of exhaust gases from a moving point source in the presence of wind, and propagation of a sound wave from a moving source in the presence of wind. A method for constructing invariant vector and tensor interval objects is proposed and operations on them are defined, and several problems in the mechanics of deformable solids are solved using the developed approach. Application of methods of mathematical statistics, Fourier, wavelet and fractal analysis, the normalized range method for analyzing traffic flow monitoring data.

Mikhail Gennadievich conducts active educational work and gives review lectures for school students and students of higher educational institutions in Russia: Perm National Research Polytechnic University, Russian University of Transport, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Belarusian National Technical University, Orenburg State University and others.

Under the guidance of Professor M. G. Boyarshinov, graduate students studied the processes of transport and dispersion of exhaust gases of motor transport, analyzed in detail the operation of the exhaust system of the car at subzero ambient temperatures, developed a quantitative indicator and criterion of traffic congestion patterns, identified patterns of functioning of parking areas and performed another dissertation research.

During his time at Perm Polytechnic University (PNRPU), he gave lectures on theoretical mechanics, material resistance, fluid and gas mechanics, contact mechanics, fundamentals of fracture mechanics, special chapters of mechanics, evolutionary problems of mechanics; modern programming technologies, programming in a high-level language, application software packages in dynamics and structural strength; numerical methods, computational

mathematics, computational methods of applied mechanics, scientific and technical calculations in applied problems of mechanics and control, analysis of numerical models in mechanics; mathematical models of technical systems, research methodology, computational modeling of nodes and elements of construction and road machinery and complexes, optimization and control in technical systems.

He has prepared more than 30 educational, methodological and scientific publications, including 16 textbooks and manuals, and 9 monographs. He developed the training courses «Numerical methods», «Scientific research», «Methodology of theoretical and experimental research», «Computational modeling of nodes and systems of construction and road machinery and complexes», «Optimization and control in technical systems».

Boyarshinov M. G. was awarded the badge «Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation».

Mikhail Gennadievich is an expert of the Russian Academy of Sciences and a full member of the Russian Academy of Transport.

The paper was submitted: 12.01.2026.

Accepted for publication: 27.01.2026.

The author has read and approved the final manuscript.