

# ТРАНСПОРТ

УДК 656.1

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-88>

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

М. Г. Бояршинов<sup>1</sup>, А. С. Вавилин<sup>2</sup>, Е. В. Васькина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет / Пермский военный институт войска национальной гвардии Российской Федерации, Пермь, Россия  
e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия  
e-mail: vavilin@tbdd.ru

<sup>3</sup> Пермская дирекция дорожного движения, Пермь, Россия  
e-mail: evvaskina@yandex.ru

**Аннотация.** Актуальность работы обусловлена специфическими свойствами вейвлет-анализа, позволяющими выявлять не только амплитудно-масштабные (частотные) характеристики рассматриваемого временного ряда, но и эволюцию этих характеристик в течение времени наблюдения. Представляется целесообразным выявить в результате исследования амплитудно-масштабные показатели интенсивности транспортного потока, которые могут оказаться индикаторами возможных проблемных ситуаций (заторы, дорожно-транспортные происшествия, отказы систем фото- и видеофиксации и проч.) и использовать их в дальнейшем при регулировании и управлении движением автомобилей на основе обработки данных о потоках транспорта, поступающих со стационарных комплексов фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения.

**Объектом изучения** является участок дороги с интенсивным односторонним движением, оборудованный программно-техническим комплексом, позволяющим измерять характеристики потока автомобильного транспорта. **Предмет исследования** – закономерности изменения суточной интенсивности потока автомобилей.

**Цель** настоящей работы состоит в анализе эволюции амплитудно-масштабных показателей, получаемых с помощью вейвлет-анализа, в результате обработки временных рядов интенсивности движения автомобильного транспорта по дороге общего пользования.

Основной **теоретико-методический подход** является вейвлет-преобразование функции интенсивности транспортного потока с использованием вейвлетов МНат и Морле. Используемый подход позволит устанавливать соответствие числовых характеристик временных рядов, полученных в результате применения вейвлет-анализа, с эволюцией интенсивности транспортного потока, что является **научной новизной** выполненного исследования.

В настоящей работе применение процедуры вейвлет-анализа данных программно-технических комплексов фото- и видеонаблюдения, полученных в течение суток, позволило построить зависимости от времени амплитудно-масштабных (частотных) показателей интенсивности движения автомобилей на дороге, связывающей центральный и отдаленные районы города Перми. **В результате исследования** временных рядов построены распределения вейвлет-образов, скалограмм, скелетонов и скейлограммы суточной интенсивности транспортного потока. Предложено объяснение характерных особенностей полученных зависимостей и их связи с функцией интенсивности потока транспорта.

**Практическая значимость** заключается в получении амплитудно-масштабных (частотных) характеристик как результата вейвлет-анализа интенсивности потока автомобилей с применением вейвлетов МНат и Морле, что представляет практический интерес с точки зрения прогнозирования движения транспортных средств, управления работой светофорных объектов, мониторинга работы оборудования и проч.

**Направление дальнейшего исследования** – получение, обработка, анализ и обобщение результатов выполнения амплитудно-масштабного вейвлет-анализа временных рядов интенсивности транспортных потоков на участках улично-дорожной сети с различной интенсивностью движения транспортных средств на примере крупного промышленного города.

**Ключевые слова:** интенсивность транспортного потока, временной ряд, вейвлет-анализ, вейвлеты МНат и Морле.

**Для цитирования:** 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>.

## APPLICATION OF THE WAVELET ANALYSIS TO RESEARCH THE TRAFFIC FLOW INTENSITY

**M. G. Boyarshinov<sup>1</sup>, A. S. Vavilin<sup>2</sup>, E. V. Vaskina<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University / Perm Military Institute of the National Guard of the Russian Federation, Perm, Russia  
e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia  
e-mail: vavilin@tbdd.ru

<sup>3</sup> Road Traffic Directorate of Perm, Perm, Russia  
e-mail: evvaskina@yandex.ru

**Abstract.** *The relevance of the work is the specific properties of the wavelet analysis, which make it possible to identify not only the amplitude-scale (frequency) characteristics of the time series under consideration, but also the evolution of these characteristics during the observation time. As a result of the study, it is advisable to identify those indicators of the intensity of traffic flow that may turn out to be indicators of possible problematic situations (congestion, traffic accidents, etc.). It is advisable to use them in the future when regulating and controlling traffic on the basis of processing information about traffic flows that comes from stationary video recording complexes of traffic violations.*

*The object of study is a road with intensive one-way traffic, equipped with a software and hardware complex that allows measuring the characteristics of the flow of motor transport. The subject of the study is the daily intensity of the flow of cars.*

*The purpose of this study is to identify patterns in the indicators evolution obtained using wavelet analysis as a result of processing of the time series of the car traffic intensity on the road network.*

*As a theoretical and methodological approach, the wavelet transforms using the МНат wavelet, and the Morlet wavelet is used. The approach used by the authors allowed us to establish the correspondence of some characteristics obtained during the wavelet analysis with the evolution of the traffic flow intensity function during the daily observation time, which is the scientific novelty of the study.*

*The wavelet analysis of the data of the video surveillance software and hardware complexes obtained during the day allowed us to construct time dependences of amplitude-scale (frequency) indicators of the car traffic intensity on the road connecting the central and rear areas of the city of Perm. As a result of the study of time series, experimental three-dimensional distributions of wavelet images, scalograms, skeletons and scalegrams of the function of the daily intensity of the traffic flow were obtained. An explanation of the characteristic features of the obtained dependencies and their relationship with the initial function of the traffic flow intensity is proposed.*

*The practical significance lies in obtaining amplitude-scale (frequency) characteristics as a result of wavelet analysis of the traffic intensity using МНат and Morlet wavelets, which is of practical interest from the point of view of predicting the movement of vehicles, controlling the operation of traffic lights, monitoring the operation of equipment, etc.*

*The direction of further research is to obtain, process, analyze and generalize the results of performing amplitude-scale wavelet analysis for time series of traffic flow intensity on parts of the road network with different vehicle traffic intensity.*

**Key words:** traffic flow intensity, time series, wavelet analysis, МНат and Morlet wavelets.

**Cite as:** Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vaskina, E. V. (2022) [Application of the wavelet analysis to research the traffic flow intensity], *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4, pp. 88–103, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-88>.

## Введение

Современные методы обработки числовых данных успешно используются при анализе солнечной активности [4], в метеорологии [19], акустике [35], сейсмологии [17], цифровой обработке сигналов и видеоизображений [12], для выявления энергетических характеристик частотных составляющих при диагностике технических систем [2], при определении свойств материалов во время циклических испытаний и в результате накопления повреждений [3]. Успешно применяемый методический подход к анализу амплитудно-частотных (или амплитудно-масштабных – в терминах вейвлет-анализа) особенностей процессов и явлений в самых разных областях знаний [8, 11] – исследование временных рядов с использованием вейвлет-анализа.

Метод идентификации плазменных потоков солнечного ветра на основе вычисления вейвлет-скелетонного спектра в области магнитной гидродинамики предложен в [4]. Для выбора погодных факторов, влияющих на поведение транспортного потока, в [26] использован анализ трафика для исследования корреляций между транспортным потоком и экзогенными погодными факторами на разных частотных (масштабных) и временных интервалах. Вейвлет-исследование [19] выявило, что доминирующим режимом изменчивости содержания атмосферного монооксида углерода является годовой цикл метеорологических параметров с зимними максимумами и летними минимумами.

Вейвлет-анализ [24] используется в медицинских исследованиях мышечной активности в процессе измерения электромиографической активности мышц при хлыстовом движении шеи, что является причиной опасных травм при дорожно-транспортных происшествиях. Вейвлет-преобразования [25] при анализе электроэнцефалограммы человеческого мозга позволяют анализировать спектральные возмущения, обусловленные вероятностью совершения ошибок при управлении автомобилем в условиях интенсивного движения, поскольку причиной дорожно-транспортных происшествий зачастую является агрессивное или нестабильное управление автомобилем. В [32] используется анализ спектра мощности и вейвлет-преобразования электроэнцефалографии водителя автомобиля, при этом указывается, что вейвлет-анализ функций областей мозга и особенностей вождения отличается повышенной точностью.

Вейвлеты активно применяются при изучении вопросов безопасности транспортных процессов. В [14] отмечается, что существующие критерии качества организации дорожного движения не способны учитывать все параметры загрузки улично-дорожной сети, и это приводит к необходимости разработки универсальных критериев, на основе которых можно будет объективно рассматривать

ситуации, происходящие на дороге. Целесообразно анализировать транспортные потоки на городских улицах на основе данных, получаемых с помощью технических средств фото- и видео-фиксации [10]. По результатам [30] использования множественных регрессий и вейвлет-анализа установлено, что на безопасность управления транспортных средств водителями положительно влияет внедрение водительских прав с испытательным сроком.

Вейвлет-анализ широко используется в моделировании транспортных процессов. В работе [31] предложен вейвлет-алгоритм прогнозирования скорости транспортного средства. Модель [22] пропускной способности высокоскоростных транспортных коридоров основана на нейросетевой модели в сочетании с оценкой стохастической пропускной способности в период транспортного затора и свободного движения транспортных средств. В [23] для прогнозирования потока общественного транспорта используются модель дерева решений и вейвлет-нейронная сеть. Математическая модель [21] аварии транспортного средства использует воспроизведение импульса ускорения при попадании в аварию и предполагает выполнение анализа во временной области, частотного–временного анализа с использованием вейвлета Морле. На использовании вейвлет-нейронной сети и генетического алгоритма построена модель [29] прогнозирования остановок транспортных средств на скоростной автомагистрали. Система обнаружения инцидентов [18] применяет программное обеспечение VISSIM для сбора параметров до и после дорожно-транспортного происшествия, вызванного внезапной остановкой автомобиля; в этом случае вейвлет-анализ используется для обработки параметров трафика на основе данных, полученных в результате моделирования.

Аппарат вейвлет-преобразований [15] является эффективным средством контроля и управления беспилотными транспортными средствами при их перемещении по траекториям карьерных маршрутов в условиях открытых горных работ. За счет метода удаления случайных данных на основе вейвлет-шумоподавления [20] возможно улучшение качества информации о движении беспилотных автомобилей. В [34] с помощью вейвлет-преобразования анализируются траектории транспортных средств, изменения которых могут быть вызваны маневрами при смене полосы движения либо при следовании за автомобилем-лидером. Точная и быстрая система [28] распознавания дорожных знаков, необходимая для беспилотных автомобилей, основана на дискретных косинус- и вейвлет-преобразованиях и позволяет определять основные характеристики изображений.

Непрерывное вейвлет-преобразование [35] используется для извлечения информации из акусти-

ческих сигналов дизельного двигателя для мониторинга его состояния. Мониторинг транспортной нагрузки является одним из важных вопросов анализа состояния конструкций мостов [36]: переменная нагрузка от потока транспорта рассматривается как комбинация стационарной нагрузки и изменяющегося во времени компонента, причем последняя описывается вейвлет-функциями. Предлагаемый способ позволяет эффективно определять вес движущегося транспорта с высокой точностью. Вибродиагностика узлов транспортных средств с помощью вейвлет-преобразования, обладающего высокой чувствительностью, рассматривается в [13].

Методика построения репрезентативного городского цикла электромотоцикла для изучения потребления энергии с использованием вейвлет-декомпозиции разработана в [33]. В [16] представлен метод определения типа транспортного средства, основанный на анализе снимков с помощью вейвлет-преобразования Добеши; алгоритм устойчив к незначительным возмущениям в изображении автомобиля и обладает высокой производительностью при определении типа транспортного средства.

Авторами [12] проведено исследование Фурье-вейвлет-спектров природных и городских фонов, пространственных и спектральных характеристик транспортных средств, полученных с помощью камер видеонаблюдения, установленных на трассах с большой интенсивностью движения для контроля дорожной обстановки. Для оценки неоднородности потока транспортных средств, движущихся

в разных направлениях, выполнен анализ трафика [27] с использованием дискретного вейвлет-преобразования и байесовской трактовки регрессии Пуассона. Вейвлет-преобразование в [1] используется в автоматизированных системах контроля дорожного движения для выделения и сегментации движущихся объектов, определения параметров транспортных потоков. В [9] вейвлеты используются для выявления локальных особенностей динамики технических компонент транспортной системы при изменении режима функционирования этих компонент с целью определения состояния системы и прогнозирования возникновения аварийных ситуаций. Анализ и интерпретация временных рядов, полученных из систем мониторинга транспортных потоков, выполняется в [7] с использованием вейвлетов Морле для анализа средней скорости, числа транспортных средств, среднего времени прохождения участка улично-дорожной сети.

Обзор российских и зарубежных литературных источников свидетельствует о значительном интересе к использованию математического аппарата вейвлет-анализа в самых различных областях знаний, в том числе и в различных аспектах транспортной науки.

#### Методика проведения исследования

Вейвлет-анализ функции  $N(t)$  интенсивности транспортного потока основан на использовании интегрального преобразования [13]

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

где

$a$  и  $b$  – параметры, определяющие размер (масштаб) вейвлета и его временную локализацию (сдвиг) соответственно;

$\psi(t)$  – анализирующий вейвлет (ядро интегрального преобразования);

$t$  – время;

символом «\*» обозначена процедура комплексного сопряжения.

В качестве вейвлета наиболее часто используются функции

$$\Psi(t) = (1 - t^2) e^{-t^2/2} - \text{вейвлет МНат (Mexican Hat)}, \quad (2)$$

$$\Psi(t) = e^{-t^2/2} e^{i2\pi t} - \text{вейвлет Морле (Morlet)}, \quad (3)$$

в последнем выражении  $i$  – комплексная единица.

Анализ вейвлет-образа  $W(a, b)$  интенсивности транспортного потока выполняется, как правило, с использованием плотности спектра (локального спектра) энергии функции  $N(t)$

$$E(a, b) = |W(a, b)|^2, \quad (4)$$

и глобального спектра энергии, вычисляемого для той же функции,

$$E_b(a) = \int_{-\infty}^{\infty} E(a, b) db = \int_{-\infty}^{\infty} |W(a, b)|^2 db. \quad (5)$$



В результате обработки данных, получаемых с программно-технических измерительных комплексов видеオフィкации нарушений правил дорожного движения, установленных на городской улично-дорожной сети г. Перми, получены временные ряды значений (отсчетов),  $N(t_k)$ ,  $k = \overline{1, N}$  с постоянными интервалами  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$  (рисунок 1).

Это приводит к необходимости применять численное интегрирование для вычисления вейвлет-образа (1) с использованием численных процедур; для получения результата в настоящей работе использован метод трапеций, имеющий погрешность второго порядка относительно шага интегрирования  $\Delta t$ :

$$W(a_i, b_j) = \frac{\Delta t}{\sqrt{a}} \left[ \frac{N(t_1)}{2} \psi^* \left( \frac{t_1 - b_j}{a_i} \right) + \sum_{k=2}^{N-1} N(t_k) \psi^* \left( \frac{t_k - b_j}{a_i} \right) + \frac{N(t_N)}{2} \psi^* \left( \frac{t_N - b_j}{a_i} \right) \right]. \quad (6)$$

Здесь обозначено:

$$a_i = a_1 + (i - 1)\Delta a, \quad i = \overline{1, N_a}, \quad b_j = b_1 + (j - 1)\Delta b, \quad j = \overline{1, N_b}$$

– дискретные значения параметров  $a$  и  $b$  вейвлетов (2) и (3) с приращениями  $\Delta a$  и  $\Delta b$  соответственно;  $N_a$  и  $N_b$  – принятые для расчетов количества узловых значений параметров  $a$  и  $b$  соответственно.

Согласно выражениям (4) и (5) вычисляются (скелограммы) функции  $N(t)$  интенсивности транспортных дискретные значения локального спектра энергии (портного потока),

$$E(a_i, b_j) = |W(a_i, b_j)|^2,$$

и глобального спектра энергии (скейлограммы) той же функции,

$$E_b(a_i) = \Delta b \left[ \frac{|W(a_i, b_1)|^2}{2} + \sum_{j=2}^{N_b-1} |W(a_i, b_j)|^2 + \frac{|W(a_i, b_{N_b})|^2}{2} \right].$$

Исследование частотного спектра временного ряда  $N(t_k)$ ,  $k = \overline{1, N}$ , удобно выполнять с использованием скелетона, определяемого выражением

$$Sc(a_i, b_j) = \begin{cases} E(a_i, b_j), & \text{если } E(a_{i-1}, b_j) < E(a_i, b_j) > E(a_{i+1}, b_j) \\ & \text{или } E(a_i, b_{j-1}) < E(a_i, b_j) > E(a_i, b_{j+1}); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

### Обработка данных программно-измерительных комплексов системы фото- и видеオフィкации

В качестве исходной информации для проведения вейвлет-анализа в настоящей работе используются данные, полученные со стационарных комплексов фото- и видеオフィкации нарушений правил дорожного движения [5, 6], установленных на улично-дорожной сети г. Перми.

В качестве временного ряда интенсивности потока транспорта использовалась функция  $N(t_k) = n(t_k)/\Delta$ , где  $n(t_k)$  – количество автомобилей, зафиксированных программно-техническим комплексом системы видеонаблюдения на контрольном рубеже за период времени от  $t_k - \Delta/2$  до  $t_k + \Delta/2$ ,  $k = \overline{1, N}$ , где  $\Delta$  – интервал времени между фиксированными моментами наблюдения. Измерение интенсивности потока автомобилей выполнялось в течение недели, с 17 по 23 мая 2021 года (рисунок 1), на дороге со стабильно высокой интенсивностью движения, связывающей цент-

ральный и отдаленные районы города Перми.

На рисунке 1, а показана зависимость  $N(t_k)$  интенсивности транспортного потока при интервалах времени, равных  $\Delta = 5$  мин, в течение недели наблюдения. Полученная зависимость состоит из семи относительно самостоятельных фрагментов, каждый из которых отражает суточное изменение интенсивности транспортного потока в соответствующий день недели. Видимое различие суточных фрагментов отражает неравномерность (стохастичность) разброса значений интенсивности потока транспорта в течение суток [5].

На рисунке 1, б показан фрагмент интенсивности транспортного потока, соответствующий суткам (на примере понедельника, верхняя кривая 1), с тем же интервалом осреднения  $\Delta$ ; наибольшая интенсивность транспортного потока в указанный день достигла 660 авт/ч. Здесь же показана центрированная зависимость  $N(t_k) - N_{cp}$  (нижняя кривая 2), где  $N_{cp} = \sum_{k=1}^N N(t_k)/N$ .

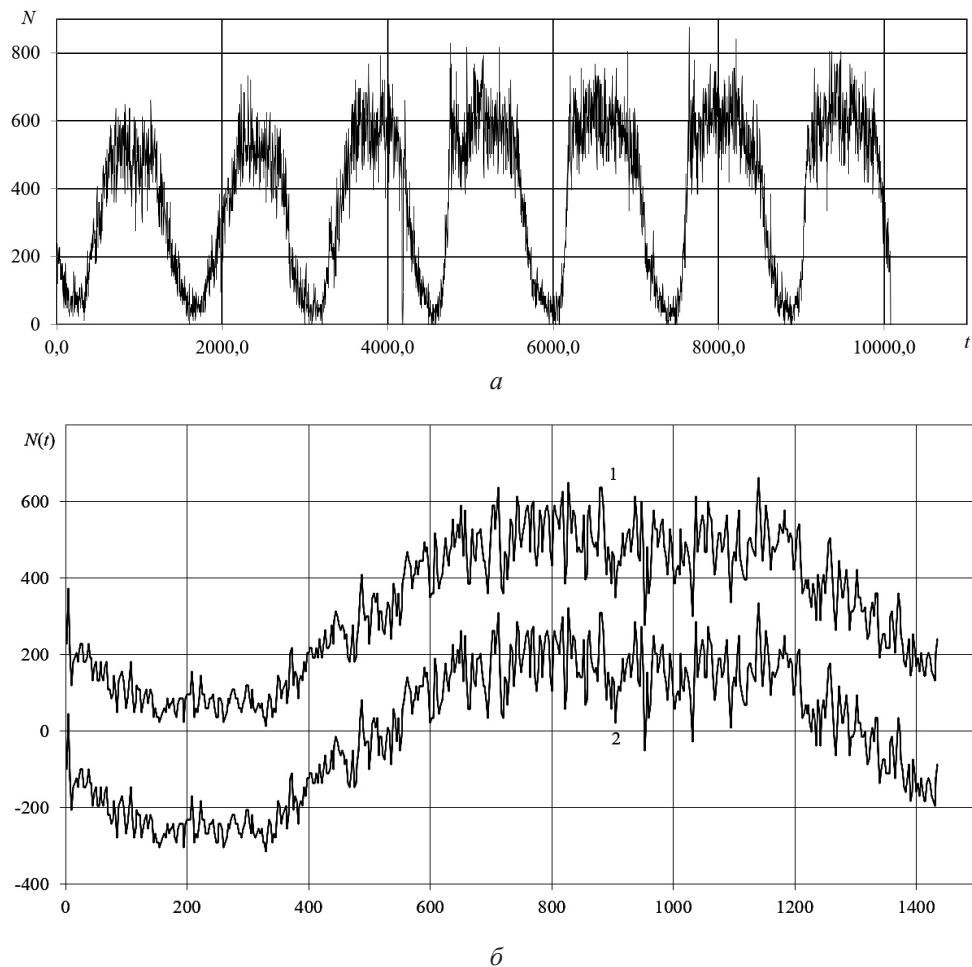


Рисунок 1. Зависимости от времени  $t$  (мин) интенсивности транспортного потока  $N$  (авт/ч) в течение одной недели (а) и одних суток (б, понедельник), верхняя кривая 1 – исходные данные, нижняя кривая 2 – центрированная зависимость; интервал осреднения  $\Delta = 5$  мин

Источник: разработано авторами на основе данных, предоставленных Пермской дирекцией дорожного движения

На рисунке 2 представлены вейвлет-образы  $W(a_i, b_j)$ , полученные после преобразования согласно выражению (6) функции  $N(t)$  интенсивности транспортного потока с использованием вейвлетов МНат и Морле. При выполнении вычислительных работ принято, что для обоих случаев  $\varkappa_a = 100$  для дискретизации по размеру вейвлета (масштабу  $a$ ) и  $\varkappa_b = 100$  для временной локализации по времени (сдвигу  $b$ ).

При малых значениях параметра (масштаба)  $a$  (практически для всего диапазона сдвигов  $b$ ) для вейвлет-образа МНат наблюдаются малоамплитудные колебания, что соответствует наличию у исходной функции (рисунок 1, б) высокочастотных осцилляций интенсивности транспортного потока, соответствующих малым значениям масштаба и имеющих небольшие размахи.

Образ, построенный с помощью вейвлета МНат, можно условно разделить на две области (отрицательных и положительных значений). В интервале сдвига  $b$  от 0 мин до 550 мин и практически во всем

диапазоне масштаба  $a$  от 7 мин до 660 мин имеет место «овраг» с минимальным значением  $-792,5$  (при  $a = 320$  мин и  $b = 232$  мин). Согласно данным, приведенным на рисунке 1, б, интенсивность транспортного потока значительно снижается в период с 2:30 до 7:30 (от 150 до 450 мин), именно в этот временной диапазон попадает точка минимума вейвлет-образа.

Зона относительно небольших отрицательных значений вейвлет-образа также располагается в интервале сдвига  $b \in [750, 1200]$  мин при значениях масштаба  $a < 140$  мин. Эта область соответствует некоторому снижению (в среднем) интенсивности транспортного потока, также заметному на рисунке 1, б в интервале времени от 13:00 до 20:00.

Дополнительно можно отметить зону отрицательных значений в диапазоне сдвига  $b \in [1100, 1500]$  и масштаба  $a \in [7,500]$  мин. Указанный интервал времени соответствует снижению интенсивности транспортного потока в конце дня после 18:00 (рисунок 1, б).

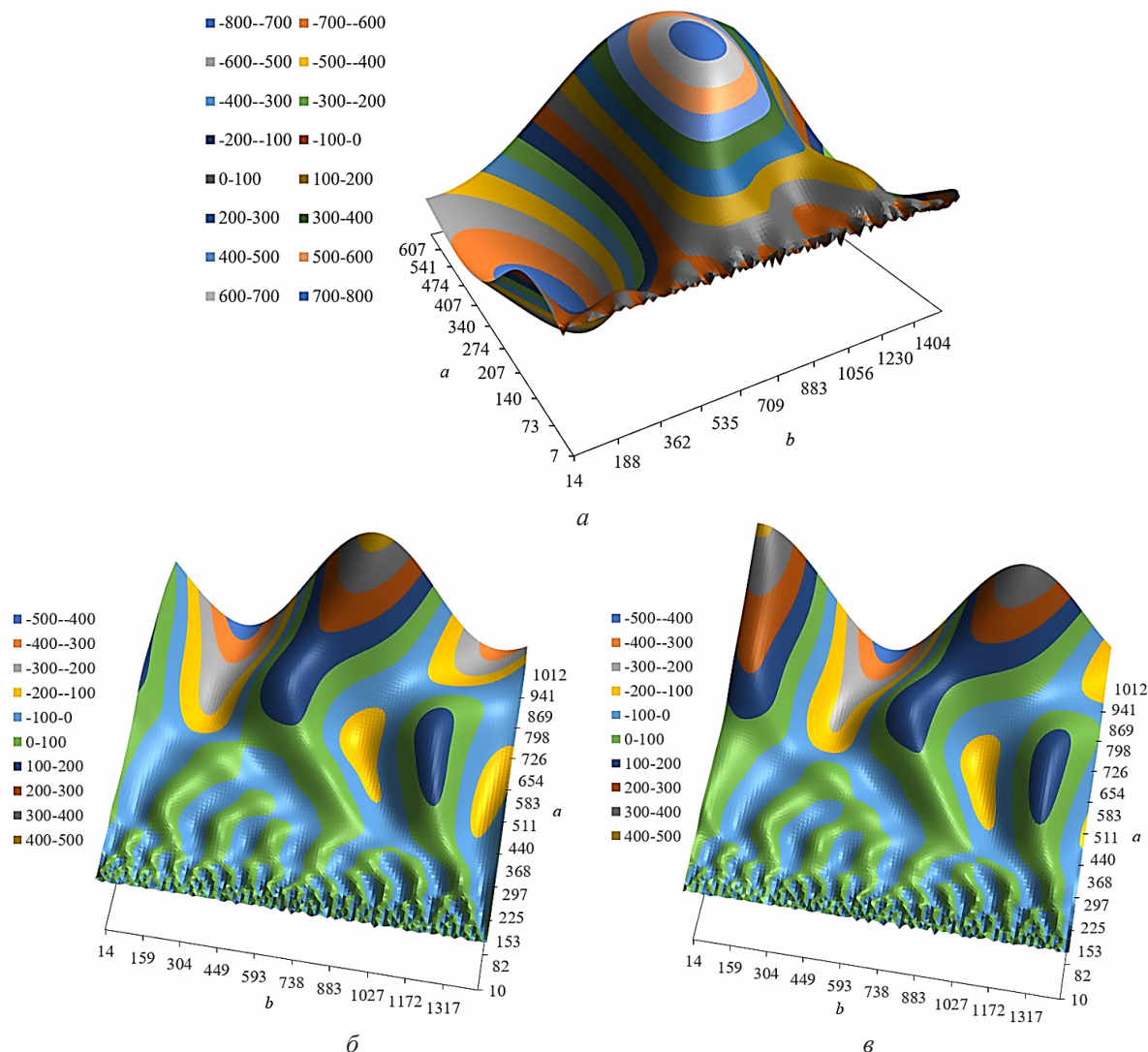


Рисунок 2. Вейвлет-образы временных рядов  $N(t)$  интенсивности транспортного потока, полученные с использованием вейвлетов МНат ( $a$ ) и Морле ( $\bar{b}$  – вещественная,  $\bar{b}$  – комплексная составляющие)

Источник: разработано авторами

В интервалах  $b \in [550, 1500]$  мин и  $a \in [90, 660]$  мин располагается область положительных значений вейвлет-образа – «холм» с максимальным значением 763,5 ( $a = 360$  мин,  $b = 883$  мин). На рисунке 1,  $\bar{b}$  видно, что интенсивность транспортного потока достигает наибольших значений в период с 11:30 до 15:00 (от 690 до 900 мин), и именно в этот диапазон времени попадает точка максимума вейвлет-образа.

Структуры вещественного и мнимого вейвлет-образов Морле рассматриваемой функции  $N(t)$  интенсивности транспортного потока (рисунок 2,  $\bar{b}$  и  $\bar{b}$ ) подобны друг другу, и в то же время сильно отличаются от структуры вейвлет-образа МНат. Как у вещественной (рисунок 2,  $\bar{b}$ ), так и у мнимой составляющих (рисунок 2,  $\bar{b}$ ) вейвлет-образа Морле (подобно вейвлет-образу МНат) при малых значениях масштаба  $a$  и практически для всего диапазона сдвигов  $b$  присутствуют малоамплитудные осцилляции, что

также объясняется наличием у исходной функции интенсивности транспортного потока (рисунок 1,  $\bar{b}$ ) быстропеременных колебаний небольшого размаха.

Рельефы вещественной и мнимой составляющих вейвлет-образа Морле наличием самоподобных ветвящихся фигур напоминают древовидные фрактальные структуры. Изменение масштаба  $a$  от 1000 мин до 10 мин в разложении рассматриваемой функции приводит к лавинообразному росту количества гармоник от 1–2 до нескольких десятков, и одновременно – к снижению амплитудных значений составляющих гармоник. Результаты вейвлет-преобразования Морле, как и выполненного ранее Фурье-преобразования [6] интенсивности транспортного потока, позволяют предположить, что функция интенсивности транспортного потока может быть представлена как суперпозиция некоторого количества гармоник (вейвлетов с соответ-

ствующими значениями масштабов  $a$  и сдвигов  $b$ ). В частности, гармонику с наибольшим периодом (наибольшим масштабом  $a$ ), можно интерпретировать, аналогично предложенному в работе [5], как детерминированную составляющую интенсивности транспортного потока, демонстрирующую, в целом, признаки стохастического поведения.

На рисунке 3 представлены плотности  $E(a, b)$

спектра энергии (локального спектра энергии) функции  $N(t)$ , рассчитанные согласно (4) и обычно называемые скалограммами, при использовании вейвлетов МНат и Морле.

Скалограмма, построенная на основе вейвлета МНат (рисунок 3, а), представляет собой «холм» с двумя вершинами-максимумами и глубокой впадиной между ними.

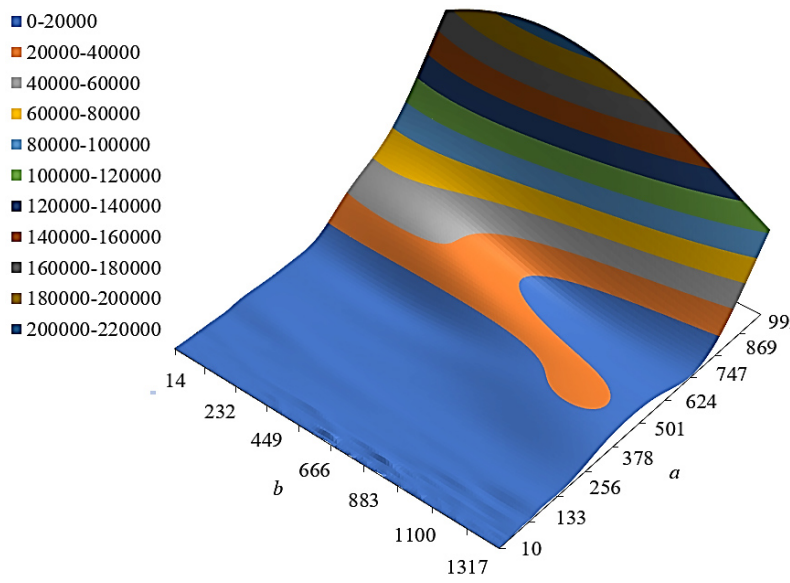
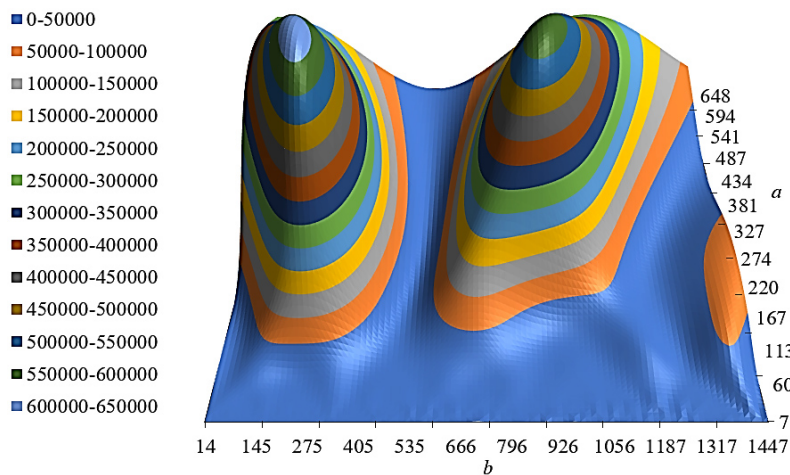


Рисунок 3. Плотности спектров энергии (скалограммы) функции, полученные на основе вейвлетов МНат (а) и Морле (б)

Источник: разработано авторами

Скалограмма вейвлет-образа МНат интенсивности транспортного потока (рисунок 3, а) показывает, что наибольшие значения плотности спектра энергии достигаются в моменты времени  $t = 217$  мин и масштабе  $a = 310$  мин (соответствует достижению наименьшей интенсивности транспортного потока) и  $t = 896$  мин и масштабе  $a = 360$  мин (соответствует достижению наибольшей интенсивно-

сти транспортного потока). Таким образом, можно предположить, что максимальные значения плотности спектра энергии вейвлет-образа МНат коррелируют с наибольшим и наименьшим значениями интенсивности транспортного потока.

Плотность спектра энергии, полученная с использованием вейвлета Морле (рисунок 3, б), практически монотонно возрастает с увеличением мас-



штаба  $a$ , за исключением области немонотонности при  $a \in [550, 850]$  мин и  $b \in [400, 1440]$  мин. Скалограмма вейвлет-образа Морле функции  $N(t)$  качественно отличается от скалограммы вейвлет-образа МНат отсутствием явно выраженных экстремумов. Практически монотонный рост значений плотности спектра энергии с увеличением масштаба практически для всех моментов рассматриваемых интервалов времени свидетельствует о наличии в разложении функции преобладающего влияния гармоник, соответствующей наибольшему масштабу  $a = 1447$  мин. Сопоставление рисунков 1, б и 3, б позволяет предположить, что разложение функции с помощью вейвлета Морле при наибольшем масштабе  $a = 1447$  мин выделяет в интенсивности транспортного потока единственную гармонику с наибольшей амплитудой, на которую накладываются гармоники меньших масштабов и амплитуд. Это служит подтверждением идеи [5] о наличии в стохастическом поведении функции интенсивности транспортного потока детерминированной составляющей.

Специфическую информацию о структурах вейвлет-образов функции интенсивности транспортного потока можно получить с помощью скелетонов. Например, скелетон вейвлет-образа МНат функции  $N(t)$  (рисунок 4, а) выделяет кривые экстремальных значений (распределение пиковых значений) скалограммы, идентифицирующие в  $N(t)$  МНат-подобные составляющие наибольшей интенсивности. Линия 1 на этом рисунке характеризуется быстрым изменением масштаба от наибольшего к наименьшему значению (или, что эквивалентно, изменением частотного параметра от наименьшего к наибольшему значению) на интервале времени от 0 до 250 мин. В поведении функции интенсивности это свидетельствует о наличии доминирующей (по амплитуде) составляющей, имеющей переменный во времени масштаб (переменную во времени частоту). Наличие вертикального участка на кривой 1 говорит о существовании в один момент времени целого ряда составляющих функции интенсивности, имеющих различные масштабы (частоты), что в ряде исследований<sup>1</sup> интерпретируется как наличие случайного («белого») шума в составе анализируемого сигнала.

Линия 2 на несколько большем временном интервале от 0 до 500 мин соответствует монотонному уменьшению масштаба до минимального значения и последующему монотонному возрастанию. Это также можно интерпретировать как наличие в функции интенсивности составляющей с переменным во времени масштабом (частотой).

Линия 3 и линия 4 демонстрируют монотонный рост масштаба с различной интенсивностью

на промежутках времени от 500 до 1300 мин и от 600 до 1000 мин соответственно. Как и в предыдущем случае, наличие этих кривых свидетельствует о наличии в функции интенсивности интервалов времени, в которых эту функцию можно считать совокупностью МНат-подобных составляющих с переменным масштабом (частотой).

Можно предположить, что линии 2 и 3 являются ветвями одной и той же кривой, имеющей точку разрыва 1 рода при  $t = 500$  мин, когда значение масштаба скачком меняется с  $a = 500$  мин до  $a = 150$  мин.

В нижней части рисунка 4, а имеется ряд линий, расположенных практически вертикально: на малых промежутках времени присутствует множество сигналов, имеющих малые масштабы (и, соответственно, высокие частоты). Такая ситуация также может объясняться наличием своеобразного «шума», то есть совокупности сигналов случайного характера.

Линия 1 на рисунке 4, б появляется в момент времени 100 мин и имеет здесь точку бифуркации, начиная с которой одна ветвь кривой идет монотонно вверх и исчезает при  $t = 450$  мин, другая опускается монотонно вниз и обрывается при  $t = 500$  мин. Линия 2 появляется с момента времени  $t = 520$  мин, монотонно уменьшая значение масштаба; при  $t = 1200$  мин эта линия также имеет точку бифуркации, из которой расходятся две кривые: верхняя идет практически горизонтально, то есть с постоянным масштабом (частотой); вдоль нижнего ответвления кривой масштаб вейвлета монотонно убывает. Можно предположить, как и в предыдущем случае, что линии 1 и 2 также являются ветвями одной и той же кривой, имеющей точку разрыва 1 рода при  $t = 500$  мин.

Линия 3 появляется на непродолжительное время в интервале от  $t = 100$  мин до  $t = 700$  мин, эволюционируя в небольших пределах. Это соответствует наличию гармонической составляющей с переменной частотой в общей интенсивности транспортного потока. Линия 4 существует непрерывно от самого начала до конца наблюдения, демонстрируя практически монотонное уменьшение масштаба, что, в свою очередь, свидетельствует о гармонической составляющей общей интенсивности транспортного потока, имеющей монотонно возрастающую в небольших пределах частоту.

На рисунке 5 показаны глобальные спектры энергии  $E_b(a)$  функции  $N(t)$  интенсивности транспортного потока, полученные интегрированием плотности  $E(a, b)$  локального спектра энергии рассматриваемой функции согласно выражению (5), на основе вейвлетов МНат (рисунок 5, а) и Морле (рисунок 5, б).

<sup>1</sup> См.: Витязев В. В., Вейвлет-анализ временных рядов, СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001 и др.

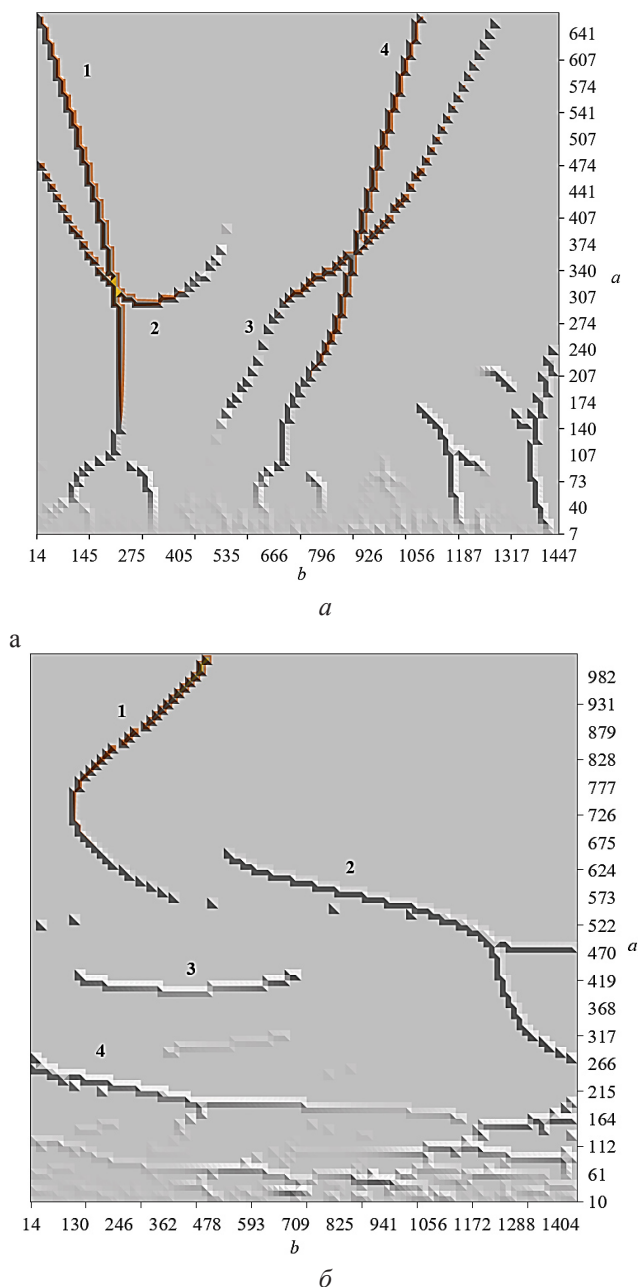


Рисунок 4. Скелетоны функции  $N(t)$ , полученные с использованием вейвлетов MNat (а) и Морле (б)  
 Источник: разработано авторами

Наибольшее значение глобального спектра энергии при использовании вейвлета MNat лежит в диапазоне масштабов  $a = 350...400$  мин, тогда как при использовании вейвлета Морле – в диапазоне масштабов  $a = 950...1020$  мин. Это соответствует распределениям вейвлет-образов (рисунок 2) и плотности спектров энергии  $E(a, b)$  (рисунок 3) функции  $N(t)$  интенсивности транспортного потока, полученных с использованием вейвлетов MNat и Морле. Иными словами, наибольшие значения глобальных спектров энергии  $E_b(a)$  на рисунке 5 в обоих случаях указывают временные диапазоны расположения наибольших амплитуд, получаемых

при разложении рассматриваемой функции с использованием соответствующих вейвлетов.

### Заключение

Применение вейвлетов дает возможность провести детальный анализ поведения временного ряда функции  $N(t)$  интенсивности транспортного потока и может рассматриваться как развитие идеи применения амплитудно-частотного анализа Фурье к транспортным потокам, рассмотренного в работе [6]. Применение вейвлетов MNat и Морле приводит к различным вейвлет-образам анализируемой функции и позволяет по-разному трактовать особенности

строения временного ряда. Вейвлет Морле построен на основе гармонических функций и ориентирован в большей степени на гармонический, то есть «амплитудно-масштабный (частотный)» анализ. Вейвлет МНат имеет выраженный экстремум и в некотором смысле аналогичен «зонду», позволяющему локализовать, «прощупать» и «измерить» отдельные «впадины» и «возвышенности» исследуемого временного ряда. Эти различия хорошо отражены на рисунке 2.

Скалограммы (плотности спектров энергии, рисунок 3) в обоих случаях обобщают вейвлет-образы, с одной стороны, упрощая проведение амплитудно-масштабного анализа исследуемой функции, и с другой стороны – снижая объем доступной информации (в частности, теряется зна-

коопределенность вейвлет-образов).

Скелетоны, выделяющие пиковые значения плотности спектров энергии, полученных с использованием вейвлетов МНат и Морле (рисунок 4), позволяют судить об особенностях основных (главных) составляющих в разложении интенсивности транспортного потока по вейвлетам МНат или гармоникам вейвлета Морле, оценивать участки изменения масштабов (частот), выявлять наличие случайных составляющих.

Скейлограммы (глобальные спектры энергии, рисунок 5) позволяют судить об интегральном (по времени) распределении амплитудных составляющих по масштабам (частотам) функции  $N(t)$  интенсивности транспортного потока.

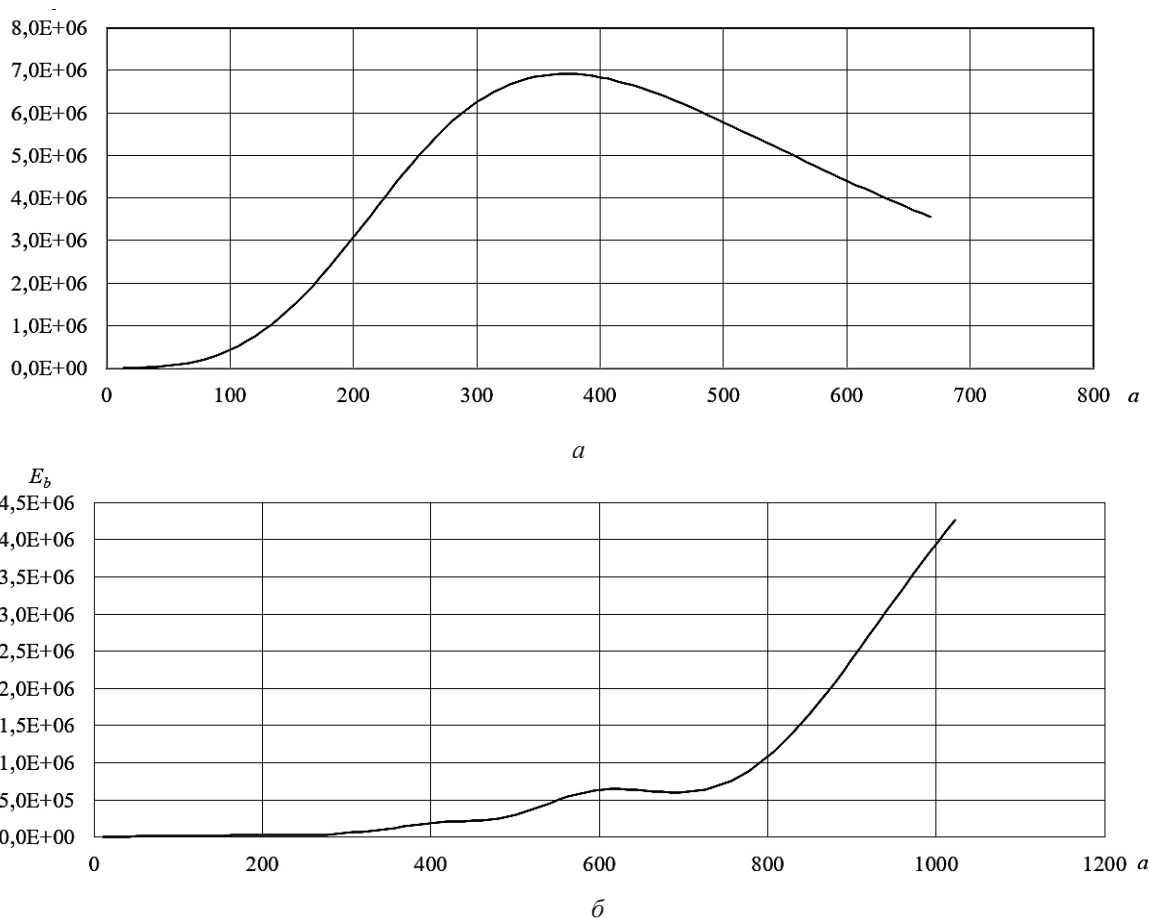


Рисунок 5. Глобальные спектры энергии  $E_b(a_i)$  (скейлограммы) функции  $N(t)$ , полученные на основе вейвлетов МНат (а) и Морле (б)

Источник: разработано авторами

Полученные результаты требуют дальнейшего осмысления и показывают необходимость продолжения работы по применению вейвлет-анализа для исследования интенсивности транспортных потоков, корректировки и развития этого подхода для учета особенностей движения автомобилей по городской улично-дорожной сети: периодичности, стохастичности, полноты и корректности дан-

ных наблюдений, получаемых с использованием средств дистанционного наблюдения, и проч.

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

и перспективного планирования, создания аналитического инструмента для обоснования и принятия управленческих решений по проектированию

новых транспортных магистралей и реконструкции существующей улично-дорожной сети.

### Литература

1. Астратов О. С., Кузьмин С. А. Обнаружение транспортных средств и оценка параметров транспортных потоков по видеопоследовательности // Информационно управляющие системы. – 2006. – № 3. – С. 19–27.
2. Ахметханов Р. С. Применение вейвлет-преобразований для анализа одно-, двух- и трехмерных массивов данных // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 5. – С. 112–119.
3. Ахметханов Р. С. Применение вейвлет-анализа и теории фракталов в исследовании изображений микрошлифов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81. – № 3. – С. 31–37.
4. Бархатов Н. А., Реунов С. Е., Виноградов А. Б. Алгоритм классификации МГД вейвлет-скелетонных спектральных картин геоэффективных плазменных потоков в солнечном ветре // Вестник Мининского университета. – 2014. – № 3. – С. 25.
5. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Использование комплекса фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения для выделения детерминированной и стохастической составляющих интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 3. – С. 61–71.
6. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Фурье-анализ интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 4. – С. 46–59.
7. Головин О. К., Столбова А. А. Вейвлет-анализ как инструмент исследования характеристик дорожного движения для интеллектуальных транспортных систем в условиях недостающих данных // Труды Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Искусственный интеллект, инженерия данных и знаний. – 2019. – Том 18. – № 2. – С. 326–353.
8. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – Том 171. – № 5. – С. 465–501.
9. Дружинина О. В., Климова Д. В. Оценка безопасности транспортной системы на основе методов фрактального и вейвлет-анализа // Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXII международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» Москва, 03 декабря 2014 г. – М.: Российский государственный гуманитарный университет, 2014. – С. 206–209.
10. Костарев А. Ф., Постаногов И. С. Использование технологий bigdata для анализа транспортных потоков на основе данных потока фотофиксации // Вестник Научного центра безопасности жизнедеятельности. – № 2 (28). – 2016. – С. 30–35.
11. Леваль Ж. Введение в анализ данных с применением непрерывного вейвлет-преобразования. – URL: <https://booksee.org/book/462953> (дата обращения: 21.01.2022).
12. Макарецкий Е. А., Нгуен Лиен Хиеу. Исследование Фурье и вейвлет спектров изображений транспортных средств // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 12. – С. 80–81.
13. Орлов Д. В., Махов В. Е., Кацан И. Ф. Диагностика вибраций узлов транспортных средств методом вейвлет-анализа границ сфокусированного оптического изображения // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3. – С. 15.
14. Румянцев Е. А., Драгунов А. Ф. Необходимость разработки оценок уровня организации дорожного движения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – № 2 (34). – 2012. – С. 227–229.
15. Chicherin I. V. et al. (2021) Using a Wavelet Medium for Computer-Aided Controlling the Movement of Unmanned Vehicles Along Quarry Routes. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. No. 2. Pp. 103–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-103-112.
16. Abadi E. A. J. et al. (2015) Vehicle Model Recognition Based on Using Image Processing and Wavelet Analysis. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. Vol. 8. No. 4. Pp. 2212–2230.
17. Abdelrahman A. A. et al. (2019) Definition of Yield Seismic Coefficient Spectrum Considering the Uncertainty of the Earthquake Motion Phase. *Applied Sciences*. Vol. 9. P. 2254.
18. Fangming T., Han D. (2012) Simulation of Traffic Incident Detection Based on VISSIM and Neural Network in 2012 *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, Chzhanczyacze, China, pp. 51–55.
19. Hernández-Paniagua I. Y. et al. (2018) Diurnal, Seasonal, and Annual Trends in Tropospheric CO in Southwest London During 2000–2015: Wind Sector Analysis and Comparisons with Urban and Remote Sites. *Atmospheric Environment*. No. 177. Pp. 262–274. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.027>.
20. Hu X. et al. (2022) Processing, Assessing, and Enhancing the Waymo Autonomous Vehicle Open Dataset



for Driving Behavior Research. *Transportation Research: Part C*. No. 134. P. 103490. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103490>.

21. Karimi H. R., Pawlus W., Robbersmyr K. G. (2012) Signal Reconstruction, Modeling and Simulation of a Vehicle Full-Scale Crash Test Based on Morlet Wavelets. *Neurocomputing*. No. 93. Pp. 88–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2012.04.010>.

22. Khabibullina E., Sysoev A. (2020) Forming Production Rules in Intelligent Transportation System to Control Traffic Flow. *Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems*. No. 4. Pp. 317–322.

23. Liu Y. et al. (2021) Traffic Flow Forecasting Analysis Based on Two Methods. *Journal of Physics: Conference Series*. No. 1861. P. 012042. doi:10.1088/1742-6596/1861/1/012042.

24. Magnusson M. L. et al. (1999) Cervical Electromyographic Activity During Low-Speed Rear Impact. *Eur Spine J*. No. 8. Pp. 118–125.

25. Muthukrishnan S. P., Soni S., Sharma R. (2020) Cingulate Oscillatory Activity Reflects the Quality of Memory Representations in Visuospatial Working Memory. *Memory*. Vol. 28. No. 9. Pp. 1173–1180. <https://doi.org/10.1080/09658211.2020.1826525>.

26. Nasser A., Simon V. (2021) A Novel Method for Analyzing Weather Effect on Smart City Traffic in 2021 *IEEE 22nd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Pisa, Italy, pp. 335–340. DOI 10.1109/WoWMoM51794.2021.00061.

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

28. Sapijaszko G., Alobaidi T., Mikhael W. B. (2019) Traffic Sign Recognition Based on Multilayer Perceptron Using DWT and DCT in 2019 *IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Dallas, TX, USA, pp. 440–443.

29. Shen X. et al. (2019) Prediction of Entering Percentage into Expressway Service Areas Based on Wavelet Neural Networks and Genetic Algorithms. *IEEE Access*. Vol. 7. Pp. 54562–54574.

30. Wu C. Y. H., Loo B. P. Y. (2017) Changes in Novice Motorcyclist Safety in Hong Kong After the Probationary Driving License Scheme. *Transportmetrica A: Transport Science*. Vol. 13. No. 5. Pp. 435–448. <https://doi.org/10.1080/23249935.2017.1289277>.

31. Yang H. et al. (2017) Research on Floating Car Speed Short-Time Prediction with Wavelet-ARIMA Under Data Missing In 2017 *International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety GITSS*, Changchun, China, pp. 289–298. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0302-9\\_29](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0302-9_29).

32. Yang L. et al. (2019) Comparison Among Driving State Prediction Models for Car-Following Condition Based on EEG and Driving Features. *Accident Analysis and Prevention*. No. 133. P. 105296. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105296>.

33. Zhao X. et al. (2019) Developing an Electric Vehicle Urban Driving Cycle to Study Differences in Energy Consumption. *Environmental Science and Pollution Research*. No. 26. Pp. 13839–13853. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3541-6>.

34. Zheng Z. et al. (2011) Freeway Traffic Oscillations: Microscopic Analysis of Formations and Propagations Using Wavelet Transform. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Vol. 17. Pp. 717–731. doi:10.1016/j.trb.2011.05.012.

35. Zhi-yong H., Jun H. (2004) Identification of Diesel Front Sound Source Based on Continuous Wavelet Transform. *Journal of Zhejiang University. Science*. Vol. 5. No. 9. Pp. 1069–1075. doi:10.1631/jzus.2004.1069.

36. Zhong J., Liu H., Yu L. (2019) Sparse Regularization for Traffic Load Monitoring Using Bridge Response Measurements. *Measurement*. No. 131. Pp. 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.044>.

## References

1. Astratov, O. S., Kuzmin, S. A. (2006) [Vehicle detection and estimation of traffic flow parameters by video sequence]. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems]. Vol. 3, pp. 19–27. (In Russ.).

2. Ahmethanov, R. S. (2013) [Application of wavelet transformations for the analysis of one-, two- and three-dimensional data arrays]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. Vol. 5, pp. 112–119. (In Russ.).

3. Ahmethanov, R. S. (2015) [Application of wavelet analysis and fractal theory in the study of micro glyph images]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Diagnostics of materials]. Vol. 81 (3), pp. 31–37. (In Russ.).

4. Barhatov, N. A., Revunov, S. E., Vinogradov, A. B. (2014) [Algorithm for classification of MHD wavelet-skeleton spectral patterns of geoeffective plasma flows in the solar wind]. *Vestnik Mininskogo universiteta* [Bulletin

of Mininsky University]. Vol. 3, pp. 25. (In Russ.).

5. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov A. G. (2021) [The use of a complex of photo- and video-fixation of traffic violations to identify deterministic and stochastic components of traffic flow intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 3, pp. 61–71. (In Russ.).

6. 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. (In Russ.).

7. Golovnin, O. K., Stolbova, A. A. (2019) [Wavelet analysis as a tool for studying traffic characteristics for intelligent transport systems in conditions of missing data]. In: *Trudy Sankt-Peterburgskogo instituta informatiki i avtomatizacii Rossijskoj akademii nauk "Iskusstvennyj intellekt, inzheneriya dannyh i znaniy"* [Proceedings of the St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences "Artificial intelligence, data and knowledge engineering"]. Vol. 18 (2), pp. 326–353. (In Russ.).

8. Dremine, I. M., Ivanov, O. V., Nechitajlo, V. A. (2001) [Wavelets and their use]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of physical sciences]. Vol. 171 (5), pp. 465–501. (In Russ.).

9. Druzhinina, O. V., Klimova, D. V. (2014) [Transport system safety assessment based on fractal and wavelet analysis methods] *Materialy XXII mezhdunarodnoj konferencii "Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnyh sistem" Moskva, 03 dekabrya 2014 g.* [Proceedings of the XXII International Conference "Security Management Problems of Complex Systems", Moscow, December 03, 2014]. Moscow: Russian State University for the Humanities. pp. 206–209. (In Russ.).

10. Kostarev, A. F., Postanogov, I. C. (2016) [Using big data technologies to analyze traffic flows based on photo-fixation flow data]. *Vestnik Nauchnogo Centra Bezopasnosti Zhiznedeyatelnosti* [Bulletin of the Scientific Centre for Life Safety]. Vol. 2 (28), pp. 30–35. (In Russ.).

11. Lewalle, J. (2011) [Introduction to Data Analysis using continuous wavelet transform]. Available at: <https://booksee.org/book/462953> (accessed: 21.01.2022). (In Russ.).

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

13. Orlov, D. V., Makhov, V. E., Kacan, I. F. (2014) [Diagnostics of vehicle components vibrations by the method of wavelet analysis of the boundaries of a focused optical image]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. Vol. 3, pp. 15. (In Russ.).

14. Romyancev, E. A., Dragunov, A. F. (2012) [The need to develop estimates of the level of traffic management]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. Vol. 2 (34), pp. 227–229. (In Russ.).

15. Chicherin, I. V. et al. (2021) [Using a wavelet medium for computer-aided controlling the movement of unmanned vehicles along quarry routes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. Vol. 2, pp. 103–112. (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-103-112

16. Abadi, E. A. J. et al. (2015) Vehicle model recognition based on using image processing and wavelet analysis. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. Vol. 8 (4), pp. 2212–2230. (In Eng.).

17. Abdelrahman, A. A. et al. (2015) Definition of Yield Seismic Coefficient Spectrum Considering the Uncertainty of the Earthquake Motion Phase. *Applied Sciences*. Vol. 9, pp. 2254. (In Eng.).

18. Fangming, T., Han, D. (2012) Simulation of Traffic Incident Detection Based on VISSIM and Neural Network. *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, 25–27 May, 2012, Chzhanczyacze, China. pp. 51–55. (In Eng.).

19. Hernández-Paniagua, I. Y. et al. (2018) Diurnal, seasonal, and annual trends in tropospheric CO in Southwest London during 2000–2015: Wind sector analysis and comparisons with urban and remote sites. *Atmospheric Environment*. Vol. 177, pp. 262–274. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.027>. (In Eng.).

20. Hu, X. et al. (2022) Processing, assessing, and enhancing the Waymo autonomous vehicle open dataset for driving behavior research. *Transportation Research: Part C*, Vol. 134, p. 103490. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103490> (In Eng.).

21. Karimi, H. R., Pawlus, W., Robbersmyr, K. G. (2021) Signal reconstruction, modeling and simulation of a vehicle full-scale crash test based on Morlet wavelets. *Neurocomputing*. Vol. 93, pp. 88–99. (In Eng.).

22. Khabibullina, E., Sysoev, A. (2020) [Forming production rules in intelligent transportation system to control traffic flow]. *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem* [Open semantic technologies for designing intelligent systems]. Vol. 4, pp. 317–322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2012.04.010> (In Engl.).

23. Liu, Y. et al. (2021) Traffic Flow Forecasting Analysis based on Two Methods. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1861, p. 012042. doi:10.1088/1742-6596/1861/1/012042 (In Eng.).

24. Magnusson, M. L. et al. (1999) Cervical electromyographic activity during low-speed rear impact. *Eur Spine J*. Vol. 8, pp. 118–125. (In Eng.).

25. Muthukrishnan, S. P., Soni, S., Sharma, R. (2020) Cingulate oscillatory activity reflects the quality of memory representations in visuospatial working memory. *Memory*. Vol. 28 (9), pp. 1173–1180. <https://doi.org/10.1080/09658211.2020.1826525> (In Eng.).
26. Nasser, A., Simon, V. (2021) A Novel Method for Analyzing Weather Effect on Smart City Traffic. *IEEE 22nd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 7–11 June, Pisa, Italy*. Pp. 335–340. DOI: 10.1109/WoWMoM51794.2021.00061 (In Eng.).
27. Nishidha, T., Janardhanan, P. (2013) Traffic Analysis using Discrete Wavelet Transform and Bayesian Regression. *Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), 4–6 July, Tiruchengode, India*. p. 31661. (In Eng.).
28. Sapijaszko, G., Alobaidi, T., Mikhael, W. B. (2019) Traffic Sign Recognition Based on Multilayer Perceptron Using DWT and DCT. *IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 4–7 Aug. Dallas, TX, USA*. pp. 440–443. (In Eng.).
29. Shen, X. et al. (2019) Prediction of Entering Percentage into Expressway Service Areas Based on Wavelet Neural Networks and Genetic Algorithms. *IEEE Access*. Vol. 7, pp. 54562–54574. (In Eng.).
30. Wu, C. Y. H., Loo, B. P. Y. Changes in novice motorcyclist safety in Hong Kong after the probationary driving license scheme. *Transportmetrica A: Transport Science*. Vol. 13:5, pp. 435–448. <https://doi.org/10.1080/23249935.2017.1289277> (In Eng.).
31. Yang, H. et al. (2017) Research on Floating Car Speed Short-Time Prediction with Wavelet-ARIMA Under Data Missing. *International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety GITSS, 1–2 July, Changchun, China*, pp. 289–298. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0302-9\\_29](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0302-9_29) (In Eng.).
32. Yang, L. et al. (2019) Comparison among driving state prediction models for car-following condition based on EEG and driving features. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 133, pp. 105–296. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105296> (In Eng.).
33. Zhao, X. et al. (2019) Developing an electric vehicle urban driving cycle to study differences in energy consumption. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 26, pp. 13839–13853. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3541-6> (In Eng.).
34. Zheng, Z. et al. (2011) Freeway traffic oscillations: Microscopic analysis of formations and propagations using Wavelet Transform. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Vol. 17, pp. 717–731. doi:10.1016/j.trb.2011.05.012 (In Eng.).
35. Zhi-yong, H., Jun, H. (2004) Identification of diesel front sound source based on continuous wavelet transform. *Journal of Zhejiang University. Science*. Vol. 5(9), pp. 1069–1075. doi:10.1631/jzus.2004.1069 (In Eng.).
36. Zhong, J., Liu, H., Yu, L. (2019) Sparse regularization for traffic load monitoring using bridge response measurements. *Measurement*. Vol. 131, pp. 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.044> (In Eng.).

#### **Информация об авторах:**

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

**SPIN:** 5958-2345, **Author ID:** 79853, **ORCID ID:** 0000-0003-4473-6776

e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

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

**Author ID:** 566592

e-mail: vavilin@tbdd.ru

**Екатерина Владимировна Васькина**, начальник отдела, Пермская дирекция дорожного движения, Пермь, Россия

**SPIN:** 2617-0961, **Author ID:** 671043

e-mail: evvaskina@yandex.ru

#### **Вклад соавторов:**

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

**Вавилин А. С.** – реализация задач исследования, обзор литературных источников, разработка алгоритмов вычислений, проведение вычислительных работ, анализ и обсуждение результатов, формулировка выводов.

**Васькина Е. В.** – реализация задач исследования, сбор и обработка исходных данных для вычислений, графическое представление цифровой информации, анализ и обсуждение результатов, формулировка выводов.

Статья поступила в редакцию: 28.03.2022; принята в печать: 15.06.2022.  
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Information about the authors:**

**Mikhail Gennadyevich Boyarshinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles and technological machines, Perm National Research Polytechnic University, Professor of the Department of General engineering disciplines, Perm Military Institute of the National Guard of the Russian Federation, Perm, Russia

**SPIN:** 5958-2345, **Author ID:** 79853, **ORCID ID:** 0000-0003-4473-6776  
e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

**Alexander Sergeevich Vavilin**, postgraduate student, scientific specialty 2.9.5 Operation of automobile transport, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

**Author ID:** 566592  
e-mail: vavilin@tbdd.ru

**Vaskina Ekaterina Vladimirovna**, Head of the department, Road Traffic Directorate of Perm, Perm, Russia

**SPIN:** 2617-0961, **Author ID:** 671043  
e-mail: evvaskina@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

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

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

**Vaskina E. V.** – execution of research objectives, collecting and processing of initial data for calculations, graphical representation of digital data, analysis and discussion of results, formulation of conclusions.

The paper was submitted: 28.03.2022.  
Accepted for publication: 15.06.2022.  
The authors have read and approved the final manuscript.