

ТРАНСПОРТ

УДК 656.1

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-68>

ПРИМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЁРСТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

М. Г. Бояршинов, А. С. Вавилин

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

Е. В. Васькина

Пермская дирекция дорожного движения, Пермь, Россия

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена предиктивными свойствами показателя (индекса) Хёрста, позволяющими выявлять наличие/отсутствие тренда в наблюдаемом стохастическом процессе, которые целесообразно использовать при регулировании и управлении движением транспорта с целью снижения заторов, дорожно-транспортных происшествий на основе обработки информации о транспортных потоках, поступающей со стационарных комплексов 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** – ежедневная интенсивность потока автомобилей в течение недели, с понедельника по воскресенье.

Цель настоящего исследования состоит в выявлении закономерностей эволюции показателей, входящих в индекс Хёрста, на основе обработки временных рядов интенсивности движения автомобильного транспорта по улично-дорожной сети.

В качестве **теоретико-методического подхода** используется метод нормированного размаха или определения показателей Хёрста. Разработанный авторами подход позволил установить некоторые закономерности эволюции указанных характеристик, в том числе показателя Хёрста, в течение интервала времени наблюдения, что является **научной новизной** выполненного исследования.

Обработка данных программно-технических комплексов видеонаблюдения позволила построить зависимости от времени показателей интенсивности движения автомобилей на дороге со стабильно высоким потоком транспортных средств, связывающей центральный и отдаленные районы города Перми, при различных интервалах осреднения по дням недели. **В результате исследования** временных рядов получены экспериментальные кривые средних значений, среднеквадратичных отклонений, накопленных и нормированных размахов, показателя Хёрста. Показано, что найденные характеристики интенсивности транспортного потока на дороге с высокой интенсивностью движения существенно отличаются от аналогичных характеристик, полученных ранее для дорог со сравнительно низкой интенсивностью.

Практическая значимость заключается в использовании при анализе интенсивности потока автотранспорта прогностических свойств показателя Хёрста для прогнозирования движения транспортных средств, управления работой светофорных объектов, мониторинга работы оборудования и проч.

Направление дальнейшего исследования – получение, обработка, анализ и обобщение результатов определения показателя Хёрста для временных рядов интенсивности транспортных потоков на участках улично-дорожной сети с различной интенсивностью движения транспортных средств.

Ключевые слова: интенсивность транспортного потока, временной ряд, метод нормированного размаха, показатель Хёрста.

Для цитирования: 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>.

APPLICATION OF THE HURST INDEX TO RESEARCH THE TRAFFIC FLOW INTENSITY

M. G. Boyarshinov, A. S. Vavilin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

e-mail: atm@pstu.ru

E. V. Vaskina

Road Traffic Directorate of Perm, Perm, Russia

Abstract. *The relevance of the work is due to the predictive properties of the Hurst indicator (index), which make it possible to identify the presence/absence of a trend in the observed stochastic process, which it is advisable to use when regulating and controlling traffic to reduce congestion, traffic accidents based on processing information about traffic flows coming from stationary video recording complexes of traffic violations.*

The object of investigation is a section of 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 cars flow during the week, from Monday to Sunday.

The purpose of this study is to identify the patterns of evolution of the indicators included in the Hurst index, based on the processing of time series of the intensity of motor transport traffic on the road network.

As a theoretical and methodological approach, the rescaled range analysis, or the definition of Hurst exponent, is used. The approach developed by the authors allowed us to establish the regularities of the evolution of mean values, standard deviations, accumulated and rescaled range, Hurst exponents, which is the scientific novelty of the performed analysis.

Data processing of video surveillance software and hardware complexes made it possible to construct time-dependent indicators of the intensity of car traffic on a road with a consistently high flow of vehicles connecting the central and remote areas of the city of Perm, at various intervals of averaging by days of the week. As a result of the study of time series, dependences on the time of average values, standard deviations, accumulated and rescaled ranges, Hurst exponents were obtained. It is shown that the found characteristics of the traffic flow intensity on a road with a high traffic intensity differ significantly from similar characteristics obtained earlier for roads with a relatively low intensity.

The practical significance lies in the use of predictive properties of the Hurst indicator in analyzing the intensity of the flow of vehicles for 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 and determine rescaled ranges and Hurst exponents for time series of traffic flow intensity on other sections of the road network.

Key words: *traffic flow intensity, time series, rescaled range analysis, Hurst exponent.*

Cite as: Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Vaskina, E. V. (2022) [Application of the Hurst index to research the traffic flow intensity]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 68–81, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-68>.

Введение

Исследование временных рядов с помощью показателя Хёрста или метода нормированного размаха [23] – оригинальный подход к исследованию стохастических данных в самых разных областях знаний. Этот сравнительно новый способ изучения случайных характеристик объектов, процессов и явлений активно развивается и используется наряду с фрактальным анализом, нейросетевым моделированием и теорией катастроф [10, 18]. Такой подход применяется в [7] при разработке методов обработки временных рядов, позволяющих изучать особенности их структур, рассматривать не только мгновенное их состояние, но и учитывать историю и эволюцию развития.

Метод нормированного размаха с использова-

нием концепции фрактальной структуры рынка активно применяется для прогноза стоимости финансовых активов и долговременной памяти рыночных цен [21], для моделирования аперiodических колебаний курсов основных валют, стоимости акций и биржевых котировок [15], для моделирования и оценки экономических рисков [6], а также как инструмент исследования фондового рынка [9]. Показатель Хёрста применяется в физиологии и медицине [4, 22], при анализе причин травматизма [16], для диагностики динамических гидрологических систем [13], используется для повышения надежности прогнозирования землетрясений [14, 17] и проч. С помощью показателя Хёрста целесообразно изучать фрактальные показатели трафиков социальных сетей [5, 29], анализировать эффектив-

ность электронного обучения [25], применять при анализе колебаний солнечного цикла [11], значений среднесуточных температур [20] и реакции наземных экосистем на экстремальные климатические условия [27]. Метод нормированного размаха имеет прикладное применение в сельском хозяйстве и в промышленном производстве [3, 8].

Необходимо отметить, что число публикаций, посвященных применению показателя Хёрста в транспортной отрасли, например, для анализа движения транспортных средств, сравнительно невелико. В зарубежных публикациях благодаря применению метода нормированного размаха установлено [26], что процесс появления транспортных средств на транспортных магистралях (в условиях умеренного и интенсивного движения) проявляет фрактальные свойства. Показатель Хёрста используется в работе [19] для доказательства фрактального характера характеристик автомобиля и физиологических показателей состояния водителей. Показатель Хёрста используется для разработки методики оценки состояния дорожного движения на городской магистрали [24] и для оценки пропускной способности водных путей [28].

Количество публикаций отечественных исследователей, посвященных анализу статистических характеристик транспортных потоков и использующих метод нормированного размаха (показатель Хёрста), чрезвычайно мало. В [1] показатель Хёрста применяется для анализа интенсивности транспортного потока и выявления возможного изменения интенсивности движения автомобилей по транспортным магистралям. В [12] на основе обработки методом нормированного размаха временного ряда данных об ускорении движущегося автомо-

биля сделан вывод об эффективности прогнозирования его поведения.

Наличие у показателя Хёрста предиктивных свойств, позволяющих выявлять наличие/отсутствие тренда в наблюдаемых стохастических процессах, целесообразно использовать при регулировании и управлении движением транспорта с целью снижения заторов, дорожно-транспортных происшествий на основе обработки информации о транспортных потоках, поступающей со стационарных комплексов видеofиксации нарушений правил дорожного движения. Появление настоящей работы обусловлено отсутствием полноценных исследований свойств показателя Хёрста при обработке и анализе характеристик транспортных потоков и направлено на восполнение пробела в этой области.

Цель настоящего исследования – выявление закономерностей в эволюции средних значений, среднеквадратичных отклонений, накопленных размахов отклонений интенсивностей транспортного потока от средних значений и других характеристик, входящих в показатель Хёрста. В качестве исходной информации для определения показателя Хёрста использованы данные о движении автомобильного транспорта, полученные с помощью стационарных комплексов видеofиксации нарушений правил дорожного движения, установленных на улично-дорожной сети крупного промышленного города (на примере г. Перми).

Методика проведения исследования

В основе подхода Хёрста лежит аппроксимация безразмерного показателя R/S временного ряда исследуемой величины степенной зависимостью вида

$$(at)^H, \tag{1}$$

где

a и H – константы,

t – время.

Здесь обозначено:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i - \langle X \rangle]^2}$$

– среднеквадратичное отклонение значений x_i случайной величины X от среднего значения

$$\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i;$$

N – количество слагаемых временного ряда случайной величины X на отрезке времени наблюдения $t \in [0, \tau]$;

$$R = \max_{t \in [0, \tau]} Z(t) - \min_{t \in [0, \tau]} Z(t)$$

– накопленный размах отклонений

$$Z(t) = \sum_{i=1}^N [x_i - \langle X \rangle], \quad t \in [0, \tau],$$

случайной величины X от среднего значения $\langle X \rangle$ на отрезке времени наблюдения.

В зависимости от значения H показателя степени (это и есть показатель Хёрста¹) различают три вида временных рядов [10, 15, 23 и др.]:

$H = 0,5$ – рассматриваемые процессы являются случайными и не имеют какого-либо тренда, то есть история изменения слагаемых рассматриваемого временного ряда не влияет на последующие значения;

$0 \leq H \leq 0,5$ – антиперсистентные процессы, для которых характерна знакопеременная тенденция, и фактически речь идет о неустойчивости значений рассматриваемого временного ряда;

$0,5 \leq H \leq 1,0$ – персистентные процессы, для которых соблюдение наблюдаемой тенденции, то есть история формирования слагаемых рассматриваемого временного ряда оказывает влияние

на последующие значения.

Результаты обработки данных видеofиксации

Рассматривается интенсивность потока транспорта $N(t) = n(t) / \Delta$ как случайная величина. В приведенном выражении $n(t)$ – количество автомобилей, прошедших через контрольный рубеж за период времени от $t - \Delta/2$ до $t + \Delta/2$. Для определения интенсивности транспортного потока рассматриваются интервалы времени $\Delta = 5, 10, 20, 30, 40, 50$ и 60 минут. Измерение интенсивности потока автомобилей выполнялось в течение недели, с 17 по 23 мая 2021 года (рис. 1), с использованием данных комплекса видеofиксации, установленного на дороге со стабильно высокой интенсивностью движения, связывающей центральный и отдаленные районы города Перми.

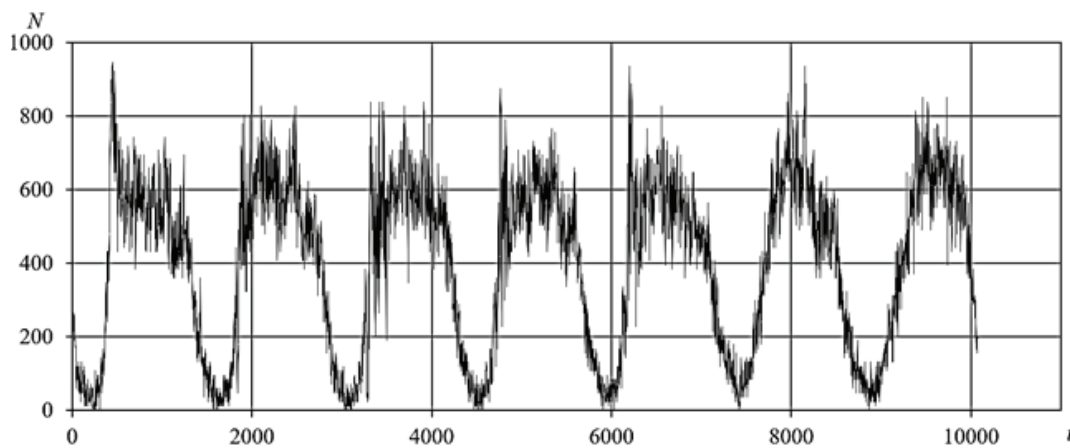


Рисунок 1. Зависимости от времени t (мин) интенсивности транспортного потока N (авт/ч) на протяжении одной недели; интервал осреднения $\Delta = 5$ мин

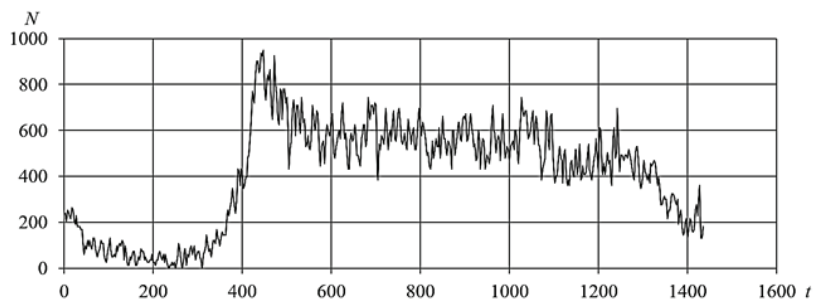
Источник: разработано авторами

Представленная на рисунке 1 кривая состоит из подобных фрагментов, каждый из которых характеризует суточное изменение интенсивности транспортного потока. Видно, что все суточные фрагменты различаются, демонстрируя неравномерность (стохастичность) разброса значений интенсивности потока транспорта в течение суток. В то же время из рисунка 1 следует, что интенсивность транспортного потока в каждый день наблюдения можно интерпретировать как некоторую детерминированную кривую, на которую наложены случайные осцилляции (см. работу [2]).

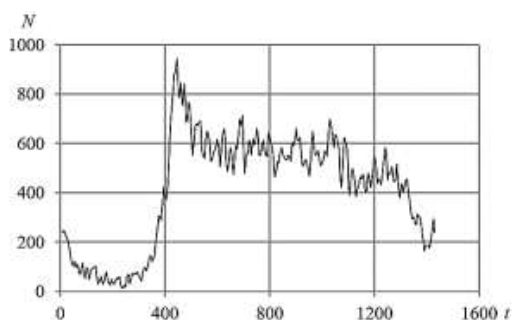
На рисунке 2 показаны зависимости от времени наблюдения интенсивности потока транспорта в течение одних суток (понедельник) при различных интервалах осреднения Δ . При наименьшем интервале осреднения $\Delta = 5$ мин (рис. 2, а) наибольшая интенсивность транспортного потока достигает 936 авт./ч.

С увеличением интервала осреднения (рис. 2, б–ж) кривые интенсивности сглаживаются и при $\Delta = 60$ мин максимальная интенсивность транспортного потока принимает значение 824 авт./ч, то есть снижается на 12%.

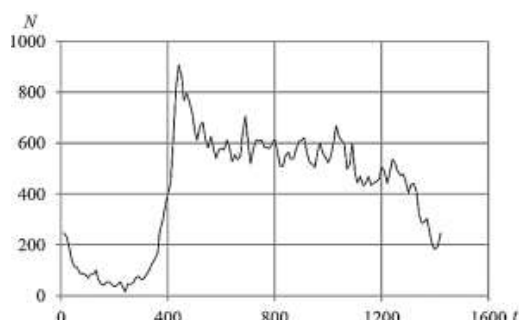
¹ Встречаются иные названия: индекс, экспонента или постоянная Хёрста.



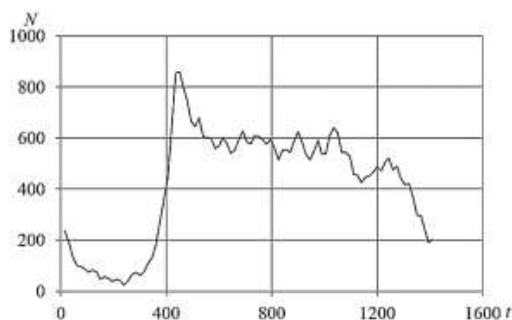
а



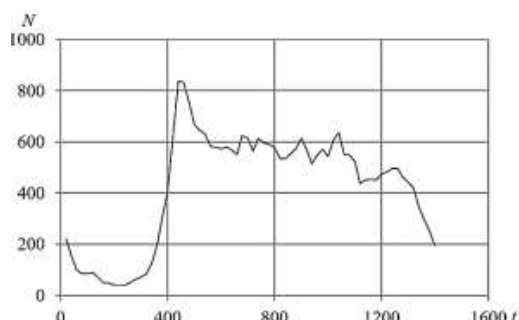
б



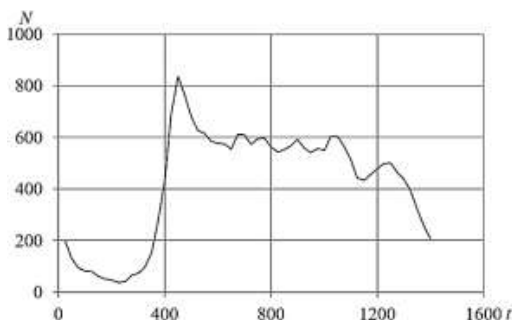
в



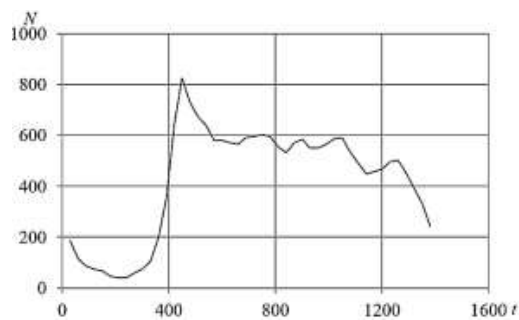
г



д



е



ж

Рисунок 2. Зависимости от времени t (мин.) суточной (понедельник) интенсивности N (авт./ч) транспортного потока при интервалах осреднения $\Delta = 5$ мин. (а), 10 мин. (б), 20 мин. (в), 30 мин. (г), 40 мин. (д), 50 мин. (е) и 60 мин. (ж)

Источник: разработано авторами

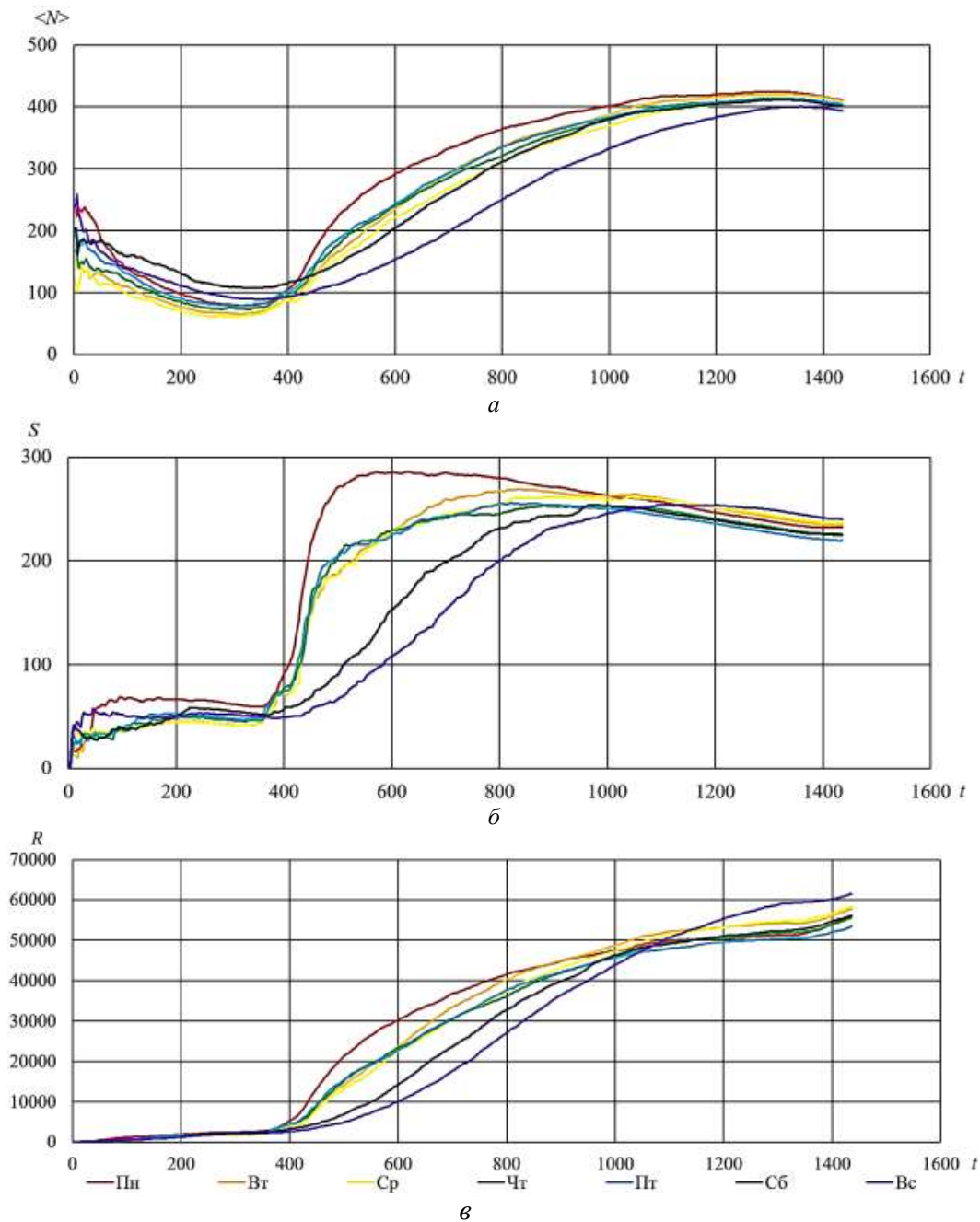


Рисунок 3. Зависимости от времени t (мин) среднего значения Δ интенсивности транспортного потока (a , авт./ч), среднеквадратичного отклонения S ($б$, авт./ч) и накопленного размаха R ($в$, авт./ч) отклонений случайной величины интенсивности транспортного потока от среднего значения по дням недели; обработка данных, полученных при $\Delta = 5$ мин

Источник: разработано авторами

На рисунке 3 представлены зависимости от времени среднего значения $\langle N \rangle$, среднеквадратичного отклонения S интенсивности транспортного потока и накопленного размаха R отклонений случайной величины интенсивности транспортного потока от среднего значения по дням недели. Кривые средних значений $\langle N \rangle$ интенсивности транспортного потока (рис. 3, а) в начальный момент времени соответствуют начальным интенсивностям в соответствующий

день недели. От 0:00 до 6:30 поведение кривых различается незначительно.

После 6:30 графики суточных интенсивностей расходятся, причем в наибольшей степени это касается кривых для понедельника и воскресенья. К концу каждого дня средние значения интенсивностей сближаются и находятся в диапазоне от 393,5 до 410,8 авт./ч (таблица 1).

Среднеквадратичные отклонения S интенсив-

ностей транспортного потока (рис. 3, б) ведут себя аналогично: после 6:30 суточные среднеквадратичные отклонения расходятся, причем в наибольшей степени это также относится к кривым для

понедельника и воскресенья. К концу каждого дня суточные среднеквадратичные отклонения сближаются и находятся в диапазоне от 219,5 до 240,2 авт./ч (таблица 1).

Таблица 1. Конечные значения средней величины $\langle N \rangle$, среднеквадратичного отклонения S и накопленного размаха R интенсивности транспортного потока по дням недели

День	$\langle N \rangle$, авт./ч	S , авт./ч	R , авт./ч	Показатель H Хёрста
Понедельник	410,8	232,1	55317,1	1,05502
Вторник	410,0	234,5	57855,0	1,12966
Среда	403,1	236,4	58348,2	1,10668
Четверг	403,3	225,7	55313,4	1,11033
Пятница	404,3	219,5	53446,8	1,07478
Суббота	400,5	224,9	56193,8	1,13485
Воскресенье	393,5	240,2	61574,8	1,12034

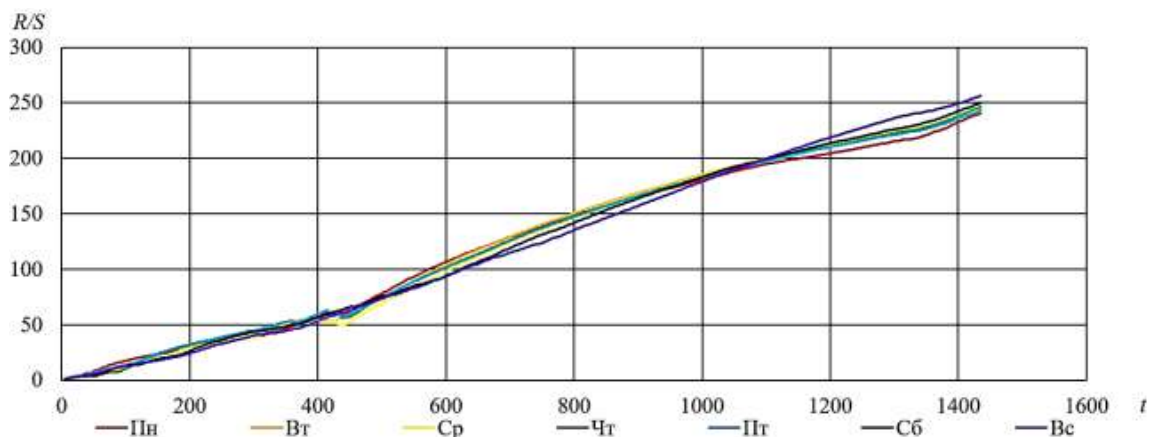


Рисунок 4. Зависимость от времени t (мин) нормированного размаха R/S интенсивности транспортного потока по дням недели; обработка данных, полученных при $\Delta = 5$ мин

Источник: разработано авторами

Кривые накопленных размахов R отклонений интенсивностей транспортного потока (рис. 3, в) демонстрируют подобное поведение: после 6:30 эти кривые также расходятся (в наибольшей степени – кривые для понедельника и воскресенья); к концу каждого дня накопленные размахи сближаются и находятся в диапазоне от 53446,8 до 61574,8 авт./ч (таблица 1).

На рисунке 4 показаны зависимости от времени наблюдения нормированных размахов R/S временных рядов интенсивности потока транспорта для каждого дня недели. Расчеты показывают, что кривые нормированных размахов мало различаются и расположены в сравнительно узком диапазоне.

Для определения показателей Хёрста в соответствии с выражением (1) кривые нормиро-

ванных размахов R/S интенсивности суточных транспортных потоков отображаются в логарифмических координатах и аппроксимируются степенными зависимостями (рисунок 5). Вычисленные значения показателя Хёрста, представленные в таблице для каждого из дней наблюдения, мало различаются между собой, в том числе для рабочих и выходных дней, и значительно превышают значение 0,5, характерное для случайных процессов, что, как отмечено ранее, свидетельствует об устойчивости наблюдаемой тенденции изменения интенсивности транспортного потока на рассматриваемой дороге, то есть история формирования слагаемых рассматриваемого временного ряда оказывает существенное влияние на последующие значения.

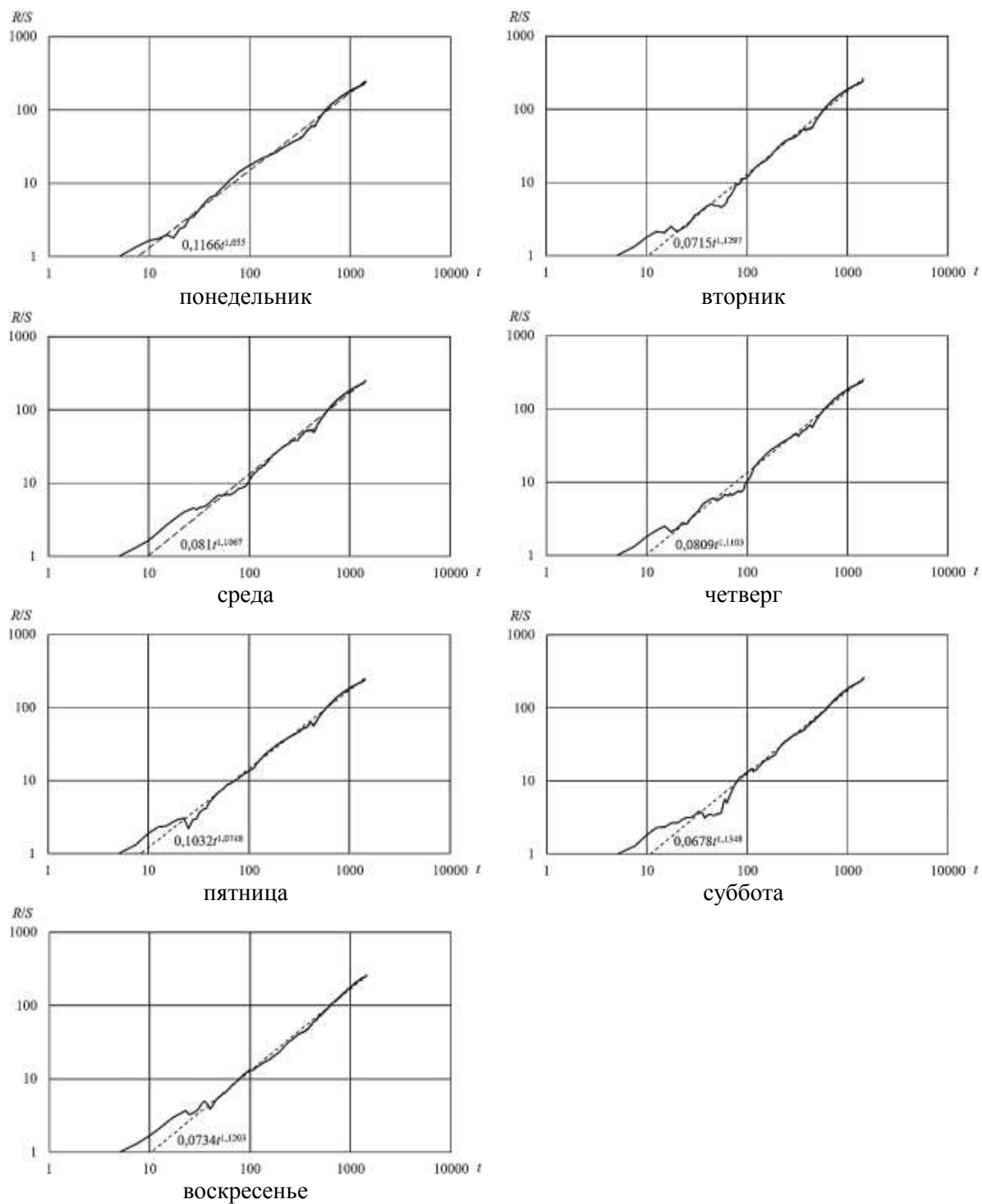


Рисунок 5. Аппроксимация степенной функцией (---) нормированного размаха R/S интенсивности транспортного потока по дням недели с использованием логарифмических координат; формулы аппроксимации степенными зависимостями приведены на рисунках

Источник: разработано авторами

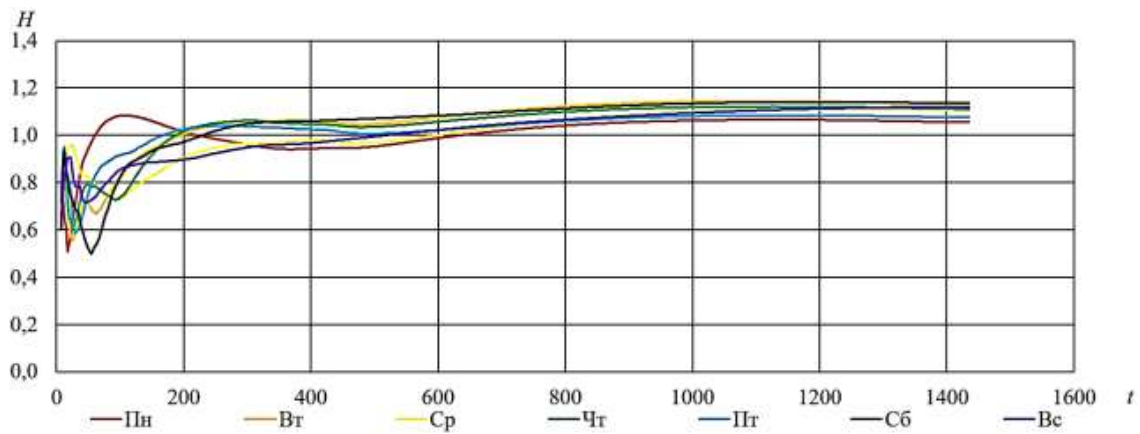


Рисунок 6. Зависимость от времени t (мин) показателя H Хёрста временных рядов интенсивности транспортного потока по дням наблюдения

Источник: разработано авторами

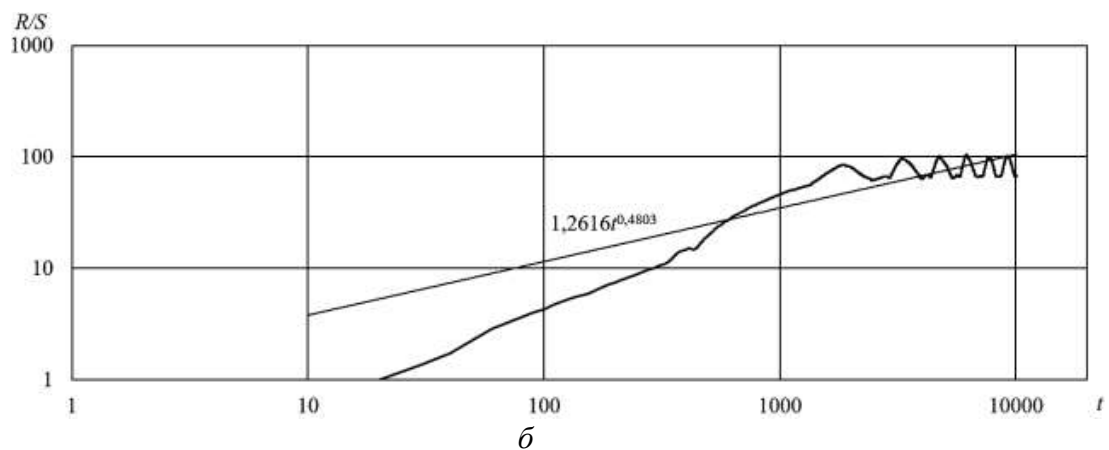
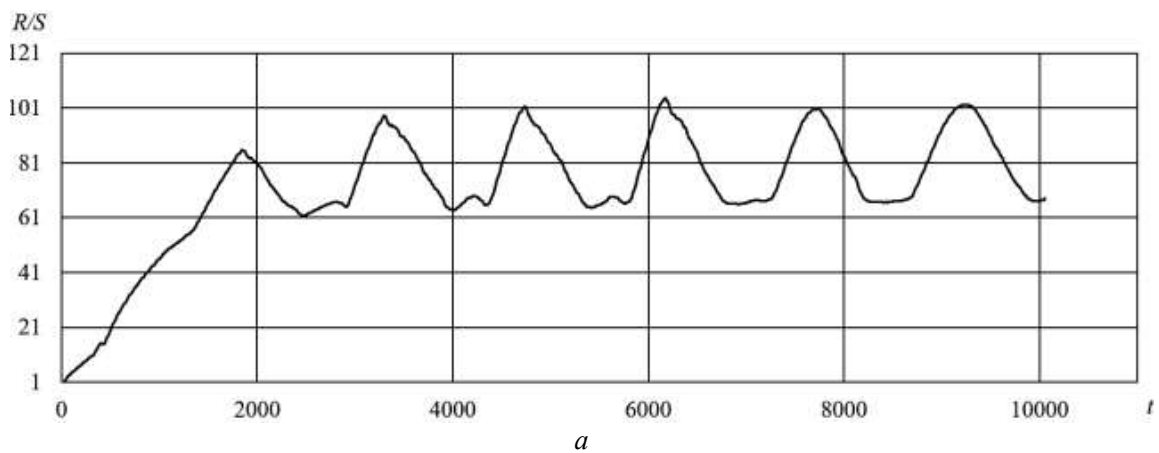


Рисунок 7. Зависимость от времени t (мин) нормированного размаха R/S в обычных (а) и логарифмических (б) координатах; аппроксимация степенной функцией (б, отрезок прямой) нормированного размаха R/S интенсивности транспортного потока на протяжении недели

Источник: разработано авторами

На рисунке 6 приведены зависимости от времени показателя Хёрста для каждого из дней наблюдения. В начальные периоды времени каждого дня,

ориентировочно с 0:00 до 3:30, значения показателя Хёрста изменяются достаточно хаотично. В дальнейшем, примерно до 10:00, эти показатели ста-

билизируются и затем незначительно возрастают и к окончанию суток устанавливаются на значениях, близких к стационарным.

На рисунке 7 показана зависимость от времени нормированного размаха R/S на протяжении всей недели в обычных и логарифмических координатах. Здесь же представлена аппроксимация кривой нормированного размаха R/S степенной функцией. Показатель Хёрста для всего времени наблюдения принимает значение $H = 0,48031$. Поскольку полученное значение меньше 0,5, рассматриваемый процесс может быть охарактеризован как антиперсистентный, что свидетельствует о неустойчивости значений рассматриваемого временного ряда значений интенсивности транспортного потока в течение недели. Это подтверждается наличием подъемов и спадов кривых на рисунках 1 и 7, а.

Заключение

Применение метода нормированного размаха Хёрста при анализе временного ряда интенсивности транспортного потока показало, что показатель Хёрста в течение каждых суток периода наблюдения эволюционирует по-разному, однако к концу каждых суток принимает близкие значения, значительно превышающее 0,5, что свидетельствует о персистентности анализируемого случайного процесса. В то же время значение показателя Хёрста для всей недели наблюдения оказывается ниже 0,5, что говорит о неустойчивости тенденции недельного изменения интенсивности

транспортного потока.

Полученные результаты представляются противоречивыми и показывают необходимость дальнейшего исследования методики нормированного размаха для целей анализа интенсивности транспортных потоков, корректировки и развития этой методики с учетом особенностей движения автомобилей на улицах города: периодичности, стохастичности, корреляционных зависимостей, полноты и корректности данных наблюдений, получаемых с использованием средств дистанционного наблюдения, и проч.

Выполненное исследование, по-видимому, является первым отечественным опытом применения показателя Хёрста для анализа интенсивности транспортных потоков на улицах российского города и, надеемся, привлечет внимание научной общественности к вопросам использования новых современных технологий анализа потоков автомобильного транспорта.

Метод нормированного размаха может оказаться полезным для выявления наличия тренда (персистентности) в изменении интенсивности движения автомобилей по автомобильным дорогам современных мегаполисов. Этот подход может также оказаться перспективным с точки зрения разработки средств прогнозирования и перспективного планирования, инструментария для обоснования и принятия управленческих решений по реконструкции существующей улично-дорожной сети и проектированию новых транспортных магистралей.

Литература

1. Бояршинов М. Г. Метод нормированного размаха для анализа интенсивности транспортного потока // Вестник Научного центра безопасности жизнедеятельности. – 2020. – № 4 (46). – С. 35–46.
2. Бояршинов М. Г., Вавилин А. С., Шумков А. Г. Использование комплекса фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения для выделения детерминированной и стохастической составляющих интенсивности транспортного потока // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 3 – С. 61–71. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-3-61.
3. Витлинский В. В., Грицюк В. В. Предпрогнозный анализ коротких временных рядов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды Международной научной школы МАБР (Санкт-Петербург, 07–11 июля 2009 г.) – СПб, 2009. – С. 290–296.
4. Гаязова Н. Т., Зарипов Р. Р. Стохастическая оценка скорости патологического тремора человека с помощью показателя Хёрста // Вестник Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета. – 2008. – 4 (15). – С. 18–20.
5. Главацкий С. П. Статистический анализ трафика социальных сетей // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2013. – 2. – С. 94–99.
6. Гуторов А. Применение методов выявления скрытых периодичностей в моделировании и оценке экономических рисков // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды Международной научной школы МАБР (Санкт-Петербург, 07–11 июля 2009 г.) – СПб, 2009. – С. 227–233.
7. Дорошина Н. В. Обзор методов расчета фрактальной размерности временных рядов // Математические методы и информационные технологии управления в науке, образовании и правоохранительной сфере: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции (Москва-Рязань, 27–28 апреля 2017 г.). – Москва-Рязань, 2017. – С. 13–17.
8. Жмурко Д. Ю., Осипов А. К. Прогнозирование показателей развития сахарной отрасли с применением методов фрактального анализа // Вестник Удмуртского университета. Экономика и право. – 2018. – 28 (2). С. 185–193.

9. Зиненко А. В. R/S анализ на фондовом рынке // Бизнес-информатика. – 2012. – 3 (21). – С. 24–30.
10. Калуш Ю. А., Логинов В. М. Показатель Хёрста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – V, 4(12). – С. 29–37.
11. Киян М. А., Фабричева Е. В., Подладчиков В. Н. Применения алгоритмов сглаживания для предварительной обработки статистических солнечных данных // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2014. – 2. – С. 68–76.
12. Клевцов С. И. Использование метода нормированного размаха для анализа поведения параметра технического объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – 6 (200). – С. 174–184.
13. Лепихин А. П., Перепелица Д. И. К применению показателя (коэффициента) Херста в гидрологии // Географический вестник. – 2016. – 4 (39). – С. 36–44.
14. Любушин А. А. Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. – 2012. – 8. – С. 23–33.
15. Найман Э. Л. Расчет показателя Херста с целью выявления трендовости (персистентности) финансовых рынков и макроэкономических показателей. – URL: http://wealth-lab.net/Data/Sites/1/SharedFiles/doc/forindicators/articles/04_erik_naiman_herst.pdf (дата обращения: 12.04.2020).
16. Пашенко Ф. Ф., Амосов О. С., Муллер Н. В. Структурно-параметрическая идентификация временного ряда с применением фрактального и вейвлет-анализа // Информатика и системы управления. – 2015. – 2 (44). – С. 80–88.
17. Abdelrahman A. A. et al. Definition of Yield Seismic Coefficient Spectrum Considering the Uncertainty of the Earthquake Motion Phase // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9. – 2254. DOI: 10.3390/app9112254.
18. Araya H., Tudor C. A. Behavior of the Hermite sheet with respect to the Hurst index // Stochastic Processes and their Applications. – 2019. – Vol. 129. – Issue 7. – Pp. 2582–2605. DOI: 10.1016/j.spa.2018.07.017.
19. Can Ye, Huiyun Li, Guoqing Xu An Early Warning Model of Traffic Accidents Based on Fractal Theory // 2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems, October 8–11, 2014. – Pp. 2280–2285.
20. Castellano R., Cerqueti R., Rotundo G. Exploring the financial risk of a temperature index: a fractional integrated approach // Annals of Operations Research. – 2020. – Vol. 284. – Pp. 225–242. DOI: 10.1007/s10479-018-3063-0.
21. David S. A. et al. Measuring the Brazilian ethanol and gasoline market efficiency using DFA-Hurst and fractal dimension // Energy Economics. – 2020. – Vol. 85. – 104614. DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104614.
22. David S. A. et al. A combined measure to differentiate EEG signals using fractal dimension and MF DFA-Hurst // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2020. – Vol. 84. – 105170. DOI: 10.1016/j.cnsns.2020.105170.
23. Hurst H. E. The Problem of Long-Term Storage In Reservoirs // International Association of Scientific Hydrology. – 1956. – Bulletin, 1(3). – Pp. 3–27.
24. Jiaotong Yunshu, Xitong Gongcheng, Yu Xinxi. Determining traffic state evolution index on urban arterial road // Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. – 2014. – 14 (3). – Pp. 64–69.
25. Kaklauskas L., Sakalauskas L. Study of on-line measurement of traffic self-similarity // Central European Journal of Operations Research. – 2013. – 21. – Pp. 63–83.
26. Meng Q., Khoo H. L. Self-Similar Characteristics of Vehicle Arrival Pattern on Highways // Journal of Transportation Engineering. – 2009. – 11. – Pp. 864–872.
27. Ying H. et al. Effects of spring and summer extreme climate events on the autumn phenology of different vegetation types of Inner Mongolia, China, from 1982 to 2015 // Ecological Indicators. – 2020. – Vol. 111. – 105974. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105974.
28. Yu Z. et al. Rescaled Range Analysis of Vessel Traffic Flow in the Yangtze River // The 5th International Conference on Transportation Information and Safety, July 14 – July 17, 2019. Liverpool, UK. DOI: 10.1109/ICTIS.2019.8883827.
29. Zhongda Tian. Chaotic characteristic analysis of network traffic time series at different time scales // Chaos, Solitons & Fractals. – 2020. Vol. 130. – 109412. DOI: 10.1016/j.chaos.2019.109412.

References

1. Boyarshinov, M. G. (2020) [The Rescaled Range Analysis to Investigate the Intensity of Traffic Flow]. *Vestnik Nauchnogo centra bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of the Scientific Center for Life Safety]. Vol. 4 (46), pp. 35–46. (In Russ.).
2. Boyarshinov, M. G., Vavilin, A. S., Shumkov, A. G. (2021) [Using the Complex of Photo and Video Recording of Traffic Violations to Identify Deterministic and Stochastic Components of the Traffic Flow Intensity]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intelligence. Innovations. Investment]. Vol. 3, pp. 61–71. (In Russ.).
3. Vitlinskij, V. V., Gricyuk, V. V. (2009) [(Pre-Prognostic Analysis of Short Time Series)]. *Modelirovanie*

i analiz bezopasnosti i riska v slozhnyh sistemah: trudy Mezhdunarodnoj nauchnoj shkoly MABR [Modeling and analysis of security and risk in complex systems: Proceedings of the International Scientific School of the MASR]. pp. 290–296. (In Russ.).

4. Gayazova, N. T., Zaripov, R. R. (2008) [Stochastic Estimation of the Rate of Pathological Tremor of a Person Using the Hurst Index]. *Vestnik Tatarskogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tatar State Humanitarian Pedagogical University]. Vol. 2, pp. 94–99. (In Russ.).

5. Glavackij, S. P. (2013) [Statistical Analysis of Social Network Traffic]. *Naukovi praci ONAZ im. O. S. Popova* [Scientific works of the A. S. Popov ONAS]. No. 4 (46), pp. 35–46. (In Russ.).

6. Gutorov, A. (2009) [Application of Methods to Identify Hidden Periodicities in Modeling and Assessment of Economic Risks]. *Modelirovanie i analiz bezopasnosti i riska v slozhnyh sistemah: trudy Mezhdunarodnoj nauchnoj shkoly MABR* [Modeling and analysis of security and risk in complex systems: Proceedings of the International Scientific School of the MASR]. pp. 227–233. (In Russ.).

7. Doroshina, N. V. (2017) [Overview of Methods for Calculating the Fractal Dimension of Time Series]. *Matematicheskie metody i informacionnye tekhnologii upravleniya v nauke, obrazovanii i pravoohranitel'noj sfere: sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Mathematical methods and information technologies of management in science, education and law enforcement: collection of materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. pp. 13–17. (In Russ.).

8. Zhmurko, D. Yu., Osipov, A. K. (2018) [Forecasting of Sugar Industry Development Indicators Using Fractal Analysis Methods]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ekonomika i pravo* [Bulletin of the Udmurt University. Economics and Law]. Vol. 28 (2), pp. 185–193. (In Russ.).

9. Zinenko, A. V. (2012) [R/S Stock Market Analysis]. *Biznes-informatika* [Biznes-informatika]. Vol. 3 (21), pp. 24–30. (In Russ.).

10. Kalush, Yu. A., Loginov, V. M. (2002) [Hurst Index and Its Hidden Properties]. *Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki* [Siberian Journal of Industrial Mathematics]. Vol. 4 (12), pp. 29–37. (In Russ.).

11. Kiyani, M. A., Fabrichева, E. V., Podladchikov, V. N. (2014) [Applications of Smoothing Algorithms for Preliminary Processing of Statistical Solar Data]. *Sistemni doslidzhennya ta informacijni tekhnologii* [Systems research and Information Technology]. Vol. 2, pp. 68–76. (In Russ.).

12. Klevcov, S. I. (2018) [Using the Rescaled Range Analysis to Investigate the Behavior of a Parameter of a Technical Object]. *Izvestiya YuFU* [News of the SFU]. Vol. 6 (200), pp. 174–184. (In Russ.).

13. Lepihin, A. P., Perepelica, D. I. (2016) [Application of the Hurst Indicator (coefficient) in Hydrology]. *Geograficheskij vestnik* [Geographical Bulletin]. Vol. 4 (39), pp. 36–44. (In Russ.).

14. Lyubushin, A. A. (2012) [Forecast of the Great Japanese Earthquake]. *Priroda* [Nature]. Vol. 8, pp. 23–33. (In Russ.).

15. Najman, E. L. (2020) Calculation of the Hurst index to identify the trend (persistence) of financial markets and macroeconomic indicators. Available at: http://wealth-lab.net/Data/Sites/1/SharedFiles/doc/forindicators/articles/04_erik_naiman_herst.pdf (accessed: 12.04.2020). (In Russ.).

16. Pashchenko, F. F., Amosov, O. S., Muller, N. V. (2015) [Structural-Parametric Identification of a Time Series Using Fractal and Wavelet Analysis]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Computer science and control systems]. Vol. 2 (44), pp. 80–88. (In Russ.).

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. 2254. DOI: 10.3390/app9112254. (In Engl.).

18. Araya, H., Tudor, C. A. (2019) Behavior of the Hermite sheet with respect to the Hurst index. *Stochastic Processes and their Applications*. Vol. 129. Issue 7. pp. 2582–2605. DOI: 10.1016/j.spa.2018.07.017. (In Engl.).

19. Can, Ye, Huiyun, Li, Guoqing, Xu (2014) An Early Warning Model of Traffic Accidents Based on Fractal Theory. *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, October 8–11, pp. 2280–2285. (In Engl.).

20. Castellano, R., Cerqueti, R., Rotundo, G. (2020) Exploring the financial risk of a temperature index: a fractional integrated approach. *Annals of Operations Research*. Vol. 28, pp. 225–242. DOI: 10.1007/s10479-018-3063-0. (In Engl.).

21. David, S. A. et al. (2020) Measuring the Brazilian ethanol and gasoline market efficiency using DFA-Hurst and fractal dimension. *Energy Economics*. Vol. 85. 104614. DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104614. (In Engl.).

22. David, S.A. et al. (2020) A combined measure to differentiate EEG signals using fractal dimension and MF DFA-Hurst. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. Vol. 84. 105170. DOI: 10.1016/j.cnsns.2020.105170. (In Engl.).

23. Hurst, H. E. (1956) The Problem of Long-Term Storage In Reservoirs. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, No. 1(3), pp. 3–27. (In Engl.).

24. Jiaotong Yunshu, Xitong Gongcheng, Yu Xinxi. (2014) Determining traffic state evolution index on urban arterial road. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. No. 14 (3), pp. 64–69. (In Engl.).
25. Kaklauskas, L., Sakalauskas, L. (2013) Study of on-line measurement of traffic self-similarity. *Central European Journal of Operations Research*. 21, pp. 63–83. (In Engl.).
26. Meng, Q., Khoo, H. L. (2009) Self-Similar Characteristics of Vehicle Arrival Pattern on Highways. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 11, pp. 864–872.
27. Ying, H. et al. (2020) Effects of spring and summer extreme climate events on the autumn phenology of different vegetation types of Inner Mongolia, China, from 1982 to 2015. *Ecological Indicators*. Vol. 111. 105974. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105974. (In Engl.).
28. Yu, Z. et al. (2019) Rescaled Range Analysis of Vessel Traffic Flow in the Yangtze River. The 5th International Conference on Transportation Information and Safety, July 14 – July 17, 2019. Liverpool, UK. DOI: 10.1109/ICTIS.2019.8883827. (In Engl.).
29. Zhongda, Tian (2020) Chaotic characteristic analysis of network traffic time series at different time scales. *Chaos, Solitons & Fractals*. Vol. 130. 109412. DOI: 10.1016/j.chaos.2019.109412. (In Engl.).

Информация об авторах:

Михаил Геннадьевич Бояршинов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобилей и технологических машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ORCID ID: 0000-0003-4473-6776

e-mail: atm@pstu.ru

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

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

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: 19.12.2021; принята в печать: 09.03.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

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

ORCID ID: 0000-0003-4473-6776

e-mail: atm@pstu.ru

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

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

Contribution of the authors:

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

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

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: 19.12.2021.

Accepted for publication: 09.03.2022 .

The authors have read and approved the final manuscript.