

УДК 656.086

© А. И. Петров, канд. техн. наук, доцент
(Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия)

E-mail: ArtIgPetrov@yandex.ru

© С. А. Евтюков, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: s.a.evt@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-4-80-88

© A. I. Petrov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russia)

E-mail: ArtIgPetrov@yandex.ru

© S. A. Evtyukov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: s.a.evt@mail.ru

СПЕЦИФИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ЭНТРОПИЙНОГО ПОДХОДА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИИ ГОРОДСКИМИ СИСТЕМАМИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

THE SPECIFICS OF USING THE INFORMATION-ENTROPY APPROACH IN THE ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF URBAN ROAD TRAFFIC SAFETY SYSTEMS

Сегодня уже очевидна сложность достижения целевых установок Стратегии безопасности дорожного движения (БДД) Российской Федерации. В данной статье представлен новый концептуальный взгляд на проблематику обеспечения БДД. Приведен информационно-энтропийный подход в установлении уникальной специфики городских или региональных систем обеспечения БДД. Его основой является структурный анализ и выявление критических звеньев процесса формирования дорожной аварийности. Проанализирована специфика структуры системных процессов формирования дорожно-транспортной аварийности в городах-административных центрах регионов Северо-Западного федерального округа. Результаты исследования открывают новое теоретическое направление в исследовании проблем обеспечения БДД.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, структура, структурная организованность, относительная энтропия, Северо-Западный федеральный округ, города.

Today, the difficulty of achieving the targets of the Road Traffic Safety Strategy (RTS) of the Russian Federation has already become evident. This paper presents a new conceptual view on the problem of providing the road traffic safety. The authors demonstrate an information-entropic approach in establishing the unique specificity of urban or regional road traffic safety systems. This approach is based on structural analysis and identification of critical links in the process of road accident formation. The specificity of the structure of system processes of road traffic accident formation in the cities-administrative centers of the Northwestern Federal District is analyzed. The results of the research open a new theoretical direction in the study of problems of providing road traffic safety.

Keywords: road traffic safety, structure, structural organization, relative entropy, North-Western Federal District, cities.

Введение

Термин «специфика» обычно используется в контексте уточнения каких-либо особенностей изучаемого предмета. Под специ-

фикой городской дорожно-транспортной аварийности можно понимать степень хаотичности процесса ее формирования, что обосновывается прежде всего управленче-

ской идеологией максимально возможного противодействия хаотичности движения транспортных потоков, осуществляемого посредством мер по регулированию транспортных потоков и создания условий для минимизации системного конфликта. Степень системной или процессной хаотичности количественно оценивается информационной энтропией H . Для ее количественной идентификации применительно к дорожно-транспортной аварийности требуется идентифицировать характерные системные (процессные) особенности.

В рамках данной статьи рассмотрены методические вопросы использования информационно-энтропийного подхода в оценке специфики систем обеспечения безопасности дорожного движения (БДД); представлены результаты количественной оценки энтропийных характеристик $H_{\text{БДД}}$ и $H_{\text{нБДД}}$ процессов формирования дорожно-транспортной аварийности в городах-административных центрах регионов Северо-Западного федерального округа; зависимости влияния на относительную энтропию $H_{\text{нБДД}}$ переходных коэффициентов K_i между звеньями причинно-следственной цепочки формирования дорожно-транспортной аварийности, итоги аналитического разбора полученных исследовательских результатов.

Методика оценки информационно-энтропийной специфики систем

Степень системной (процессной) хаотичности количественно оценивается информационной энтропией H [1]. Общеизвестным автором теории информации является К. Шеннон (1948 г.). В 1955 г. была опубликована статья о необходимости развития кибернетических идей К. Шеннона в нашей стране [2]. Сегодня идеи К. Шеннона и его последователей используются в самых разных сферах знания при решении широкого круга задач. К возможностям такого использования может быть отнесен анализ структурной специфичности каких-либо процессов, развора-

чивающихся в пространственно-временном континууме. Анализ особенностей процессов формирования дорожно-транспортной аварийности — одна из таких возможностей.

Идентификация характерных системных специфических характеристик применительно к дорожно-транспортной аварийности возможна при формализации изучаемого процесса в форме причинно-следственной цепочки и оценке структурных соотношений между значимостью ее различных звеньев.

Представим формирование аварийности в форме трехзвенной (рис. 1) причинно-следственной цепочки «население города P » — «число ДТП, зарегистрированных в городе N_{RA} » — «число пострадавших в этих ДТП N_V » — «число погибших в этих ДТП N_D » [3], связывающей между собой базовые блоки процесса.

Специфические особенности процесса формирования аварийности достаточно легко идентифицировать посредством определения передаточных коэффициентов K_i между численными значениями показателей звеньев этой цепочки по формуле

$$K_i = X_{out} / X_{in}, \quad (1)$$

где X_{out} — показатель характеристики последующего звена причинно-следственной цепочки; X_{in} — показатель характеристики предыдущего звена причинно-следственной цепочки.

В частности, специфичность процесса формирования дорожно-транспортной аварийности определяют значения информационно-передаточных коэффициентов K_i :

$$\begin{aligned} K_1 &= N_{RA} / P; \\ K_2 &= N_V / N_{RA}; \\ K_3 &= N_D / N_V, \end{aligned} \quad (2)$$

где N_{RA} — число ДТП в городе, произошедших за год (2022), ед./год; N_V — число пострадавших в этих ДТП (2022), чел./год; N_D — число погибших в этих ДТП (2022), чел./год; P — население города (2022), чел.

Четкое понимание соотношений характеристик блоков причинно-следственного про-

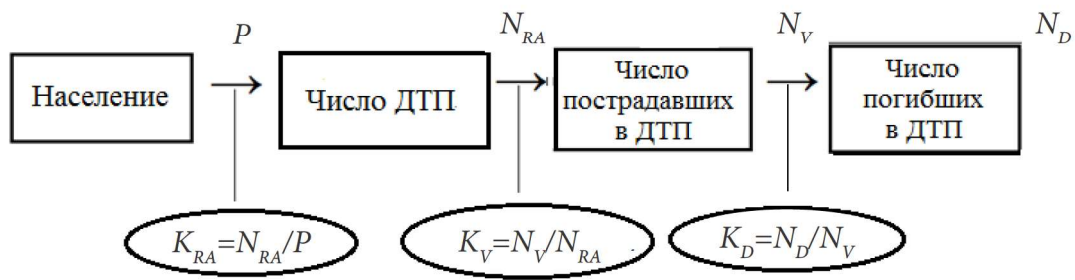


Рис. 1. Причинно-следственная цепочка « $P - N_{RA} - N_V - N_D$ » для городских систем обеспечения БДД

цесса формирования дорожно-транспортной аварийности позволяет идентифицировать структурные особенности этого процесса, а также оценить специфику аварийности, которая в различных городах будет проявляться по-разному.

Оценить эту специфику количественно можно посредством энтропии $H_{БДД}$ и относительной энтропии $H_{нБДД}$ в размерности $H_{нБДД} = [0...1]$, где 0 — низший теоретический уровень системной или процессной организованности (абсолютная организованность); 1 — высший теоретический уровень организованности (абсолютная дезорганизованность).

Расчет энтропии H осуществляется по классической формуле К. Э. Шеннона [1, 2]:

$$H = -\sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln w_i, \quad (3)$$

где n — число звеньев причинно-следственной цепочки формирования аварийности; w_i — весовые коэффициенты, отвечающие условию нормировки, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

Используемая в формуле (3) замена вероятностных характеристик событий (согласно концепции К. Шеннона) на весовые коэффициенты w_i — это нормальная практика [4], идентифицирующая смысловую тождественность между вероятностью какого-либо события и «весом» или значимостью какого-либо системного элемента в рамках всей системы.

В условиях равновесного системного состояния, свидетельствующего о максимуме

энтропии H [5], относительная значимость или «вес» всех элементов системы будет равен. Например, для трехэлементной системы (или трехзвенного процесса) весовые коэффициенты w_i будут равны 0,333 (рис. 2, а).

В условиях внешнего управления, суть которого заключается в определенном насилии над системой в попытке изменить ее поведение, значимость различных элементов будет искусственно изменяться. Весовые коэффициенты w_i в этом случае будут принимать различные неравные друг другу значения, отображающие степень значимости каких-либо элементов системы (или звеньев причинно-следственной цепочки). В этом случае весовые коэффициенты w_i не будут равны 0,333 (рис. 2, б), а могут принимать любые значения в диапазоне $w_i = [0; 1]$. Суммарно их веса должны отвечать условию $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

Расчет относительной энтропии $H_{нБДД}$ системы обеспечения БДД в нашем случае может быть осуществлен по формуле

$$H_n = \left[-\sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln(w_i) \right] / \ln(n), \quad (4)$$

где n — число звеньев причинно-следственной цепочки, $n = 3$ (см. рис. 1).

Учет числа звеньев процесса необходим для определения максимально возможного для конкретной оцениваемой системы обеспечения БДД уровня системной энтропии H .

Использование для анализа специфики городской дорожно-транспортной аварийности относительной энтропии $H_{нБДД}$ более

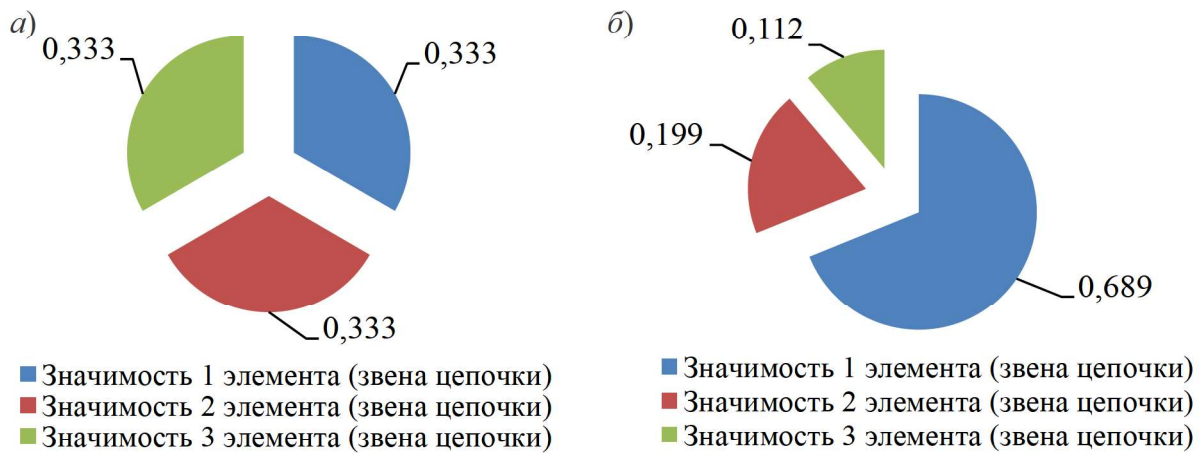


Рис. 2. Примеры идентификации равновесного и неравновесного состояния трехэлементной системы, характеризуемые разным уровнем H_n : а — равновесное состояние системы в отсутствии внешнего управления, $H_n = H_{n\max}$; б — неравновесное состояние при наличии внешнего управления, $H_n \neq H_{n\max}$

выгодно с позиций наглядности и удобства пользования.

Концептуальные подходы к использованию классической формулы К. Э. Шеннона [1] в определении информационной энтропии процессов формирования дорожно-транспортной аварийности в городах (регионах) авторы ранее представляли в своих работах [6–7].

Результаты

Используя представленный в трудах [6–7] подход, можно определить численные значения передаточных коэффициентов K_i процесса формирования дорожно-транспортной аварийности в городах–административных центрах регионов Северо-Западного федерального округа РФ и рассчитать значения энтропийных характеристик $H_{\text{БДД}}$ и $H_{\text{нБДД}}$. В табл. 1 представлены необходимые для этого исходные данные.

Даже визуальный анализ данных (см. табл. 1) показывает, что характеристики аварийности лишь косвенно связаны с численностью населения. Например, в Петрозаводске число ДТП, а также количество пострадавших в них, значительно меньше, чем в Великом Новгороде и Сыктывкаре, население которых вполне сопоставимо с населением Петрозаводска.

Число погибших в ДТП в 2022 г. в Великом Новгороде значительно выше (11 чел. в год), чем в Петрозаводске и Мурманске (5 и 6 чел. в год соответственно), хотя численность его населения меньше.

Очевидно, что дорожно-транспортная аварийность является результирующей сложных внутренних процессов, связанных с уровнем организованности городских систем обеспечения БДД.

В табл. 2 представлены расчетные значения передаточных коэффициентов K_i причинно-следственной цепочки механизма формирования аварийности и энтропийных характеристик $H_{\text{БДД}}$ и $H_{\text{нБДД}}$ процесса формирования дорожно-транспортной аварийности в городах – административных центрах регионов Северо-Западного федерального округа.

Отметим, что, с одной стороны, диапазон значений $H_{\text{нБДД}}$ для 10 сравниваемых городов [0,623; 0,685] вряд ли можно назвать сравнительно широким, а значит, в целом для всех сравниваемых городов процессы формирования дорожно-транспортной аварийности протекают примерно одинаково.

С другой стороны, специфика дорожно-транспортной аварийности в городах–административных центрах регионов Северо-

Таблица 1

Исходные данные (2022 г.), характеризующие процессы формирования дорожно-транспортной аварийности в городах–административных центрах регионов Северо-Западного федерального округа

Город	Население, чел.	Число ДТП, ед.	Количество, чел.	
			пострадавших	погибших
Санкт-Петербург	5 601 911	4179	4910	140
Калининград	490 449	480	538	19
Вологда	313 944	326	423	8
Архангельск	301 199	216	258	8
Мурманск	270 384	290	347	6
Петрозаводск	234 897	164	196	5
Великий Новгород	221 286	235	290	11
Сыктывкар	220 580	272	343	7
Псков	193 082	159	215	7
Нарьян-Мар	23 300	10	15	0

Таблица 2

Значения (2022 г.) передаточных коэффициентов K_i и энтропийных характеристик $H_{БДД}$ и $H_{нБДД}$

Город	Передаточные коэффициенты K_i			Энтропийные характеристики	
	K_1	K_2	K_3	$H_{БДД}$	$H_{нБДД}$
Санкт-Петербург	0,0007	1,1749	0,0285	0,702	0,639
Калининград	0,0010	1,1208	0,0353	0,684	0,623
Вологда	0,0010	1,2975	0,0189	0,753	0,685
Архангельск	0,0007	1,1944	0,0310	0,703	0,640
Мурманск	0,0011	1,1966	0,0173	0,732	0,667
Петрозаводск	0,0007	1,1951	0,0255	0,710	0,646
Великий Новгород	0,0011	1,2340	0,0379	0,716	0,652
Сыктывкар	0,0012	1,2610	0,0204	0,747	0,680
Псков	0,0008	1,3522	0,0326	0,740	0,674
Нарьян-Мар	0,0004	1,5000	0,0000	–	–

Западного федерального округа проявляется двумя обстоятельствами:

- 1) величиной относительной энтропии $H_{нБДД}$ городской системы обеспечения БДД;
- 2) спецификой соотношений значений передаточных коэффициентов K_i причинно-следственной цепочки механизма формирования аварийности.

На рис. 3–5 графически представлены зависимости $H_{нБДД} = f(K_1 \dots K_3)$.

Обсуждение

Зная численные значения $H_{нБДД}$, характерные для всех 10 городов, можно разделить системы обеспечения БДД этих городов по уровню системной организованности на

4 класса. Средним уровнем организованности систем ОБДД в городах выбран уровень $H_{нБДД \text{ средний}} = 0,65$.

Границы классов определены с учетом величины диапазона значений $\Delta H_{нБДД}$ равной 0,025;

1) высокий ($H_{нБДД} \leq 0,625$) — Калининград (0,623);

2) выше среднего ($0,625 < H_{нБДД} \leq 0,650$) — Санкт-Петербург (0,639), Архангельск (0,640), Петрозаводск (0,646);

3) ниже среднего ($0,651 < H_{нБДД} \leq 0,675$) — В. Новгород (0,652), Мурманск (0,667), Псков (0,674);

4) низкий ($H_{нБДД} > 0,675$) — Сыктывкар (0,680), Вологда (0,685).

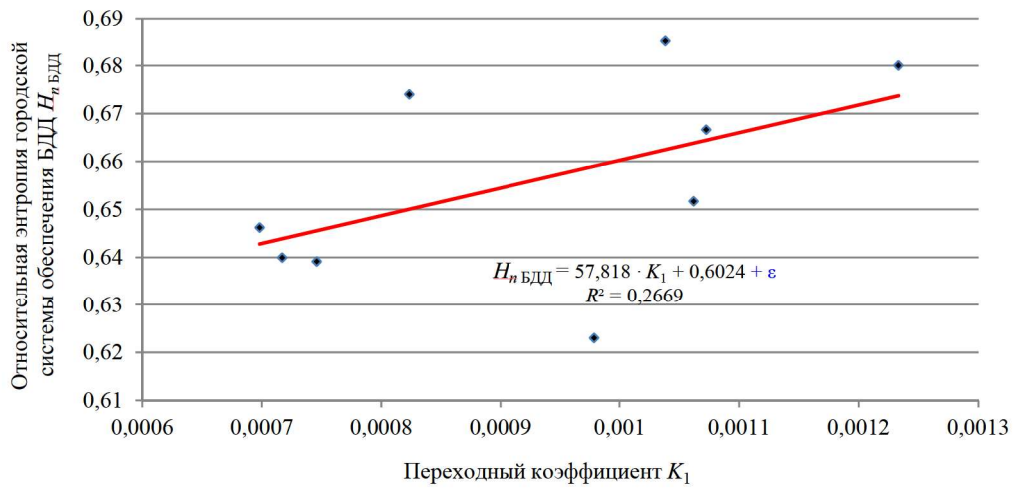


Рис. 3. Графический вид зависимости $H_{н\text{БДД}} = f(K_1)$

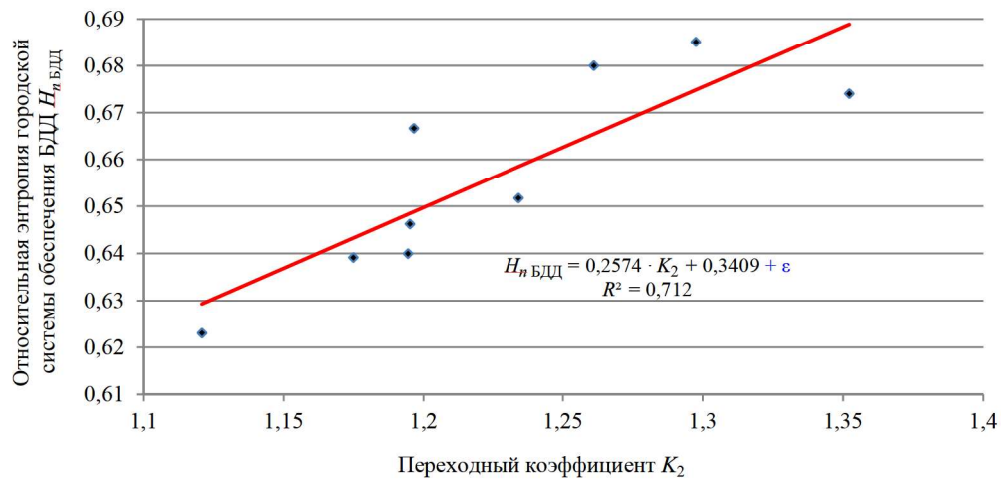


Рис. 4. Графический вид зависимости $H_{н\text{БДД}} = f(K_2)$

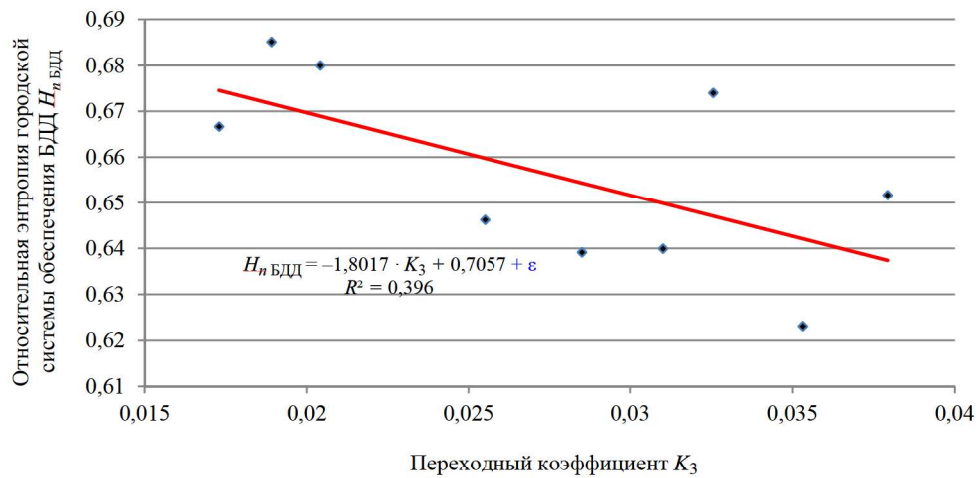


Рис. 5. Графический вид зависимости $H_{н\text{БДД}} = f(K_3)$

Рассмотрим специфичность дорожно-транспортной аварийности в городах Северо-Западного федерального округа на примере систем обеспечения БДД двух городов: Вологды ($H_{\text{нБДД}} \rightarrow \max$) и Калининграда ($H_{\text{нБДД}} \rightarrow \min$). Уровень хаоса в системах обеспечения БДД этих городов различается примерно на 10 % ($H_{\text{нБДД Вологда}} / H_{\text{нБДД Калининград}} = 1,10$).

Проанализируем значения K_i для определения факторов системной организованности системы обеспечения БДД Вологды и Калининграда (табл. 3).

Вероятность для жителя города попасть в ДТП (оценивается K_1) в сравниваемых городах на одном уровне ($K_1 = 0,0010$). При этом удельное число пострадавших в среднестатистическом ДТП (оценивается K_2) в Вологде выше, чем в Калининграде, в 1,16 раза (1,2975/1,1208). Коэффициент тяжести ДТП (оценивается K_3) в Калининграде выше, чем в Вологде, в 1,86 раза (0,0353/0,0189). Именно эти соотношения в максимальной степени влияют на оценку $H_{\text{нБДД}}$.

Характерно, что именно коэффициент K_3 в наибольшей степени воздействует на итоговую величину энтропийных характеристик $H_{\text{БДД}}$ и $H_{\text{нБДД}}$. В понимании авторов, «энтропия БДД» — это степень неопределенности в отношении аспекта безопасности участников дорожного движения. Высокие значения $H_{\text{нБДД}}$ свидетельствуют о высокой неопределенности реализации негативных проявлений дорожно-транспортной аварийности и, наоборот, низкие значения $H_{\text{нБДД}}$ характеризуют высокий уровень определенности реализации самых худших сценариев аварийности.

В этой связи высокий уровень энтропийной организованности городских систем обеспечения безопасности дорожного движения является скорее отрицательной характеристикой с позиций общепринятого понимания БДД.

Понимание того, как именно соотносятся характеристики блоков причинно-следственной цепочки (идентифицируются значениями K_i), позволяет осознать сущность специфики функционирования автотранспортной системы города, определяющей поведение участников дорожного движения и, как следствие, специфику аварийности.

Надо отметить, что число погибших в ДТП в Вологде в 2,5 раза ниже, чем в Калининграде (8 против 19). Разница в численности населения этих городов примерно полторакратно, а значит, в целом удельно (на 1000 чел.) последствия дорожной аварийности для Вологды менее болезненны, чем для Калининграда.

Таким образом, именно понимание структуры внутренних системных процессов и позволяет характеризовать специфику дорожно-транспортной аварийности в различных городах. С учетом совокупности обстоятельств определяются качественная специфика дорожно-транспортной аварийности и количественный уровень степени организованности городских систем обеспечения БДД (с использованием $H_{\text{нБДД}}$).

Более подробно с использованием представленного в статье информационно-энтропийного подхода к оценке качества управления системами обеспечения БДД можно ознакомиться в работах [8–10].

Таблица 3

Сравнение структуры процесса формирования аварийности в городах с максимально высоким и максимально низким уровнями $H_{\text{нБДД}}$

Город	Передаточные коэффициенты			Энтропийные характеристики	
	K_1	K_2	K_3	$H_{\text{БДД}}$	$H_{\text{нБДД}}$
Вологда	0,0010	1,2975	0,0189	0,753	0,685
Калининград	0,0010	1,1208	0,0353	0,684	0,623

Выводы

При оценке текущего качества управления БДД некорректно сравнивать показатели дорожно-транспортной аварийности текущего года (число ДТП, число раненых и погибших в ДТП) с аналогичными показателями прошлого года (АППГ). Аббревиатура АППГ регулярно используется профессионалами для анализа трендов аварийности, является привычным для пользователей инструментом, однако ничего не дает в плане анализа специфичности дорожно-транспортной аварийности. Только структурный анализ, основанный на анализе энтропийной специфики процессов дорожно-транспортной аварийности, позволяет решать задачи понятийного смыслового анализа изучаемых процессов. Этот анализ способствует детальному, скрупулезному осмыслению полного понимания специфических городских (или региональных) проблем в сфере обеспечения БДД.

Изыскания в сфере оценки и последующего практического использования данных об идентичности, организованности разномасштабных (страна, регион, город и т. п.) систем обеспечения БДД проводятся автором и его научным руководителем с 2018 г.

Рабочие исследовательские материалы, методика оценки энтропийных характеристик систем обеспечения БДД переданы в НЦ ГИБДД РФ (начальник — полковник Д. В. Митрошин), что, по мнению авторов, должно послужить началом нового этапа плодотворного научно-практического взаимодействия между наукой и практикой.

Библиографический список

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. литер., 1963. 830 с.
2. Соболев С. Л., Китов А. И., Ляпунов А. А. Основные черты кибернетики // Вопросы философии. 1955. № 4. С. 136–148.
3. Петров А. И., Евтюков С. А., Колесов В. И. Новые подходы к управлению безопасностью дорожного движения: парадигма организованности процессов

обеспечения безопасности дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 3 (66). С. 65–74.

4. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»: Институт компьютерных исследований, 2011. 164 с.

5. Зайцев Р. О. Введение в современную статистическую физику. М.: Книжный дом «Либроком», 2016. 504 с.

6. Петров А. И., Евтюков С. А. Новая антиэнтропийная концепция организованности систем обеспечения безопасности дорожного движения // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1 (72). С. 184–193.

7. Петров А. И. Энтропия системного управления безопасностью дорожного движения: методика и практика использования // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С. 72–82.

8. Petrov A. I. Entropy Method of Road Safety Management: Case Study of the Russian Federation // Entropy. 2022. 24 (2). 177. URL: <https://doi.org/10.3390/e24020177>.

9. Petrov A. I. Information and Entropy Aspects of the Specifics of Regional Road Traffic Accident Rate in Russia // Information. 2023. 14 (2). 138. URL: <https://doi.org/10.3390/info14020138>.

10. Petrov A. I. Philosophy and Meanings of the Information Entropy Analysis of Road Safety: Case Study of Russian Cities // Information. 2023. 14 (6). 302. URL: <https://doi.org/10.3390/info14060302>.

References

1. Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Research works on information theory and cybernetics]. Moscow, Publ., 1963, 830 p.
2. Sobolev S. L., Kitov A. I., Lyapunov A. A. *Osnovnye cherty kibernetiki* [Basic features of cybernetics]. *Voprosy filosofii – Issues of Philosophy*, 1955, no. 4, pp. 136–148.
3. Petrov A. I., Evtyukov S. A., Kolesov V. I. *Novye podkhody k upravleniyu bezopasnost'yu dorozhnogo dvizheniya: paradigma organizovannosti protsessov obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* [New approaches to road traffic safety management. Paradigm of road traffic safety management]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin – World of transport and technological machines*, 2019, no. 3 (66), pp. 65–74.
4. Chumak O. V. *Entropii i fraktaly v analize dannykh* [Entropies and fractals in data analysis]. Moscow-Izhevsk, SIC “Regular and Chaotic Dynamics”, Institute for Computer Research Publ., 2011, 164 p.
5. Zaytsev R. O. *Vvedenie v sovremennuyu statisticheskuyu fiziku* [Introduction to modern statistical

physics]. Moscow, Knizhniy dom Librokom Publ., 2016, 504 p.

6. Petrov A. I., Evtukov S. A. *Novaya anti-entropiyaya kontseptsiya organizovannosti sistem obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* [A new anti-entropic conception of forming the road traffic safety provision systems]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 1 (72), pp. 184–193.

7. Petrov A. I. *Entropiya sistemnogo upravleniya bezopasnost'yu dorozhnogo dvizheniya: metodika i praktika ispol'zovaniya* [Entropy of the system management of road traffic safety: methodology and practice of using]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii – Intellect. Innovations. Investments*, 2023, no. 4, pp. 72–82.

8. Petrov A. I. Entropy method of road safety management: Case study of the Russian Federation. *Entropy*, 2022, no. 24 (2), 177 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/e24020177>

9. Petrov A. I. Information and entropy aspects of the specifics of regional road traffic accident rate in Russia. *Information*, 2023, no. 14 (2), 138 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/info14020138>

10. Petrov A. I. Philosophy and meanings of the information entropy analysis of road safety: Case study of Russian cities. *Information*, 2023, no. 14 (6), 302 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/info14060302>