

34. Цвелик Е. А. Методика эффективного управления образовательными программами в вузе : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. А. Цвелик. – Волгоград, 2018. – 16 с.
35. Чугунов А. П. Модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении сетевыми образовательными программами вузов с учетом индивидуальных предпочтений студентов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. П. Чугунов. – Челябинск, 2018. – 23 с.
36. Ботов Д. С. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки формирования образовательных программ по требованиям рынка труда на основе нейросетевых моделей языка : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Ботов. – Челябинск, 2019. – 16 с.
37. Диязитдинова А. А. Модельно-методический комплекс поддержки процесса принятия решений в приемной комиссии вуза : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Диязитдинова. – Новосибирск, 2019. – 18 с.
38. Лямин А. В. Модели, методы и алгоритмы построения автоматизированных систем управления процессом электронного обучения в сфере высшего образования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. В. Лямин. – Пенза, 2019. – 34 с.
39. Боровкова Г. С. Методы и алгоритмы управления образовательным учреждением высшего образования с помощью рейтинговой системы : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. С. Боровкова. – Липецк, 2019. – 22 с.
40. Полетайкин А. Н. Методология гибридного моделирования образовательной деятельности высшего учебного заведения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Полетайкин. – Новосибирск, 2021. – 35 с.
41. Городович А. В. Модели, алгоритмы и инструментальная система оценивания и модернизации учебного контента : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Городович. – Томск, 2022. – 23 с.
42. Кривцун А. В. Управление эффективностью международной деятельности вуза : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Кривцун. – Новочеркасск, 2023. – 19 с.
43. Федутинов К. А. Интеллектуализация процессов принятия решений в организационных системах в условиях оперативного анализа мониторинговых данных : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. А. Федутинов. – Воронеж, 2023. – 21 с.
44. Болгова Е. В. Модели и методы повышения профессиональной компетентности педагогических работников образовательных организаций ФСИН России : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Болгова. – Воронеж, 2023. – 18 с.
45. Аль-Дулаими О. Х. З. Интеллектуализация процессов принятия решений в системе управления качеством подготовки обучаемых в организационных корпоративных системах на основе нейросетевых моделей представления знаний : автореф. дис. ... канд. техн. наук / О. Х. З. Аль-Дулаими. – Воронеж, 2024. – 21 с.
46. Дорофеев Д. В. Управление процессами принятия решений в образовательных организационных системах в условиях редизайна на базе модели цифрового двойника : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Дорофеев. – Воронеж, 2024. – 23 с.

© Р. И. Аминов, Л. Х. Зайнутдинова

**Ссылка для цитирования:**

Аминов Р. И., Зайнутдинова Л. Х. Электронные информационно-управляющие системы в образовательном процессе вуза // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 1 (51). С. 120–127.

УДК 519.816

DOI 10.52684/2312-3702-2025-51-1-127-131

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДСКОЙ ПРИДОРОЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ**

**Б. Х. Санжапов**

**Санжапов Булат Хизбуллоевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Клиническая инженерия и технологии искусственного интеллекта», Волгоградский государственный медицинский университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: +79044241115; e-mail: sbkh@mail.ru

В статье рассматривается подход к экспресс-анализу загрязнения атмосферы придорожной территории взвешенными частицами. Обоснована целесообразность использования стандартного индекса как показателя эффективности режима эксплуатации автомобильной дороги. В работе аргументируется использование вероятностной искусственной нейронной сети для решения задачи поддержки принятия решений – классификации экологического состояния атмосферы городской территории – на основе обработки уникального статистического материала. Разработка вероятностной нейронной сети проводилась средствами системы *MATLAB*. Обсуждена специфика задач обеспечения экологической безопасности городских территорий. Показана целесообразность использования нейронной сети вероятностного типа для исследования экологического состояния атмосферы городской придорожной территории. Приведен иллюстрирующий эффективность предложенного подхода модельный пример. Предложенная модель экспресс-оценки применима на ранней стадии исследования вариантов реализации городских программ. Разработанный подход может быть полезен как дополнительный материал при ранжировании режимов функционирования действующих объектов.

**Ключевые слова:** вероятностная нейронная сеть, ранжирование, классификация, взвешенные частицы, придорожная территория, экологическая безопасность.

## APPLICATION OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR EXPRESS ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF AN URBAN ROADSIDE AREA

B. Kh. Sanzhapov

**Sanzhapov Bulat Khizbullovich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Clinical Engineering and Artificial Intelligence Technologies Department, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russian Federation, phone: +79044241115; e-mail: sbkh@mail.ru

The article discusses an approach to express analysis of air pollution in roadside areas with particulate matter. The advantages of using a standard index as an indicator for the efficiency of highways are shown. The work justifies the use of a probabilistic artificial neural network to solve the problem of supporting decisions, which is classifying the ecological state of an urban atmosphere based on unique statistical data. The development of the probabilistic neural net was done using the Matlab system. The specific tasks of ensuring environmental safety in urban areas were discussed. The feasibility of using probabilistic networks to study the atmospheric ecology of urban roadsides is demonstrated. A model case demonstrating the effectiveness of this approach is provided. The proposed rapid assessment method is applicable at the early stages of studying options for urban program implementation. The developed approach can be used as an additional tool for ranking the operational modes of existing facilities.

**Keywords:** probabilistic neural network, ranking, classification, roadside area, environmental safety, particulate matter.

**Введение**

Развитие города в целом и, в частности, его отдельных частей должно обеспечивать экологическую безопасность окружающей среды. В дальнейшем развитие городских территорий рассматривается как реализация городских программ, включая выбор оптимальных, с точки зрения загрязнения воздушного пространства, режимов их эксплуатации. В частности, такие требования должны предъявляться к городской автомобильной дороге (АД). Использование принятых в нашей стране таких интегральных показателей, как индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) и наибольшая повторяемость (НП), а также зарубежных индексов качества атмосферы (AQI), включает в себя рассмотрение в качестве загрязнителя взвешенные частицы (ВЧ):  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$ , чьи размеры не превышают 2,5 мкм и 10 мкм соответственно. Существенный вклад в загрязнение атмосферы городских территорий мелкодисперсными частицами вносит эксплуатация автомобильных дорог [1, 2]. Негативное влияние этих загрязнителей на здоровье человека довольно хорошо изучено в ряде работ, в частности, этому посвящены статьи [2, 3].

В настоящий момент существуют математические модели, описывающие с приемлемой точностью процесс распространения загрязняющих веществ (ЗВ), частности, находящихся в законодательно закрепленной методике, утвержденной приказом Минприроды России [4]. Ряд математических моделей распространения ЗВ используют распределение Гаусса, например, [5]. Имитационные модели позволяют прогнозировать загрязнение атмосферы придорожной территории при некоторых ограничениях [6, 7]. Во многих программных продуктах для вычисления продвижения фронта загрязнения используются решения уравнений математической физики [8].

Тем не менее применение таких моделей для оценки степени загрязнения придорожной тер-

ритории ВЧ, в том числе на небольшом расстоянии от нее, не всегда могут дать высокую точность расчетов, ввиду того что не учитывается ряд факторов. Например, влажность воздуха, реальный дисперсный состав загрязнителя и другие. В некоторых случаях исходные данные могут задаваться в виде интервалов. Действительно, довольно сложно с высокой степенью достоверности прогнозировать значения скорости ветра, влажности воздуха, интенсивности движения и др. Следует учесть, что в современных методиках учитываются только начальные концентрации сажевых частиц, выделяющихся из отработавших газов с двигателей, и не учитываются частицы, возникающие при истирании тормозных колодок, шин, асфальтного покрытия, и другие [6]. В этих методиках также не исследуется влияние неточности значений исходных параметров на конечный результат – продвижение фронта ЗВ. Таким образом, целесообразно рассмотреть отдельно загрязнение мелкодисперсной пылью атмосферы придорожной территории при использовании уникального для данной территории статистического материала. Полученные результаты при этом могут быть применены в расчетах интегральных показателей степени загрязнения атмосферы придорожной территории широким спектром ЗВ.

**Метод**

При таких изложенных выше условиях представляется целесообразным использовать уникальный накопленный статистический материал для экспресс-оценки экологического состояния придорожной территории. В качестве этого показателя выбран стандартный индекс (СИ), который определяется как значение концентрации ЗВ-С за какой-то период: сутки, месяц, год, деленное на его соответствующее значение предельно допустимой концентрации (ПДК):

$$СИ = C / ПДК.$$

При таких предположениях обработка интервальной информации также довольно затруднительна [9, 10]. Заметим, что измерения, на базе которых составлена модель, проводились около АД в период с апреля по октябрь – самый неблагоприятный с точки зрения загрязнения атмосферы период. Причем замеры осуществлялись на критических участках – перекрестках города, на которых довольно высокая интенсивность движения. На этих участках происходит торможение автомобилей, и вследствие этого возникает интенсивное истирание дорожного покрытия и шин, приводящее к увеличенному поступлению пыли в атмосферу. Натурные

эксперименты проводились на городских автомагистралях, на которых, в основном, присутствовали легковые автомобили [11]. В связи с приведенными выше обстоятельствами будем использовать общепринятую у нас в стране дискретную градацию СИ (см. табл.1). Обоснованием выбора этого показателя может служить также то обстоятельство, что рассчитанные значения не совсем точные, поэтому целесообразно использовать укрупненные показатели. Оценки за сутки, месяц, год идентичны, поэтому в таблице 1 временной интервал не рассматривается. Значения ПДК для каждого загрязнителя являются табличными, поэтому здесь не приводятся.

Таблица 1

Оценка уровня загрязнений атмосферного воздуха (СИ)

Классификация	Загрязнение воздуха	Значение показателя
1 Класс	Низкое	0-1
2 Класс	Повышенное	1-4
3 Класс	Высокое	4-10
4 Класс	Очень высокое	> 10

Следует заметить, в некоторых случаях использование изученных регрессионных методов при оценке экологического состояния атмосферы придорожной территории довольно затруднительно [12–14]. Это обусловлено тем, что исходные данные, являющиеся в общем случае неточными, в таких моделях аппроксимируются одной из стандартных функций. Выходные параметры принимают дискретные значения (класс загрязненности атмосферы), и эффективность оценки результатов может быть в некоторых случаях не совсем приемлемой. Поэтому на наш взгляд целесообразно использовать математический аппарат, позволяющий вычислять выходные значения модели, однозначно совпадающие с результатами эксперимента.

Существующие современные методы классификации объектов требуют довольно полного описания характеристик объектов, поэтому их применение не всегда эффективно [15–18].

В качестве математической модели, оценивающей уровень загрязнения атмосферы придорожной территории – классы – при ее экспресс-оценке на основе обработки уникального для этой территории статистического материала, использовалась искусственная нейронная сеть вероятностного типа, обозначаемая как *PNN* (*Probabilistic Neural Network*) [19, 20].

Эта сеть состоит из двух слоев: 1 – радиально-базисный слой (*Radial Basis Layer*) и 2 – конкурирующий слой (*Competitive Layer*). В первом слое число нейронов равно  $Q$  – количеству обучающих пар вход / цель и вектор весов каждого такого нейрона равен соответствующему значению вектора обучающего множества, во втором –  $K$  – число нейронов – количество

классов, на которые однозначно разделены входные векторы из обучающего множества. Конкурирующая функция активации (*a compete transfer function*) на выходе второго слоя для входного вектора вычисляет максимальное значение рассчитанных вероятностей и назначает 1 для класса, на котором реализуется максимальное значение, и 0 – для других.

Стандартная *PNN* основывается на основных положениях радиальной базисной сети, в которой используется нейрон, имеющий функцию активации

$$\text{radbas}(n) = e^{-n^2}.$$

Вход функции активации определяется как

$$n = \text{dist} \left\| \vec{p} - \vec{w} \right\| \cdot b,$$

где  $\|...\|$  – евклидово расстояние между вектором входа  $\vec{p}$  и вектором весов сети  $\vec{w}$ ,  $b$  – смещение, заметим для первого слоя нейронной сети (*Radial Basis Layer*) его значение полагается равным значению  $0,8326/\text{SPREAD}$ . Величина  $\text{SPREAD}$ , исходя из состава данных – множества обучающей выборки, определяет интервал ( $-\text{SPREAD}$ ,  $\text{SPREAD}$ ), в котором функция активации имеет значение большее 0,5.

#### Результаты и обсуждение

Входными данными для *PNN* использовались значения таких измеренных на основе эксперимента показателей, как скорость ветра (м/с) –  $p_1$ , относительная влажность воздуха (%) –  $p_2$ , интенсивность потока легковых автомобилей (авт./час) –  $p_3$ . Таким образом, обучающая выборка состоит из множества трехмерных векторов  $P = \{p = (p_1, p_2, p_3)^T\}$  с известной классификацией  $T = \{t\}$ . Синтез сети осуществлялся средствами системы *MATLAB* (рис. 1) [20].

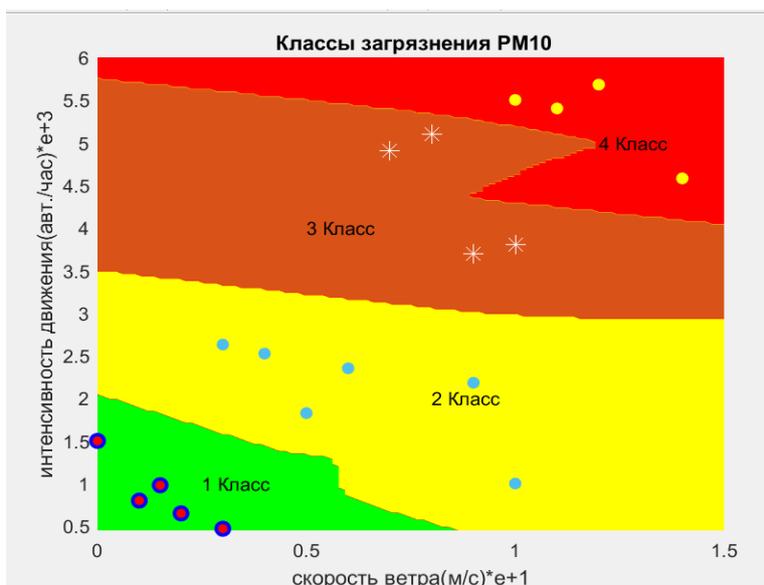


Рис. 1. Разбиение области значений параметров на четыре класса

В статье рассматривается модельный пример для загрязнителя атмосферы  $PM_{10}$ , основанный, в частности, на результатах работ [6, 11]. Заметим, что загрязнитель  $PM_{2.5}$  исследуется аналогично. Обучающая последовательность

образована множеством, состоящим из  $Q = 65$  пар  $\{(p, t)\}$ . Фрагмент обучающей выборки приведен в таблице 2.

Таблица 2

Фрагмент обучающей выборки для  $PM_{10}$

Номер эксперимента	Скорость ветра (м/с), $p_1$	Относительная влажность воздуха (%), $p_2$	Интенсивность автопотока (авт./час), $p_3$	Класс загрязнения, $t$
1.	7	85	1753	2
2.	1	92	1254	1
3.	9	47	4100	3
4.	12	24	5360	4

В качестве иллюстративного примера работы, построенной  $PNN$ , как классификатора, решена задача разделения области  $(p_1, p_3)$  на четыре класса загрязнения при фиксированном значении  $p_2 = 86\%$ . Результаты приведены на рисунке 1, там же указаны некоторые точки обучающей выборки.

### Заключение

Применение  $PNN$  даст возможность использовать уникальный для конкретной территории статистический материал для экспресс-ана-

лиза степени ее загрязнения взвешенными частицами. Полученные результаты могут быть полезны при ранжировании альтернативных вариантов развития городских программ на раннем этапе их рассмотрения при учете других загрязняющих атмосферу веществ. Предложенный подход представляет интерес в качестве дополнительного материала для определения оптимального режима функционирования существующих городских объектов на основе результатов обработки имеющихся экспериментальных данных.

### Список литературы

- Xu W. The influence of PM 2.5 exposure on kidney diseases/ W. Xu, S. Wang, L. Jiang, X. Sun, N. Wang, X. Liu et al. // Human & Experimental Toxicology. – 2022. – Vol. 41. – P. 096032712110699. – DOI: 10.1177/09603271211069982.
- Chowdhury S. Global health burden of ambient PM2.5 and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols / S. Chowdhury, A. Pozzer, A. Haines, K. Klingmüller, T. Münzel, P. Paasonen et al. // Environment International. – 2022. – Vol. 159. – P. 107020. – DOI: 10.1016/j.envint.2021.107020.
- Xi Y. Effects of short-term ambient PM 2.5 exposure on cardiovascular disease incidence and mortality among U. S. hemodialysis patients: a retrospective cohort study / Y Xi, D. B. Richardson, A. V. Kshirsagar, T. J. Wade, J. E. Flythe, E. A. Whitsel // Environmental Health. – 2022. – Vol. 21, issue 1. – DOI: 10.1186/s12940-022-00836-0.
- Российская Федерация. Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе : приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 273 от 06.06.2017. – Режим доступа: <https://rg.ru/2017/08/14/minprirodi-prikaz273-site-dok.html> (дата обращения 25.02.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
- Perry

6. , S. G. Characterization of pollutant dispersion near elongated buildings based on wind tunnel simulations / S. G. Perry, D. K. Heist, L. H. Brouwer, E. M. Monbureau, L. A. Brixey // Atmospheric Environment. – 2016. – Vol. 142. – P. 286–295. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.07.052.
7. Невмержицкий Н. В. Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM10 и PM2.5 : дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2016. – 154 с.
8. Бояршинов М. Г. Моделирование и анализ переноса газовых выбросов от автомобильных потоков со случайными характеристиками / М. Г. Бояршинов // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 6 (244). – С. 86–94.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
10. Sanzharov B. Kh. Decision support based on the interval relation / B. Kh. Sanzharov, R. B. Sanzharov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – № 12 (15). – P. 4601–4607.
11. Sanzharov B. Kh. Ordering objects on the basis of potential fuzzy relation for group expert evaluation / B. Kh. Sanzharov, R. B. Sanzharov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – № 11 (13). – P. 8544–8548.
12. Барикаева Н. С Совершенствование системы мониторинга загрязнения воздуха придорожных территорий городов мелкодисперсной пылью : дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2017. – 159 с.
13. Кендалл М. Статистические выводы и связи, пер. с англ. / М. Кендалл, А. Стьюарт – Москва : Наука, 1973. – 466 с.
14. Крамер Г. Математические методы статистики : пер. с англ. / Г. Крамер. – 2 изд. – Москва : Наука, 1975. – 648 с.
15. Закс Л. Статистическое оценивание / Л. Закс. – Москва : Статистика, 1976. – 598 с.
16. Smarandache F. Advances and applications of DSMT for Information Fusion / F. Smarandache, J. Dezert. – Rehoboth : American Research Press, 2006. – Vol. 2. – 461 p.
17. Wang P. Three-way k-means: integrating k-means and three-way decision / P. Wang, H. Shi, X. Yang, J. Mi // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2019. – Vol. 10, № 10. – P. 2767–2777.
18. Afridi M. K. Variance based three-way clustering approaches for handling overlapping clustering / M. K. Afridi, N. Azam, J. Yao // International Journal of Approximate Reasoning. – 2020. – Vol. 118. – P. 47–63.
19. Yao Y. Three-way decision and granular computing / Y. Yao // International Journal of Approximate Reasoning. – 2018. – Vol. 103. – P. 107–123.
20. Specht D. F. Probabilistic neural networks / D. F. Specht // Neural Networks. – 1990. – Vol. 3 (1). – P. 109–118.
21. Demuth H. B. Neural Network Toolbox for Use with MATLAB. User's Guide / H. B. Demuth, M. H. Beale // MathWorks. – 2000. – 498 p.

© Б. Х. Санжапов

**Ссылка для цитирования:**

Санжапов Б. Х. Применение вероятностной нейронной сети для экспресс-анализа экологического состояния атмосферы городской придорожной территории // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 1 (51). С. 127–131.