

Научная статья

УДК 656.13(1-21):621.43.06:504.3.064.36; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-59-66

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТА ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ ТРОПОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЯХ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

✉ Ложкин Владимир Николаевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ vnlojkin@yandex.ru

Аннотация. На основании критического обзора положительных практик контроля экстремального загрязнения городской среды поллютантами транспорта обосновывается комплексная двухуровневая инструментально-цифровая методология оценки и прогнозирования опасного воздействия на население отработавших газов при аномальном физическом состоянии тропосферы, обусловленного инверсией температуры и слабым ветром. На первом этапе реализации методологии определяются зоны экстремальных загрязнений городской территории по данным, обработанным нейронной сетью, полей концентраций веществ, измеренных стационарными и передвижными станциями. Аппроксимация полей концентраций осуществляется по модели Гаусса. На втором этапе с помощью уравнений атмосферной диффузии рассчитываются чрезвычайно опасные, по отношению к ПДК_{МР}, накопления веществ отработавших газов на уровне дыхания горожан применительно к условиям интенсивного транспортного движения в часы «пик». По приоритетным загрязнителям для мест совместного влияния автотранспорта и судов обоснована вероятность превышений концентраций NO₂ и РМ_{2,5-10}, соответственно, до 4–7 ПДК_{МР} и 2–3 ПДК_{МР}. Оригинальные авторские подходы прогнозирования чрезвычайных ситуаций внедрены в отечественных и международных методиках.

Ключевые слова: город, транспорт, поллютанты, тропосфера, аномальное состояние, чрезвычайная ситуация, прогнозирование, искусственный интеллект

Для цитирования: Ложкин В.Н. Прогнозирование опасного воздействия транспорта при чрезвычайных тропосферных явлениях путем применения искусственного интеллекта // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 59–66. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-59-66.

Scientific article

FORECASTING THE HAZARDOUS IMPACT OF TRANSPORT DURING EMERGENCY TROPOSPHERIC PHENOMENA USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

✉ Lozhkin Vladimir N.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ vnlojkin@yandex.ru

Abstract. In the article, based on a critical review of positive practices for monitoring extreme pollution of the urban environment with transport pollutants, a comprehensive two-level instrumental and digital methodology for assessing and predicting the hazardous impact of exhaust gases on the population in the abnormal physical state of the troposphere caused by temperature inversion and weak wind is substantiated. At the first stage of the methodology implementation, zones of extreme pollution of the urban area are determined based on data processed by a neural

network, concentration fields of substances measured by stationary and mobile stations. The concentration fields are approximated using the Gaussian model. At the second stage, extremely dangerous, in relation to the LTC_{MS} , accumulations of substances in exhaust gases at the level of breathing of city residents are calculated using atmospheric diffusion equations in relation to the conditions of intense traffic during rush hours. For priority pollutants, for places of joint influence of motor transport and ships, the probability of exceeding concentrations of NO_2 and $PM_{2.5-10}$, respectively, up to 4–7 LTC_{MS} and 2–3 LTC_{MS} is substantiated. Original authorial approaches to forecasting emergency situations are implemented in domestic and international methods.

Keywords: city, transport, pollutants, troposphere, abnormal condition, emergency, forecasting, artificial intelligence

For citation: Lozhkin V.N. Forecasting the hazardous impact of transport during emergency tropospheric phenomena using artificial intelligence // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 3 (75). P. 59–66. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-59-66.

Вводная часть: состояние проблемы

В крупных поселенческих агломерациях, благодаря высокой плотности стационарных промышленных и передвигающихся транспортных источников эмиссии в тропосферу поллютантов, вероятны повышенные объемы их поступления в зоны жизнедеятельности проживающего населения [1]. Для городов Российской Федерации, например во втором по численности после Москвы – Санкт-Петербурге [2], годовые массы выбросов от автомобилей к 2024 г. составили 67,8 % от общего количества их поступления в окружающую среду (отчет администрации Санкт-Петербурга)¹ (рис. 1).

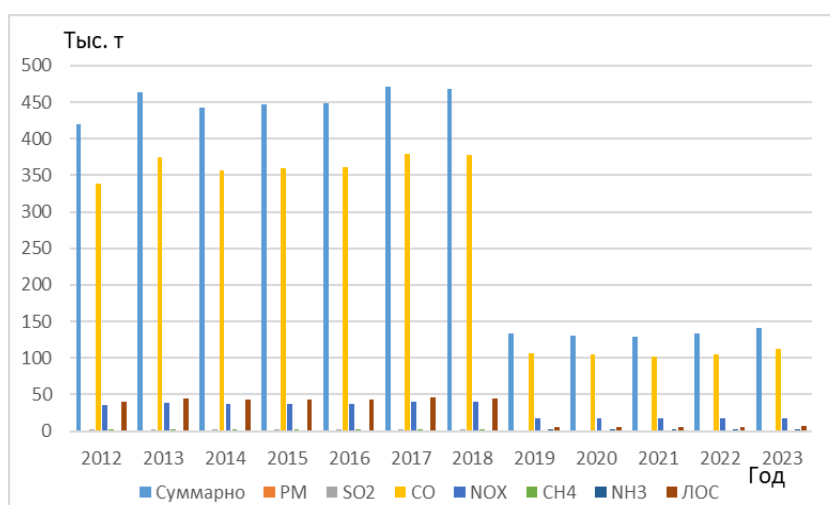


Рис. 1. Поступление в тропосферу Санкт-Петербурга автомобильных поллютантов

Согласно данным отчета администрации Санкт-Петербурга выбросы поллютантов от городских теплоэлектрических центральных (ТЭЦ) к 2024 г. относительно автомобильных составили весомую долю (около 48 %). Однако следует принимать во внимание тот факт, что, несмотря на беспрецедентное уменьшение автомобильных выбросов к 2024 г. относительно 2018 г. в 3,3 раза (рис. 1) при незначительном росте численности автомобильного транспорта за этот же период на 4 % (рис. 2), они попадают непосредственно в зону дыхания горожан [3] (~ 2,5 м над уровнем земли), а дымовые газы ТЭЦ поступают в тропосферу в среднем на высоте 300–400 м над уровнем земли и, рассеиваясь на громадных площадях, наносят горожанам значительно меньший ущерб здоровью [4], чем поллютанты автомобильного транспорта.

¹ Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге // Администрация Санкт-Петербурга. URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ecology/statistic/development/> (дата обращения: 09.06.2025)

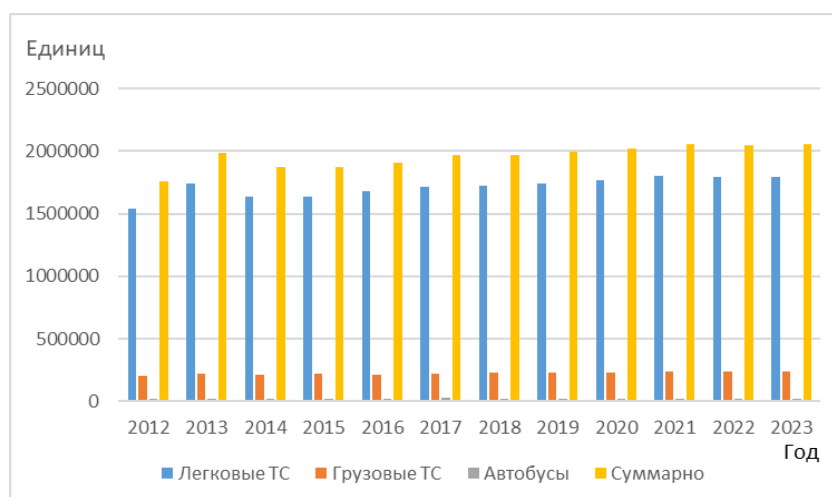


Рис. 2. Динамика изменения численности автотранспорта в Санкт-Петербурге

Существенная экологизация эксплуатируемого автомобильного транспорта Санкт-Петербурга к 2018–2024 гг. (рис. 1) стала возможной благодаря последовательному (с 2012 г.) «ужесточению» природоохранных нормативов в Российской Федерации на эмиссию с отработавшими газами (ОГ) загрязнителей и парниковых газов (ТР ТС 018/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств»)²). Внедрение этого документа «подстегнуло» поступление в Российской Федерации транспорта 3–5 «экологических классов» [5], а «на пороге» мировой автомобильной индустрии уже явно просматривается переход на уровень экологических требований Euro-7 [6, 7].

МЧС России в рамках межведомственной системы реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС) опасного загрязнения городской тропосферы загрязнителями организует непрерывный инструментально-расчетный контроль их формирования на локальном, региональном и глобальном уровнях с использованием передовых научно-методических средств [1, 2, 4, 8], включая искусственный интеллект [9], а также космическую фотосъемку с орбитальных спутников Земли (рис. 3).

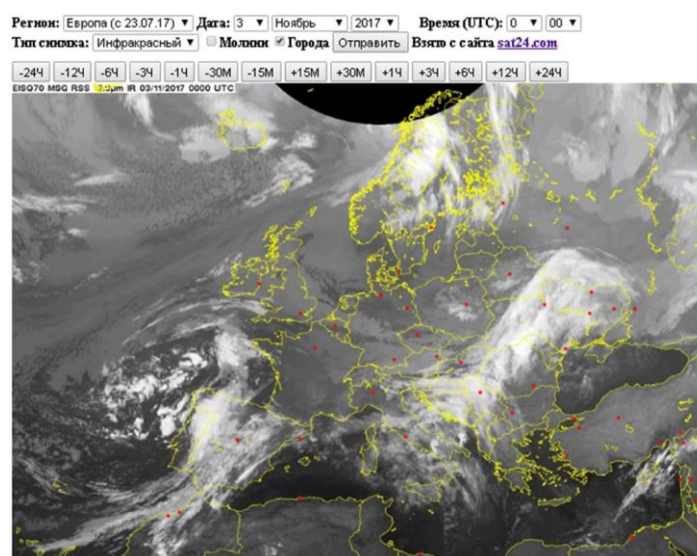


Рис. 3. Снимок со спутника NOAA-16 Северо-Западного региона Российской Федерации [8]

² Законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации. URL: <https://legalacts.ru/doc/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuz-a-ot-09122011-n-877-o/?ysclid=lpfchgsuyg952550441> (дата обращения: 09.06.2025).

Снимок со спутника NOAA-16 (рис. 3) над регионом Санкт-Петербурга [8] зафиксировал «матовые тона» (яркости) в отраженном свете от «слоистых облаков», что свидетельствует о наличии температурной инверсии в нижних слоях тропосферы и, как следствие, накопление поллютантов над городами.

Отмеченное убеждает в настоятельной необходимости научного обоснования и внедрения единого инструментария прогнозирования рассмотренных ЧС на «мезо-региональном» и локальном уровнях, чем и востребована данная работа.

Объекты, методика и результаты исследования

Объектом настоящего исследования явился автомобильный транспорт Санкт-Петербурга, поставляющий, по мнению компетентных организаций, в городскую среду, примыкающую к улично-дорожной сети (УДС), не менее 95 % поллютантов. Предмет исследования – аномальные метеоситуации физического состояния нижних слоев тропосферы, затрудняющие естественную конвекцию воздушных масс и вынос с ними поллютантов за пределы городской черты. Данное неблагоприятное состояние тропосферы (инверсия температуры, слабый ветер) в часы «пиковой» транспортной нагрузки порождает локальные ЧС сверхнормативного загрязнения воздуха для населения, жизнедеятельность которого происходит в районах с плотной УДС.

На первом этапе прогнозирования ЧС с помощью разработанной с участием автора оригинальной нейронной сети (ее основы взяты из работы [10]) по модели Гаусса (1) аппроксимируются данные измерений концентраций поллютантов стационарными и передвижными станциями (Отчет администрации Санкт-Петербурга) и для реальных моментов времени строятся закономерности распределения значений «относительных» их концентраций на «уровне вдыхания человеком» для территории в пределах административной городской черты.

Миграция в тропосфере каждого из поллютантов по Гауссу допускает нормальный закон распределения их концентраций как случайных величин:

$$q(t, x, y, z) = \frac{Q \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-x'-ut)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y-y'-vt)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z-z'-wt)^2}{(\sigma_z)^2 t}\right)\right)}{(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (1)$$

здесь x', y', z' – координаты модельного источника поллютанта; Q – мощность его потока; (u, v, w) – «разложение» по осям скорости воздушных масс; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – средне-квадратические отклонения концентрации по координатным осям для момента времени t :

$$\sigma_x^2 = \frac{2}{h} \int_0^h K_x(z) dz, \sigma_y^2 = \frac{2}{h} \int_0^h K_y(z) dz, \sigma_z^2 = \frac{2}{h} \int_0^h K_z(z) dz,$$

здесь h – высота «подстилающей поверхности», в пределах распространения поллютантов в тропосфере.

Опуская дальнейшие математические преобразования (1), детально описанные в работе [10], приходим к форме конечной суммы кубатурных функций:

$$q(t, x, y, z; u, v, w) = \sum_{i=1}^N C_i \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-ut-x_i)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y-vt-y_i)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z-wt-z_i)^2}{(\sigma_z)^2 t}\right)\right)}{(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (2)$$

здесь C_i – константы; (x_i, y_i, z_i) – координаты «узлов интегрирования», $i = 1, 2, \dots, N$.

Как видно, уравнение (2) для расчета концентраций поллютантов q представляет искусственную нейросеть, выраженную с помощью радиальных базисных функций («гауссианов») [10]. Подбор «весов», линейно/нелинейно связанных переменных C_i , а также (x_i, y_i, z_i) нейросети (2) производим путем минимизации «функционала ошибки» [10]:

$$J = \sum_{j=1}^P |q(t, \bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j; u, v, w) - q_j(t; u, v, w)|^2,$$

здесь $\{(\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j)\}_{j=1}^P$ – множество «пробных» точек в некоторой области Ω , в которых обновляются данные измерений станциями концентраций $\{q_j\}_{j=1}^P$. Обновляя данные наблюдений, получаем возможность «обучения» нейросети с целью повышения степени достоверности результатов расчетов.

На рис. 1 а представлены результаты расчетов по уравнению (2) программой Mathematica фирмы Wolfram Research распределения относительных концентраций NO_2 в воздушной среде Санкт-Петербурга. На рис. 1 б, сделанном совмещенно во времени с измерениями NO_2 станциями наблюдения, представлено аномальное состояние тропосферы в форме картины реального истечения дымовых газов из трубы Южной ТЭЦ (левая часть рис. 1 б) и теплоцентрали гипермаркета «Лента» (правая часть рис. 1 б).

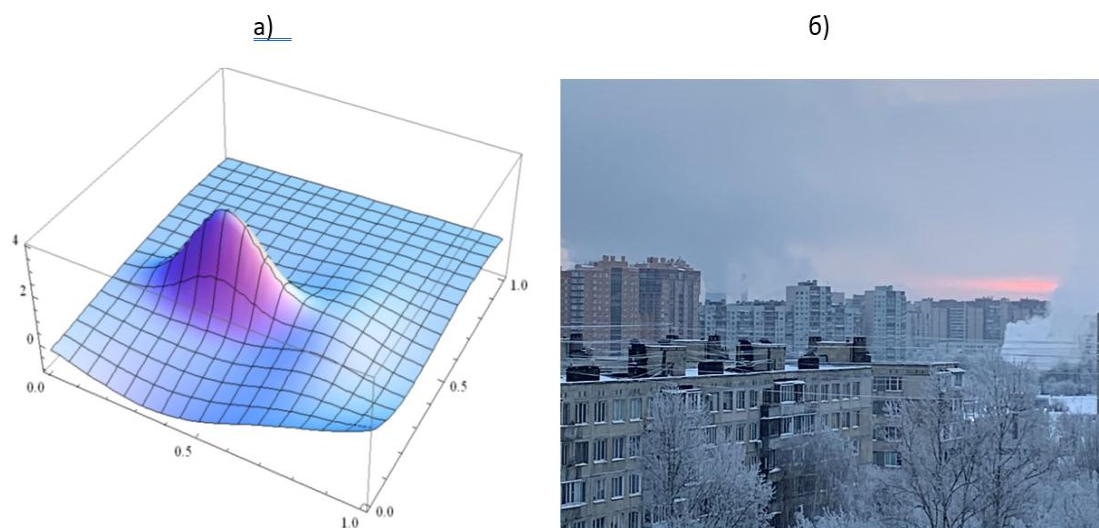


Рис. 4. 3D иллюстрация опасного загрязнения тропосферы NO_2 в Санкт-Петербурге:
а) расчет относительных концентраций NO_2 в городе; б) фото истечения дымовых газов из трубы Южной ТЭЦ (левая часть) и теплоцентрали гипермаркета «Лента» (правая часть)

На втором этапе прогнозирование ЧС осуществляется по модели в форме системы дифференциальных уравнений диффузии поллютантов в тропосфере [2] по данным интенсивностей движения автомобилей в часы «пик» [4]. Результаты представляются ГИС-картами загрязнения воздуха (рис. 5).

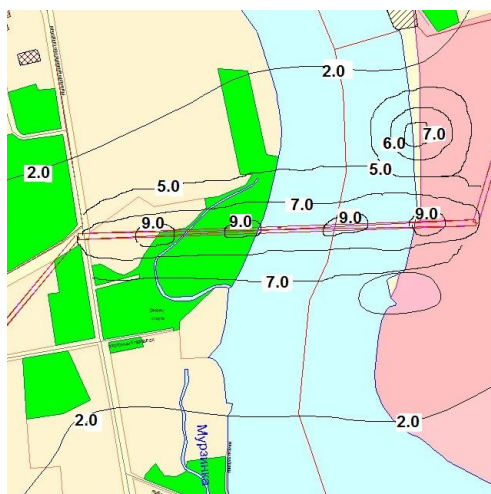


Рис. 5. ГИС-карта вероятного сверхнормативного загрязнения воздуха NO_2 в долях $\text{ПДК}_{\text{МР}}$ на кольцевой автодороге (КАД), примыкающей к санитарно-защитной зоне в районе вантового перехода через р. Неву в Санкт-Петербурге

Обсуждение результатов и заключение

После проведения исследований на первом этапе прогнозирования ЧС (рис. 4) становится понятной общая картина загрязнения тропосферы города в пределах его административных границ с возможностью осуществления однозначной вероятностно-достоверной идентификации чрезвычайно опасных района/районов для населения Санкт-Петербурга. Действительно, на рис. 4 б четко просматривается подынверсионная, на высотах 50–100 м, штилевая ситуация, при которой дымовые газы «прижимаются» к поверхности Земли, способствуя непрерывному накоплению поллютантов в этой аномальной области тропосферы. Заметно, что трубы, как Южной ТЭЦ, так и теплоцентрали гипермаркета «Лента», буквально «утопают» в собственных дымовых газах, делая ситуацию опасной для горожан.

Выполненные расчеты по авторской нейронной модели рис. 4 а свидетельствуют о том, что, в эти часы наблюдаемое чрезвычайное физическое состояние тропосферы распространяется на весь регион. При этом вследствие относительно более холодной водной поверхности Финского залива над ней формируется область пониженного барического давления, в которую вместе с воздушными массами устремляются («перетекают») поллютанты с соседних территорий с образованием «эпицентра» (максимума) накопления опасного NO_2 в географических координатах: $59^\circ 53'$ с. ш. и $30^\circ 06'$ в. д.

Исследования на втором этапе направлены на изучение локализованных ситуаций (улица, скоростная магистраль, перекресток, парковка и т.п.) внутри выявленных по результатам исследований первого этапа реализации комплексной методики опасных городских района/районов. Анализ ГИС-карты рис. 5 позволяет сделать вывод о том, что в зоне совместного влияния автомобильного и водного транспорта при неблагоприятном физическом состоянии тропосферы и в часы интенсивной эксплуатации транспорта в санитарно-защитной зоне, примыкающей к вантовому переходу через р. Неву, пассажирскому и грузовому портам водного транспорта вероятно ожидать превышений концентраций NO_2 до опасных значений 7–9 $\text{ПДК}_{\text{МР}}$.

В заключение можно отметить, что комплексная методология прогнозирования опасного воздействия транспорта при чрезвычайных тропосферных явлениях путем применения искусственного интеллекта позволяет получить более полное представление о динамике формирования и развития ЧС сверхнормативного загрязнения городской тропосферы поллютантами транспорта и тем самым обеспечить эффективное реагирование на них подразделений МЧС России.

Список источников

1. Научно обоснованный прогноз адаптации сектора автомобильного транспорта к вероятным последствиям изменения климата и возможные сценарии его декарбонизации в Российской Федерации: монография / Ю. Трофименко [и др.]. М.: ООО «Центр транспортных инноваций», Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, 2022. 134 с.
2. Ложкина О.В., Малышев С.А., Хахленов А.В. Исследование опасного загрязнения придорожного воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2,5}$ на примере Санкт-Петербурга // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 2 (59). С. 96–103. EDN: ETSSIG.
3. Effect of automobile exhaust emission on human health and environment in India: a systematic review / J.M. Pardiwala [et al.] // CHEMICAL PAPERS. Indexed 2025-06-23. Document Type: Review; Early Access. 2025. DOI: 10.1007/s11696-025-04082-9.
4. Ложкин В.Н., Калимуллина И.Ф., Сагиров Э.А. Контроль чрезвычайного загрязнения воздуха транспортом Санкт-Петербурга по критериям наносимого ущерба // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 2 (70). С. 95–101. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-95-101.
5. Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н., Смирнов А.С. Теория и практика обеспечения безопасности применения в условиях чрезвычайных ситуаций силовых установок пожарных автомобилей 4-5 поколений // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 8–15. EDN: VRCPVS.
6. Measurement of Gaseous Exhaust Emissions of Light-Duty Vehicles in Preparation for Euro 7: A Comparison of Portable and Laboratory Instrumentation / V. Valverde [et al.] // Energies. 2023. № 16. P. 2561. DOI: 10.3390/en16062561.
7. Euro 7 proposal assessment of a Euro VI parallel hybrid electric bus / N. Fonseca Gonz'alez [et al.] // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2024. Vol. 129. P. 104125. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104125.
8. Доронин А.П., Тимошук А.С., Шабалин П.В. Результаты исследования метеорологических условий формирования высоких уровней загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге по данным за 2017 год // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2017. № 662. С. 129–134. EDN: YSWXDN.
9. Кулакова Е.С., Родионов Г.А. Искусственная нейронная сеть для прогнозирования концентрации загрязняющих веществ атмосферного воздуха на различной высоте // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2024. № 2. С. 88–97. EDN: BVDNLX.
10. Васильев А.Н., Тархов Д.А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. 528 с. ISBN: 978-5-7422-2272-9. EDN: QMTVRJ.

References

1. Nauchno obosnovannyj prognoz adaptacii sektora avtomobil'nogo transporta k veroyatnym posledstviyam izmeneniya klimata i vozmozhnye scenarii ego dekarbonizacii v Rossijskoj Federacii: monografiya / Yu. Trofimenko [i dr.]. M.: OOO «Centr transportnyh innovacij», Centr energetiki Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO, 2022. 134 s.
2. Lozhkina O.V., Malyshev S.A., Hahlenov A.V. Issledovanie opasnogo zagryazneniya pridorozhnogo vozduha melkodispersnymi vzveshennymi chasticami RM_{10} i $RM_{2,5}$ na primere Sankt-Peterburga // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2021. № 2 (59). S. 96–103. EDN: ETSSIG.
3. Effect of automobile exhaust emission on human health and environment in India: a systematic review / J.M. Pardiwala [et al.] // CHEMICAL PAPERS. Indexed 2025-06-23. Document Type: Review; Early Access. 2025. DOI: 10.1007/s11696-025-04082-9.

4. Lozhkin V.N., Kalimullina I.F., Sagirov E.A. Kontrol' chrezvychajного zagryazneniya vozduha transportom Sankt-Peterburga po kriteriyam nanosimogo ushcherba // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 2 (70). S. 95–101. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-95-101.
5. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N., Smirnov A.S. Teoriya i praktika obespecheniya bezopasnosti primeneniya v usloviyah chrezvychajnyh situacij silovyh ustanovok pozharnyh avtomobilej 4-5 pokolenij // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 2 (66). S. 8–15. EDN: VRCPVS.
6. Measurement of Gaseous Exhaust Emissions of Light-Duty Vehicles in Preparation for Euro 7: A Comparison of Portable and Laboratory Instrumentation / V. Valverde [et al.] // Energies. 2023. № 16. P. 2561. DOI: 10.3390/en16062561.
7. Euro 7 proposal assessment of a Euro VI parallel hybrid electric bus / N. Fonseca Gonz'alez [et al.] // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2024. Vol. 129. P. 104125. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104125.
8. Doronin A.P., Timoshchuk A.S., Shabalin P.V. Rezul'taty issledovaniya meteorologicheskikh uslovij formirovaniya vysokih urovnej zagryazneniya atmosfernogo vozduha v Sankt-Peterburge po dannym za 2017 god // Trudy voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhajskogo. 2017. № 662. S. 129–134. EDN: YSWXDN.
9. Kulakova E.S., Rodionov G.A. Iskusstvennaya nejronnaya set' dlya prognozirovaniya koncentracii zagryaznyayushchih veshchestv atmosfernogo vozduha na razlichnoj vysote // Vestnik nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoy bezopasnosti. 2024. № 2. S. 88–97. EDN: BVDNLX.
10. Vasil'ev A.N., Tarhov D.A. Nejrosetevoe modelirovanie. Principy. Algoritmy. Prilozheniya. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2009. 528 s. ISBN: 978-5-7422-2272-9. EDN: QMTVRJ.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 11.08.2025; одобрена после рецензирования: 02.09.2025; принята к публикации: 10.09.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 11.08.2025; approved after review: 02.09.2025; accepted for publication: 10.09.2025

Информация об авторах:

Ложкин Владимир Николаевич, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, SPIN-код: 9496-2451

Information about the authors:

Lozhkin Vladimir N., professor of the department of fire, rescue equipment and automobile economy of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, SPIN: 9496-2451