
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 004:621.656:504.064

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ АСПЕКТОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА

**В.Н. Ложкин, доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки Российской Федерации.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Приводится метод информационной поддержки функционирования системы инструментально-расчетного прогнозирования безопасности объектов энергетики и транспорта по показателям качества воздушной среды в Санкт-Петербурге. Контроль осуществляется путем цифровой обработки информационной базы данных измерений поллютантов стационарными и мобильными станциями, получаемых в реальном масштабе времени, оригинальным нейросетевым способом.

Ключевые слова: информационные аспекты, город, воздушная среда, поллютанты, энергетика и транспорт, моделирование, контроль

RESEARCH OF INFORMATION ASPECTS OF ENSURING THE FUNCTIONING OF THE SECURITY CONTROL SYSTEM FOR ENERGY AND TRANSPORT FACILITIES

V.N. Lojkin. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

A method of information support for the functioning of the system of instrumental and calculated forecasting of the safety of energy and transport facilities based on air quality indicators in Saint Petersburg is presented. The control is carried out by digital processing of the information database of pollutants measurements by stationary and mobile stations, obtained in real time, using an original neural network method.

Keywords: information aspects, city, air environment, pollutants, energy and transport, modeling, control

В городских агломерациях с плотной улично-дорожной сетью в часы интенсивного транспортного движения и периоды аномальных атмосферных явлений [1], затрудняющих перемещение воздушных масс, наблюдаются высокие уровни загрязнения отработавшими, картерными газами и топливными испарениями транспортных средств [2, 3]. Необходимость контроля таких чрезвычайных ситуаций (ЧС) ставит перед оперативными службами МЧС России актуальную задачу проведения оперативного инструментального мониторинга

и долгосрочного расчётного прогнозирования качественного состояния атмосферного воздуха на урбанизированных городских территориях [4].

В настоящей работе рассматриваются информационные аспекты поддержки расчетного мониторинга качества воздушной среды Санкт-Петербурга по диоксиду азота NO_2 и взвешенным аэрозольным частицам опасных размеров (до 10 микрон) PM_{10} , являющихся, по квалифицированному мнению Всемирной организации здравоохранения [5], «приоритетными» загрязнителями атмосферного воздуха (поллютантами).

Объектом исследования являются концентрации поллютантов в приземном слое тропосферы на расстоянии от «подстилающей поверхности» (над водной гладью водоема или почвой земли), соответствующем уровню дыхания человека. Текущие значения концентраций поллютантов формируются случайным образом диффузией в стратифицированной воздушной городской среде отработавших газов (ОГ) тепловых двигателей автомобилей, судов, тепловозов, воздушных судов и тепловых энергетических станций ТЭЦ, эксплуатируемых в акватории города.

Согласно сведениям источника [4] доля поллютантов, приходящаяся только на ОГ поршневых тепловых силовых установок автотранспорта, эксплуатируемого на улично-дорожной сети (УДС) Санкт-Петербурга, составляет около 80 %. Следовательно, остальные загрязняющие атмосферу вещества приходятся на железнодорожный, водный, воздушный транспорт и ТЭЦ, в основном, сжигающие метан.

Предметом исследования являлись ЧС загрязнения воздушной среды NO_2 и PM_{10} , обусловленные устойчивыми, непродолжительными во времени и городском пространстве, а, следовательно, случайно-закономерными физическими явлениями переноса в стратифицированной атмосфере ОГ при неблагоприятных, для естественного разбавления ОГ свежим воздухом, сочетания режимных транспортных (работа тепловых двигателей на форсажных режимах или режимах полной загрузки) и метеорологических параметров (скорость ветра менее 2 м/с, инверсия температуры в приземной тропосфере).

В качестве исходной информационной базы данных для экспериментального и последующего расчетного исследований были взяты доступные сведения о загрязнении городской воздушной среды поллютантами, контролируемые в режиме «онлайн» автоматизированной системой мониторинга (АСМ), эксплуатацию которой производит Санкт-Петербургское государственное геологическое унитарное предприятие «Специализированная фирма «Минерал»» [6]. Измерения концентраций поллютантов АСМ производятся с периодичностью 20 минут (время экспозиции, соответствующее стандартному контролю «максимальной разовой» концентрации опасного для человека химического вещества).

Газообразные и взвешенные в тропосфере твердые и жидкие химические вещества ОГ физическими процессами молекулярной и турбулентной ветровой диффузии (конвекции) перемешиваются в приземном слое атмосферы, вступают между собой в реакции, например, под воздействием световой радиации, и переносятся из мест эксплуатации транспортных средств и ТЭЦ в пределах городской территории в другие районы, удаленные на большие расстояния от передвижных и стационарных источников выбросов ОГ. Анализ работы [7] показал возможность корректного применения для таких условий диффузии поллютантов ОГ в приземном слое атмосферы модели Гаусса.

В связи с тем, что для реализации расчетного мониторинга по аналитическим уравнениям Гаусса, из практических соображений организации информационного процесса, потребовалось корректировать начальные и граничные условия экстремальной задачи ЧС, изменять сведения о значениях констант математических уравнений, численных параметров положения в пространстве города границ фазовых разделов (жидкость, газ), наконец, конструирования иерархии составляющих математических моделей, неизбежно появлялась необходимость учитывать внушительный по объему обновляемый массив операционных информационных данных наблюдений АСМ, авторами [8] для минимизации информационных неопределенностей использовался оригинальный нейросетевой метод [9].

По модели Гаусса изменение концентрации по декартовым координатам в городском пространстве и во времени описывается нормальным законом распределения случайной величины:

$$q(t, x, y, z) = \frac{Q e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-x_0-V_x t)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y-y_0)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z-z_0)^2}{(\sigma_z)^2 t} \right)}}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (1)$$

где x_0, y_0, z_0 – исходные координаты расположения источника выброса исследуемого поллютанта; Q – мощность его выброса в окружающую среду; V_x – параметр, с помощью которого оценивается влияние нагрузки ветра; направление оси ОХ совпадает с направлением, в котором дует ветер; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – средние квадратические отклонения пульсации поллютантов ОГ для фиксированного момента времени t в направлении ОХ, ОУ, ОZ:

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

где h – характерный размер границ приземного слоя тропосферы.

Аппарат математической суперпозиции позволяет уравнение (1) преобразовать в формулу, удобную для расчета концентрации поллютанта при его эмиссии от объектов исследования, как от точечных источников, условно в границах допущений, непрерывного действия:

$$q(t, x, y, z) = \int_0^t \frac{Q \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-x_0-V_x t)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y-y_0)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z-z_0)^2}{(\sigma_z)^2 t} \right) \right)}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} dt.$$

Возникающее неудобство, связанное с вычислением интеграла (при расчете которого аналитические методы, как правило, приводят к сложным аналитическим выражениям, а применение численных подходов весьма трудоемко по времени и необходимым информационным ресурсам), решаем применением кубатурных формул путем замены интеграла выражением для «конечной суммы»:

$$q_n(t, x_i, y_i, z_i) = \sum_{i=0}^n C_i \frac{Q \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{(x_i-x_0-V_x t)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y_i-y_0)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z_i-z_0)^2}{(\sigma_z)^2 t} \right) \right)}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (2)$$

где C_i – числовой параметр; $x_i \in [0; t]$, $i=0, 1, 2, 3, \dots, n$ – точки интегрирования.

Выражение (2), описывающее изменение концентрации поллютанта (q), следует считать математической моделью искусственной нейронной сети, в которой функция Гаусса используется в качестве радиальной базисной функции для математической аппроксимации исходной гетерогенной информации – формализованные «гауссианами» аналитические закономерности и переменные данные измерений АСМ [7, 8].

По разработанной математической модели были обработаны данные измерений поллютантов АСМ и построены нейронные сети для разных количеств нейронов, а именно $n=5; 10; 15$ и 20 . Оригинальность метода состояла в том, что применялись, согласованно, прием, известный из зарубежной литературы как метод RProp, прием на основе сочетания методов «Облака» при количестве нейронов $n_1=3$ и RProp [8].

По разработанной математической модели был осуществлен «цифровой эксперимент» по нескольким вероятным характерным сценариям загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге при эксплуатации транспортных средств и ТЭЦ. В расчетах использовалось программное обеспечение Mathematica фирмы «Wolfram Research» [7, 8].

На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов загрязнения воздуха NO_2 и аэрозольными частицами опасных размеров для человека PM_{10} , которые подтверждают эффективность разработанного метода. Расчеты представлены в геометрической форме «3D поверхности», построенной в зависимости от комплексной векторной характеристики, представляющей скорость и направление ветровой нагрузки [7, 8].

Диаграмма, показанная на рис. 1, соответствует, фактически, чрезвычайным метеоусловиям, а именно загрязнению атмосферы NO_2 при слабом движении воздушных масс в сочетании с выраженной инверсией температуры в тропосфере над Финским заливом по высоте.

Оптимальная реализация математического информационного процесса расчетного мониторинга загрязнения воздуха NO_2 (рис. 1) была обеспечена обработкой данных измерений АСМ методом, как это было ранее отмечено, сочетания приемов «Облака», при $n=5$, RProp, при $n_1=3$. Из рис. 1 наглядно видно, что область экстремального загрязнения воздуха NO_2 (до 10 ПДК_{МР}) вероятно ожидать над Финским заливом в точке с географическими координатами $59^\circ 55'$ с.ш. и $30^\circ 20'$ в.д.

Диаграмма, показанная на рис. 2, так же, как и в первом примере, получена путем математической обработки по разработанной модели данных измерений АСМ аэрозольных частиц PM_{10} . Она соответствует, фактически, изменению ветровой нагрузки в юго-западном направлении, характерном для «Розы ветров» региона Санкт-Петербурга.

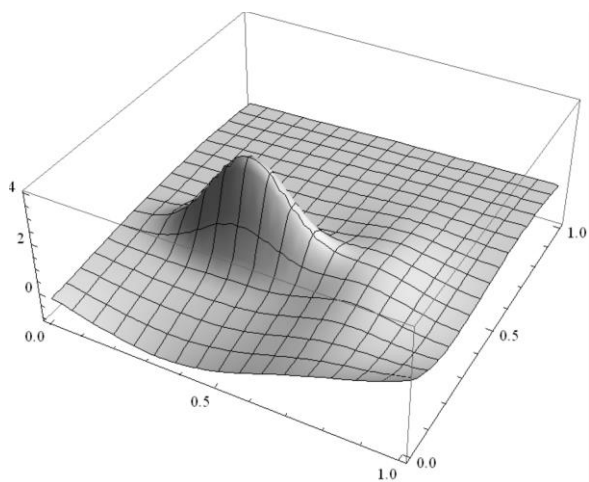


Рис. 1. Характер распределения концентрации NO_2 в Санкт-Петербурге при эксплуатации транспорта и ТЭЦ при anomalно неблагоприятных метеоусловиях [8]

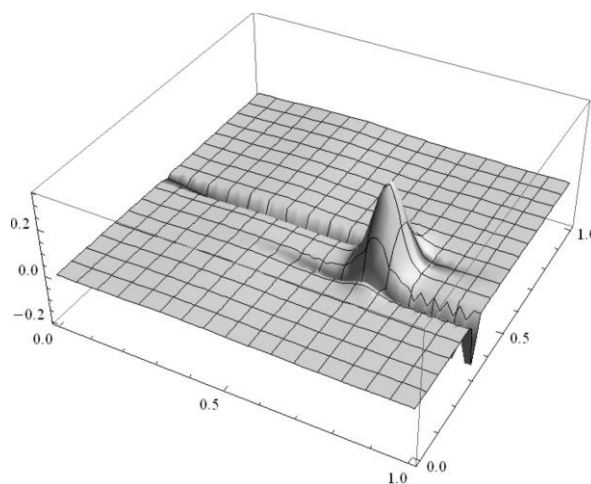


Рис. 2. Характер распределения концентрации PM_{10} в Санкт-Петербурге при эксплуатации транспорта и ТЭЦ при смещении облака смога под воздействием устойчивой ветровой нагрузки [7]

Под воздействием устойчивой ветровой нагрузки облако смога над Финским заливом, образовавшееся в результате эксплуатации транспорта и ТЭЦ, устойчиво смещается в Центральный район с географическими координатами ожидаемого максимума концентрации до 5 ПДК_{МР} $59^\circ 55'$ с.ш. и $30^\circ 20'$ в.д.

Выводы:

1. Исследование информационных аспектов обеспечения функционирования системы контроля безопасности объектов энергетики и транспорта в Санкт-Петербурге на основе методологии построения иерархии приемов нейронных сетей показало целесообразность и эффективность ее применения для прогнозирования загрязнения воздушной среды опасными для горожан химическими веществами NO_2 и PM_{10} , выбрасываемыми в окружающую среду с ОГ тепловых двигателей автомобильного, водного, железнодорожного, воздушного транспорта и ТЭЦ, в условиях действия неблагоприятных метеорологических и транспортно-режимных факторов.

2. Выполненные с помощью оригинального цифрового метода искусственных нейронных сетей, органично сочетающего приемы «Облака» и RProp, информационные изыскания позволили путем обработки данных автоматизированных станций инструментального мониторинга качества воздушной среды в Санкт-Петербурге в реальном временном масштабе и теоретически обоснованного применения аналитического выражения функции Гаусса спрогнозировать вероятно ожидаемые загрязнения воздушной среды NO_2 , над Финским заливом до 10 ПДК_{МР} и PM_{10} в Центральном районе до 5 ПДК_{МР}.

Автор выражает признательность профессорам А.Н. Васильеву, Д.А. Тархову, доктору технических наук О.В. Ложкиной и кандидату технических наук Н.В. Невмержицкому, результаты расчетных исследований которых были использованы для иллюстрации информационных аспектов обеспечения функционирования системы контроля безопасности объектов энергетики и транспорта в Санкт-Петербурге.

Литература

1. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Прогнозирование загрязнения воздуха отработавшими газами двигателей судов и автотранспорта // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 1 (68). С. 59–62.

2. Takeaki Orihara. An Update of Vehicle Emission Control Policies and Regulations in Japan and Tokyo // Motor Vehicle/Vessel Emissions Control Workshop 2016, December 14, 2016. URL: <https://www.polyu.edu.hk/cee/MOVE2016/2-06-ORIHARA.pd>. (дата обращения: 25.05.2020).

3. Michelle L. Bell, Devra L. Davis, Tony Fletcher. A Retrospective Assessment of Mortality from the London Smog Episode of 1952: The Role of Influenza and Pollution // Environmental Health Perspective. 2004. V. 112. № 1. pp. 6–8. DOI:10.1289/ehp.6539. PMID 14698923.

4. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Управление экологической безопасностью городского транспорта. Исследование эффективности управления экологической безопасностью городского транспорта на примере Санкт-Петербурга // LAP Lambert Academic Publishing. 2011. 195 с.

5. Всемирная организация здравоохранения. URL: <http://www.who.int/en/> (дата обращения: 18.06.2020).

6. Экологический портал Санкт-Петербурга. URL: <http://www.infoeco.ru/> (дата обращения: 18.06.2020).

7. Härkönen J. Regulatory dispersion modelling of traffic-originated pollution // Finnish Meteorological Institute, Contributions No. 38, FMI-CONT-38. University Press, Helsinki, 2002. 103 p.

8. Васильев А.Н., Тархов Д.А., Шемякина Т.А. Нейросетевой подход к задачам математической физики. СПб.: Нестор-история, 2015. 260 с.

9. Motor transport related harmful $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} : from on-road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level / O.V. Lozhkina, V.N. Lozhkin, N.V. Nevmerzhtsky, D.A. Tarhov and A.N. Vasilyev // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 772. № 1. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/772/1/012031/meta> (дата обращения: 14.06.2020).

References

1. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Prognozirovanie zagryazneniya vozduha otrabotavshimi gazami dvigatelej sudov i avtotransporta // Transport Rossijskoj Federacii. 2017. № 1 (68). S. 59–62.
2. Takeaki Orihara. An Update of Vehicle Emission Control Policies and Regulations in Japan and Tokyo // Motor Vehicle/Vessel Emissions Control Workshop 2016, December 14, 2016. URL: <https://www.polyu.edu.hk/cee/MOVE2016/2-06-ORIHARA.pdf>. (data obrashcheniya: 18.06.2020).
3. Michelle L. Bell, Devra L. Davis, Tony Fletcher. A Retrospective Assessment of Mortality from the London Smog Episode of 1952: The Role of Influenza and Pollution // Environmental Health Perspective. 2004. V. 112. № 1. pp. 6–8. DOI:10.1289/ehp.6539. PMID 14698923.
4. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Upravlenie ekologicheskoj bezopasnost'yu gorodskogo transporta. Issledovanie effektivnosti upravleniya ekologicheskoj bezopasnost'yu gorodskogo transporta na primere Sankt-Peterburga // LAP Lambert Academic Publishing. 2011. 195 c.
5. Vsemirnaya organizaciya zdavoohraneniya. URL: <http://www.who.int/en/> (data obrashcheniya: 18.06.2020).
6. Ekologicheskij portal Sankt-Peterburga. URL: <http://www.infoeco.ru/> (data obrashcheniya: 18.06.2020).
7. Härkönen J. Regulatory dispersion modelling of traffic-originated pollution // Finnish Meteorological Institute, Contributions No. 38, FMI-CONT-38. University Press, Helsinki, 2002. 103 p.
8. Vasil'ev A.N., Tarhov D.A., Shemyakina T.A. Nejrosetevoj podhod k zadacham matematicheskoj fiziki. SPb.: Nestor-istoriya, 2015. 260 s.
9. Motor transport related harmful PM2.5 and PM10: from on-road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level / O.V. Lozhkina, V.N. Lozhkin, N.V. Nevmerzhitsky, D.A. Tarhov and A.N. Vasilyev // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 772. № 1. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/772/1/012031/meta> (data obrashcheniya: 14.06.2020).