



О чрезвычайном загрязнении воздуха тепловыми двигателями городского транспорта

В крупных городах мира и России в течение последних 20–30 лет в периоды аномально неблагоприятных метеорологических условий (атмосферные инверсии в штилевую погоду [1]) стали наблюдаться локальные чрезвычайные ситуации (ЧС), связанные с опасным загрязнением воздушной среды токсичными и канцерогенными веществами отработавших газов (ОГ) тепловых двигателей транспорта [2, 3]. Для контроля таких чрезвычайных ситуаций Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России осуществляет в оперативном режиме мониторинг и прогнозирование загрязнения воздушной среды в городах [4].

В данной статье на примере Санкт-Петербурга приводятся результаты расчётного исследования вероятного локального загрязнения воздуха на уровне дыхания человека оксидами азота (NO_2) и PM_{10} (частицы дизельной сажи, на которых адсорбируются канцерогенные вещества), являющимися наиболее опасными поллютантами согласно оценке Всемирной организации здравоохранения [5].

Объекты исследования

Объектами исследования являлись тепловые двигатели автомобильного, водного (речной, морской), железнодорожного

(в основном маневровые дизельные тепловозы) и воздушного (с турбореактивными двигателями) транспорта, одновременно эксплуатируемого на территории Санкт-Петербурга (включая его водные и воздушные акватории). Особенности Санкт-Петербурга, водной столицы России, является его расположение на берегу Финского залива. Город имеет развитую улично-дорожную и железнодорожную инфраструктуру, на которой эксплуатируется ежедневно более 2,5 млн транспортных средств. В черте города находятся 45 рек, рукавов, протоков и 40 искусственных каналов общей протяжённостью около 300 км.

Навигация судов начинается в начале апреля, а заканчивается в конце ноября.

В данной статье на примере Санкт-Петербурга приводятся результаты расчётного исследования вероятного локального загрязнения воздуха на уровне дыхания человека оксидами азота NO_2 и PM_{10} , являющимися наиболее опасными поллютантами согласно оценке Всемирной организации здравоохранения

Рецензия эксперта на статью получена 08.02.2019 [Expert review on the article received February 08, 2019].

УДК 621.43.06:656(1-21):504.3.054. Научные специальности: 05.04.02, 05.26.02, 05.26.03.

О чрезвычайном загрязнении воздуха тепловыми двигателями городского транспорта

Владимир Н. Ложкин, д.т.н., профессор; Ольга В. Ложкина, к.х.н., доцент; Богдан В. Гавкалюк, к.т.н.; Максим А. Косовец, адъюнкт, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Приведены результаты расчётного исследования загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга поллютантами тепловых двигателей городского транспорта в чрезвычайных условиях эксплуатации. Задача переноса и накопления в атмосфере опасных веществ при совместной эксплуатации тепловых двигателей автомобильного, водного, железнодорожного и воздушного транспорта решается в масштабах города нейросетевым методом по уравнению Гаусса с обучением математической модели гетерогенными данными инструментального мониторинга. Установлено, что при неблагоприятном сочетании метеорологических и транспортных условий ожидаемые значения концентраций NO_2 и канцерогенных PM_{10} на локализованных территориях могут в 5–10 раз превышать предельно допустимые значения.

Ключевые слова: тепловые двигатели, транспорт, поллютанты, город, чрезвычайная ситуация

UDC 621.43.06:656(1-21):504.3.054. Numbers of scientific specialties: 05.04.02, 05.26.02, 05.26.03.

About emergency air pollution by heat motor transport engines

Vladimir N. Lozhkin, Doctor of Technical Sciences, Professor; Olga V. Lozhkina, PhD, Associate Professor; Bogdan V. Gavkalyk, PhD; Maxim A. Kosovets, an adjunct student, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia

The results of a numerical study of the pollution of the atmosphere of St. Petersburg by heat engines under extreme operating conditions are presented. The task of diffusion and accumulation of hazardous substances in the atmosphere during the joint operation of road, water, rail and air transport is solved by the neural network method using the Gauss equation. The mathematical model is trained according to instrumental monitoring. It was established that under unfavorable combination of meteorological and transport conditions, the expected values of NO_2 and carcinogenic PM_{10} concentrations in localized areas can be 5–10 times higher than the maximum allowable values.

Key words: heat engines, transport, pollutants, city, emergency.

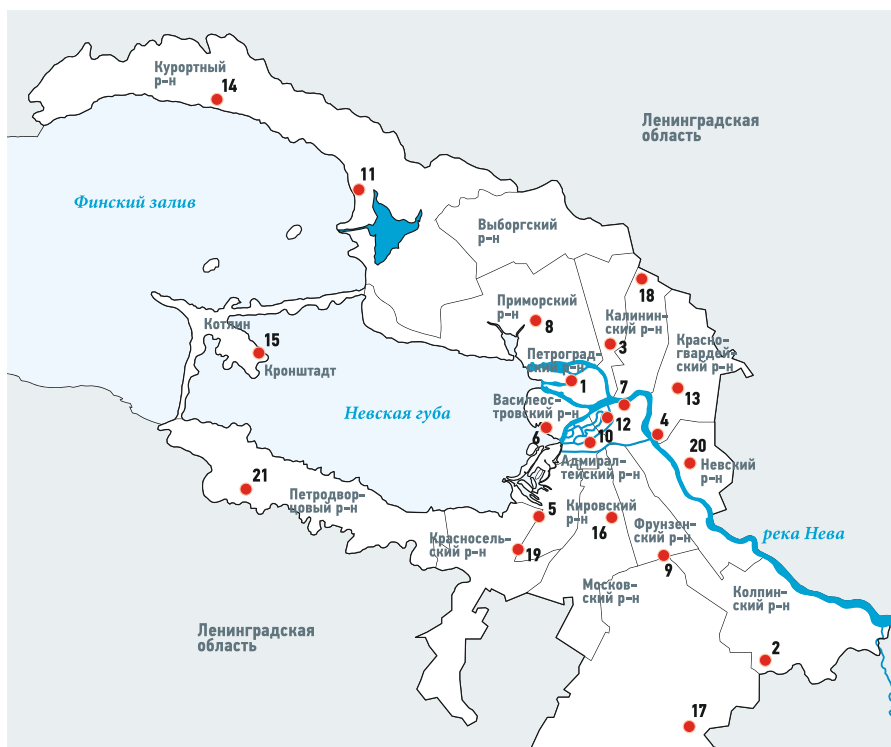


Рис. 1. Схема расположения автоматизированных станций мониторинга (АСМ) качества атмосферного воздуха в городе Санкт-Петербурге [6]

Основное отличие пассажирских и грузовых судов от автотранспортных средств заключается в том, что размещённые на них дизельные двигатели предназначены не только для приведения судов в движение, но и для утилизации отходов, выработки тепловой и электрической энергии, удовлетворения общесудовых нужд экипажа и пассажиров. Негативной особенностью эксплуатируемого в Санкт-Петербурге российского речного и морского флота является их экстремально высокий возраст. Так, трёхпалубные пассажирские теплоходы 588-го проекта выпускались с 1951 по 1961 годы, четырёхпалубные теплоходы 301-го проекта — с 1974 по 1983 годы, теплоходы «Метеор» 342Э — с 1961 по 1991 годы, в связи с чем

их дизельные двигатели характеризуются чрезвычайно высокими показателями токсичности (преимущественно нулевого экологического класса [1]).

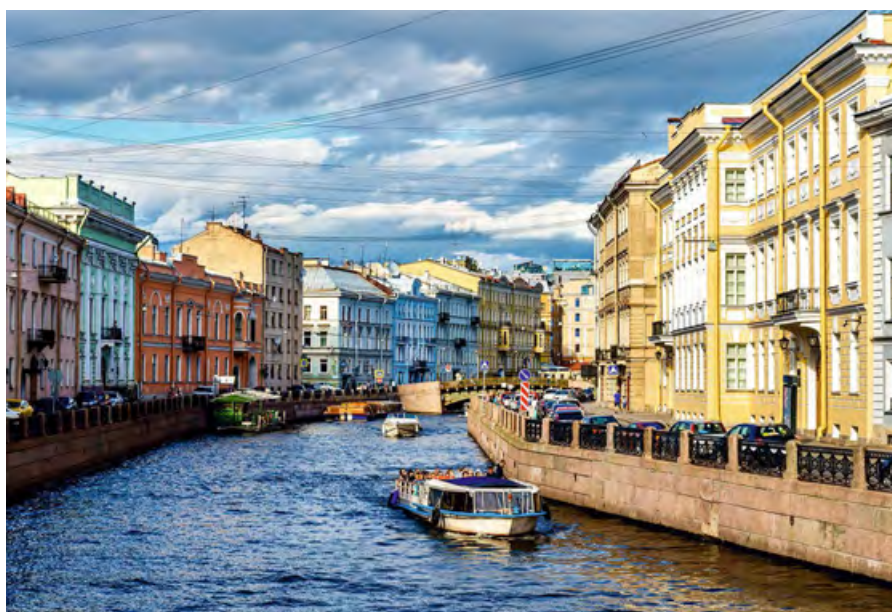
Воздушные лайнеры аэропорта Пулково взлетают при работе двигателей на жёстких (с экологической точки зрения) форсированных нагруженных режимах преимущественно в направлении городской акватории Финского залива. По данным исследований [4], на долю тепловых двигателей автомобильного, водного, железнодорожного и воздушного транспорта, эксплуатируемого в Санкт-Петербурге, приходится не менее 95–98% выбросов в атмосферу вредных (загрязняющих) веществ, регистрируемых городскими службами мониторинга.

Методика и исходные данные исследования

В данном исследовании были проанализированы гипотетические сценарии закономерно повторяющихся кратковременных (от нескольких часов, например, часы пик транспортной нагрузки, до нескольких суток) ситуаций, обусловленных явлениями эмиссии, переноса (диффузии) в стратифицированной атмосфере и чрезвычайно опасного локального (по времени и территории) оседания загрязняющих веществ NO_2 и PM_{10} отработавших газов двигателей транспортных средств при сочетании неблагоприятных транспортных и метеорологических условий, способствующих их накоплению в приземном слое атмосферы. Миграция загрязняющих веществ изучалась в масштабе городской территории, включая её водные акватории с частью примыкающего Финского залива. По международной шкале моделирования атмосферных процессов это соответствует «мезоуровню».

Исходными данными для организации численного эксперимента были сведения за весенне-летне-осенние периоды наблюдений (2015–2017 годы) о загрязнении воздушной среды поллютантами на уровне дыхания человека, взятые из базы данных измерений автоматизированной системы мониторинга (АСМ) Комитета по охране окружающей среды и природопользования правительства Санкт-Петербурга [6]. В расчётах использовались главным образом выборки измеряемых значений концентраций поллютантов, соответствующие малым осадкам, слабой и средней ветровой нагрузке (скорость ветра 0,5–3,0 м/с), а также часам пик транспортной нагрузки.

На время проведения исследований АСМ включала 21 стационарную автоматическую станцию мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, равномерно покрывающих территорию города (рис. 1): №1 (ул. Профессора Попова, д. 48), №2 (г. Колпино, ул. Красная, д. 1-А), №3 (ул. Карбышева, д. 7), №4 (Малоохтинский пр., д. 98), №5 (пр. Маршала Жукова, д. 30, корп. 3), №6 (В.О., Весёлая ул., д. 6), №7 (ул. Шпалерная, д. 56), №8 (ул. Королёва, д. 36, корп. 8), №9 (Малая Балканская ул., д. 54), №10 (Московский пр., д. 19), №11 (г. Сестрорецк, ул. Максима Горького, д. 2), №12 (ул. Пестеля, д. 1), №13 (Шоссе Революции, д. 84), №14 (г. Зеленогорск, пляж «Золотой», д. 1), №15 (город Кронштадт, ул. Ильмянинова, д. 4), №16 (ул. Севастьянова, д. 11), №17 (г. Пушкин, Тиньков пер., д. 4), №18 (ул. Ольги Форш, д. 6), №19 (пр. Маршала Жукова, д. 55), №20 (ул. Тельмана, д. 24), №21 (г. Ломоносов, ул. Федюнинского, д. 3).



Станции АСМ расположены в 18 административных районах Санкт-Петербурга, функционируют непрерывно в автоматическом режиме и обеспечивают регулярное получение оперативной информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга основными загрязняющими веществами. Автоматические измерения концентраций загрязняющих веществ проводятся с периодичностью 20 минут (требование оценки соответствия качества воздуха населённых мест предельно допустимым значениям «максимально разовой» концентрации вредного (загрязняющего) вещества — ПДК_{мр}). Эксплуатацию станций осуществляет Санкт-Петербургское государственное геологическое унитарное предприятие «Специализированная фирма «Минерал».

Математическая модель проведения численного эксперимента

Выбросы загрязняющих веществ ветровой конвекцией или диффузией перемешиваются и уносятся из районов сосредоточения стационарных и передвижных источников с тепловыми двигателями (автомобили, суда, локомотивы, авиалайнеры, дизель-электрические станции и другие промышленные установки с двигателями внутреннего сгорания и т.п.) на сопредельные территории, удалённые от источников на значительные (в несколько десятков километров) расстояния в пределах городской черты.

Скорость и дальность переноса загрязняющих веществ в общем случае зависят от их температуры, турбулентности воздуха и динамических характеристик ветрового поля. При выборе аппарата моделирования данного весьма сложного физико-химического процесса мы выделили три критерия, которым она должна удовлетворять: универсальность (возможность использования модели для решения конкретных задач переноса газообразных веществ и взвешенных частиц на мезоуровне), реалистичность (степень её соответствия реальной, по сути — близкой к стационарной на исследуемом временном отрезке системе), точность (способность количественно оценивать и прогнозировать развитие системы при изменяющихся условиях).

Очевидно, что следует добавить ещё один — рациональность. Это означает, что принятая модель, по возможности, должна максимально просто формулировать анализируемое явление (процесс диффузии), включать только те связи, соотношения, зависимости, которые наиболее важны при рассмотрении данной кон-



кретной задачи, по сути — поиска экстремального результата в условиях сочетания чрезвычайных факторов эксплуатации транспорта и метеорологии.

Как показал анализ международной многолетней положительной практики моделирования диффузии поллютантов в стратифицированной атмосфере на мезоуровне [7] для описания переноса выбросов в атмосферном воздухе газообразных и взвешенных частиц, отвечающем выше отмеченным критериям, лучше всего подходит модель Гаусса, в которой среднее сечение «факела» неизменно во времени и пространстве, имеет единообразную геометрическую форму, напоминающего сечение колокола.

Скорость и дальность переноса загрязняющих веществ в общем случае зависят от их температуры, турбулентности воздуха и динамических характеристик ветрового поля

Ввиду того, что массив исходных точечных данных о концентрациях имеет объём, близкий к необозримому, работа с ним традиционными методами может оказаться чрезвычайно трудоёмкой. Организация вычислительного процесса, очевидно, будет сопряжена с необходимостью использования далеко не полной информации о начальных и граничных условиях, о коэффициентах уравнений, о границах разделов газообразных и взвешенных сред — наконец, при построении моделей неизбежно появится необходимость учитывать обновляемые данные наблюдений автоматизированной системы мониторинга.

Во избежание перечисленных проблем нами использовался универсальный подход [8] на основе построения иерархии нейросетевых моделей для любого набора оперируемой информации и ана-

литических выражений определяющих зависимостей: «уравнения» или «наборы данных» — и в смешанной гетерогенной ситуации: «уравнения + данные». Используя данный подход, можно единообразно, без принципиальной перестройки алгоритмов конструировать устойчивые к ошибкам и способные усваивать новую информацию нейросетевые модели процесса переноса. Как показала практическая реализация настоящего исследования, данная методология существенно сокращает трудоёмкость моделирования систем с распределёнными параметрами, к которым относится динамическая задача оценки загрязнения атмосферы ОГ транспорта. Положительным является и то, что предложенный подход и соответствующие ему нейросетевые модели загрязнения воздуха и нейросетевые алгоритмы их настройки обладают приоритетной новизной [9].

Согласно модели Гаусса, изменение концентрации примеси от мгновенного точечного источника примеси подчиняется нормальному закону распределения:

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

где x_0 , y_0 и z_0 — координаты источника выброса; Q — мощность источника; V_x — коэффициент, характеризующий скорость ветра в предположении, что система координат сориентирована таким образом, что OX совпадает с направлением ветра; σ_x , σ_y и σ_z — средние квадратичные отклонения частиц примеси в момент времени t , соответственно, вдоль координатных осей OX , OY и OZ :

$$\sigma_x^2 = \frac{2}{h} \int_0^h [K_x(z) dz]; \quad \sigma_y^2 = \frac{2}{h} \int_0^h [K_y(z) dz];$$

$$\sigma_z^2 = \frac{2}{h} \int_0^h [K_z(z) dz], \quad (2)$$

где h — высота приземного слоя.

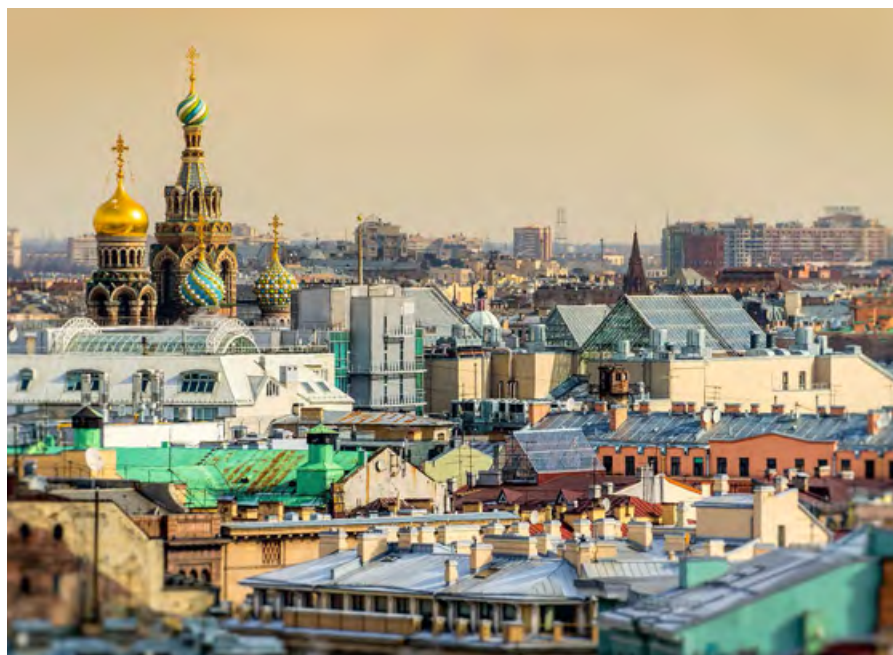
Используя принцип суперпозиции, из (1) легко получить формулы для расчёта концентрации примеси от точечного источника непрерывного действия:

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

Согласно гауссовой модели изменение концентрации примеси в атмосфере подчиняется нормальному закону распределения. Основная сложность состоит в вычислении интеграла, при расчёте которого аналитические методы приводят к громоздким формулам, а численные методы требуют большого времени счёта. Поэтому, используя кубатурные формулы, заменим интеграл конечной суммой:

$$q_n(t, x_i, y_i, z_i) = \sum_{i=0}^n C_i Q e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_0-V_x t)^2}{\sigma_x^2 t} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2 t} + \frac{(z-z_0)^2}{\sigma_z^2 t} \right]} \frac{1}{\sqrt[3]{2\pi t \sigma_x \sigma_y \sigma_z}} \quad (4)$$

где C_i — числовой коэффициент; $x_i \in [0; t]$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ — узлы интегрирования.



Приближение (4) для концентрации вредного (загрязняющего) вещества q можно рассматривать как модель, соответствующую искусственным нейронным сетям с радиальными базисными функциями (в анализируемом случае базисная функция — функция Гаусса).

Результаты проведённого исследования

На основе обработки данных мониторинга по разработанной математической модели были построены нейронные сети с разным количеством нейронов: $n = 5, 10, 15, 20$ с применением метода RProp [8] и комбинации [8] метода «Облака» из трёх частиц ($n_1 = 3$) и метода RProp.

В результате проведения по модели численного эксперимента с использованием программного обеспечения Mathematica компании Wolfram Research были получены диаграммы для разных гипотетических сценариев развития ситуации загрязнения атмосферного воздуха на территории Санкт-Петербурга. Полную информацию о проведённых многолетних исследованиях можно получить из отчёта по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) «Информационные модели на основе иерархических гетерогенных нейронных сетей в исследовании влияния объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду» (проект №14-01-00733А, 2015–2016 годы).

В качестве примеров, подтверждающих работоспособность разработанного метода, на рис. 2 (плоская модель) отражена зависимость уровня загрязнения воздуха диоксидом азота NO_2 в разных районах города от комплексного векторного параметра — скорости и направления ветра. Расчёты соответствуют anomalously неблагоприятным метеорологическим условиям: безветренной погоде и наличия над Финским заливом глубокой (по высоте) области температурных инверсий.

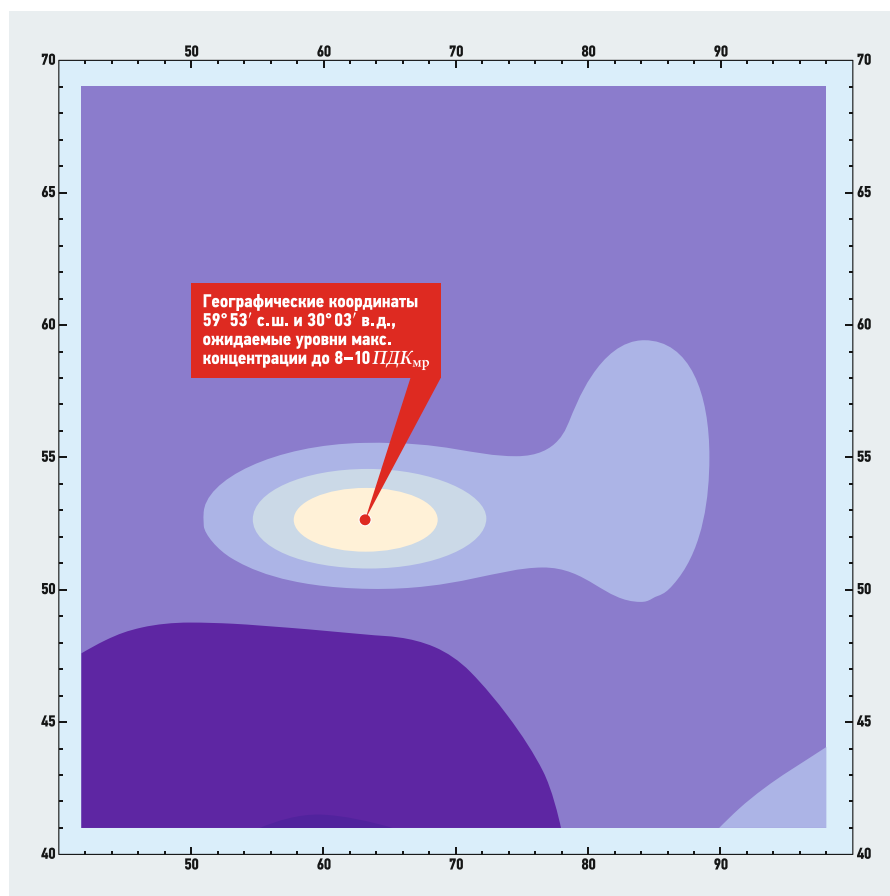


Рис. 2. Двухмерная визуализация модельных вычислений распространения и распределения NO_2 в городе Санкт-Петербурге на мезоуровне с использованием программного обеспечения Mathematica производства компании Wolfram Research

Для «розы ветров», характерной для региона Санкт-Петербурга, юго-западные направления ветровой нагрузки наблюдаются наиболее часто

В результате последовательных итераций (обучающих аппроксимаций данных измерений АСМ, наилучшие, более точные результаты, с минимальными значениями функционала ошибки, получились в случае применения комбинации методов «облака» и RPror при $n = 5$; $n_1 = 3$.

На рис. 3 эти результаты представлены на трёхмерной модели.

Согласно данным диаграммам, уровень наивысшего загрязнения диоксидом азота в этом случае соответствует области с географическими координатами $59^{\circ}53'$ с.ш. и $30^{\circ}03'$ в.д. (над Финским заливом). Ожидаемые вероятные численные значения загрязнения воздуха NO_2 на уровне дыхания человека в этой чрезвычайно опасной области могут лежать в диапазоне значений $8-10 \text{ ПДК}_{\text{мр}}$.

Высокий уровень загрязнения над Финским заливом, как об этом было ранее сказано, объясняется диффузией, «перетеканием» вредных (загрязняющих веществ) из других районов города, в которых работают транспортные тепловые двигатели. Причиной этому явилась устойчива инверсия над Финским заливом — область пониженного давления.

На рис. 4 в качестве второго примера приведены результаты численного моделирования загрязнения воздуха частицами PM_{10} в Санкт-Петербурге — также на мезоуровне, как и в первом примере. Здесь на диаграмме представлена ожидаемая трансформация распределения загрязнения воздуха частицами PM_{10} как следствия смещения загрязнённого поллютантами облака смога над Финским заливом под воздействием слабого юго-западного ветра со скоростью 2 м/с .

Следует отметить, что для «розы ветров», характерной для региона Санкт-Петербурга, юго-западные направления ветровой нагрузки наблюдаются наиболее часто во все времена года. Как вытекает из анализа диаграммы рис. 4, при слабом юго-западном ветре наивысший уровень загрязнения атмосферного воздуха PM_{10} соответствует району с координатами $59^{\circ}55'$ с.ш. и $30^{\circ}20'$ в.д. (Центральный район).

Смещение высокого уровня загрязнения воздуха над Санкт-Петербургом с Финского залива в сторону Центрального района объясняется диффузией, «перетеканием» вредных (загрязняющих) веществ,

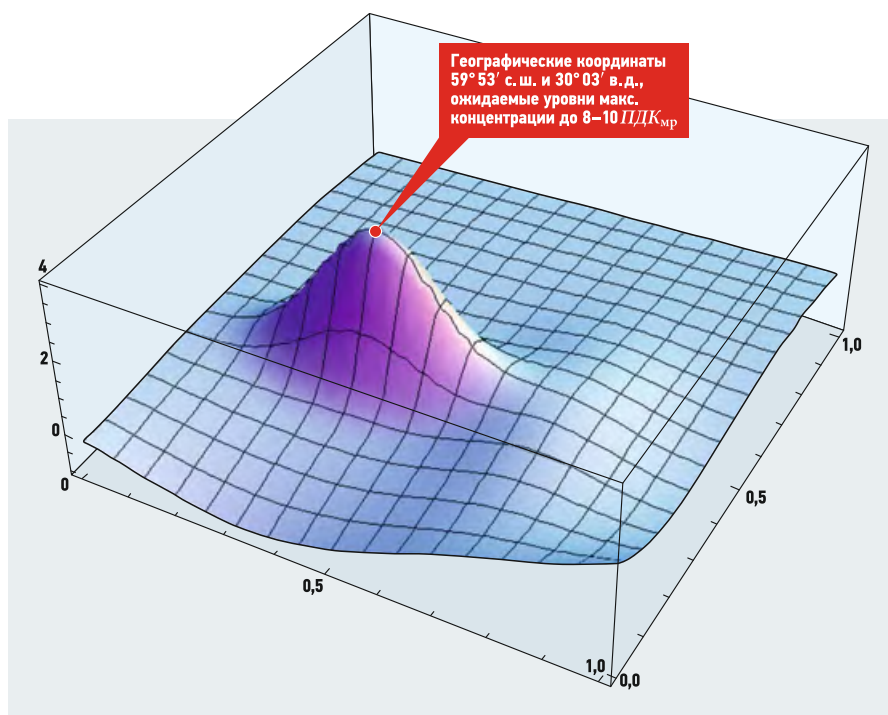


Рис. 3. Трёхмерная визуализация модельных вычислений распространения и распределения NO_2 в городе Санкт-Петербурге на мезоуровне с использованием программного обеспечения Mathematica производства компании Wolfram Research

как из ранее сформировавшегося облака смога вредных (загрязняющих веществ) над Финским заливом, так и из других районов города, в которых работают транспортные тепловые двигатели. Причиной этому явилось сформировавшееся

под воздействием ветровой нагрузки новое устойчивое распределение вертикальных температур и, как физическое метеорологическое следствие, смещение инверсионных пониженных атмосферных давлений в область Центрального района.

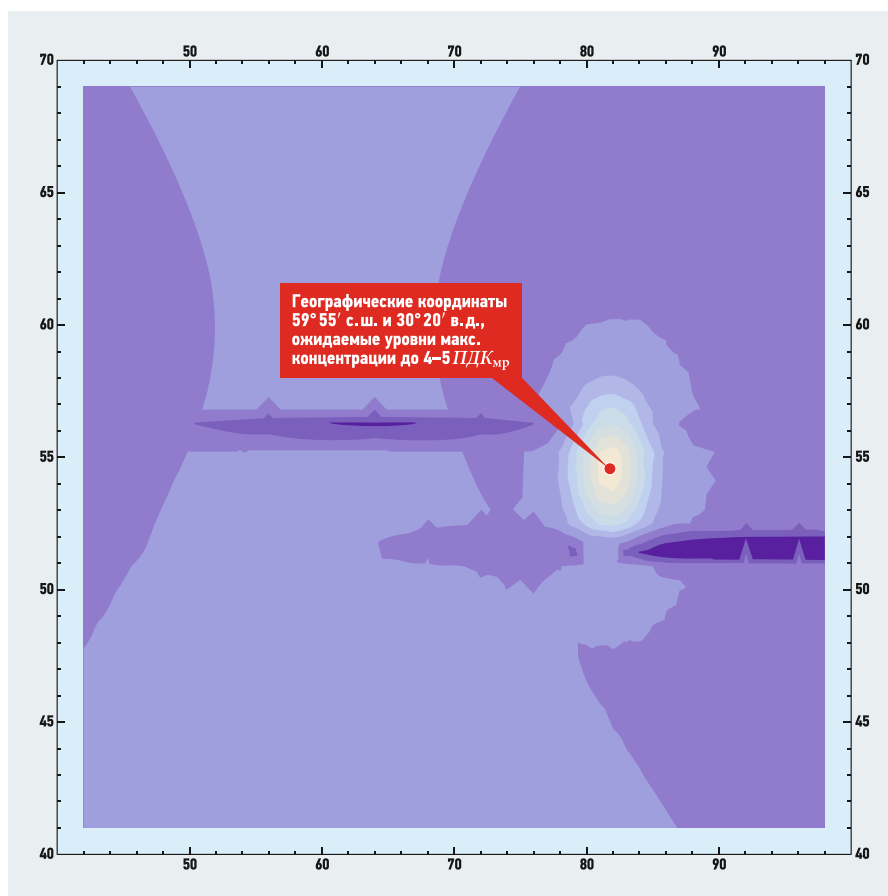


Рис. 4. Двухмерная визуализация модельных вычислений распространения и распределения частиц PM_{10} (дизельной сажи тепловых двигателей транспорта) в Санкт-Петербурге на мезоуровне с использованием программного обеспечения Mathematica компании Wolfram Research

По результатам нейросетевой аппроксимации данных многолетних измерений автоматизированной системы мониторинга ожидаемые вероятные численные значения загрязнения воздуха PM_{10} на уровне дыхания человека в этой чрезвычайно опасной области Центрального района могут лежать в диапазоне значений 4–5 $ПДК_{мр}$.

Выводы

1. В Санкт-Петербурге одновременная эксплуатация тепловых двигателей автомобильного, водного, железнодорожного и воздушного транспорта при неблагоприятных метеорологических и транспортных условиях приводит к закономерно повторяемым локальным территориально-временным чрезвычайным ситуациям сверхнормативного загрязнения воздуха NO_2 и PM_{10} , причём на уровне легких человека.

2. Применение оригинального (комбинация методов «Облака» и RProp) универсального подхода математического моделирования на основе построения иерархии обучаемых нейросетевых моделей для набора оперируемой инструментальной информации о полях распределения концентраций NO_2 , PM_{10} и аналитического выражения закона диффузии Гаусса («уравнения + данные») позволяет контролировать и прогнозировать такие ЧС.

3. Организация и проведение численного эксперимента с использованием нового подхода, применительно к Санкт-Петербургу — водной и культурной столице РФ — позволили выявить вероятные локально временные ЧС загрязнения воздуха ОТ тепловых двигателей от совместной работы транспорта над Финским заливом (превышение концентраций NO_2 до 8–10 $ПДК_{мр}$) и в Центральном районе (превышение концентраций PM_{10} до 4–5 $ПДК_{мр}$).

4. Натурными полевыми и численными исследованиями установлено, что подобные закономерно повторяемые территориально-временные локальные чрезвычайные ситуации сверхнормативного загрязнения воздуха в городах являются следствием сочетания одновременно неблагоприятных транспортных (часы пиковой транспортной нагрузки) и метеорологических (штилевая или слабая ветровая нагрузка, локальные температурные инверсии в приземном слое стратифицированной атмосферы) факторов. ●

1. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Прогнозирование загрязнения воздуха отработавшими газами двигателей судов и автотранспорта // Транспорт Российской Федерации, 2017. №1. 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.
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. Vol. 112. No. 1. Pp. 6–8.
4. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Управление экологической безопасностью городского транспорта. Исследование эффективности управления экологической безопасностью городского транспорта на примере Санкт-Петербурга. Lambert Academic Publishing, 2011. 204 с.
5. Официальный сайт Всемирной организации здравоохранения [Электр. текст]. Режим доступа: who.int. Дата обрац.: 22.05.2018.
6. Экологический портал Санкт-Петербурга [Электр. текст]. Режим доступа: infoeco.ru. Дата обрац.: 11.06.2018.
7. Härkönen J. Regulatory dispersion modelling of traffic-originated pollution. Finnish Meteorological Institute, Contributions No. 38. University Press. Helsinki, Finland. 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. Lozhkina O.V., Lozhkin V.N., Nevmerzhiysky N.V., Tarhov D.A., Vasilyev A.N. Motor transport related harmful $PM_{2.5}$ and PM_{10} : from on-road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 772. No. 1. Pp. 1–6.

References — see page 94.

About emergency air pollution by heat motor transport engines. Pp. 56–61.

Vladimir N. Lozhkin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Olga V. Lozhkina**, PhD, Associate Professor; **Bogdan V. Gavkalyk**, PhD; **Maxim A. Kosovets**, an adjunct student, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia

1. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. *Prognozirovanie zagryazneniya vozduha otrabotavshimi gazami dvigatelej sudov i avtotransporta* [Prediction of air pollution from exhaust engines of ships and vehicles]. *Transport Rossijskoj Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2017. No. 1. Pp. 59–62. [In Russian]
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.
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. Vol. 112. No. 1. Pp. 6–8.
4. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. *Upravlenie jekologicheskoj bezopasnost'ju gorodskogo transporta. Issledovanie jeffektivnosti upravlenija jekologicheskoj bezopasnost'ju gorodskogo transporta na primere Sankt-Peterburga* [Management of environmental safety of urban transport: The study of the effectiveness of environmental safety management of urban transport on the example of St. Petersburg]. *Lambert Academic Publishing*. 2011. 204 p. [In Russian]
5. *Official'nyj sajt Vsemirnoj organizacii zdavoohranenija* [Official site of the World Health Organization]. Web-source: who.int. Access data: May 22, 2018.
6. *Jekologicheskij portal Sankt-Peterburga* [Ecological portal of St. Petersburg]. Web-source: infoeco.ru. Access data: June 11, 2018. [In Russian]
7. Härkönen J. Regulatory dispersion modelling of traffic-originated pollution. Finnish Meteorological Institute, Contributions No. 38. University Press. Helsinki, Finland. 2002. 103 p.
8. Vasil'ev A.N., Tarhov D.A., Shemjakina T.A. *Nejrosetevoj podhod k zadacham matematicheskij fiziki* [Neural network approach to the problems of mathematical physics]. St. Petersburg. *Nestor-istorija* ["Nestor-History" Publishing House] 2015. 260 p. [In Russian]
9. Lozhkina O.V., Lozhkin V.N., Nevmerzhitsky N.V., Tarhov D.A., Vasilyev A.N. 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. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 772. No. 1. Pp. 1–6.