

# О влиянии физического состояния атмосферы на опасное загрязнение воздуха поллютантами транспорта и промышленности в Санкт-Петербурге



**В. Н. Ложкин,**  
д-р техн. наук, профес-  
сор кафедры пожарной,  
аварийно-спасательной  
техники и автомо-  
бильного хозяйства  
Санкт-Петербургского  
университета Государст-  
венной противопожарной  
службы МЧС России имени  
героя РФ генерала армии  
Е. Н. Зиничева

Разработанная при участии автора методология организации экспериментально-расчетного контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций загрязнения атмосферы поллютантами транспорта на мезо- и локальном уровнях с помощью средств искусственного интеллекта нашла внедрение в региональных, национальных и международных документах.

**К**онтроль за качеством атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге осуществляется по комплексу критериев:

- валовым (годовым) объемам выбросов поллютантов от автотранспорта/стационарных объектов промышленности;
- данным инструментальных замеров значений их концентраций на уровне дыхания человека в реальном масштабе времени;
- прогнозам чрезвычайно опасных загрязнений воздуха при неблагоприятном сочетании гидрометеорологических, климатических и транспортно-логистических факторов (локальные воздушные «застои», вызванные аномальным физическим состоянием при-

земных слоев атмосферы, часы пик автомобильного движения).

Объемы поступления поллютантов от автотранспортных средств (АТС) определяются их количеством, техническим состоянием (распределением парка по экологическим классам [1, 2]), видом и качеством топлива (дизельное, бензин, газ, содержание серы, бензола) [3] и характером/режимами его эксплуатации на улично-дорожной городской сети [4–7]. В *табл. 1* представлена динамика изменения численности автотранспорта по сведениям управления ГИБДД ГУ МВД России по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской обл.

Анализ данных показывает, что, как и прогнозировалось в более ранних авторских исследованиях<sup>1</sup>, к 2012 г. стала заметной тенденция насыщения парка эксплуатируемых АТС Санкт-Петербурга, характеризующаяся незначительными колебаниями его общей численности к началу 2024 г.

Выбросы в атмосферу поллютантов от АТС Санкт-Петербурга за 2012–2023 гг., рассчитанные по обновленной версии Методических рекомендаций Росприроднадзора (Распоряжение № 37-р от 1 ноября 2013 г.), приведены в *табл. 2*.

Анализ данных свидетельствует о беспрецедентной тенденции снижения

**Таблица 1. Изменение численности АТС в Санкт-Петербурге за 2012–2023 гг.**

| Годы | Легковые автомобили | Грузовые автомобили | Автобусы | Всего   |
|------|---------------------|---------------------|----------|---------|
| 2012 | 1537473             | 201033              | 22449    | 1760955 |
| 2013 | 1741267             | 220067              | 21513    | 1982847 |
| 2014 | 1636336             | 213123              | 19838    | 1869297 |
| 2015 | 1638183             | 217738              | 20221    | 1876142 |
| 2016 | 1676379             | 214003              | 19659    | 1910041 |
| 2017 | 1710811             | 223662              | 29798    | 1964271 |
| 2018 | 1724410             | 226975              | 20948    | 1972333 |
| 2019 | 1744133             | 229764              | 21061    | 1994958 |
| 2020 | 1771034             | 231735              | 20951    | 2023720 |
| 2021 | 1800214             | 236683              | 20709    | 2057606 |
| 2022 | 1789182             | 238771              | 20599    | 2048552 |
| 2023 | 1789510             | 242466              | 21357    | 2053333 |

<sup>1</sup> Ложкин В.Н., Ложкина О. В. Автомобильный транспорт и судьба биосферы — можно ли избежать противостояния? // Научно-теоретический журнал «Общество, среда, развитие». 2011. № 2. С. 208–214.

Таблица 2. Выбросы загрязнителей от АТС Санкт-Петербурга в 2012–2023 гг., тыс. т.

| Годы | Всего | Твердые вещества (сажа) | SO <sub>2</sub> | CO    | NO <sub>x</sub> | CH <sub>4</sub> | NH <sub>3</sub> | ЛОС  |
|------|-------|-------------------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| 2012 | 419,3 | 0,7                     | 2               | 338,2 | 35,3            | 1,8             | 0,7             | 40,6 |
| 2013 | 464,3 | 0,8                     | 2,2             | 374,4 | 38,9            | 2               | 0,8             | 45,1 |
| 2014 | 441,8 | 0,8                     | 2,1             | 356,2 | 37,2            | 1,9             | 0,8             | 42,8 |
| 2015 | 446,7 | 0,8                     | 2,1             | 360,1 | 37,7            | 1,9             | 0,8             | 43,2 |
| 2016 | 447,8 | 0,8                     | 2,1             | 361,1 | 37,6            | 1,9             | 0,8             | 43,5 |
| 2017 | 470,8 | 0,9                     | 2,3             | 379,8 | 39,6            | 2               | 0,8             | 45,5 |
| 2018 | 467,8 | 0,9                     | 2,2             | 377,2 | 39,4            | 2               | 0,8             | 45,3 |
| 2019 | 134   | 0,6                     | 1,2             | 106,7 | 17,3            | 0,2             | 2,3             | 5,8  |
| 2020 | 131   | 0,6                     | 1,2             | 104,2 | 16,9            | 0,2             | 2,3             | 5,6  |
| 2021 | 128,9 | 0,5                     | 1,2             | 102,4 | 16,7            | 0,2             | 2,3             | 5,5  |
| 2022 | 132,8 | 0,5                     | 1,2             | 105,5 | 17              | 0,3             | 2,3             | 6    |
| 2023 | 140,6 | 0,6                     | 1,2             | 112,3 | 17,6            | 0,2             | 2,3             | 6,4  |

Таблица 3. Выбросы от стационарных объектов промышленности в 2012–2023 гг., тыс. т

| Годы | Всего* | Твердые вещества | SO <sub>2</sub> | CO   | NO <sub>x</sub> | СНХ** | ЛОС |
|------|--------|------------------|-----------------|------|-----------------|-------|-----|
| 2012 | 68,9   | 1,9              | 5,6             | 19,1 | 27,7            | 8,8   | 4,7 |
| 2013 | 72,3   | 1,9              | 3,2             | 22,4 | 27,6            | 8,6   | 8,3 |
| 2014 | 70,5   | 2,1              | 2,6             | 21,1 | 24,5            | 15    | 5   |
| 2015 | 73,2   | 2,2              | 2,2             | 19,1 | 23              | 20,4  | 5,9 |
| 2016 | 78,3   | 2,3              | 2,5             | 21,6 | 25,6            | 20,8  | 5,1 |
| 2017 | 87,3   | 3,2              | 2,5             | 26,8 | 26,4            | 22,4  | 5,5 |
| 2018 | 83,9   | 4,4              | 2               | 27,3 | 26,2            | 18,7  | 4,8 |
| 2019 | 66,9   | 2,6              | 2               | 28,8 | 25,7            | 2     | 5,5 |
| 2020 | 67     | 3                | 2,3             | 27,7 | 25,1            | 1,9   | 6,6 |
| 2021 | 72,2   | 3,3              | 2,2             | 30   | 28,4            | 1,8   | 6   |
| 2022 | 70,3   | 3,2              | 2,3             | 29,6 | 27,4            | 1,9   | 5,5 |
| 2023 | 66,7   | 3,6              | 1,8             | 30   | 23,2            | 2,1   | 5,8 |

**Примечание:**

\* Значение в колонке «Всего» соответствует сумме выбросов всех твердых газообразных и жидких загрязняющих веществ на территории субъекта.

\*\* СНХ углеводороды без ЛОС.

эмиссии от АТС опаснейших летучих органических соединений (ЛОС), метана CH<sub>4</sub>, угарного газа CO, оксидов азота NO<sub>x</sub>, сернистого ангидрида SO<sub>2</sub> (за счет экологической стандартизации<sup>1</sup>, сопровождающейся притоком АТС 3–5 экологических классов, оборудованных системами термokatалитической нейтрализации отработавших газов, и расширением производства в России малосернистых топлив).

Одновременно отмечены умеренные изменения эмиссии сажи РМ [8] (из-за незначительной доли в грузовом парке АТС, оборудованных сажевыми фильтрами) и рост эмиссии аммиака NH<sub>3</sub> [9] (из-за увеличения доли транспортных средств, оборудованных каталитическими нейтрализаторами восстановления N<sub>2</sub> из оксидов азота отработавших газов).

В табл. 3 приведены данные эмиссии загрязнителей от промышленности с 2012 по 2023 гг.

<sup>1</sup> Решение Комиссии Таможенного союза N 877 от 09.12.2011 (ред. от 27.09.2023) «О принятии технического регламента Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (вместе с «ТР ТС 018/2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности колесных транспортных средств»). URL: <https://legalacts.ru/doc/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuz-a-ot-09122011-n-877-o/?ysclid=lpfchgsuyg952550441> (дата обращения: 16.04.2025).

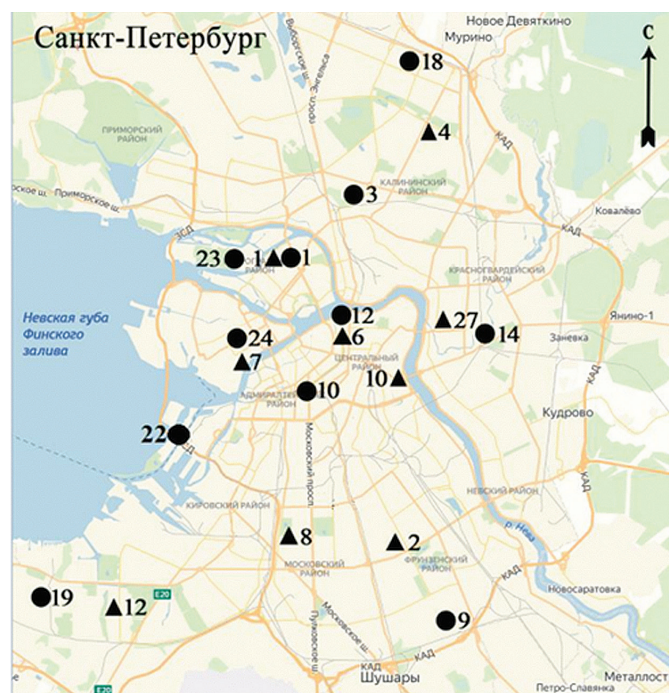
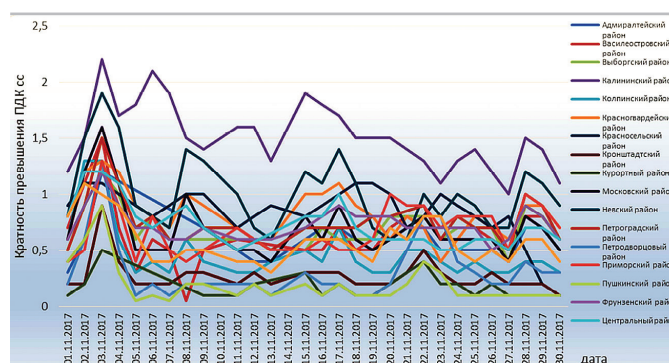


Рис. 1. Размещение постов Северо-Западного УГМС и роз ветров

Рис. 2. Месячный ход значений NO<sub>2</sub> (в ед. ПДКСС), зафиксированный районными станциями АСМ (ноябрь 2017 г.) [10]

Подытожим выполненный анализ состояния исследуемого проблемного вопроса. За 2012–2023 гг. численность АТС в Санкт-Петербурге изменялась в реальном масштабе времени нерегулярно (см. табл. 1) в диапазоне значений с 1 760 955 до 2 053 333 единиц. При этом выбросы загрязнителей от АТС в среднем уменьшились (см. табл. 2) приблизительно в три раза (с 419,3 до 140,6 тыс. т). За тот же период времени выбросы загрязнителей от стационарных объектов промышленности изменялись несущественно (табл. 3): 68,9 тыс. т — 2012 г., 83,9 тыс. т — 2018 г., 66,7 тыс. т — 2023 г. При этом по состоянию на начало 2024 г. преобладающий объем выбросов загрязнителей (67,8%), как следует из анализа данных табл. 2 и 3, приходился на автотранспорт.

Для выявления чрезвычайных ситуаций (ЧС) опасного воздействия загрязнителей на горожан потребовалось провести исследование закономерностей загрязнения воздушной среды загрязнителями на уровне дыхания человека в зависимости от физического состояния атмосферы и интенсивности эксплуатации основного поставщика загрязнителей в Санкт-Петербурге — автотранспорта.

### Мониторинг воздушной среды, физико-математическая модель и методика расчетного исследования

Непрерывные наблюдения за качеством атмосферного воздуха Санкт-Петербурга в 2023 г., аналогично предыдущим годам, проводились стационарными постами Государственной службы наблюдений за состоянием окружающей среды, находящихся в ведении Северо-Западного УГМС (рис. 1).

Измерения с 20-минутной фиксацией значений концентраций диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), оксида углерода ( $\text{CO}$ ), оксида азота ( $\text{NO}$ ), диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ), озона ( $\text{O}_3$ ) и многих других загрязнителей и парниковых газов в приземном слое воздуха проводятся газоанализаторами на станциях Автоматизированной системы мониторинга (АСМ) атмосферного воздуха Санкт-Петербурга Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности<sup>1</sup> (Комитет).

Каждые 20 мин на центральный аналитический центр АСМ поступает информация о концентрациях загрязнителей на уровне дыхания человека по множеству координат, равномерно покрывающих площадь города в его административных границах. В нижней части рис. 1 показана роза ветров, характеризующая распределение по сторонам света ветровой нагрузки в течение 2023 г.

Информация о концентрациях загрязнителей обрабатывается в аналитическом центре Комитета и становится доступной пользователям (рис. 2) [10].

Из анализа розы ветров можно заключить, что в течение года Санкт-Петербург постоянно продувается ветрами с юго-западного (22%) и западного (18%) направлений, что благоприятствует интенсивному рассеиванию, а вместе с обильными дождями и вымыванию в атмосфере загрязнителей.

Анализ данных рис. 2 позволяет заметить устойчивый фон нестабильности уровня загрязнения воздушной среды  $\text{NO}_2$  по разным административным районам Санкт-Петербурга, которая является следствием существенной разницы в них техногенного прессинга со стороны транспорта и промышленности.

Одновременно с этим явно просматривается закономерное присутствие общего для всех районов тренда, выраженного динамичными колебаниями максимальных значений загрязнения воздушной среды  $\text{NO}_2$  в реальном масштабе времени с пиком в начале месячного хода среднесуточных концентраций  $\text{NO}_2$ .

<sup>1</sup> Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2023 году / под ред. А. В. Германа, И. А. Серебрицкого. СПб., 2024. 221 с.

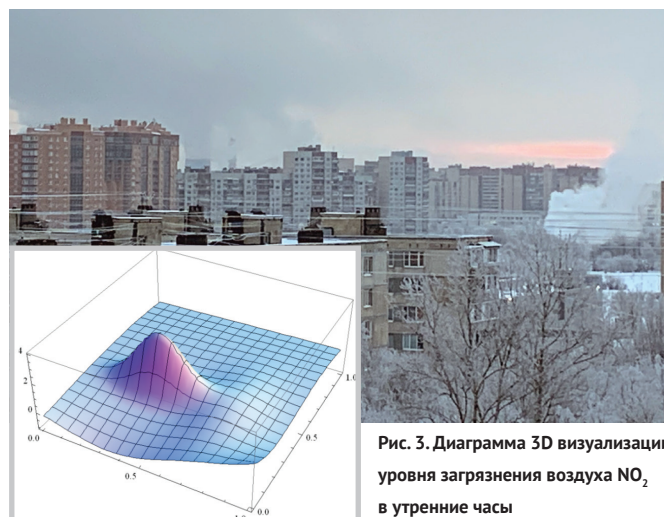


Рис. 3. Диаграмма 3D визуализации уровня загрязнения воздуха  $\text{NO}_2$  в утренние часы

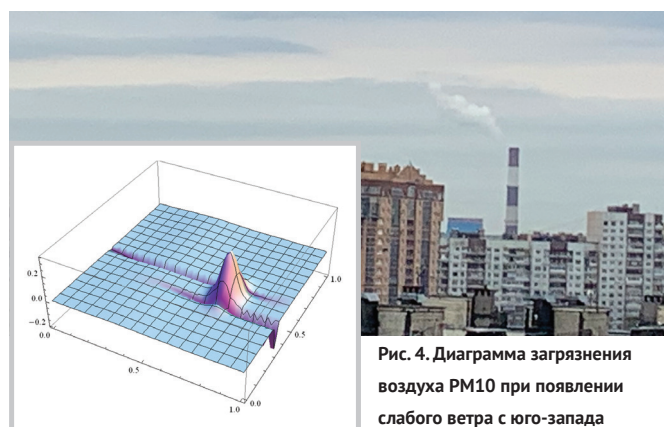


Рис. 4. Диаграмма загрязнения воздуха  $\text{PM}_{10}$  при появлении слабого ветра с юго-запада

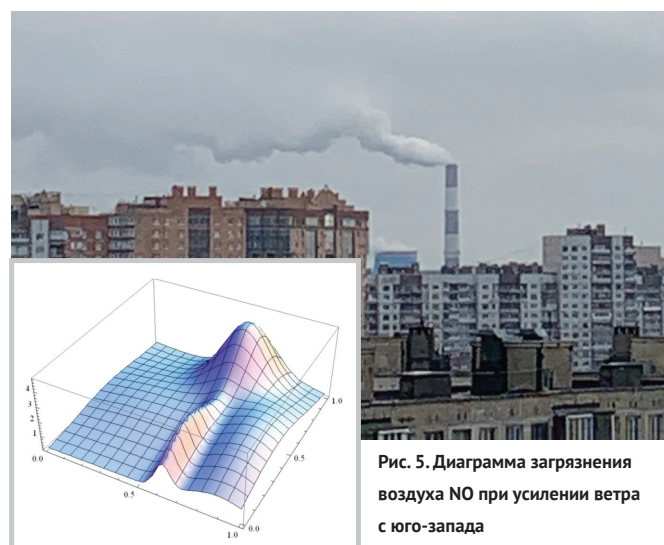


Рис. 5. Диаграмма загрязнения воздуха  $\text{NO}$  при усилении ветра с юго-запада

Последнее говорит о существенности влияния на загрязнение воздушной среды  $\text{NO}_2$  переменного физического (метеорологического) состояния атмосферы.

Углубленный анализ причин общего для всех районов наблюдаемого тренда изменчивости/относительной стабильности пиков концентраций  $\text{NO}_2$  является следствием складывающейся в регионе общей синоптической картины движения воздушных масс внутри действующих циклонов/антициклонов, распределения в них барических давлений и температур с опасными для рассеивания загрязнителей явлениями инверсий и «изотермий» [10, 11].

Таким образом, выявленная неустойчивость погодноклиматических условий в масштабах всего мегаполиса актуализировала разработку предлагаемого метода прогноза загрязне-

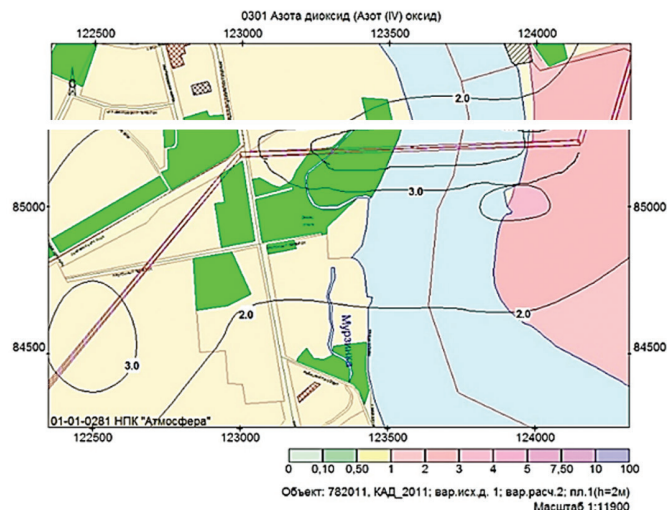


Рис. 6. Прогноз загрязнения атмосферы  $\text{NO}_2$  (в соотношении расчетных концентраций к ПДКМР) в акватории р. Невы у вантового перехода «Мост Обуховский» в Санкт-Петербурге

ния воздуха загрязнителями в динамике развития этого процесса по мере изменения метеорологических и техногенных факторов на мезо- и локальном уровнях масштабирования чрезвычайных ситуаций опасного загрязнения городской воздушной среды.

Методология прогноза ЧС загрязнения воздушной среды Санкт-Петербурга загрязнителями на мезоуровне разработана ранее в рамках гранта РФФИ № 14-01-00733А (2016). Она предполагает качественный анализ возникновения и развития ЧС с использованием искусственного интеллекта по оригинальной модели построения робастной нейронной сети, аппроксимирующей распределение концентраций загрязнителей в регионе по закону Гаусса [12].

Распределение концентраций загрязнителя по Гауссу соответствует нормальному закону:

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

где  $x', y', z'$  — координаты источника эмиссии загрязнителя;

$Q$  — интенсивность эмиссии от источника;

$(u, v, w)$  — составляющие скорости ветра;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  — средние значения квадратичных отклонений концентраций загрязнителя для фиксированного значения времени  $t$  по декартовым осям  $OX, OY, OZ$ :

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

$h$  — протяженность по вертикали приземного слоя воздуха.

Применяя принцип суперпозиции, формулу (1) преобразуем в уравнение для расчета концентрации загрязнителя:

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

Интегрирование по уравнению (3) происходит в области, соответствующей территории региона. Трудоемкие способы вычисления интеграла аналитическим или численным путем заменяем использованием кубатурных формул с представлением интеграла конечной суммой:

$$q(t, x, y, z; u, v, w) = \sum_{i=1}^N C_i \frac{Q \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{(x-ut-x_i)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y-vt-y_i)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z-wt-z_i)^2}{(\sigma_z)^2 t} \right) \right)}{(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (4)$$

где  $C_i$  — значения числовых коэффициентов;

$(x_i, y_i, z_i)$  — координаты «узлов» интегрирования,  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Приближение (4) для концентрации загрязнителя  $q$  рассматриваем как модель искусственной нейронной сети с радиальными базисными функциями, составленными на основе использования «гауссиана» в качестве базисной функции [12]. Настройка весов в нейронной сети линейно и нелинейно входящих аргументов  $C_i$  и  $(x_i, y_i, z_i)$  проводится путем минимизации «функционала ошибки». Записываем последний в дискретной форме [12] как  $J = \sum_{j=1}^p |q(t, \bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j; u, v, w) - q_j(t; u, v, w)|^2$ . Здесь  $\{(\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j)\}_{j=1}^p$  представляет собой множество координат в области  $\Omega$ , для которой, допускаем, известны значения концентраций  $\{q_j\}_{j=1}^p$  загрязнителя, измеренные станциями АСМ.

На локальном уровне (улицы и перекрестки с интенсивным движением АТС, места совместной эксплуатации автомобильного и водного транспорта, прогрев АТС в слабо проветриваемых дворах-колодцах в центральной части города и т. п.) прогнозируются ЧС с количественными оценками ожидаемого превышения концентраций загрязнителя его ПДКМР по обоснованной обобщенной математической модели турбулентной диффузии в стратифицированной атмосфере для неблагоприятных метеорологических условий и квазистационарного режима:

$$u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} - \alpha q, \quad (5)$$

где  $q$  — концентрация изучаемого загрязнителя;

$x, z$  — оси, расположенные соответственно в направлении ветровой нагрузки по горизонтали и вертикали;

$u, w$  — средние значения скорости загрязнителя по горизонтали и вертикали;

$k_x, k_z$  — значения осевых компонент коэффициента конвективного обмена;

$\alpha$  — коэффициент метаболизма веществ, например, химического превращения  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  в атмосфере.

Конкретные практические рекомендации по адаптации оригинальной методологии к частным задачам экстремального загрязнения воздуха на локальном уровне с учетом действующего национального документа Минприроды РФ (приказ № 273 от 06.06.2017) можно найти в авторских работах [1, 3, 8].

## Результаты экспериментально-расчетных исследований

Своеобразным визуальным маркером физического состояния тропосферы в ее нижнем приземном слое, приблизительно до 500–700 м над поверхностью Земли, можно считать наблюдаемый характер истечения дымовых газов из труб городских теплоцентралей (ТЭЦ). На рис. 3–5 показаны последовательные во времени состояния атмосферы, характерные для региона Санкт-Петербурга, зафиксированные автором по истечению дымовых газов из трубы Южной ТЭЦ. Они совмещены во времени с загрязнениями воздуха загрязнителями, рассчитанными по методологии мезоуровня, выражения (1)–(4).

Из диаграммы на рис. 3 видно, что наибольшему загрязнению  $\text{NO}_2$  соответствует область с координатами  $59^\circ 53'$  с. ш. и  $30^\circ 06'$  в. д. (над Финским заливом, рис. 1). Это может быть связано с тем, что при неблагоприятных метеорологических

условиях (инверсии на высотах 50–100 м, отсутствие ветра, дым из трубы стелется над Землей), характерных для утренних часов, над относительно более холодной поверхностью вод Финского залива создается область с низким давлением, в которую вместе с воздушными потоками перетекают поллютанты, в частности,  $\text{NO}_2$  из сопредельных городских районов.

Согласно диаграмме на рис. 4, по мере появления слабого ветра с юго-запада и его усиления происходит вытеснение поллютантов с акватории Финского залива и их накопление в области Центрального района с максимальным уровнем загрязнения  $\text{PM}_{10}$  в области с координатами  $59^\circ 55'$  с. ш. и  $30^\circ 20'$  в. д.

Усиление ветра северо-восточного направления, согласно диаграмме на рис. 5, способствует продолжению накопления поллютантов, в частности,  $\text{NO}$  в Центральном районе с усилением их переноса в Выборгский район и агломерацию Шувалово — Озерки с максимальным загрязнением воздуха в области с координатами  $59^\circ 55'$  с. ш. и  $30^\circ 20'$  в. д.

Проанализированная целостная картина динамики изменения загрязнения воздушной среды поллютантами на мезоуровне в пределах административных границ региона Санкт-Петербург (рис. 3–5) совокупно представляет результат суммации множества процессов загрязнения воздушной среды поллютантами на локальных уровнях. Она дает ценную исходную информацию для актуализации расчетного детализированного прогнозирования загрязнения воздуха на локальном уровне: улицы, перекрестки, места совместной эксплуатации АТС и водного транспорта и т. п.

В качестве такого примера приведем расчетный прогноз опасного воздействия поллютантов на население, жизнедеятельность которого протекает в санитарно-защитной зоне, примыкающей к вантовому Обуховскому мосту (рис. 6), по методологии (5).

Как следует из анализа рис. 6, при вероятном стечении неблагоприятных метеорологических обстоятельств (см. ситуацию к рис. 3 в сочетании с интенсивным движением АТС в часы пик) в санитарной зоне, примыкающей к вантовому мосту, можно ожидать на весь период ЧС превышения концентрации  $\text{NO}_2$  на уровне вдыхания воздуха человеком до трех значений ПДК<sub>мр</sub>. В период навигации близость к мосту грузового и пассажирского терминалов водного транспорта способны в результате совместной эксплуатации АТС и водного транспор-

та увеличить опасность для проживающего населения от поллютанта  $\text{NO}_2$  при вероятных краткосрочных метеорологических ЧС до 6–7 ПДК<sub>мр</sub> [3].

Автором предлагаются следующие меры по снижению вредного воздействия поллютантов транспорта и предприятий промышленности на население Санкт-Петербурга [3]:

- продолжение обновления эксплуатируемого парка на транспорт с силовыми установками 5–6 экологических классов;
  - расширение применения на транспорте малосернистых топлив 4–6 экологических классов;
  - ускорение перевода автомобилей и водного транспорта на природный газ;
  - более широкое использование на внутреннем транспорте гибридных силовых установок с электроприводом;
  - экологическая оптимизация внутренних судовых потоков, интенсивности и режимов эксплуатации автотранспорта на улично-дорожной сети;
  - улучшение качества дорожного покрытия;
  - строительство подземных и надземных переходов на дорогах с интенсивным автомобильным движением;
  - развитие сети кольцевых, дуговых и радиальных скоростных магистралей с безостановочным движением;
  - внедрение на городских ТЭЦ эффективных природоохранных технологий, в частности, фильтрации от аэрозоля и селективной каталитической очистки отходящих дымовых газов.
- Расширение внедрения в Санкт-Петербурге, других крупных городах РФ и странах, дружественного России зарубежья методологии организации экспериментально-расчетного контроля и прогнозирования ЧС загрязнения атмосферы поллютантами транспорта с помощью средств искусственного интеллекта позволит своевременно выявлять такие чрезвычайные ситуации для оперативного и эффективного реагирования на них сил и средств МЧС.

#### Источники

1. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N., Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: Effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates // Transportation research part d-transport and environment. 2016. Vol. 47. P. 251–264. DOI: 10.1016/j.trd.2016.06.008.

2. O'Driscoll R., Stettler M. E. J., Molden N. et al. Real world CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 621. № 15. P. 282–290. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.271.
3. Ложкин В. Н., Ложкина О. В. Информационные процессы в управлении комплексной безопасностью транспорта: стратегическое планирование и моделирование: Монография / под общ. ред. Б. В. Гавкалюка. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. 164 с.
4. Sordyl A., Chlopek Z., Merkisz J. Correlation studies of processes: vehicle velocity, pollutant emissions, and vehicle fuel consumption in the world-wide light-duty test cycle // Transport problems. 2024. Vol. 19. Iss. 2. P. 229–241. DOI: 10.20858/tp.2023.19.2.18165.
5. Fan J. Y., Li A. Y., Ilahi A., Gao K. Emission impacts of left-turn lane on light-heavy-duty mixed traffic in signalized intersections: Optimization and empirical analysis // Heliyon. 2023. Vol. 9. Iss. 5. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16260.
6. Alves C. A., Lopes D. J., Calvo A. I. et al. Emissions from Light-Duty Diesel and Gasoline In-Use Vehicles Measured on Chassis Dynamometer Test Cycles // Aerosol and Air Quality Research. 2015. Vol. 15. P. 99–116. DOI: 10.4209/aaqr.2014.01.0006.
7. Sun H., Owen J. S., Almazmumi S. et al. Pollutant cross-transmission in courtyard buildings: Wind tunnel experiments and computational fluid dynamics (CFD) evaluation // Building and environment. 2024. Vol. 264. № 111919. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111919.
8. Ложкина О. В., Малышев С. А., Халенков А. В. Исследование опасного загрязнения придорожного воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  на примере Санкт-Петербурга // Проблемы управления рисками в технике. 2021. № 2 (59). С. 96–103. EDN: ETSSIG.
9. Valverde V., Kondo Y., Otsuki Y. et al. Measurement of Gaseous Exhaust Emissions of Light-Duty Vehicles in Preparation for Euro 7: A Comparison of Portable and Laboratory Instrumentation // Energies. 2023. № 16. № 2561. DOI: 10.3390/en16062561.
10. 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.
11. Андреева Е. С., Лазарева Е. О., Липовицкая И. Н. Прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха г. Санкт-Петербург при различных синоптических ситуациях: монография. СПб.: Изд-во BBM, 2017. 86 с. EDN: ZUTDAR.
12. Васильев А. Н., Тархов Д. А., Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. 528 с. EDN: QMTVRJ.