

## ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ ПРИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ

Лукьянов С.В.

*ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4), e-mail: sl.73@list.ru*

---

Очаги опасного загрязнения воздушной среды вредными выбросами автотранспорта возникают вблизи автомагистралей в связи с неблагоприятным суммированием целого ряда техногенных и природных факторов, обусловленных техническим состоянием автомобильного транспорта, его составом, интенсивностью движения, ландшафтным рельефом местности, этажностью и характером городской застройки, а также метеорологическими и климатическими параметрами ареала, в котором находится автомагистраль. Ввиду невозможности постановки натурных экспериментов, связанных с мониторингом данных неблагоприятных ситуаций, единственным инструментом оценки вероятных негативных последствий воздействия автотранспорта на население, проживающего вблизи автомагистралей, становятся физико-математические модели. В статье приводится краткое обоснование выбранной физико-математической модели, с помощью которой проводится оценка загрязнения атмосферы вблизи автомагистрали при неблагоприятных ситуациях. Представлены результаты расчетов максимальных приземных концентраций диоксида азота и сажи вблизи КАД Санкт-Петербурга. Правильность выбора модели подтвердили положительные результаты ранее проведенных экспериментальных исследований других авторов, а также сопоставления результатов расчетов с данными инструментального мониторинга воздушной среды автоматическими станциями измерения загрязнения воздуха в г. Санкт-Петербурге при соответствующих метеоусловиях.

---

Ключевые слова: автотранспорт, загрязнение атмосферы.

## ESTIMATION OF POLLUTION OF THE AIR ENVIRONMENT IN A HIGHWAYS VICINITY UNDER ANVERSE METEOLOGIC CONDITIONS

Lukyanov S.V.

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia, (190005, street 2<sup>nd</sup> Krasnoarmejsky, 4), e-mail: sl.73@list.ru*

---

The centers of dangerous pollution of the air environment, harmful blowouts of motor transport arise near to highway, in connection with adverse summation of a variety technogenic and the natural factors caused by technical characteristics of motor transport, its structure, intensity of movement, character of construction of cities, and also meteorological and climatic parameters of area in which there is a highway. Because of impossibility of carrying out of the natural experiments connected with control of given adverse situations, physical and mathematical models become the unique tool of an estimation of probable negative consequences of influence of motor transport on the population which is living near to highway. In article the substantiation of the chosen physical and mathematical model with which help the estimation of pollution of atmosphere close to highway is spent at adverse situations is short. Results of calculations of the maximum concentration of NO<sub>x</sub> and soot nearby St.-Petersburg Ring Road are presented. Correctness of a choice of model has been confirmed with positive results before the spent experimental researches of other authors, and also comparisons of results of calculations to the data of control of the tool of air environment automatic stations of measurement of air pollution in St.-Petersburg at corresponding weather conditions.

---

Key words: motor transport, air pollution.

Очаги опасного загрязнения воздушной среды вредными выбросами автотранспорта возникают вблизи оживленных автомагистралей, в «часы пик», при неблагоприятном стечении метеорологических условий (штиль, инверсия), препятствующих естественной очистке воздуха от автомобильных выбросов.

Для получения достоверных характеристик об уровне загрязнения атмосферы в окрестности автомагистрали при неблагоприятных метеорологических и транспортно-дорожных условиях необходимо проводить многочисленные и достаточно широкомасштабные отборы проб газов и аэрозольных выпадений на протяжении нескольких лет, что требует значительных финансовых затрат [1; 4].

Поэтому данная проблема на практике может быть решена расчётным методом путем построения физико-математической модели эмиссии загрязняющих веществ автотранспортом и их рассеивания в окрестности магистрали. Если расчетные оценки концентраций загрязняющих веществ с использованием обоснованной модели совпадут с результатами измерений концентраций стационарными станциями наблюдения [6], то расчетный метод можно использовать для получения долгосрочных прогнозов, например в связи с развитием транспорта и городской инфраструктуры [5; 8; 9].

Из критического анализа применимости современных подходов моделирования [1–5; 7–9] для решения поставленной специфичной по своей сути экстремальной задачи была выбрана модель, основанная на решении уравнений турбулентной диффузии (массопереноса). В специальной литературе данная модель называется «градиентной» или «К-моделью» [1–3; 7].

Приращение концентрации вредного (загрязняющего) вещества за счёт притока отработавших газов от автотранспорта в точке пространства с координатами  $x, y, z$  определяется по следующему выражению:

$$\Delta C_i^{(x,y,z)} = C_i^0 - C_i^{диф} - C_i^n - C_i^{вым} \pm C_i^{прев}, \quad (1)$$

где  $C_i^0$  – концентрация вредного вещества (ВВ) в отработавших газах;

$C_i^{вым}, C_i^n$  – снижение концентрации вредного вещества за счёт его вымывания или осаждения на подстилающую поверхность;

$C_i^{диф}$  – снижение концентрации ВВ за счёт турбулентной диффузии;

$\pm C_i^{прев}$  – снижение (-) или увеличение (+) концентрации ВВ за счёт химических превращений в атмосфере;

$\Delta C_i^{(x,y,z)}$  – прирост концентрации вредного вещества над фоновым загрязнением атмосферы за счет АТС.

Таким образом, уровень техногенной нагрузки для точки с координатами  $x, y, z$  определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_i^{(x,y,z)} = (C_{i\phi} + \Delta C_i)^{(x,y,z)} / [C_i], \quad (2)$$

где,  $C_{if}^{(x,y,z)}$  – фоновая концентрация ВВ в точке с координатами  $x, y, z$ ;

$[C_i]$  – предельно допустимая концентрация ВВ, ПДК<sub>МР</sub>.

В условиях реальной эксплуатации АТС на автомагистрали имеют место турбулентные потоки в атмосфере, когда количество движения переносится крупнообъёмными движущимися массами воздуха [1; 7].

При описании процессов диффузии в турбулентной атмосфере выделяются средние значения концентраций вредных веществ и пульсационные отклонения от них наряду со средними величинами и флуктуациями скоростей движения воздуха. Применяя приёмы усреднения, осуществляется переход от уравнения диффузии для мгновенных концентраций к уравнению турбулентной диффузии для средних значений концентраций. В общем виде изменения средних значений концентраций описываются уравнением [1; 7]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} - \alpha q, \quad (3)$$

где  $x$  и  $y$  – оси, расположенные в горизонтальной плоскости;

$z$  – ось по вертикали;

$t$  – время;

$u, v, w$  – составляющие средней скорости перемещения вредных веществ соответственно по направлению осей  $x, y, z$ ;

$k_x, k_y, k_z$  – горизонтальные и вертикальная составляющие коэффициента обмена;

$\alpha$  – коэффициент, определяющий изменение концентрации за счёт превращения примеси.

В конкретно решаемой задаче уравнение (3) упрощается. Принимается установившийся процесс  $\frac{\partial q}{\partial t} = 0$ .

Если ось  $x$  ориентировать в направлении ветра, то  $v = 0$ . Вертикальные движения в атмосфере над однородной горизонтальной подстилающей поверхностью малы и, следовательно, могут не учитываться. Для лёгких частиц, не имеющих собственной скорости осаждения, можно принять  $w = 0$ . При наличии ветра можно пренебречь членом, учитывающим диффузию по оси  $x$ , поскольку в этом направлении диффузионный поток значительно меньше конвективного. Таким образом, при установившейся диффузии после отмеченных упрощений уравнение (3) приобретает вид [1; 7]:

$$u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} - \alpha q. \quad (4)$$

В уравнении (4) для примеси, не имеющей собственной скорости осаждения ( $w = 0$ ), второй член в левой части исчезает, для случая сохраняющейся примеси ( $\alpha = 0$ ) исчезает и последний член правой части. При наличии в атмосфере вертикальных токов член  $w \frac{\partial q}{\partial z}$  приобретает иной смысл, поскольку включает вертикальную составляющую скорости движения. В условиях сложного рельефа, когда направление ветра не горизонтально, необходимо учитывать и член  $\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x}$ .

Граничные условия на бесконечном удалении от источника (автомагистрали) принимаются в соответствии с естественным предположением о том, что при этом концентрация убывает до нуля:

$$q \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow \infty \quad (5)$$

$$q \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad |y| \rightarrow \infty \quad (6)$$

При формулировке граничного условия на подстилающей поверхности необходимо выделить случаи, когда примеси распространяются над поверхностью, поглощающей их (например, водная поверхность), и поэтому концентрация непосредственно у её поверхности равна нулю, т.к.

$$q \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow 0 \quad (7)$$

С поверхностью почвы примеси взаимодействуют относительно слабо. Попадая на поверхность почвы, примеси могут не накапливаться на ней, а с турбулентными вихрями снова устремляться в атмосферу. Для упрощения задачи принимается, что средний турбулентный поток примеси у земной поверхности мал, т.е.

$$k_z \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z = 0. \quad (8)$$

При исследовании переноса выбросов вредных веществ ОГ в атмосфере необходимо определить момент времени, по истечении которого рассматриваемый процесс приобретает стационарный характер. Аналогично [1; 7] для описания концентрации вредных веществ от мгновенного источника используется уравнение:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} k_z \frac{\partial S}{\partial y} \quad (9)$$

с граничными условиями:

$$k_z \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z = 0$$

$$S = 0 \quad \text{при } z \rightarrow \infty \text{ и } |y| \rightarrow \infty.$$

Для мгновенного источника мощностью  $M$  в точке  $x = 0$ ,  $y = 0$ , и  $z = H$  в качестве начального условия принимается:

$$S = M\delta(x)\delta(y)\delta(z - H) \quad \text{при } t = 0. \quad (10)$$

Источник вредных выбросов можно в общем случае рассматривать как источник конечного времени действия. Используя принцип суперпозиции и полагая для упрощения скорость ветра  $u$  постоянной, получаем, что к моменту времени  $t$  концентрация  $S$  от источника, действующего в течение периода  $Tu$ , будет определяться соотношением:

$$S = \int_0^{Tu} q(t - \xi, y, z)\delta[x - u(t - \xi)]d\xi. \quad (11)$$

Из этого соотношения в силу свойств  $\delta$  – функции следует, что

$$S = q\left(\frac{x}{u}, y, z\right) \quad \text{для } t \geq \frac{x}{u}. \quad (12)$$

При этом  $q$  удовлетворяет уравнению для установившегося состояния (4) при  $\left[\frac{\partial q}{\partial z}\right]_{z=0} = 0$ . Следовательно, стационарный режим достигается в данном случае при  $t \geq \frac{x}{u}$ .

Как правило, время наблюдения  $t$  после начала действия источника больше времени, необходимого для прохождения примеси до точки наблюдения, определяемого соотношением  $\frac{x}{u}$ . Поэтому достаточно ограничиться получением решения для установившихся условий.

Принимая направление ветра по оси  $x$  и учитывая выше приведённые рассуждения, для определения концентрации вредных выбросов в точке пространства с координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для открытой местности принимаем выражение [1]:

$$C_f(x, y, z) = \frac{2K_M \cdot Q_{OG}}{\pi \cdot S_{u_y} \cdot S_{u_z} \cdot u \cdot x^{2-n}} \exp\left[-\frac{1}{x^{2-n}} \left(\frac{y^2}{S_{u_y}^2} + \frac{(z+H)^2}{S_{u_z}^2}\right)\right], \quad (13)$$

где  $K_M$  – коэффициент турбулентной вязкости.

Для скорости ветра  $u = 5$  м/с на высоте 2 метров он определяется [1; 7]:

$$K_m = k \cdot \bar{u}_x \cdot z \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\beta-1}, \quad (14)$$

где  $k$  – постоянная Кармана (принято  $k = 0,4$ ), учитывающая длину смещения;

$\beta$  – адиабатический градиент,  $\beta = 1,0$ ;

$z_0$  – коэффициент шероховатости;

$\bar{u}_x$  – скорость трения.

Значения  $z_0$  и  $u_x$  зависят от вида подстилающей поверхности и табулированы. Коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии определяются по следующим выражениям:

$$S_{u_y}^2 = 4 \cdot \nu^n \cdot \left( \frac{v'^2}{u^2} \right)^{1-n} / \left[ (1-n)(2-n) \bar{u}^n \right], \quad (15)$$

$$S_{u_z}^2 = 4 \cdot \nu^n \cdot \left( \frac{w'^2}{u^2} \right)^{1-n} / \left[ (1-n)(2-n) \bar{u}^n \right], \quad (16)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость движущегося воздуха;

$n$  – параметр, числовые значения которого изменяются между 0 и 1 в зависимости от устойчивости атмосферы. При сильной неустойчивости  $n = 0,2$ ; при нейтральных условиях – 0,25, для умеренной инверсии – 0,33 и для сильной инверсии  $n = 0,5$  [1; 7]. На высоте от 0 до 10 м от уровня земли величины коэффициентов не превышают [1]:  $Su_y = 0,21$ ;  $Su_z = 0,10$ .

При достаточно высокой интенсивности движения автотранспорта концентрация  $f$ -го компонента ОГ определяется, как для случая линейного источника [7].

$$C_f(x) = \frac{K_M \cdot C_f \cdot 8,296 \cdot 10^{-3} \cdot G_i \cdot T_o (\alpha + 0,0675)}{\pi^{1/2} \cdot Su_z \cdot \bar{u} \cdot x^{1-n/2} \cdot P_o}. \quad (17)$$

Как следует из анализа выражения (17), концентрация вредных веществ у поверхности земли зависит от направления и скорости ветра, устойчивости атмосферы, расстояния до источника выброса, начальной концентрации вредного вещества. Следует иметь в виду, что в случае линейного источника необходимо учитывать интенсивность движения автотранспорта и его скорость.

При стилизации объектов автотранспортной инфраструктуры в формы линейных источников (автомагистраль) модель расчета полей концентраций может быть сведена к упрощенной эмпирической формуле, полученной сотрудниками ГГО им А.И. Воейкова на основе многолетних исследований (документ ОНД-86) [5], анализ применимости которой приводится в работе [4].

Известно, что подход М.Е. Берлянда применим только при условии, что размер облака выброса больше, чем размер доминантной турбулентности. Вообще, все модели, построенные на решении уравнения турбулентной диффузии, наиболее применимы к

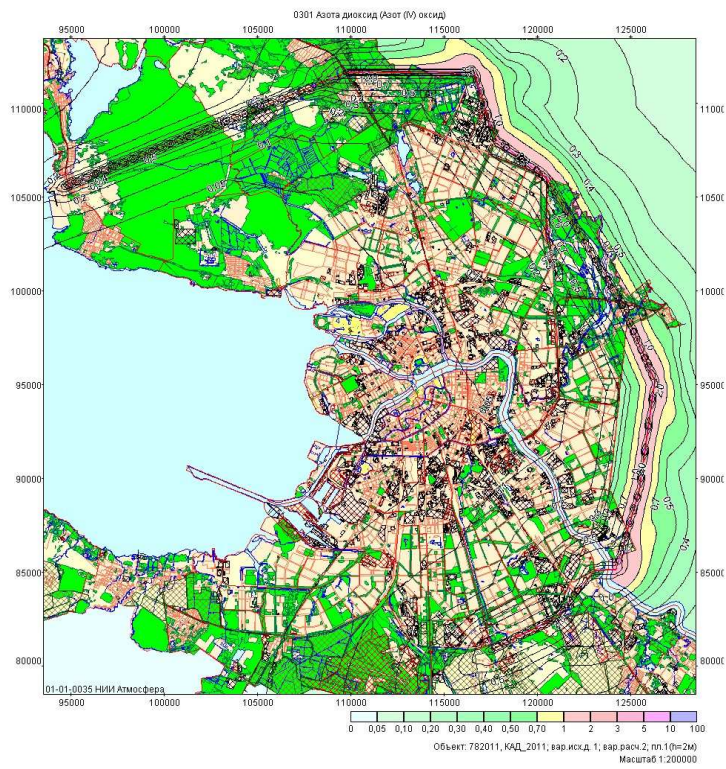
описанию вертикальной диффузии у поверхности земли на расстояние не более 10 км от источника, что приемлемо для автомагистралей.

Модель на основе уравнений турбулентной диффузии позволяет на единой основе решать задачи прогнозирования загрязнения воздуха вблизи автомагистрали и при этом учесть застройку, рельеф местности, время осреднения (разовые, годовые), фотохимические реакции, метеоусловия (нормально неблагоприятные и аномально неблагоприятные).

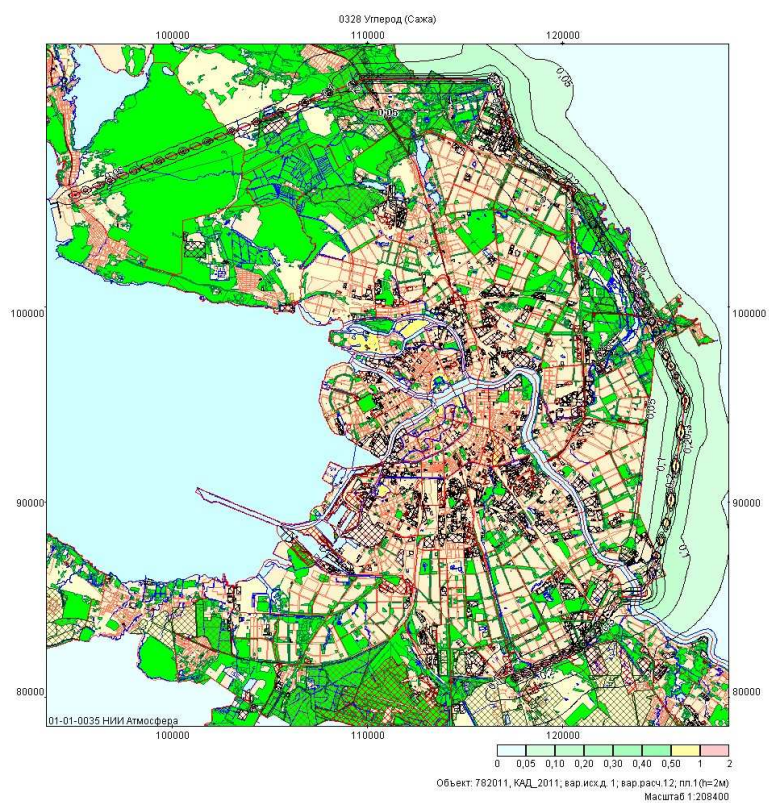
Очевидно, что для получения достоверных результатов расчетного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха требуется реальная и одновременно полная (по структуре транспортных средств) информация о мощности выбросов и ее распределения по автомагистрали, причем в наиболее опасные по времени суток часы пик.

Эта задача решается путем непосредственного инструментального наблюдения за интенсивностями движения и структурным распределением транспортных средств по характерным группам и экологическим классам. При этом выбросы определяются с учетом специального технического регламента «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории РФ, вредных (загрязняющих) веществ», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 609 от 12 октября 2005 года.

В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены выполненные с непосредственным участием автора экспериментально-расчетные исследования загрязнения  $\text{NO}_2$  и сажей вблизи КАД Санкт-Петербурга.



**Рис. 1. Карта вероятного загрязнения атмосферы  $\text{NO}_2$  в окрестности КАД Санкт-Петербурга.**



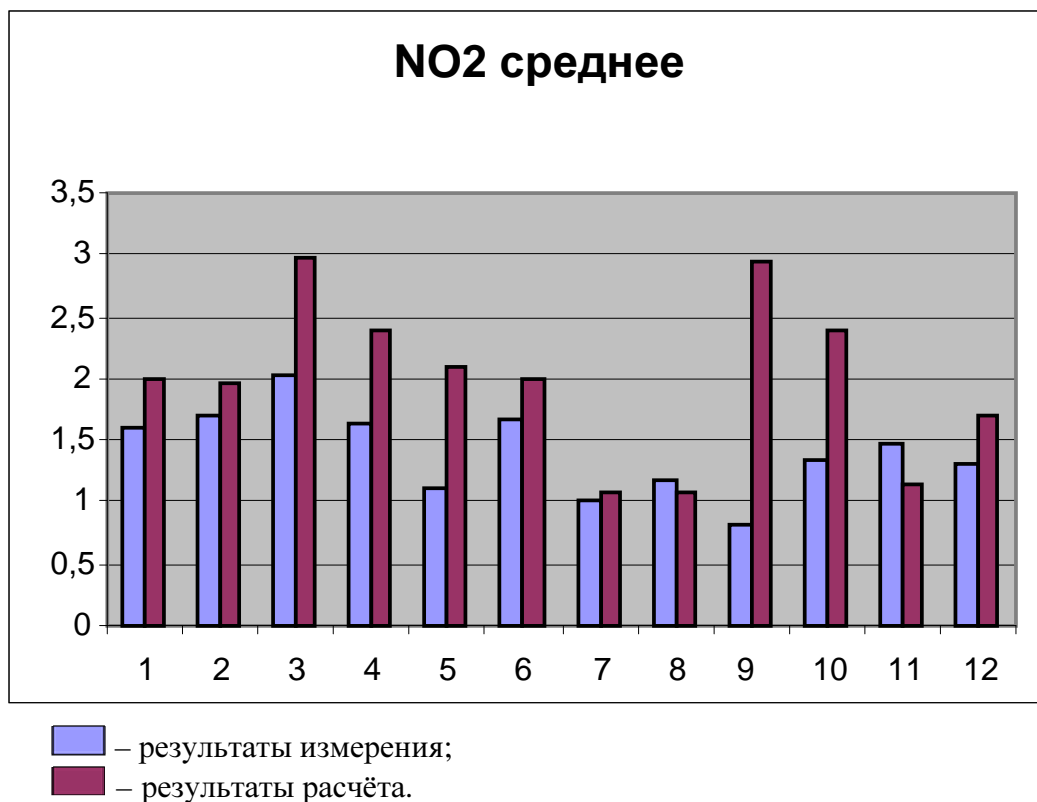


**Рис. 2. Карта вероятного загрязнения атмосферы сажей в окрестности КАД Санкт-Петербурга.**

На рисунках показаны результаты расчетов максимальных приземных концентраций, которые наносились на карту города в форме изолиний превышения концентраций над ПДК<sub>МР</sub>.

Из анализа карт загрязнения воздушной среды вредными выбросами АТС на КАД Санкт-Петербурга можно сделать следующие выводы: при неблагоприятных метеорологических условиях и интенсивностях движения АТС, характерных для часов пик, вероятно существенное превышение концентраций диоксида азота NO<sub>2</sub> относительно ПДК<sub>МР</sub> до 2–2,5 раз, в отдельных очагах до 10 и выше раз. По саже загрязнение воздуха составляет величину до 0,5 ПДК<sub>МР</sub>, в отдельных очагах до 1–2 ПДК<sub>МР</sub>.

Правильность выбора основополагающей математической модели для оценки загрязнения воздуха выбросами автотранспорта подтвердили положительные результаты ранее проведенных экспериментальных исследований других авторов [7], а также сопоставления результатов расчетов с данными инструментального мониторинга воздушной среды автоматическими станциями измерения загрязнения воздуха (АСИЗВ) в г. Санкт-Петербурге при соответствующих метеоусловиях [6].



**Рис. 3. Сравнительный анализ данных расчета и измерений превышения ПДК<sub>МР</sub>.**

Применение численных методов расчета воздействия автотранспорта на городскую среду с использованием данных непосредственных наблюдений интенсивностей и структуры потоков на автомагистралях, сочетающих наиболее сильные отечественные и зарубежные модели, позволит более взвешенно принимать управленческие решения и неотложные меры по улучшению экологической ситуации крупных городов.

### **Список литературы**

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
2. Буренин Н.С., Оникул Р.И., Соломатина И.И. К оценке выбросов автотранспорта в атмосферу и загрязнения воздуха вблизи автомагистралей // Труды ГГО. – 1997. – Вып. 436. – С. 102-110.
3. Ложкин В.Н., Артамонов В.С., Баскин Ю.Г. К вопросу управления риском биоэкологического воздействия автомобильного транспорта на население крупного города // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД. – 2000. – № 4 (8). – С. 110-116.
4. Ложкин В.Н., Медейко В.В. Модели оценки экологического ущерба, применяемые в Российской Федерации, США и странах ЕС при государственном регулировании воздействия транспортных средств на окружающую среду // Информационный бюллетень № 2 (32) «Вопросы охраны атмосферы от загрязнения» / НПК «Атмосфера» при ГГО им. А.И. Воейкова. – СПб., 2005. – С. 103-116.
5. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.
6. Сорокин Н.Д. Система мониторинга атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге // Доклад на IV Междунар. науч.-практ. конф. «Автотранспорт: от экологической политики до повседневной практики», VIII Междунар. экол. форум 20-21 марта 2008 г. – СПб., 2008.
7. Berlyand M.E., Burenin N.S., Genihovich E.L. Experimental investigation of atmospheric pollution due to motor vehicles. Proc. Sov. American. Symp on mobile sources of air pollution. – St. Petersburg, 1992. – V. 1. – P.105-121.
8. Kukkonen J., Härkönen J., Walden J. Evaluation of the dispersion model CAR-FMI against data from a measurement campaign near a major road // Atmospheric Environment. – 2001. – V. 35/5. – P. 949-960.

9. Uliasz M., Stocker R.A. and Pielke R.A. Regional modelling of air pollution transport in the south-western USA. (In:) Zannetti P. (ed.), Environmental Modelling vol. III Comput. Mech. Public., Southampton, 1996.

**Рецензенты**

Добромиров В.Н., д.т.н., профессор, директор Института БДД СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург.

Шульгин В.В., д.т.н., старший научный сотрудник, профессор кафедры «Технология обслуживания транспортных средств» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики», г. Санкт-Петербург.