

---

---

# СНИЖЕНИЕ РИСКОВ И ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧС

---

---

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И ОПАСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПМ<sub>10</sub> И ПМ<sub>2,5</sub> С УЧЕТОМ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

**В.Н. Ложкин, доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки Российской Федерации;  
А.Ю. Пенченков;  
Б.В. Гавкалюк, кандидат технических наук.  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Приведены данные измерений содержания высокотоксичных C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>, Pb, Cd, Ni, Cr в пробах сажи пожарного автомобиля КамАЗ. Обоснованы физическая и математическая модели прогноза санитарно-гигиенического загрязнения воздуха ПМ<sub>10</sub> и ПМ<sub>2,5</sub>, с учетом их химического состава, на магистрали в чрезвычайных транспортных и метеорологических условиях.

*Ключевые слова:* транспорт, твердые частицы, химический состав, городская магистраль, чрезвычайная ситуация, модель, прогноз

## PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF EDUCATION, EMISSIONS AND EXPOSURE, TAKING INTO ACCOUNT THE CHEMICAL COMPOSITION OF PM<sub>10</sub> AND PM<sub>2,5</sub> IN EMERGENCY CONDITIONS ON THE HIGHWAY

V.N. Lozhkin; A.Yu. Penchenkov; B.V. Gavkalyuk.  
Saint Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The content of highly toxic C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>, Pb, Cd, Ni, Cr was measured in soot samples of the KamAZ fire engine. A physical and mathematical model for predicting sanitary and hygienic air pollution on the highway PM<sub>10</sub> and PM<sub>2,5</sub> is substantiated taking into account their chemical composition under adverse meteorological conditions.

*Keywords:* transport, solid particles, chemical composition, city highway, emergency, model, forecast

В крупных городах транспортные выбросы вредных (загрязняющих атмосферу) твердых частиц (particulate matter) размером до 10 мкм (ПМ<sub>10</sub>) и до 2,5 мкм (ПМ<sub>2,5</sub>) при неблагоприятных транспортно-метеорологических условиях могут создавать локальные

территориально-временные чрезвычайные ситуации (ЧС) сверх нормативного санитарно-гигиенического уровня воздействия на население, проживающего в окрестности транспортных коммуникаций [1, 2].

В зарубежной специальной литературе, в зависимости от специфики опасных свойств и химического состава субстрата твердых частиц, можно встретить такие его наименования, как [3]: черный углерод (black Carbon), элементарный углерод (Elemental Carbon), органический углерод (Organic Carbon), вторичный органический аэрозоль (Secondary organic Aerosol), общий углерод (Total Carbon=Organic Carbon+Elemental carbon).

Санитарно-гигиеническая опасность твердых частиц для человека [3] связана с поражением частицами кардиореспираторной системы человека, состоящей из сердечно-сосудистой системы и системы дыхания. Чем мельче частицы, тем глубже они проникают в тело человека. Частицы  $PM_{10}$  беспрепятственно проходят через щетину волосков носоглотки и по дыхательным путям попадают в легкие человека. Их металлические элементы окисляют клетки легких, повреждают их ДНК, увеличивая риск рака; приводят к хроническим заболеваниям легких.

Доказано, что частицы  $PM_{2,5}$  проникают глубже, в альвеолы (воздушные мешочки) легких, пронизанные капиллярными сосудами, через стенки которых происходит обмен кровотока кислородом и углекислым газом [3]. Блокируя нормальный клеточный метаболизм, частицы  $PM_{2,5}$  воспаляют и сужают кровеносные сосуды, сгущают жировой налет, повышают артериальное давление, приводят к образованию сгустков (тромбов). Это может блокировать приток крови к сердцу и мозгу, и, со временем, привести к инсульту и инфаркту миокарда. Современными исследованиями [2] подтверждается связь  $PM_{2,5}$  с понижением когнитивной функции (старения) мозга, его нейронной коммуникативной функции обмена информацией из-за воспаления мозгового белого вещества (болезней Альцгеймера и деменции – приобретенного слабоумия).

Аналогично зарубежной практике контроля твердых частиц [3], постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 19 апреля 2010 г. № 26 было введено в действие Дополнение № 8 к ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест», которым установлены ПДК для взвешенных частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  (табл.) [2].

Таблица. Значения предельно допустимых концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$

№ п/п	Наименование вещества	Величина ПДК (мг/м <sup>3</sup> )		
		максимальная разовая	среднесуточная	среднегодовая
1	Взвешенные частицы $PM_{10}$	0,3	0,06 <sup>*)</sup>	0,04
2	Взвешенные частицы $PM_{2,5}$	0,16	0,035 <sup>*)</sup>	0,025

<sup>\*)</sup> 99-я процентиль

Однако нормируемая в установленном порядке опасность твердых частиц не учитывает их химический состав. Проведенные одним из авторов настоящей статьи исследования [4] показали, что частицы сажи  $PM_{2,5}$ , выбрасываемые в атмосферу с отработавшими газами (ОГ) дизелей, адсорбируют в порах бензо(а)пирен ( $C_{20}H_{12}$ , далее – БП) – самое опасное вещество по шкале Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [2, 3].

Для доказательства актуальности моделирования чрезвычайно опасного воздействия твердых частиц с учетом их химического состава в период с 18 января 2019 г. по 7 февраля 2019 г. на базе ФГБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений

по Центральному федеральному округу» (Воронежский филиал) были проведены экспериментальные исследования по оценке химического состава проб дизельной сажи, взятых из выпускной трубы пожарного автомобиля с дизельным двигателем КамАЗ. Пробы отбирались по методике ПНД Ф 12.1:2:2:2:2:3:3:2-03.

Исследования показали присутствие в пробах значительного количества не только БП, но и тяжелых металлов. Измерения, выполненные по методике ПНД Ф 16.1:2:2:2:2:3.39-03, показали наличие в пробах БП до  $0,015 \pm 0,006$  мг/кг. Измерения, выполненные по методике ПНД Ф 16.3.24-2000, показали наличие в пробах высокотоксичных металлов: свинца до  $17,5 \pm 3,7$  мг/кг; кадмия до  $0,5 \pm 0,2$  мг/кг; никеля до  $104 \pm 48$  мг/кг; хрома до  $156 \pm 28$  мг/кг.

Для моделирования физического процесса образования ПМ<sub>10</sub> и ПМ<sub>2,5</sub> сажи одним из авторов статьи был разработан метод [4], который он назвал «оптическим или лазерным индицированием» и применил его, впервые в мире, в 70-х гг. для изучения динамики процесса образования сажи и важнейшей для физического моделирования его протекания характеристики – температуры, развиваемой, непосредственно, в локальных областях дизельного пламени, в которых и происходит пиролиз топлива.

Для моделирования физических условий формирования локальных ЧС сверх нормативного загрязнения твердыми частицами воздуха непосредственно на магистралях (как источниках эмиссии) были проведены серии непрерывных измерений РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>2,5</sub> при движении в потоке автотранспорта и измерений на тротуарах магистралей Санкт-Петербурга с движущимся автотранспортом. Для этого был использован оптический метод косвенного измерения концентрации частиц дизельной сажи лазерной спектрометрии с детектированием рассеянного света прибором DUCTTRAK, модель 8530 (изготовитель TSI Incorporated USA) [2].

Математическая модель реализуется в два этапа.

На первом этапе модель накопления твердых частиц на магистрали протяженности  $L$  (км) в результате их эмиссии от потока дизельного автотранспорта (по пяти учетным группам: легковые, автофургоны и микроавтобусы до 3 500 кг, грузовые от 3 500 до 12 000 кг, грузовые свыше 12 000 кг, автобусы свыше 3 500 кг), по формуле:

$$M_{L_i} = \frac{L}{1200} \sum_1^x M_{k,i}^L \cdot G_k \cdot r_{V_{k,i}}, \quad \text{г/с}$$

где  $M_{k,i}^L$ , г/км – удельный пробеговый выброс твердых частиц сажи автомобилями  $k$  группы [5];  $x=5$  – количество групп автотранспорта;  $G_k$ , 1/час – фактическая наибольшая интенсивность движения автомобилей  $k$  группы, проходящих через фиксированное сечение магистрали в обоих направлениях по всем полосам движения (за 20 мин наблюдений) [5];  $r_{V_{k,i}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения автомобилей ( $V_{k,i}$ , км/час) на магистрали, определяемый по методике [5].

На втором – модель диффузии твердых частиц от магистрали в часы пик при неблагоприятных метеорологических условиях. Разработана авторами в творческом содружестве с Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова и НИИ «Атмосферного воздуха» (Санкт-Петербург), как реализация, в зависимости от конкретных задач (перекресток, магистраль, элемент улично-дорожной сети, город, метеорологические условия и т.п.) [1, 2, 5, 6], численных решений уравнения атмосферной диффузии, которое для средних значений концентраций ПМ ( $q$ ) представляется выражением:

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

где  $x$  и  $y$  – оси расположенные в горизонтальной плоскости;  $z$  – ось по вертикали;  $t$  – время;  $u, v, w$  – составляющие средней скорости витания твердых частиц в стратифицированной атмосфере, соответственно, в направлениях осей  $x, y, z$ ;  $k_x, k_y, k_z$  – горизонтальные и вертикальная составляющие коэффициента обмена;  $\alpha$  – коэффициент, определяющий изменение концентрации за счёт физических процессов коагуляции и гравитационного оседания, вымывания частиц сажи осадками, оседания их на почве, поверхности водоемов, объектов инфраструктуры, зданий и т.п.

Задача решается с использованием программы «Эколог 4» НПФ «Интеграл» (Санкт-Петербург); с элементами нейронных сетевых математических аппроксимаций результатов и обучения моделей гетерогенными данными измерений автоматизированной системы мониторинга (АСМ) [1, 2] (работает в режиме «онлайн») Комитета по охране окружающей среды и природопользования Правительства Санкт-Петербурга.

На рисунке, в качестве примера практической реализации разработанного метода, показана вероятная карта загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга  $PM_{2,5}$  дизельной сажи ОГ двигателей транспортных средств.

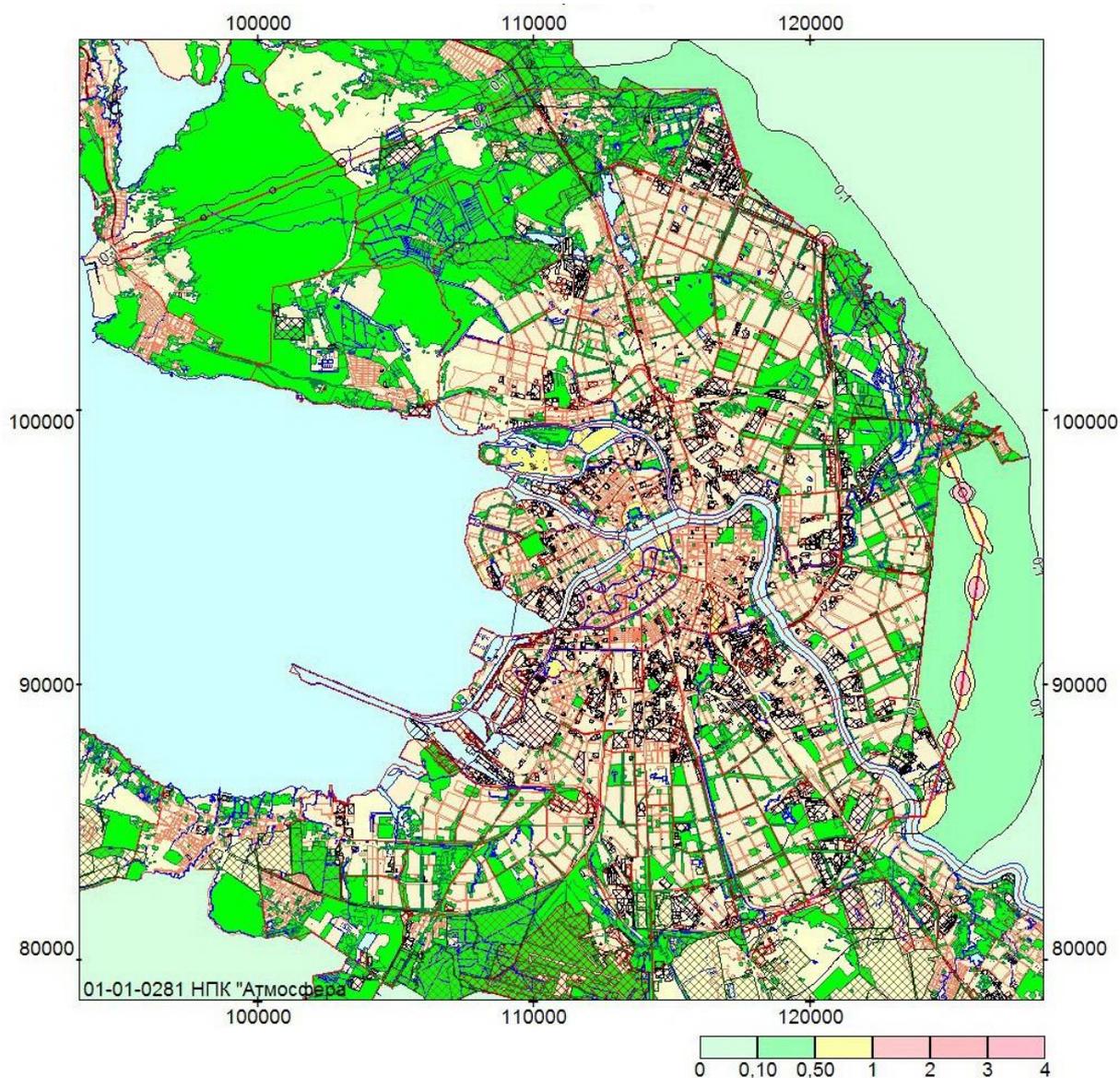


Рис. Карта ожидаемого загрязнения воздуха  $PM_{2,5}$  сажи дизельных автомобилей при неблагоприятных метеорологических условиях (Санкт-Петербург, 2017 г., в долях ПДК<sub>МР</sub>)

Расчеты выполнены для сочетания неблагоприятных транспортных («часы пик») и метеорологических условий, способствующих накоплению  $PM_{2,5}$  (слабая ветровая нагрузка, наличие инверсий) в приземном слое атмосферы на уровне дыхания человека. Анализ данных рисунка показывает, что при неблагоприятных условиях, вероятно, ожидать в окрестности оживленных городских транспортных артерий локальных мест загрязнения воздуха до уровня  $2,5 PDK_{MP}$ .

Принимая во внимание значение ПДК для БП в воздухе населенных мест ( $PDK_{CC}=0,1 \text{ мкг}/100\text{м}^3$ ) и, ранее отмеченное, измеренное содержание в твердых частицах дизельной сажи БП (до  $0,015 \text{ мг}/\text{кг}$ ), нетрудно сосчитать, что при ожидаемых в ЧС локальных территориально-временных превышениях ПДК дизельной сажи (до  $2,5$  раз) – вероятное превышение ПДК только от эмиссии БП в составе частиц дизельной сажи  $PM_{2,5}$ , будет до  $20$  раз. Такие локальные ЧС, конечно, могут представлять серьезную опасность для населения, проживающего в окрестности оживленных автомагистралей, поскольку, по данным ВОЗ [3], превышение фонового содержания в воздухе БП является для человека опасным.

Выводы:

1. Предложена оригинальная физико-математическая модель, позволяющая прогнозировать загрязнения воздуха твердыми частицами дизельной сажи  $PM_{2,5}$  в окрестности оживленных автомагистралей при неблагоприятных чрезвычайных транспортно-метеорологических условиях, с учетом их химического состава.

2. Проведением измерений содержания БП в частицах сажи пожарного автомобиля КамАЗ и расчетного исследования по разработанной модели (численного эксперимента) показано, что при таких ЧС можно ожидать локальные превышения ПДК по дизельной саже до  $2,5$  раз, а, соответствующие этим условиям, превышения ПДК по БП, содержащемуся только в  $PM_{2,5}$  дизельной сажи, до  $20$  раз.

3. Целесообразно продолжить исследования по изучению вероятности возникновения локальных ситуаций чрезвычайного санитарно-гигиенического воздействия  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  на население, проживающее в окрестности оживленных автомагистралей, с учетом химического состава твердых частиц.

### Литература

1. Lozhkin V., Lozhkina O., Dobromirov V. A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of Saint Petersburg / Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018) // Transportation Research Procedia 36 (2018). P. 453–458.

2. 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 / O.V. Lozhkina [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 772. № 1.

3. Introducing the Air Quality Life Index Twelve Facts about Particulate Air Pollution, Human Health, and Global Policy By Michael Greenstone and Claire Qing Fan, Energy Policy Institute at the University of Chicago, November 2018.

4. Ложкин В.Н. Исследование динамики и термических условий сажевыделения при сгорании распыленного топлива в цилиндрах дизелей: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1978. 172 с.

5. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (доп. и перераб.). СПб., 2012.

6. Sofiev M., Genikhovich E., Keronen P., Vesala T. (2010). Diagnosing the surface layer parameters for dispersion models within the meteorological-to-dispersion modeling interface // J. Appl. Meteor. Climatol. V. 49. Iss. 2. p. 221–233. Doi: 10.1175/2009JAMC2210.

## References

1. Lozhkin V., Lozhkina O., Dobromirov V. A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of Saint Petersburg / Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018) // Transportation Research Procedia 36 (2018). P. 453–458.
2. Motor transport related harmful PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub>: from on-road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level / O.V. Lozhkina [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 772. № 1.
3. Introducing the Air Quality Life Index Twelve Facts about Particulate Air Pollution, Human Health, and Global Policy By Michael Greenstone and Claire Qing Fan, Energy Policy Institute at the University of Chicago, November 2018.
4. Lozhkin V.N. Issledovanie dinamiki i termicheskikh uslovij sazhevydeleniya pri sgoranii raspynnogo topliva v cilindrah dizelej: dis. ... kand. tekhn. nauk. L.: LPI, 1978. 172 s.
5. Metodicheskoe posobie po raschetu, normirovaniyu i kontrolyu vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferyj vozduh (dop. i pererab.). SPb., 2012.
6. Sofiev M., Genikhovich E., Keronen P., Vesala T. (2010). Diagnosing the surface layer parameters for dispersion models within the meteorological-to-dispersion modeling interface // J. Appl. Meteor. Climatol. V. 49. Iss. 2. p. 221–233. Doi: 10.1175/2009JAMC2210.