

Система оценки загрязнения атмосферного воздуха в условиях городской среды

Р. А. Мышко¹, Н. И. Куракина², Р. А. Бурдин³

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

RomanMyshko@gmail.com¹, NKurakina@gmail.com², Rodiogch@gmail.com³

Аннотация. Работа посвящена созданию системы оценки экологического воздействия дорожно-автомобильного комплекса на загрязнение воздуха в городах. В соответствии с разработанными теоретическими основами создано программно-алгоритмическое обеспечение геоинформационной системы моделирования, включающее модули подготовки исходных данных, построения пространственной модели дорожной сети, расчёта величин эмиссии, производимых потоками автотранспорта и моделирования распространения концентрации каждого загрязняющего вещества. Создана цифровая модель автотранспортного загрязнения жилых территорий г. Санкт-Петербург. Разработанная система может быть использована в качестве эффективного инструмента при решении задач городского планирования и повышения комфортности городской среды в рамках реализации программы стратегического развития г. Санкт-Петербург.

Ключевые слова: моделирование загрязнения окружающей среды; ГИС; загрязнение воздуха; дорожный транспорт; экологическая безопасность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферного воздуха является одним из наиболее опасных факторов, воздействующих на здоровье людей. В соответствии с отчётом об экологической ситуации в Санкт-Петербурге за 2022 год число транспортных средств в городе увеличилось на 14% за последнее десятилетие, а суммарная эмиссия загрязняющих веществ, связанных с эксплуатацией автотранспорта за год, выросла на 3%. Автомобильно-дорожный комплекс в крупных городах является основным источником эмиссии загрязняющих веществ, включая канцерогенные твёрдые частицы. По этой причине задачи оценки и принятия решений, направленных на минимизацию загрязнения атмосферного воздуха в городах, являются актуальными.

Анализ существующих моделей рассеяния показал, что зарубежные модели в значительной степени не учитывают российскую нормативную базу, связанную с оценкой загрязнения, не могут применяться в чистом виде и требуют значительной адаптации для применения в условиях российских городов [1]. В то же время в моделях в недостаточной степени учитывается загрязнение воздуха, связанное с эмиссией твёрдых частиц в результате износа самих транспортных средств (протекторов шин, тормозной системы) и дорожного полотна [2]. В силу указанных выше причин возникает задача создания принципиально новых подходов к моделированию загрязнения воздуха, предполагающих

создание пространственной модели, которая позволила бы определить территории г. Санкт-Петербург, наиболее подверженные загрязнению воздуха.

II. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ДОРОЖНОЙ СЕТИ

Одной из важнейших задач при разработке системы оценки распространения загрязнений, производимых дорожно-автомобильным комплексом, является организация структуры исходных данных. Среди факторов, влияющих на эмиссию загрязнителей, наибольшее влияние оказывают характеристики трафика, по этой причине именно характеристики трафика являются основой для формирования структуры данных. В работе предлагается использовать метод разбиения дорожной сети на элементарные участки – дорожные перегоны. Дорожный перегон представляет собой участок дороги, для которого можно считать условно постоянными совокупность конструктивных характеристик, а также характеристики трафика.

Благодаря разбиению дорог на перегоны в значительной степени упрощается процедура формирования унифицированной структуры источников загрязнения. Становится возможным применение нормативных квазиэмпирических моделей рассеяния для оценки воздействия автотранспорта на атмосферный воздух городов [3]. К факторам, учитываемым при разбиении дорожной сети на перегоны, относятся изменения геометрии дорожной сети, статические и динамические характеристики дорожного перегона, влияющие на характеристики трафика. Для каждого направления движения задаётся отдельный перегон. Для каждого перегона определяется кортеж параметров в соответствии с рассмотренными ранее характеристиками:

$$R_i = \{L, H, C, Z, N_p, W_p, V, P_b, T, G_I \dots G_V, S_I \dots S_V, P_c, N_c\},$$

где L – протяжённость перегона, км; H – средняя высота перегона относительно уровня земли, м; C – тип дорожного покрытия; Z – характер изоляции перегона; N_p – число полос движения; W_p – ширина полосы, м; V – средняя скорость автотранспорта, км/ч; P_b – степень загруженности трафика, балл; T – рассматриваемый период времени, мин; G – соответственно интенсивности движения за период T ; S – соответственно числа остановок транспортных средств на конце перегона за период T ; P_c – продолжительность цикла остановки транспортных средств, мин; N_c – количество циклов остановки транспортных средств за период T ; $I \dots V$ – типы транспортных средств.

Помимо перегонов, модель включает объекты локальной неоднородности транспортного потока. К объектам локальной неоднородности относятся дорожные объекты, за исключением тех, которые являются границами перегонов (пешеходные переходы, железнодорожные переезды). В соответствии с разработанными критериями деления дорожной сети коротким параметром перегонов и объектов локальной неоднородности транспортного потока реализован алгоритм разделения дорожной сети на перегоны и построена пространственная модель дорожной сети [4].

III. РАСЧЁТ МАССОВЫХ ВЕЛИЧИН ЭМИССИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Расчёт массовых величин эмиссии загрязняющих веществ осуществляется в соответствии с ранее разработанным алгоритмом [3] и пространственной моделью дорожной сети. Процедура расчета эмиссии загрязняющих веществ регулируется ГОСТ Р 56162-2019 [5]. Величина эмиссии загрязняющего вещества M_i , г/с потоком транспортных средств, движущимся по перегону протяженности L , км определяется следующим образом:

$$M_i = \frac{L}{T \cdot 60} \sum_{k=1}^k M_{k,i}^L \cdot G_k \cdot r_{V_{kj}},$$

где $M_{k,i}^L$ – удельная величина эмиссии i -го загрязняющего вещества транспортными средствами k -го типа, г/км. $M_{k,i}^L$ для рассматриваемого региона определяется в соответствии с [6]. При определении данных величин важное значение имеет парк транспортных средств, в частности, соотношение категорий автомобилей, соответствующих тому или иному классу экологической безопасности (Евро0...Евро6), типу применяемого топлива, году выпуска и степени износа. Удельные величины эмиссии твёрдых частиц определяются в соответствии с «Методикой оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM10 и PM2,5» [7]. Удельные величины эмиссии загрязнителей, в первую очередь, твёрдых частиц невыхлопного происхождения, также зависят от климатических условий, состояния дорожного полотна, в частности, применение шипованных покрышек в зимний период значительно увеличивает степень его истирания, приводя к большей эмиссии твёрдых частиц. G_k – интенсивность движения автомобилей k -го типа за период времени T . В качестве источника данных об интенсивности движения используются результаты видеосъёмки с камер наблюдения, обработанные с использованием нейросети ImageAI. $r_{V_{ki}}$ – поправочный коэффициент средней скорости движения автомобилей V , км/ч.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Моделируемым параметром является максимальная разовая приземная концентрация загрязняющего вещества. В качестве базовой модели рассеяния используются «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе», утверждённые приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 06.06.2017. В соответствии с вышеуказанными методами реализован алгоритм моделирования приземной концентрации загрязняющих веществ, производимых точечными источниками. Однако, учитывая значительную протяжённость, автомобильные дороги необходимо классифицировать как протяжённые или площадные объекты, и целесообразно рассматривать линейную модель при моделировании загрязнения, поскольку в исследуемом масштабе длина дороги значительно превосходит её ширину. Предлагаемый метод моделирования был изложен в [3]. Автомобильная дорога рассматривается как источник выбросов фиксированной высоты. В качестве протяжённого источника рассматривается дорожный перегон, а в качестве мощности эквивалентного точечного источника – величина эмиссии загрязнителя потоком автотранспорта, движущегося по данному перегону. Максимальная приземная концентрация c_m определяется выражением:

$$c_m = \frac{0,9 \cdot A \cdot M \cdot F \cdot \eta}{H^{7/3}},$$

где A – коэффициент, характеризующий температурную стратификацию атмосферы (для г. Санкт-Петербург, $A = 160$); M – величина эмиссии загрязняющего вещества потоком транспортных средств за период времени T , г/с; F – коэффициент, характеризующий скорость гравитационного оседания загрязнителя; η – коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной местности $\eta = 1$. При этом опасная скорость ветра u_m для рассматриваемого типа источников составляет 0,5 м/с. Расстояние x_m , на котором достигается максимальная приземная концентрация загрязняющего вещества c_m при неблагоприятных метеорологических условиях, составляет $5,7 \cdot H$.

Величина разовой концентрации загрязнителя в рассматриваемой точке местности $c(x, y, z)$ определяется в соответствии с величинами c_m , u , x_m и заданными скоростью u и направлением ветра u_f . Дорожный перегон рассматривается как протяжённый источник. В рамках поставленной задачи рассматривается приземная концентрация загрязняющих веществ $c(x, y)$. Расчёт ведётся для наземных источников выброса (дорожные перегоны, расположенные на уровне земли).

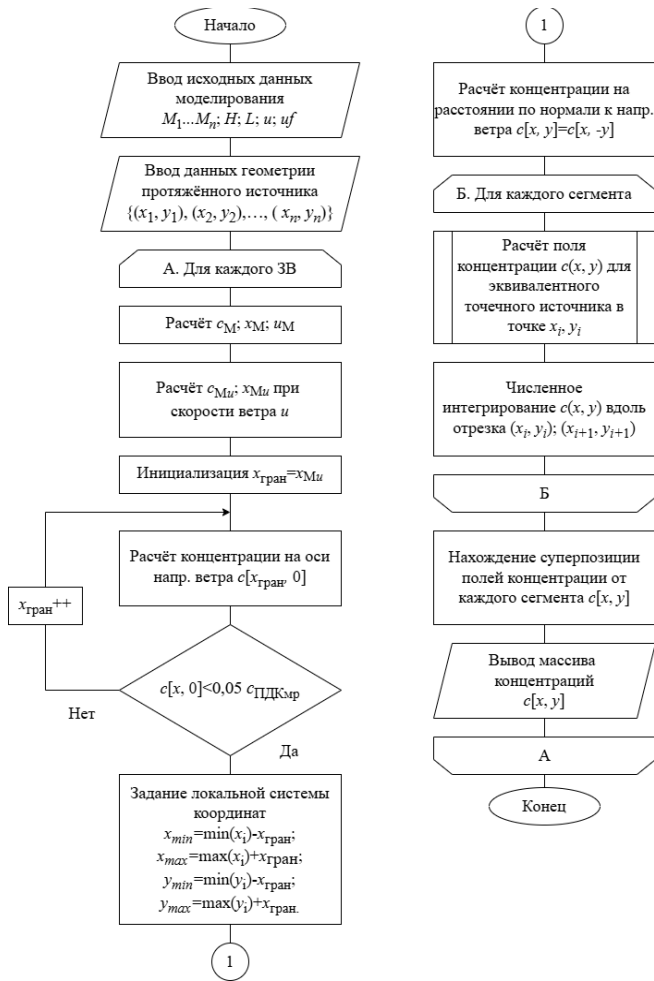


Рис. 1. Алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ

В простейшем случае, если источник загрязнения задан прямой и определена локальная система координат с началом в точке x_1, y_1 и осью Ox , совпадающей с направлением источника, концентрация в результате воздействия протяжённого источника может быть определена как сумма концентраций загрязняющих веществ, производимых точечными источниками, расположенными на каждом малом отрезке протяжённого источника, шаг расположения которых задан в соответствии с требованиями к точности моделирования. Пусть координаты концов дорожного перегона заданы в виде $A(x_1, y_1)$ и $B(x_2, y_2)$, а сам он задан функцией $y(x)$.

$$c_l(x, y) = \frac{1}{|L|} \int_{x_1}^{x_2} c(x - \xi, y - \eta) \sqrt{1 + (y'(x))^2} |dx|.$$

Моделирование производится для всех исследуемых дорожных перегонов. Концентрация загрязняющего вещества c в рассматриваемой точке определяется как сумма концентраций данного вещества от всех источников эмиссии, воздействующих на данную точку при заданных направлении и скорости ветра.

V. АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

В соответствии с вышеизложенными методами был разработан алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ в результате воздействия автотранспорта (рисунок 1). Результатом работы алгоритма является массив значений приземной разовой концентрации каждого загрязняющего вещества в окрестности анализируемых дорожных перегонов с заданным шагом дискретизации $c_1[x][y] \dots c_n[x][y]$.

VI. ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА АВТОТРАНСПОРТОМ

В результате выполнения вышеизложенного алгоритма формируются данные моделирования приземной концентрации для каждого исследуемого загрязняющего вещества в результате воздействия автомобильного транспорта.

С целью обеспечения достоверности результатов моделирования за счёт учёта максимального числа влияющих факторов, формируется геоинформационная система, позволяющая объединить данные, характеризующие климатические условия, характеристики городской среды, пространственно-распределённые данные, интегрированные пространственной моделью дорожной сети; разработанные программные модули, применяемые для вычисления массовых выбросов загрязняющих веществ, моделирования распространения приземной концентрации от точечных и протяжённых источников, расчёта суммарной концентрации и определения степени воздействия на урбанизированные территории. Обобщённая структура геоинформационной системы оценки автотранспортного загрязнения показана на рис. 2.

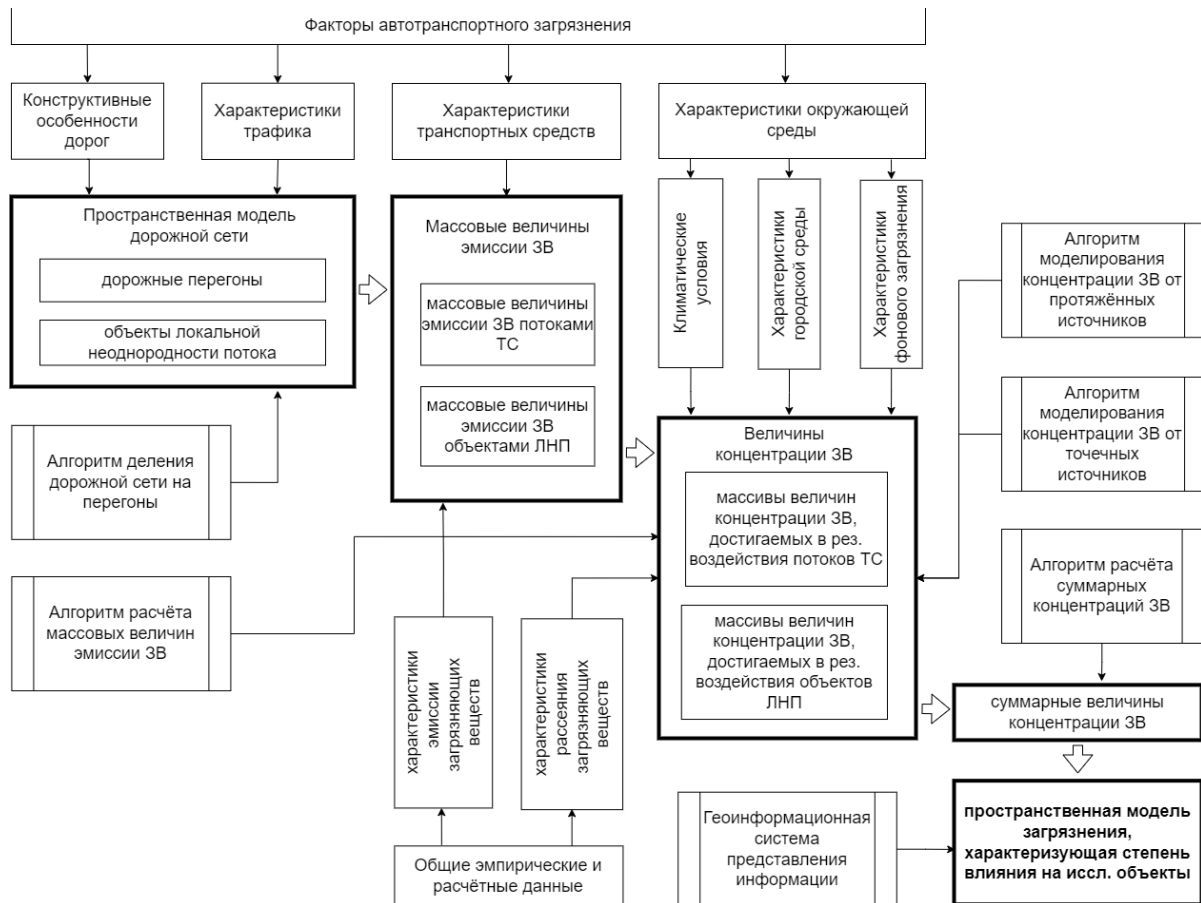


Рис. 2. Обобщённая структура геоинформационной системы оценки автотранспортного загрязнения

Пространственная модель дорожной сети реализована в геоинформационной системе QGIS. Объектом исследования выбран фрагмент территории Калининского района г. Санкт-Петербург. Исходные геоданные представлены в виде слоя дорог OpenStreetMap, характеристик трафика, определённых для каждого участка дороги.

В результате работы была создана цифровая модель автотранспортного загрязнения жилых территорий г. Санкт-Петербург. Реализация модели в геоинформационной системе открывает большие возможности для оценки воздействия автотранспортного загрязнения на объекты жилой инфраструктуры, при этом, в зависимости от перечня исходных данных, позволяет произвести моделирование в различных погодных условиях и с различным сочетанием характеристик трафика для выявления наиболее опасных сочетаний факторов загрязнения.

VII. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность результатов оценки концентрации загрязняющего вещества определяется, главным образом, полнотой и точностью исходных данных. Суммарная стандартная неопределённость оценки разовой концентрации газообразного загрязняющего вещества в заданной пространственной точке $s(x, y)$ определяется выражением:

$$u(s_{x,y}) = \sqrt{c_1^2 \cdot u(M_i)^2 + c_2^2 \cdot u(H)^2 + c_3^2 \cdot u(u)^2 + c_4^2 \cdot u(u_f)^2 + c_5^2 \cdot u(x)^2 + c_6^2 \cdot u(y)^2 + c_7^2 \cdot u(f)^2}$$

где $u(M_i)$, $u(H)$, $u(u)$, $u(u_f)$, $u(x)$, $u(y)$, $u(f)$ – неопределённости вычисления величины эмиссии i -го загрязняющего вещества, измерения высоты источника, скорости и направления ветра, координат источника, численного интегрирования. $u(M_i)$ определяется выражением:

$$u(M_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^k c_{8_k}^2 \cdot u(G_k)^2 + c_9^2 \cdot u(L)^2 + c_{10}^2 \cdot u(T)^2}$$

где $u(G_k)$ – неопределённость измерения интенсивности движения k -го типа транспортных средств, $u(L)$ – неопределённость измерения протяжённости перегона, $u(T)$ – неопределённость измерения временного интервала. $u(G_k)$ определяется неопределённостью измерения общей интенсивности движения $u(G)$ и неопределённостью идентификации типа транспортного средства:

$$u(G_k) = \sqrt{c_{11}^2 \cdot u(G)^2 + c_{12}^2 \cdot u(I_k)^2},$$

где c_1 - c_{12} – коэффициенты влияния, определяемые в соответствии с применяемыми методиками расчёта соответствующих величин.

При условии соответствия точности измерений входных величин требованиям перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [8], суммарная

стандартная неопределённость оценки разовой концентрации газообразного загрязняющего вещества в заданной пространственной точке, превышающего предельно допустимое значение, будет находиться в допустимом диапазоне, позволяющем применять разработанное программно-алгоритмическое обеспечение для экстремальной оценки загрязнения воздуха автомобильным транспортом.

Неопределённость оценки разовой концентрации твёрдых частиц PM_{2.5} и PM₁₀, помимо вышеуказанных факторов, будет определяться соответствием исследуемого региона требованиям, предъявляемым методикой [7].

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования рассматривалась система оценки экологического воздействия дорожно-транспортного комплекса на качество воздуха жилых территорий городов. Были разработаны теоретические основы моделирования загрязнения атмосферного воздуха в условиях городской среды, для оценки эмиссии загрязняющих веществ, производимых автотранспортными потоками с учётом твёрдых частиц невыхлопного происхождения (образующихся в результате эксплуатационного износа тормозных дисков, протекторов шин и дорожного покрытия).

В соответствии с разработанными теоретическими основами создано программно-алгоритмическое обеспечение системы оценки загрязнения воздуха городской среды автомобильным транспортом, включающее модули подготовки исходных географических данных, построения пространственной модели дорожной сети, расчёта величин эмиссии загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта, и моделирования распространения концентрации с последующей возможностью анализа степени воздействия на объекты гражданской инфраструктуры. Произведена оценка достоверности полученных результатов моделирования. Разработана

цифровая модель автотранспортного загрязнения жилых территорий Санкт-Петербурга. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение планируется интегрировать в обобщённую геоинформационную модель, которая может применяться в качестве эффективного инструмента при решении задач городского планирования, оценки автотранспортного загрязнения воздуха и повышения комфортности городской среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Holmes N.S., Morawska L. A Review of Dispersion Modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available // *Atmospheric Environment* 2006, T. 40. № 30, С. 5902-5928.
- [2] Леванчук А.В. Совершенствование системы социально-гигиенического мониторинга на территории с развитым автомобильно-дорожным комплексом // *Общественное здоровье и здравоохранение*. 2014. № 4. С. 78–82.
- [3] Куракина Н.И., Мышко Р.А. Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2022. Т. 25, № 6. С. 105-115 doi:10.32603/1993-8985-2022-25-6-90-100
- [4] Мышко Р.А., Куракина Н.И., Бурдин Р.А. Алгоритм формирования пространственной модели дорожно-транспортной сети для оценки загрязнения атмосферного воздуха // *Материалы XXVII Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024), СПбГЭТУ, 22-24 мая 2024 г.* С.486-490.
- [5] Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. М.: Интеграл, 1999. 15 с.
- [6] Распоряжение Росприроднадзора от 13.12.2019 N 37-р «Об утверждении порядка организации работ по оценке выбросов от отдельных видов передвижных источников»
- [7] Невмержицкий Н.В., Ложкина О.В., Ложкин В.Н. Расчетная методика и компьютерная программа для оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM₁₀ и PM_{2.5} // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. Т. 2 № 55. С. 206-209.
- [8] Перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений Утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2020 года N 1847.