

Моделирование рассеяния загрязняющих веществ, производимых автомобильным транспортом

Н. И. Куракина¹, Р. А. Мышко²

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

¹NKurakina@gmail.com, ²RomanMyshko@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена созданию геоинформационной системы оценки и моделирования загрязнения атмосферного воздуха в крупных городах автомобильным транспортом. Произведен обзор моделей рассеяния, применяемых для прогнозирования загрязнения воздуха. Обоснована необходимость учёта содержания твёрдых частиц помимо составляющих выхлопных газов. Приведена обобщённая структура геоинформационной системы моделирования и выделены основные факторы, влияющие на загрязнение атмосферного воздуха автотранспортом, включая конструктивные особенности дорог, характеристики трафика и характеристики окружающей среды. В качестве объекта исследования выбраны дороги г. Всеволожск. На основании результатов моделирования построены тематические карты, наглядно показывающие влияние дорожно-автомобильного комплекса на качество воздуха в крупных городах.

Ключевые слова: моделирование загрязнения среды; ГИС; загрязнение воздуха; автомобильный транспорт; экологическая безопасность

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные темпы развития экономики влекут за собой постоянное увеличение количества как производственных мощностей, так и объектов инфраструктуры и транспорта. Подобные изменения способствуют ухудшению экологической обстановки. В частности, загрязнение атмосферного воздуха – одна из самых важных проблем современности. Для крупных городов, особенно таких как Москва или Санкт-Петербург доля выбросов в атмосферу от автомобильного транспорта соизмерима с выбросами предприятий. Таким образом, задача минимизации влияния выбросов от автотранспорта на здоровье людей является приоритетной. Решить эту задачу возможно с использованием методов математического моделирования.

Как правило, при оценке уровней загрязнения воздуха автомобильным транспортом, в первую очередь рассматриваются загрязняющие вещества, производимые в результате сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания. В состав топлива входят углеводороды, кислород, сера, азот и минеральные примеси. Основными продуктами сгорания автомобильного топлива являются углекислый газ и диоксид серы. Однако загрязнение окружающей среды в зоне интенсивного автомобильного движения происходит еще и за счет эксплуатационного износа дорожно-автомобильного комплекса (протекторов шин,

тормозной системы и дорожного покрытия). Эксплуатационный износ является причиной образования твёрдых частиц. Задача моделирования рассеяния твёрдых частиц имеет важное значение для экологического мониторинга и осложняется тем, что на процесс рассеяния твёрдых частиц оказывает влияние большое количество факторов, которые сложно учесть, в том числе характеристики окружающей среды, состояние дорожного покрытия.

Целью данной работы является разработка обобщённой структуры системы моделирования автотранспортного загрязнения. Важной задачей, которую необходимо решить, является анализ существующих моделей рассеяния, применяемых для оценки автотранспортного загрязнения на предмет комплексности, удобства с точки зрения программной реализации и интеграции с геоинформационными системами, возможности моделирования рассеяния твёрдых частиц.

II. ОБЗОР МОДЕЛЕЙ РАССЕЯНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРОИЗВОДИМЫХ АВТОТРАНСПОРТОМ

Задача оценки загрязнения воздуха автотранспортом в городах является специфической и предполагает необходимость учёта неочевидных факторов. При рассмотрении моделей важно учитывать перечень загрязняющих веществ, для оценки рассеяния которых они могут быть применены и, в особенности, твёрдых частиц.

A. Существующие модели рассеяния, применяемые для оценки автотранспортного загрязнения воздуха

Рассеяние примесей в атмосфере относится к классу явлений диффузии. На текущий момент существует множество различных математических моделей рассеяния примесей в атмосферном воздухе, используются различные подходы к их классификации, однако с точки зрения используемого в них математического аппарата можно выделить такие основные группы моделей, как гауссовы, эйлеровы, лагранжевы, а также комбинированные и квазиэмпирические модели. На текущий момент комбинированные модели наиболее распространены.

В зарубежной практике для оценки автотранспортного загрязнения широко применяются гауссовы и лагранжевы модели, в то время как в России более распространены эйлеровы модели. Среди наиболее известных моделей, предназначенных для оценки

рассеяния загрязняющих веществ, производимых автотранспортом, можно выделить следующие:

Модели CALINE4, разработанная Департаментом Транспорта Штата Калифорния [1], и HIWAY2, разработанная EPA [2], основанные на Гауссовой модели, предназначены для моделирования рассеяния газов и имеют присущие данному подходу ограничения, связанные с моделированием дисперсии на малых расстояниях. В этих моделях автодорога представляется в виде протяжённого источника, который состоит из множества элементов, ориентированных по направлению ветра. CALINE 4 учитывает явления тепловой и механической турбулентности, вызванной транспортными средствами, в отличие от HIWAY2. Ещё одним существенным недостатком данных моделей является отсутствие возможности учёта прилегающей к дорогам территории, в частности застройки, существенно изменяющей характер дисперсии в улицах-каньонах.

Гауссова модель CAR-FMI, разработанная Финским Институтом Метрологии на основе уравнений для оценки влияния автотранспорта позволяет моделировать рассеяние CO, NO, NO₂, NO_x и твёрдых частиц PM_{2,5}. Вертикальные и горизонтальные коэффициенты дисперсии учитывают явления турбулентности и особенности выхлопных газов автомобилей. В отличие от американских моделей, CAR-FMI содержит модуль для расчёта сухого осаждения частиц трёх различных размеров. Этл и др. (2001) [3].

Недостатком всех гауссовых моделей, в том числе и CAR-FMI является их плохая применимость для низких скоростей ветра.

Проблему моделирования рассеяния для улиц-каньонов частично позволяют решить блочные модели и их интегрирование с гауссовыми, например, комплексная модель AURORA, разработанная бельгийским исследовательским центром VITO [4], а также модель CPB (GEOMET), применяемая для расчёта средних концентраций инертных газов и диоксида азота для улиц-каньонов.

OSPM – датская квазиэмпирическая модель, представляющая собой комбинацию гауссовой модели подъёма шлейфа и блочной модели для расчета влияния турбулентности [5]. Поперечная ветровая диффузия внутри шлейфа не учитывается, а источники рассматриваются как бесконечные линейные источники. Уравнение дисперсии для линейного источника интегрируется вдоль направления ветра.

Наиболее известной моделью, совмещающей эйлеровы и лагранжевы характеристики, является GRAL (Институт двигателей внутреннего сгорания и термодинамики, Грац, Австрия), которая представляет собой комплексную модель, предназначенную для моделирования рассеяния инертных соединений в неоднородных полях ветра. Модель позволяет рассчитать концентрации для времени распространения от 10 минут до 1 часа для линейных и точечных источников, а также для туннелей для однородной и неоднородной подстилающей поверхности. Недостаток модели заключается в том, что модель не учитывает химическую трансформацию примеси (например, нитраты аммония, сульфаты аммония). Модель учитывает классы устойчивости атмосферы. На данный

момент не проведено экспериментальных исследований применимости GRAL для моделирования рассеяния твёрдых частиц, однако разработчиками производится моделирование рассеяния PM₁₀ и PM_{2,5} в городской среде.

Ещё один класс моделей – модели вычислительной гидрогазодинамики (CFD), которые находят применение преимущественно для локальных задач.

В. Исследование корреляции концентрации газов и твёрдых частиц

В контексте осуществления комплексной оценки воздействия автотранспортного загрязнения может быть полезным исследование взаимосвязи концентрации различных загрязняющих веществ. При обнаружении устойчивой корреляции, соотношение может быть использовано для упрощения оценки концентрации твёрдых частиц.

Исследования показали [6], что для открытого пространства показатели концентрации твёрдых частиц имеют значительную корреляцию с концентрациями газов и могут быть учтены путём введения эмпирических соотношений, то, когда речь идёт о городской среде, требуется индивидуальный учёт. В особенности это актуально для крупных городов, где автотранспорт является главным источником загрязнения. При этом, учитывая относительную редкость учёта рассмотренными моделями твёрдых частиц, можно сделать вывод о том, что задача разработки комплексных моделей остаётся актуальной.

С. Исследование корреляции концентрации твёрдых частиц PM₁₀ и PM_{2,5}

Также существуют исследования, ставящие целью установить соотношение концентраций твёрдых частиц различных диаметров. В городской среде, где автотранспорт является основным источником твёрдых частиц, в исследовании [7] показано, что корреляция концентрации PM_{2,5} и PM₁₀ была на уровне 0,95 на всех объектах в сети мониторинга. Однако соотношение PM₁₀/PM_{2,5} слишком сильно варьировалось, чтобы можно было установить универсальную величину PM₁₀/PM_{2,5}, не было обнаружено и корреляции со среднегодовой концентрацией. Напротив, Харрисон и др. (1999) [8], обнаружили, более высокую степень корреляции среднечасовой концентрации со среднегодовыми показателями PM_{2,5}, чем с измерениями PM₁₀, хотя оба диапазона показали высокую корреляцию за период 3 месяцев.

Таким образом, модели, предназначенные для моделирования рассеяния газов, могут быть использованы для расчёта концентрации твёрдых частиц PM_{2,5} и PM₁₀ на открытой местности, особенно для длительных периодов усреднения, при которых краткосрочные колебания образования частиц нивелируются.

Моделирование концентрации частиц требует учёта процессов трансформации, поэтому в модели рассеивания, как правило, включены модули динамики аэрозолей.

Таким образом, лишь некоторые зарубежные модели включают модули для оценки рассеяния твёрдых частиц, в отечественной практике подобных моделей,

разработанных для прогнозирования автотранспортного загрязнения, не найдено. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о целесообразности разработки системы моделирования автотранспортного загрязнения, позволяющей производить оценку концентрации твёрдых частиц. При этом целесообразно разрабатывать систему, позволяющую организовать взаимодействие с геоинформационными системами.

Поскольку основной задачей является оценка уровней загрязнения воздуха в городах, в частности, моделирование разовых концентраций, более важным критерием в выборе математической модели рассеяния является скорость обработки данных и согласованность метода с российскими нормативными требованиями с точки зрения перечня загрязняющих веществ, способов нормирования и оценки уровней загрязнения. Исходя из этого, целесообразно использовать в качестве основы [9]. Данный нормативный документ предоставляет общий алгоритм, применимый, в том числе, и для протяжённых источников, при этом содержит значительное количество полуэмпирических закономерностей, адаптированных для отечественной нормативной базы.

III. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Для того чтобы однозначно охарактеризовать влияние дорожно-автомобильного комплекса на состояние атмосферного воздуха необходимо определить перечень влияющих факторов. В данном случае задача заключается в том, чтобы определить взаимосвязь между источниками воздействия и характеристиками эмиссии загрязняющих веществ, которые служат исходными данными для моделирования. Условно факторы, потенциально влияющие на эмиссию загрязняющих веществ, подразделяются на 3 группы.

A. Конструктивные особенности дороги

В ходе работы были изучены основные подходы к классификации автомобильных дорог, предлагаемые нормативными документами. Разделение на категории с точки зрения конструктивных особенностей дороги, влияющих на загрязнение, достаточно полно характеризует особенности, включая в себя параметры поперечного сечения: ширину полос и обочины, число полос. Важнейшим фактором, учитываемым категоризацией, и в то же время определяющим тип пересечения с другими дорогами, режим доступа и скоростной режим движения является подразделение дорог на автомагистрали (категория IA), скоростные автомобильные дороги (категория IB) и обычные автомобильные дороги (категории IV-V). Помимо указания категории, к группе конструктивных особенностей можно отнести тип дорожной одежды C , высоту поднятия дороги над уровнем земли – H , наличие защитного экрана – Z .

Приведённые выше факторы не используются непосредственно при расчёте массовых выбросов загрязняющих веществ, однако применяются при формировании базы данных для расчёта: категория дороги определяет скоростной режим и способ пересечения дорог (например, на автомагистралях нет пересечений дорог в одном уровне и железнодорожных переездов, следовательно, на перегонах, относящихся к данной категории нет необходимости учитывать

воздействие автотранспорта, стоящего на регулируемом перекрёстке).

С учётом категории автодороги и пространственных данных дорожной сети формируется следующий кортеж параметров дорожных перегонов:

$$R_i = \{K, L, H, V, N, S_n, S_o, S_p, C, Z\}$$

где V – средняя скорость движения, км/ч; L – протяжённость перегона, км; H – высота поднятия перегона над поверхностью земли, м; N – число полос движения; S_n – ширина полосы, м; S_o – ширина обочины, м; S_p – ширина разделительной полосы (при отсутствии 0), м; C – тип покрытия, Z – наличие защитного экрана на участке дороги.

B. Характеристики трафика

Вторая группа факторов характеризует трафик. Для решения задачи определения характеристик трафика интерес представляют состав потока – перечень типов транспортных средств в потоке и интенсивность движения для каждого типа (количество транспортных средств). Статистические исследования, как правило используют среднегодовую суточную интенсивность движения, однако для определения разовых концентраций больший интерес представляет пиковая интенсивность за временной интервал 20 минут. Также к исследуемым параметрам, характеризующим трафик относятся средняя скорость движения на участке и характеристики светофорного регулирования (при наличии регулируемого перекрёстка) – длительность действия запрещающего сигнала светофора и число циклов его работы за рассматриваемый временной промежуток, а также число транспортных средств каждой категории, останавливающихся на перекрёстке.

В зависимости от полноты и характера статистических данных может учитываться среднесуточная, пиковая, среднегодовая интенсивность движения, в том числе приведённая к легковому автомобилю (коэффициенты приведения заданы в ГОСТ). В данном исследовании производится учёт пиковой интенсивности движения в расчёте за 20 минут. Дополнительные характеристики при наличии на перегоне регулируемого перекрёстка - числа остановок транспортных средств за временной интервал 20 минут, длительность действия запрещающего сигнала за период и количество циклов действия запрещающего сигнала за период (20 мин). Таким образом, кортеж параметров дорожных перегонов дополняется параметрами, характеризующими трафик, и приобретает следующий вид:

$$R_i = \left\{ K, L, H, V, N, S_n, S_o, S_p, C, Z, \right. \\ \left. G_{cc1} \dots G_{cck}, G_{cn1} \dots G_{cnk}, P_u, N_u \right\},$$

где $G_{cc1} \dots G_{cck}$ – пиковая интенсивность движения на дорожном перегоне в обоих направлениях для категорий транспортных средств $1 \dots k$ за период (20 мин), $G_{cn1} \dots G_{cnk}$ – числа остановок транспортных средств на регулируемом перекрёстке в обоих направлениях для категорий транспортных средств $1 \dots k$ за период (20 мин), P_u – длительность действия запрещающего сигнала за период (20 мин), N_u – количество циклов действия запрещающего сигнала за период (20 мин).

С. Характеристики окружающей среды

Характеристики окружающей среды также оказывают влияние на эмиссию загрязняющих веществ. К ним относятся параметры объектов городской среды, такие как близость и высота застройки, наличие зелёных насаждений, данные фоновых загрязнений, а также социально-экономические характеристики городских территорий. Данные характеристики влияют на распространение загрязнений или требуют учёта при оценке предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, но не связаны с их эмиссией и

то же время не обязательно могут коррелировать с методикой разбиения дороги на перегоны, поэтому учитываются уже дополнительно в процессе моделирования.

IV. СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА АВТОТРАНСПОРТОМ

Совокупность характеристик, влияющих на загрязнение воздуха и способ формирования системы моделирования загрязнения атмосферного воздуха, показаны на рис. 1.

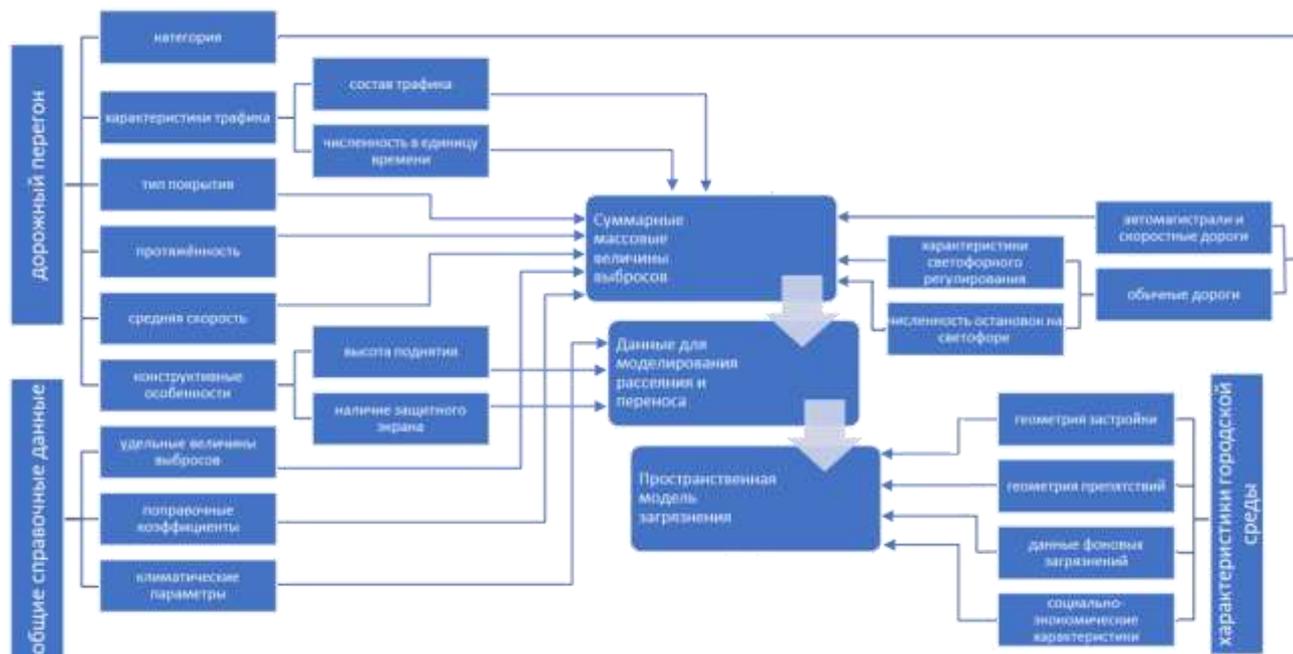


Рис. 1. Обобщённая структура системы моделирования загрязнения

Система моделирования объединяет географическую базу данных дорожных перегонов, содержащую исходные данные, необходимые для расчёта автотранспортного загрязнения, пространственные характеристики окружающей среды, необходимые для оценки потенциального воздействия на объекты инфраструктуры, климатические параметры, программный модуль расчёта массовых выбросов, а также непосредственно модель рассеяния, формирующую пространственные данные концентрации загрязняющих веществ. Подробное описание разработанного модуля для расчёта массовых выбросов в соответствии с требованиями ГОСТ содержится в [10]. Алгоритмическая основа моделирования концентрации загрязняющих веществ от протяжённых источников на основе рассчитанных массовых величины выбросов представлена в [11]. Результатом моделирования является пространственная модель загрязнения, Пример построения поля распределения концентрации от нескольких основных дорог города Всеволожск в среде ArcGIS представлен на рис. 2.

Среда ArcGIS представляет широкие возможности для дальнейшей работы с полученными распределениями концентрации.

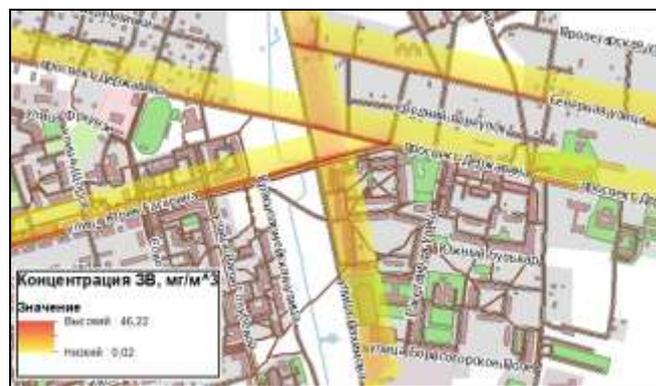


Рис. 2. Поле концентрации загрязняющего вещества от дорог

Полученные данные могут быть классифицированы по уровню кратности превышения ПДК, могут быть найдены буферные зоны вокруг источников с повышенной опасностью, при наличии данных может быть определено по характеристикам расположения, какие социальные объекты попадают в зону повышенной концентрации загрязняющих веществ.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был произведён обзор моделей рассеяния, применяемых для оценки автотранспортного загрязнения воздуха. Обоснована необходимость учёта

твёрдых частиц при моделировании загрязнения, рассмотрены вопросы установления корреляции концентраций газов и твёрдых частиц, а также частиц различного диаметра. Приведена обобщённая структура геоинформационной системы моделирования и выделены основные факторы, влияющие на загрязнение атмосферного воздуха автотранспортом, включая конструктивные особенности дорог, характеристики трафика и характеристики окружающей среды. В качестве объекта исследования выбраны дороги г. Всеволожск. По результатам исследования построены тематические карты, наглядно показывающие влияние дорожно-автомобильного комплекса на качество воздуха в крупных городах. Разрабатываемая система может применяться для оценки уровней загрязнения в городах, экологического мониторинга и прогнозирования потенциальных зон воздействия автотранспортного загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] CALINE4. A Dispersion model for predicting air pollutant concentrations near roadways. Final Report. Department of Transportation. State of California. 1989.
- [2] Luhar A.K., Patil R. A General Finite Line Source Model for Vehicular Pollution Dispersion. *Atmospheric Environment*. 1998. No. 23. P. 555-562.
- [3] Oettl D., Kukkonen J., et al. Evaluation of a Gaussian and a Lagrangian model against a roadside data set, with emphasis on low wind speed conditions. *Atmospheric Environment* 2001. No. 35(12). P. 2123-2132.
- [4] Mensink C., De Ridder K., et al. AURORA: An air quality model for urban regions using an optimal resolution approach VITO, Centre for Remote Sensing and Atmospheric Processes, Belgium.
- [5] Vignati E., Berkowicz R., et al. Transformation of size distributions of emitted particles in streets. *The Science of the Total Environment*. 1999. No. 235. P. 37-49.
- [6] 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. No. 40(30). P. 5902-5928.
- [7] Van Dingenen R., Raes F., et al. A European aerosol phenomenology-1: physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment*. 2006. No. 38(16). P. 2561-2577.
- [8] Harrison R.M., Jones M., et al. Measurements of the Physical Properties of Particles in the Urban Atmosphere. *Atmospheric Environment* 1999. No. 33. P. 309-321.
- [9] Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. М.: Официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru) № 0001201708110012, 2017 г.
- [10] 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.
- [11] Куракина Н.И., Мышко Р.А. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами в технологии геоинформационных систем. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2021. №5. С. 21-27.