

# Алгоритм формирования пространственной модели дорожно-транспортной сети для оценки загрязнения атмосферного воздуха

Р. А. Мышко<sup>1</sup>, Н. И. Куракина<sup>2</sup>, Р. А. Бурдин<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>RomanMyshko@gmail.com, <sup>2</sup>NKurakina@gmail.com, <sup>3</sup>Rodiogch@gmail.com

**Аннотация.** Работа посвящена созданию алгоритма формирования пространственной модели дорожно-транспортной сети с использованием геоинформационных технологий. Предлагается использовать структуру деления дорожной сети на перегоны. Для каждого дорожного перегона определяется кортеж параметров, позволяющий выделить основные факторы, влияющие на загрязнение атмосферного воздуха. Разработана унифицированная структура данных, описывающая каждый перегон. Деление на перегоны позволяет избежать необходимости применения сложного математического аппарата и получить данные для применения полумпирических методов моделирования рассеяния, применяемых в соответствии с нормативными документами, для определения максимально возможных уровней загрязнения в городах.

**Ключевые слова:** пространственная модель; дорожная сеть; ГИС; загрязнение воздуха; автомобильный транспорт; экологическая безопасность

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения атмосферного воздуха в городах России является актуальной в связи с серьёзным влиянием на самого человека и на качество его жизни. Развитие автомобильно-дорожного комплекса, обусловленное увеличением численности автотранспорта, скорости передвижения и объемов перевозимых грузов, приводит к тому, что доля выбросов в атмосферу от автомобильного транспорта становится соизмерима с выбросами предприятий. Особенно остро стоит такая проблема в больших городах, таких как Москва и Санкт-Петербург, поскольку в таких городах наблюдается тенденция переноса промышленных предприятий за черту города, а доля автомобильного транспорта растет с каждым годом.

Задача оценки распространения загрязнений от объектов транспортной инфраструктуры требует наличия алгоритмического и программного обеспечения, что позволило бы автоматизировать процесс анализа загрязнения атмосферного воздуха. Применение геоинформационных систем позволит более эффективно решать задачи моделирования рассеяния загрязняющих веществ, производимых автотранспортом. Геоинформационные системы (ГИС) предоставляют множество инструментов обработки пространственных данных, которые помогают анализировать и прогнозировать распространение загрязнения воздуха.

Применение ГИС предоставляет широкие возможности для визуализации результатов моделирования [1].

Целью работы является разработка алгоритма формирования геоинформационной модели дорожной сети с параметрами дорожных перегонов для г. Санкт-Петербург, а также создание унифицированной структуры исходных данных для моделирования рассеяния загрязняющих веществ, производимых автотранспортом.

Разработанная модель, а также методологическое и алгоритмическое обеспечение, позволят оценить воздействие трафика на эмиссию загрязняющих веществ, в том числе не выхлопного происхождения.

## II. КОРТЕЖ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДЕЛИ ДОРОЖНОЙ СЕТИ

Рассматриваемый объект, являющийся источником воздействия – автомобильная дорога. Чтобы однозначно охарактеризовать влияние дорожно-автомобильного комплекса на состояние атмосферного воздуха, необходимо определить перечень влияющих факторов. Основные факторы, потенциально влияющие на эмиссию загрязняющих веществ, подразделяются на следующие группы: Конструктивные особенности дороги; Характеристики трафика; Характеристики окружающей среды, Характеристики транспортных средств и способ их эксплуатации.

В работе предлагается использовать структуру деления дорожной сети на перегоны [2]. Деление на перегоны позволяет избежать необходимости применения сложного математического аппарата и получить данные для применения полумпирических методик моделирования рассеяния с целью определения максимально возможных уровней загрязнения в городах.

Кортеж параметров дорожной сети, необходимый для расчёта эмиссии загрязняющих веществ, включает следующие характеристики:

$$R = \left\{ K, L, H, C, Z, X, D, N_p, W_p, W_o, W_r, \left. \begin{array}{l} V^A, V^B, P_b^A, P_b^B, G_I^A \dots G_V^A, G_I^B \dots G_V^B \\ S_I^A \dots S_V^A, S_I^B \dots S_V^B, P_c^A, N_c^A, P_c^B, N_c^B \end{array} \right\}, \right.$$

где  $K$  – категория дороги;  $L$  – протяжённость дороги, км;  $H$  – высота поднятия дороги над поверхностью земли, м;

$C$  – тип покрытия;  $Z$  – характер изоляции дороги;  $X$  – степень износа дорожного полотна;  $D$  – характер движения (одностороннее, двустороннее);  $N_p$  – число полос движения;  $W_p$  – ширина полосы, м;  $W_o$  – ширина обочины, м;  $W_r$  – ширина разделительной полосы, м,  $V$  – средняя скорость движения, км/ч;  $P_b$  – степень загруженности дороги (балл по данным отслеживания пробок);  $G$  – соответственно интенсивности движения за рассматриваемый временной интервал;  $S$  – соответственно числа остановок транспортных средств за рассматриваемый временной интервал;  $P_c$  – продолжительность цикла остановки транспортных средств;  $N_c$  – количество циклов остановки транспортных средств за рассматриваемый временной интервал;  $A$  – прямое,  $B$  – обратное направление движения;  $I...V$  – типы транспортных средств.

В соответствии с уровнем воздействия на загрязнение воздуха выделяют следующие типы транспортных средств:  $I$  – легковые;  $II$  – автофургоны и микроавтобусы до 3.5 т;  $III$  – грузовые от 3.5 до 12 т;  $IV$  – грузовые свыше 12 т;  $V$  – автобусы свыше 3.5 т. Таким образом, структура потока может быть задана в виде:

$$G = \{G_I^A \dots G_V^A, G_I^B \dots G_V^B\},$$

где  $G$  – величины интенсивности движения транспортных средств.  $A$  – прямое,  $B$  – обратное направление движения,  $I...V$  – типы транспортных средств.

Интенсивность движения определяется как количество транспортных средств, проходящих в единицу времени через поперечное сечение дороги [3]. В работе анализируется суммарная пиковая интенсивность дорожного движения, представляющая собой общее количество автомобилей, проходящих через поперечное сечение дороги. В общем случае следует рассматривать несколько пиковых интенсивностей, которые могут различаться для разных временных периодов: утренний и вечерний час пик в будний и выходной день, а также интенсивность может иметь различия в зависимости от сезона (зимний и летний период). Для более точного моделирования выбросов загрязняющих веществ необходима структура данных, учитывающая соотношение интенсивностей движения различных типов транспорта. Для жилых зон наиболее значимыми с точки зрения загрязнения воздуха являются утренняя и вечерняя пиковая интенсивность (авт./20 мин.) по будним дням  $G_m$  и  $G_e$  соответственно. Структура потока задается в виде перечня интенсивностей движения для каждого типа транспорта. Таким образом, кортеж параметров интенсивности движения дополнится следующими значениями:

$$G = \{G_{mI}^A \dots G_{mV}^A, G_{mI}^B \dots G_{mV}^B, G_{eI}^A \dots G_{eV}^A, G_{eI}^B \dots G_{eV}^B\},$$

где  $m$  – утренний час пик,  $e$  – вечерний час пик.

Величины эмиссии загрязняющих веществ напрямую зависят от скорости движения, по этой причине для каждой дороги в рассматриваемых условиях должна быть задана средняя скорость движения  $V$ . В качестве косвенных методов оценки интенсивности дорожного

движения в городах могут быть рассмотрены различные сервисы определения транспортной нагрузки, регистрирующие пробки. Уровень загруженности учтён в качестве коэффициента, определяющего снижение средней скорости движения, для каждой дороги определяется условный уровень загруженности по пятибалльной шкале  $P_b$ .

Частным случаем скоростного режима является неподвижный транспорт. В соответствии с нормативной методикой расчёта массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта [4], характер эмиссии загрязняющих веществ, производимых неподвижным транспортом с работающим двигателем, отличен и поэтому требует дополнительного учёта. Для каждой дороги в общем случае должны быть определены количества транспортных средств различных типов, находящиеся в неподвижном состоянии  $S$ , а также продолжительность периода остановки и число этих периодов за рассматриваемый временной промежуток (20 минут). Уточнённый кортеж параметров интенсивности движения принимает следующий вид:

$$G = \left\{ V^A, V^B, P_b^A, P_b^B, G_{mI}^A \dots G_{mV}^A, G_{mI}^B \dots G_{mV}^B, G_{eI}^A \dots G_{eV}^A, G_{eI}^B \dots G_{eV}^B, S_{mI}^A \dots S_{mV}^A, S_{mI}^B \dots S_{mV}^B, S_{eI}^A \dots S_{eV}^A, S_{eI}^B \dots S_{eV}^B, P_c^A, N_c^A, P_c^B, N_c^B \right\},$$

где  $V$  – средняя скорость движения, км/ч;  $P_b$  – степень загруженности перегона (балл по данным отслеживания пробок);  $S$  – соответственно числа остановок транспортных средств на конце перегона за рассматриваемый временной интервал;  $P_c$  – продолжительность цикла остановки транспортных средств;  $N_c$  – количество циклов остановки транспортных средств за рассматриваемый временной интервал.

### III. КРИТЕРИИ ДЕЛЕНИЯ ДОРОГИ НА ПЕРЕГОНЫ

Критерии деления дорожной сети на перегоны определяются значительными изменениями интенсивности или скорости движения транспортных средств, а также состава транспортного потока. В частности, деление дорог на перегоны происходит в местах сочленения дорог на одном уровне. К сочленениям дорог относятся пересечения и примыкания. В зависимости от интенсивности движения на примыкающих участках, может потребоваться деление на перегоны. Границами перегонов также являются точки перехода между различными режимами движения, например, сужения или расширения дороги (изменение полосности), точки изменения средней скорости движения более чем на 15 %.

Стоит учитывать и особые правила для разных дорог, например, включение или исключение грузового автотранспорта на определенных участках дороги.

Таким образом, факторы, определяющие деление дорожной сети на перегоны, можно разделить на следующие группы.

#### А. Изменения геометрии дорожной сети

К данной категории относятся сочленения дорог: регулируемые и нерегулируемые перекрёстки и примыкания дорог, локальные участки изменения геометрии дорожного полотна – расширения, сужения, соединения и разветвления). Данные объекты являются естественными границами дорожных перегонов и могут использоваться для первичного автоматизированного разбиения дорожной сети. В зависимости от характеристик трафика, некоторые участки изменения геометрии могут не требовать разбиения дороги на перегоны, например нерегулируемое примыкание второстепенной дороги с более низкой интенсивностью движения не влияет на поток главной дороги или влияет незначительно.

#### В. Статические характеристики дорожного перегона

К данной категории относятся постоянные характеристики, имеющие отношение ко всему перегону: установившийся скоростной режим, запрет движения грузовых транспортных средств, тип дорожного покрытия, наличие защитного экрана, факт, является ли перегон тоннелем или мостом, скоростной дорогой и т. п.

#### С. Динамические характеристики дорожного перегона

К данной категории относятся оперативные данные, характеризующие режим движения: например, если весь дорожный перегон занят автомобильной пробкой, требуется использовать алгоритм расчёта выбросов загрязняющих веществ для стоящих транспортных средств. Также, если дорога перекрыта для движения на текущий момент в связи с ремонтом или общественным мероприятием, учёт интенсивности не требуется. Для каждого направления движения задаётся отдельный перегон.

Границы перегонов, в частности, места сочленения дорог, как правило, характеризуются периодическими остановками автотранспорта. При расчете удельных выбросов загрязняющих веществ на перекрестках автомобильных дорог учитывается, что водители, находясь на перекрестке, могут провести определенное время в ожидании при работе двигателя на холостом ходу, помимо моментов торможения и разгона, когда автомобиль не движется. Поэтому важно учитывать длительность этих остановок.

Для моделирования загрязнения наибольший интерес представляет продолжительность фазы действия запрещающего сигнала по каждому направлению движения и количество циклов регулирования за период 20 минут. Сочленения могут рассматриваться отдельно как точечные источники загрязнений, производимых неподвижным транспортом, однако учитывая, что для каждого направления движения определяется отдельный перегон, очевидно, что скопления остановившегося транспорта будут наблюдаться в конечной точке перегона по направлению движения, поэтому характеристики трафика и светофорного регулирования были включены в кортеж параметров перегона:

$$R_i = \left\{ L, H, C, Z, X, N_p, W_p, D_n, V, P_b^m, P_b^e, G_I^m \dots G_V^m, S_I^m \dots S_V^m, G_I^e \dots G_V^e, S_I^e \dots S_V^e, P_c, N_c \right\},$$

где  $L$  – протяжённость перегона, км;  $H$  – средняя высота поднятия перегона над поверхностью земли, м;  $C$  – тип дорожного покрытия;  $Z$  – характер изоляции перегона;  $X$  – степень износа дорожного полотна;  $D_n$  – параметр, характеризующий направление движения;  $N_p$  – число полос движения;  $W_p$  – ширина полосы, м;  $V$  – средняя скорость движения, км/ч;  $P_b$  – степень загруженности перегона (балл по данным отслеживания пробок);  $G$  – соответственно интенсивности движения за рассматриваемый временной интервал;  $S$  – соответственно числа остановок транспортных средств на конце перегона за рассматриваемый временной интервал;  $P_c$  – продолжительность цикла остановки транспортных средств;  $N_c$  – количество циклов остановки транспортных средств за рассматриваемый временной интервал;  $I \dots V$  – типы транспортных средств;  $m$  – утренний час пик,  $e$  – вечерний час пик.

#### Д. Объекты локальной неоднородности потока

К объектам локальной неоднородности относятся дорожные объекты, не являющиеся границами перегонов. К объектам локальной неоднородности относятся отдельно стоящие пешеходные переходы, железнодорожные переезды и другие объекты. Кортеж параметров объектов локальной неоднородности определяется следующим образом:

$$S_i = \left\{ P_c, N_c, S_I^m \dots S_V^m, S_I^e \dots S_V^e \right\},$$

где  $S$  – соответственно числа остановок транспортных средств на конце перегона за рассматриваемый временной интервал;  $P_c$  – продолжительность цикла остановки транспортных средств;  $N_c$  – количество циклов остановки транспортных средств за рассматриваемый временной интервал;  $I \dots V$  – типы транспортных средств;  $m$  – утренний час пик,  $e$  – вечерний час пик.

### IV. АЛГОРИТМ РАЗБИЕНИЯ ДОРОЖНОЙ СЕТИ НА ПЕРЕГОНЫ

В соответствии с рассмотренными критериями, разработана схема деления дороги на перегоны. Пример разбиения дорожной сети: 1 – разделение при смене скоростного режима; 2 – примыкание обычной дороги к автомагистрали; 3 – тоннель; 4 – пересечение в регулируемом перекрёстке; 5 – расширение дороги; 6 – регулируемое примыкание; 7 – раздвоение дороги; 8 – нерегулируемое примыкание и 9 – пересечение железной дороги. Исходя из вышеописанных факторов, объекты 8 и 9 не требуют разбиения на перегоны (рис. 1).

В соответствии с приведённой схемой деления дорожной сети на перегоны и кортежем параметров перегонов и объектов локальной неоднородности потока разработан алгоритм разбиения дорожной сети на перегоны (рис. 2). Исходные геоданные представлены в виде слоя дорог OpenStreetMap [5] (линейные объекты), характеристик трафика, определённых для каждого участка дороги.

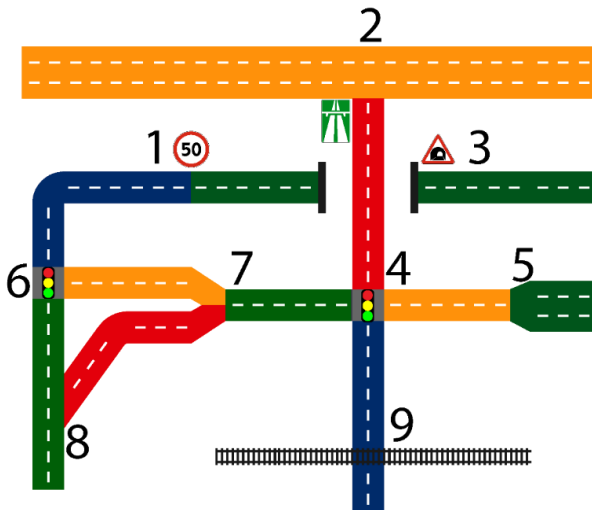


Рис. 1. Схема деления дорожной сети на перегоны

Первым шагом алгоритма разбиения на перегоны является анализ исходной дорожной сети и выбор приоритетных дорог, для которых требуется произвести моделирование рассеяния. Критерием отбора является пороговое значение интенсивности движения. В структуре перегонов не рассматриваются дороги дворовых территорий, пешеходные улицы, дороги для которых не заданы значения интенсивности движения.

Следующим шагом алгоритма является формирование перегонов в соответствии изменением геометрии дорожной сети: разделение дороги на два перегона производится в местах пересечения с другими дорогами на одном уровне, а также в местах примыкания дорог с регулируемым перекрестком. На основе сформированных перегонов создаётся пространственная модель дорожной сети.

Затем осуществляется формирование базы данных, характеризующих трафик для каждого дорожного перегона. С учётом исходных данных о составе трафика производится расчёт пиковых интенсивностей для каждого типа транспорта. Производится вычисление протяжённости перегона. Завершающим этапом является формирование базы данных объектов локальной неоднородности потока.

#### V. РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ В ГИС

Объектом исследования выбран Василеостровский район Санкт-Петербурга. Данный район выбран потому, что его структура соответствует большей части Санкт-Петербурга. В районе преобладают жилые зоны, степень воздействия автотранспортного загрязнения на которые превышает все другие источники загрязнения, также имеется значительное количество регулируемых перекрестков, что является типичным для городской застройки.

В соответствии с разработанным алгоритмом была создана цифровая модель участка дорожной сети Васильевского острова (рис. 3).

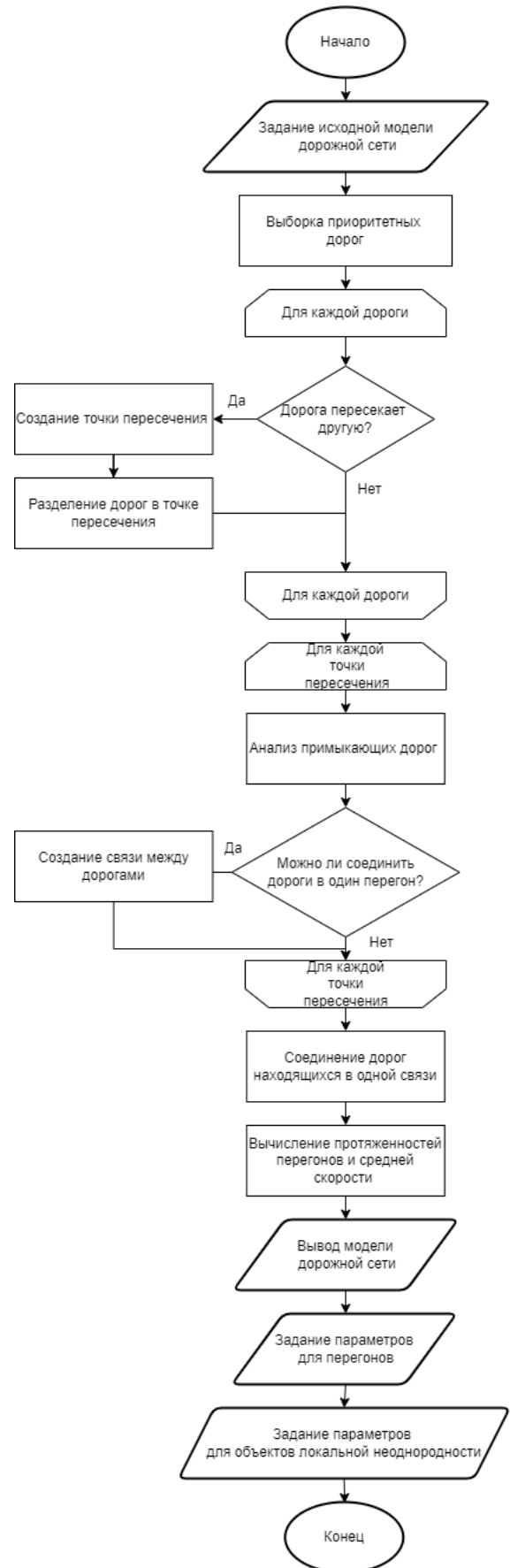


Рис. 2. Алгоритм разбиения дорожной сети на перегоны

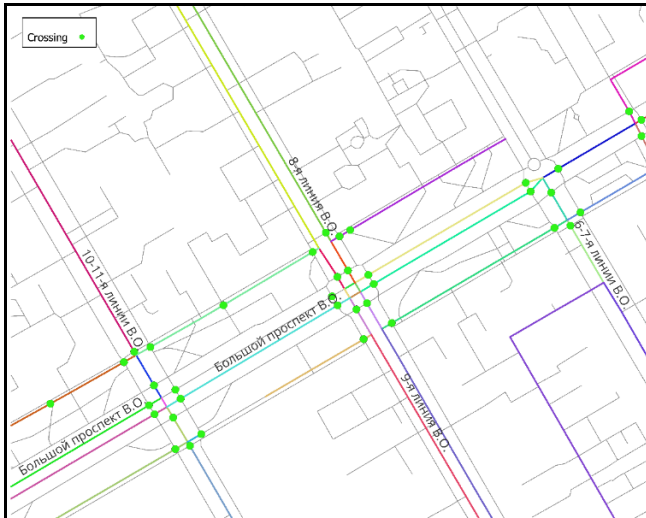


Рис. 3. Участок дорожной сети с разбиением на перегоны

Для каждого перегона занесены данные, характеризующие трафик, содержащие утреннюю и вечернюю пиковую интенсивность движения, рассчитанную для каждого типа транспорта, характеристики скоростного режима, протяжённость перегона. Фрагмент таблицы атрибутов класса перегонов представлен на рис. 4.

id	L	Gml	Gmll	Gmlll	GmIV	GmV	Gel	Gell	Gelll	GeIV	GeV	V
1	26	16	6	0	0	0	16	9	0	0	0	40
2	59	30	1	0	0	0	28	4	0	0	0	40
3	133	29	9	0	0	4	22	6	0	0	4	30

Рис. 4. Таблица атрибутов класса перегонов

Для каждого объекта локальной неоднородности транспортного потока сформирована структура данных, характеризующих количество остановок транспорта в утренний и вечерний час пик, а также характеристики светофорного регулирования для регулируемых перекрёстков, таблица атрибутов представлена на рис. 5.

id	Sml	SmlI	SmlII	SmlIV	SmV	Sel	Sell	SellI	SelIV	SeV	P	N
1	25	10	0	0	2	24	4	0	0	4	30	13
2	23	8	0	0	1	20	4	0	0	1	30	13
3	26	9	0	0	1	23	6	0	0	2	30	13

Рис. 5. Таблица атрибутов класса объектов локальной неоднородности транспортного потока

Полученные данные являются исходными для модуля расчёта массовых выбросов, являющегося составной частью геоинформационной системы моделирования эмиссии загрязняющих веществ.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования был разработан алгоритм разбиения дорожной сети на перегоны и произведена его реализация в ГИС. Создана геоинформационная модель дорожно-транспортной сети Василеостровского района Санкт-Петербурга, а также сформирована унифицированная структура исходных данных для моделирования рассеяния загрязняющих веществ, производимых автотранспортом.

Создаваемая пространственная модель дорожной сети, а также методологическое и алгоритмическое обеспечение, позволят оценить воздействие трафика на эмиссию загрязняющих веществ, в том числе не выхлопного происхождения.

Разрабатываемое программно-алгоритмическое обеспечение позволит произвести моделирование потенциального воздействия проектируемой дорожной сети с учётом предполагаемой транспортной нагрузки на состояние атмосферного воздуха. Это достигается за счёт применения новых, более эффективных методик моделирования, которые позволят при сравнительно низких временных затратах производить оценку рассеяния наиболее опасных загрязняющих веществ в различных условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Myshko R.A., Kurakina N.I. GIS for assessing road transport complex impact on urban air pollution // 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2022 ElConRus). СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 25-28 января 2022 г.
- [2] 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.
- [3] ГОСТ 32965-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока. М.: Стандартинформ, 2014.
- [4] ГОСТ Р 56162-2019 Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории. М.: Стандартинформ, 2019.
- [5] OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/about> (дата последнего посещения 10 марта 2024).