

Алгоритмическое обеспечение системы оценки воздействия дорожно-автомобильного комплекса на атмосферный воздух жилых территорий

Н. И. Куракина^{1✉}, Р. А. Мышко¹, Р. А. Бурдин¹, Н. Ф. Денисова²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Восточно-Казахстанский технический университет
им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

✉ nikurakina@etu.ru

Аннотация

Введение. Исследование посвящено разработке системы оценки экологического воздействия дорожно-автомобильного комплекса на загрязнение воздуха в городах. Актуальность работы определяется необходимостью создания принципиально новых подходов к оценке автотранспортного загрязнения воздуха городов, создания обобщенной геоинформационной модели городской территории, позволяющей определять зоны, подверженные воздействию загрязнения в большей степени с целью принятия решений, способствующих снижению загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге.

Цель работы. Разработка теоретических основ и программно-алгоритмического обеспечения геоинформационной системы моделирования загрязнения воздуха в условиях городской среды.

Материалы и методы. Применен математический аппарат теории измерений, теории систем, математического моделирования, обработки пространственных данных, объектно-ориентированного программирования.

Результаты. В соответствии с разработанными теоретическими основами создано программно-алгоритмическое обеспечение системы оценки загрязнения воздуха городской среды автомобильным транспортом, включающее модули подготовки исходных данных, построения пространственной модели дорожной сети, расчета эмиссии, производимой потоками автотранспорта, и моделирования распространения концентрации каждого загрязняющего вещества. Создана цифровая модель автотранспортного загрязнения жилых территорий Санкт-Петербурга.

Заключение. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение послужит основой при создании цифровой карты загрязнения воздуха, которая может применяться в качестве эффективного инструмента при решении задач городского планирования и повышения комфортности городской среды в рамках реализации программы стратегического развития Санкт-Петербурга. Реализация цифровой 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 провести моделирование в различных погодных условиях и с различным сочетанием характеристик трафика для выявления наиболее опасных сочетаний факторов загрязнения.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, автотранспорт, система оценки, моделирование, пространственная модель, метрологический анализ

Для цитирования: Алгоритмическое обеспечение системы оценки воздействия дорожно-автомобильного комплекса на атмосферный воздух жилых территорий / Н. И. Куракина, Р. А. Мышко, Р. А. Бурдин, Н. Ф. Денисова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 80–94. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-80-94

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.09.2024; принята к публикации после рецензирования 14.10.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

Algorithmic Support for Environmental Impact Assessment of Road Transport Infrastructure on Atmospheric Air in Urban Areas

Natalia I. Kurakina^{1✉}, Roman A. Myshko¹, Rodion A. Burdin¹, Natalya F. Denisova²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

✉ nikurakina@etu.ru

Abstract

Introduction. In this study, we develop a system for assessing the environmental impact of road transport on air quality in cities. The research relevance is determined by the need to create improved approaches to assessing air pollution in cities associated with the load of automobile transport. In this respect, a generalized geoinformation model for identifying the urban areas most exposed to pollution is required. This model can be used when developing measures aimed at improving the environmental situation in St Petersburg.

Aim. Development of theoretical foundations, as well as software and algorithmic support, with the purpose of creation of a geographic information system for modeling urban air pollution.

Materials and methods. The methods of measurement theory mathematics, systems theory mathematics, mathematical modeling, geoinformation data processing, and object-oriented programming were applied.

Results. Following the development of theoretical foundations, a software and algorithmic support complex for a system for assessing the level of air pollution in urban environments under the impact of road transport was created. This system includes the modules of initial data preparation, road network spatial modeling, calculation of pollutant emissions by vehicle flows, and modeling of the distribution of pollutant concentrations for each pollutant. A digital model of road transport pollution in the residential areas of St Petersburg was developed.

Conclusion. The developed software and algorithmic support can serve as the basis for development of a digital air pollution map. This map can be used when managing problems of urban planning and improving urban environment comfort as part of St Petersburg's strategic development program. The implementation of the developed digital model in the geographic information system of the city provides opportunities for assessing the impact of road pollution on residential infrastructure. Depending on the source data, including various weather and traffic conditions, the model can be used to identify the most dangerous combinations of pollution factors.

Keywords: air pollution, road transport, assessment system, modeling, spatial model, metrological analysis

For citation: Kurakina N. I., Myshko R. A., Burdin R. A., Denisova N. F. Algorithmic Support for Environmental Impact Assessment of Road Transport Infrastructure on Atmospheric Air in Urban Areas. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 80–94. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-80-94

Conflict of interest The authors declare no conflicts of interest

Submitted 10.09.2024; accepted 14.10.2024; published online 27.12.2024

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха является одним из наиболее опасных факторов, воздействующих на здоровье людей. В крупных городах, таких как Санкт-Петербург, наблюдается увеличение концентрации загрязнителей, связанное с совершенствованием транспортной инфраструктуры. В соответствии с отчетом об экологической ситуации в Санкт-Петербурге за 2022 г.,

число транспортных средств в городе увеличилось на 14 % за последнее десятилетие, а суммарная эмиссия загрязняющих веществ (ЗВ), связанных с эксплуатацией автотранспорта, за год выросла на 3 % [1]. Автомобильно-дорожный комплекс в крупных городах является основным источником эмиссии загрязняющих веществ, включая канцерогенные твердые частицы. По этой причине за-

Алгоритмическое обеспечение системы оценки воздействия
дорожно-автомобильного комплекса на атмосферный воздух жилых территорий
Algorithmic Support for Environmental Impact Assessment
of Road Transport Infrastructure on Atmospheric Air in Urban Areas

дачи оценки и принятия решений, направленных на минимизацию загрязнения атмосферного воздуха в городах, являются актуальными.

Задача оценки загрязнения атмосферного воздуха в результате воздействия автотранспорта осложняется пространственной и временной неоднородностью влияющих факторов, главным образом характеристик трафика. В связи с этим непосредственное измерение уровней загрязнения с целью проведения экологического мониторинга является трудоемким и дорогостоящим. При этом 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 [2]. В то же время в моделях в недостаточной степени учитывается загрязнение воздуха, связанное с эмиссией твердых частиц в результате износа самих транспортных средств (протекторов шин, тормозной системы) и дорожного полотна [3].

В силу указанных причин возникает задача формирования принципиально новых подходов к моделированию загрязнения воздуха, предполагающих создание пространственной модели, которая позволила бы определить территории Санкт-Петербурга, наиболее подверженные загрязнению воздуха, с целью улучшения экологической обстановки в городе.

Применение геоинформационных технологий в рамках разработки системы оценки автотранспортного загрязнения позволяет проводить автоматизированную комплексную оценку воздействия каждого объекта транспортной инфраструктуры на загрязнение воздуха, определять степень воздействия на жилые территории и наглядно отображать результаты оценки на карте.

Данное исследование будет полезным при решении задач, направленных на реализацию эффективной государственной политики в области защиты окружающей среды. Полученные научные результаты и разработанное алгоритмическое обеспечение могут быть применены в задачах городского планирования и проектирования объектов транспортно-дорожной инфраструктуры Санкт-Петербурга.

Методы. Оценка загрязнения воздуха связана, в первую очередь, с определением характеристик источников загрязнения и определением перечня факторов, которые оказывают воздействие на величину этого загрязнения. Основным оцениваемым параметром является концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе и факт превышения предельно допустимой величины, установленной нормативными документами. Пространственно неоднородный характер источников и значительное количество влияющих факторов, которые имеют место при оценке автотранспортного загрязнения, требуют особого подхода к организации и сбору исходных данных, необходимых для моделирования загрязнения. Таким образом, процедура оценки автотранспортного загрязнения состоит из нескольких этапов.

Первым этапом является построение пространственной модели дорожной сети на основе данных геометрии, конструктивных особенностей дорожной сети и характеристик трафика. Данная модель представляет собой совокупность элементов (дорожных перегонов), характеризующихся условно постоянным набором характеристик, влияющих на эмиссию загрязняющих веществ и рассматриваемых как источники загрязнения.

Следующим этапом является расчет эмиссии всех рассматриваемых загрязнителей для каждого источника, производимых потоком транспортных средств (ТС), движущимся по данному перегону.

На третьем этапе проводится моделирование рассеяния загрязняющих веществ на основе рассчитанных характеристик эмиссии, конфигурации и расположения источников, а также климатических условий, в результате чего формируются массивы значений концентрации загрязнителя для каждой точки пространства с заданным шагом.

На четвертом этапе осуществляется суммирование концентраций загрязняющих веществ для каждой точки исследуемой области с последующей оценкой превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) с целью определения территорий, подверженных большему загрязнению воздуха.

Заключительным этапом описанной процедуры является оценка достоверности получен-

ных результатов моделирования с учетом полноты и точности исходных данных.

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 статье предлагается использовать метод разбиения дорожной сети на элементарные участки – дорожные перегоны. Дорожный перегон представляет собой участок дороги, совокупность конструктивных характеристик, а также характеристик трафика, для которого может быть принята условно постоянной. В частности, состав потока, скорость и интенсивность движения изменяются в пределах перегона не более чем на 15 %.

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 [4].

Факторы, учитываемые при разбиении дорожной сети на перегоны, можно разделить на следующие группы:

1. Изменения геометрии дорожной сети (к данной категории относятся сочленения дорог: регулируемые и нерегулируемые перекрестки 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.

2. Статические характеристики дорожного перегона. К данной категории относятся посто-

янные характеристики, имеющие отношение ко всему перегону: установленный 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.

3. Динамические характеристики дорожного перегона. К данной категории относятся оперативные данные, характеризующие режим движения: например, если весь дорожный перегон занят автомобильной пробкой, требуется использовать алгоритм расчета выбросов загрязняющих веществ для стоящих транспортных средств. Также, если дорога перекрыта для движения на текущий момент в связи с ремонтом или общественным мероприятием, учет интенсивности не требуется.

Характер эмиссии загрязняющих веществ, производимых неподвижным транспортом с работающим двигателем, отличен и поэтому требует дополнительного учета. Наибольший интерес представляют периодические остановки транспортного потока на перекрестках и пешеходных переходах. Для каждого перегона определяется количество транспортных средств различных типов, находящихся в неподвижном состоянии $S_1 \dots V$, а также продолжительность периода остановки и число этих периодов за рассматриваемый промежуток времени.

Для каждого направления движения задается отдельный перегон. Для каждого перегона определяется кортеж параметров в соответствии с рассмотренными ранее характеристиками:

$$R_i = \{L, H, C, Z, N_p, W_p, v, P_b, T, G_1 \dots G_V, S_1 \dots S_V, P_c, N_c\},$$

где L – протяженность 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, баллы; T – рассматриваемый период, мин; G – соответственно, интенсивности движения за период T ($1 \dots V$ – типы транспортных средств); S – соответственно, число 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 .

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). Кorteж параметров объектов локальной неоднородности определяется выражением

$$S_i = \{P_c, N_c, T, S_1 \dots S_V\}.$$

Структура данных содержит перечень параметров, необходимых для дальнейшего моделирования загрязнений. В соответствии с разработанными критериями деления дорожной сети, corteж параметров перегонов и объектов локальной неоднородности транспортного потока реализован алгоритм разделения дорожной сети на перегоны и построена пространственная модель дорожной сети [5].

Расчет массовых величин эмиссии загрязняющих веществ. Расчет массовых величин эмиссии загрязняющих веществ осуществляется в соответствии с ранее разработанным алгоритмом [4] и пространственной моделью дорожной сети. Процедура расчета эмиссии загрязняющих веществ регулируется ГОСТ Р 56162–2019 [6].

Эмиссия i -го загрязняющего вещества M_i [г/с], производимого движущимся по перегону протяженностью L [км] потоком транспортных средств, определяется следующим образом:

$$M_i = \frac{L}{T \cdot 60} \sum_1^k M_{k,i}^L G_k r_{v_{kj}},$$

где $M_{k,i}^L$ – удельная эмиссия i -го загрязняющего вещества транспортными средствами k -го типа, г/км; G_k – интенсивность движения автомобилей k -го типа за период T ; $r_{v_{kj}}$ – поправочный коэффициент средней скорости движения автомобилей. $M_{k,i}^L$ для рассматриваемого региона определяется в соответствии с [7]. При определении данных величин важное значение имеет парк транспортных средств, в частности соотношение категорий автомобилей, соответ-

ствующих тому или иному классу экологической безопасности (Евро0...Евроб), типу применяемого топлива, году выпуска и степени износа. Удельные эмиссии твердых частиц определяются в соответствии с [8]. Удельные эмиссии загрязнителей, в первую очередь твердых 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 твердых частиц. В качестве источника данных об интенсивности движения используются результаты видеосъемки с камер наблюдения, обработанные с использованием нейросети ImageAI [9]. Скоростной режим оказывает значительное влияние на эмиссию выхлопных газов: частые периоды торможения и разгона, которые характерны для движения плотного транспортного потока в условиях городской среды, способствуют увеличению удельной эмиссии.

Объекты локальной неоднородности потока вызывают периодические остановки автотранспорта, так же как и регулируемые перекрестки на концах перегонов. Скопление очереди транспортных средств в районе таких объектов учитывается при моделировании за счет введения дополнительной удельной эмиссии для неподвижного транспорта $S_1 \dots V$.

В результате расчета для каждого перегона и объекта локальной неоднородности потока формируется перечень эмиссии загрязняющих веществ. Совокупность полученных массовых эмиссий загрязняющих веществ, произведенных каждым источником загрязнения (объектом пространственной модели дорожной сети), климатические условия и характеристики окружающей среды формируют перечень данных, необходимых для моделирования рассеяния загрязняющих веществ и определения разовых концентраций загрязнителей в рассматриваемых точках пространства.

Моделирование распространения концентрации загрязняющих веществ. Моделируемым параметром является максимальная разовая приземная концентрация загрязняющего вещества. При всем многообразии существующих моделей рассеяния, в их основе, как правило, лежит один из подходов к решению

уравнения турбулентной диффузии. При выборе модели рассеяния для реализации алгоритма наиболее важными критериями являются достоверность результатов, соответствие нормативным требованиям и потенциальная скорость обработки данных. Данным критериям удовлетворяют квазиэмпирические модели. В качестве базовой модели рассеяния используются методы, описанные в [10]. В соответствии с вышеуказанными методами реализован алгоритм моделирования приземной концентрации загрязняющих веществ, производимых точечными источниками [11]. Однако, учитывая значительную протяженность, автомобильные дороги необходимо классифицировать как протяженные или площадные объекты и целесообразно рассматривать линейную модель при моделировании загрязнения, поскольку в исследуемом масштабе длина дороги значительно превосходит ширину. Предлагаемый метод моделирования был изложен в [12].

Автомобильная дорога рассматривается как источник выбросов фиксированной высоты. В качестве протяженного источника рассматривается дорожный перегон, а в качестве мощности эквивалентного точечного источника – эмиссия загрязнителя потоком автотранспорта, движущегося по данному перегону. Максимальная приземная концентрация [10] определяется выражением

$$C_{\max} = \frac{0.9AMF\eta}{H^{7/3}},$$

где A – коэффициент, характеризующий температурную стратификацию атмосферы (для Санкт-Петербурга $A = 160$); M – эмиссия загрязняющего вещества потоком транспортных средств за период T , г/с; F – коэффициент, характеризующий скорость гравитационного оседания загрязнителя; η – коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности (для ровной местности $\eta = 1$). При этом опасная скорость ветра для рассматриваемого типа источников составляет $u_{\max} = 0.5$ м/с. Расстояние, на котором достигается максимальная приземная концентрация загрязняющего вещества $C_{\max}$ при неблагоприятных метеорологических условиях, составляет $x_{\max} = 5.7 \cdot H$.

Разовая концентрация загрязнителя c в рассматриваемой точке местности (x, y, z) определяется в соответствии с величинами $C_{\max}$, $u_{\max}$, $x_{\max}$ и заданными скоростью u и направлением ветра u_f .

Дорожный перегон рассматривается как протяженный источник. В соответствии с моделью [10] концентрация загрязнителя от линейного источника (c_l) , расположенного вдоль отрезка l трехмерной кривой, рассчитывается по формуле

$$c_l(x, y, z) = \frac{1}{|L|} \int_l c(x - \xi, y - \eta, z - \zeta) dl,$$

где $c_l(x, y, z)$ – концентрация загрязняющего вещества, достигаемая в точке (x, y, z) в результате воздействия точечного источника, находящегося в точке (ξ, η, ζ) отрезка l длины $|L|$. Подынтегральная функция вычисляется по формулам, применяемым для эквивалентного точечного источника. Характеристики эмиссии загрязняющего вещества и направление ветра принимаются постоянными на протяжении всего перегона.

В рамках поставленной задачи рассматривается приземная концентрация загрязняющих веществ $c(x, y)$. Расчет ведется для наземных источников выброса (дорожные перегоны, расположенные на уровне земли). Поэтому из выражения исключается вертикальная составляющая z :

$$c_l(x, y) = \frac{1}{|L|} \int_l c(x - \xi, y - \eta) dl,$$

Пусть координаты концов дорожного перегона заданы в виде $A(x_1, y_1)$ и $B(x_2, y_2)$, а сам он задан функцией $y(x)$. Криволинейный интеграл первого рода в данном случае может быть сведен к определенному интегралу:

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

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 ис-

точника, определенный интеграл сводится к сумме концентраций загрязняющих веществ, производимых точечными источниками, расположенными на каждом малом отрезке протяженного источника, шаг расположения которых задан в соответствии с требованиями к точности моделирования.

Моделирование проводится для всех исследуемых дорожных перегонов. Учитывая специфику задания геометрии протяженных объектов в геоинформационных системах (ГИС), их можно в автоматизированном режиме разбить на элементарные прямолинейные участки, для каждого из которых задать локальную систему координат. При этом дискретность вычисления интегралов может быть подобрана в соответствии с требованиями к точности моделирования приземной концентрации.

Расчет суммарной концентрации загрязняющих веществ. В соответствии с [10], концентрация загрязняющего вещества в рассматриваемой точке определяется как сумма концентраций данного вещества от всех источников эмиссии, воздействующих на данную точку при заданных направлении и скорости ветра:

$$C = c_1 + c_2 + \dots + c_N,$$

где $c_1, c_2, \dots, c_N$ – концентрации загрязняющего вещества, соответственно, от 1, 2, ..., N -го источников эмиссии, расположенных с наветренной стороны.

Важной задачей при оценке суммарной концентрации загрязняющих веществ является определение граничных условий для моделирования концентрации от каждого рассматриваемого источника: если рассматривается воздействие одного отдельно взятого источника (перегона или объекта локальной неоднородности потока), расчет концентрации осуществляется последовательно с заданным шагом в точках, по мере удаления от источника до тех пор, пока концентрация превосходит предельно допустимую (c_i ПДК). Когда рассматривается суммарное воздействие от группы компактно расположенных источников, что характерно для задачи оценки автотранспортного загрязнения, очевидно, что в некоторых точках суммарная концентрация от нескольких источ-

ников может превышать ПДК и при условии, что ни одна из составляющих ее не превысила. По этой причине граничные условия для моделирования концентрации i -го загрязняющего вещества следует определять из соотношения

$$c_{i \text{ гр}} = c_i \text{ ПДК} / n - c_{i \text{ фон}},$$

где n – количество источников i -го загрязняющего вещества, располагающихся в пределах максимального характерного расстояния достижения по направлению ветра концентрации на уровне ПДК x_c ПДК, в данных метеорологических условиях определяемого эмпирическим путем; $c_{i \text{ фон}}$ – фоновая концентрация рассматриваемого загрязняющего вещества в регионе.

Алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ. В соответствии с вышеизложенными методами был разработан алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ в результате воздействия автотранспорта (рис. 1).

Алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ, эмитируемых транспортным потоком, движущимся по перегону, включает следующие этапы:

1. Ввод параметров моделирования, включающих климатические параметры (направление (u_f) и скорость (u) ветра), перечень значений ПДК всех рассматриваемых загрязняющих веществ (c_i ПДК), определение граничных условий для моделирования рассеяния.

2. Ввод параметров дорожных перегонов, включая эмиссию каждого загрязняющего вещества $\{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, а также геометрии перегонов (последовательность координат сегментов дорожного перегона) $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$.

3. Разбиение дорожного перегона на сегменты, заданные координатами концов (x_1, y_1, x_2, y_2) .

4. Задание локальной системы координат с центром в точке x_1, y_1 или x_2, y_2 в соответствии с направлением ветра и осью Ox , совпадающей с сегментом. Логика инициализации локальной системы координат для каждого сегмента проиллюстрирована на рис. 2.

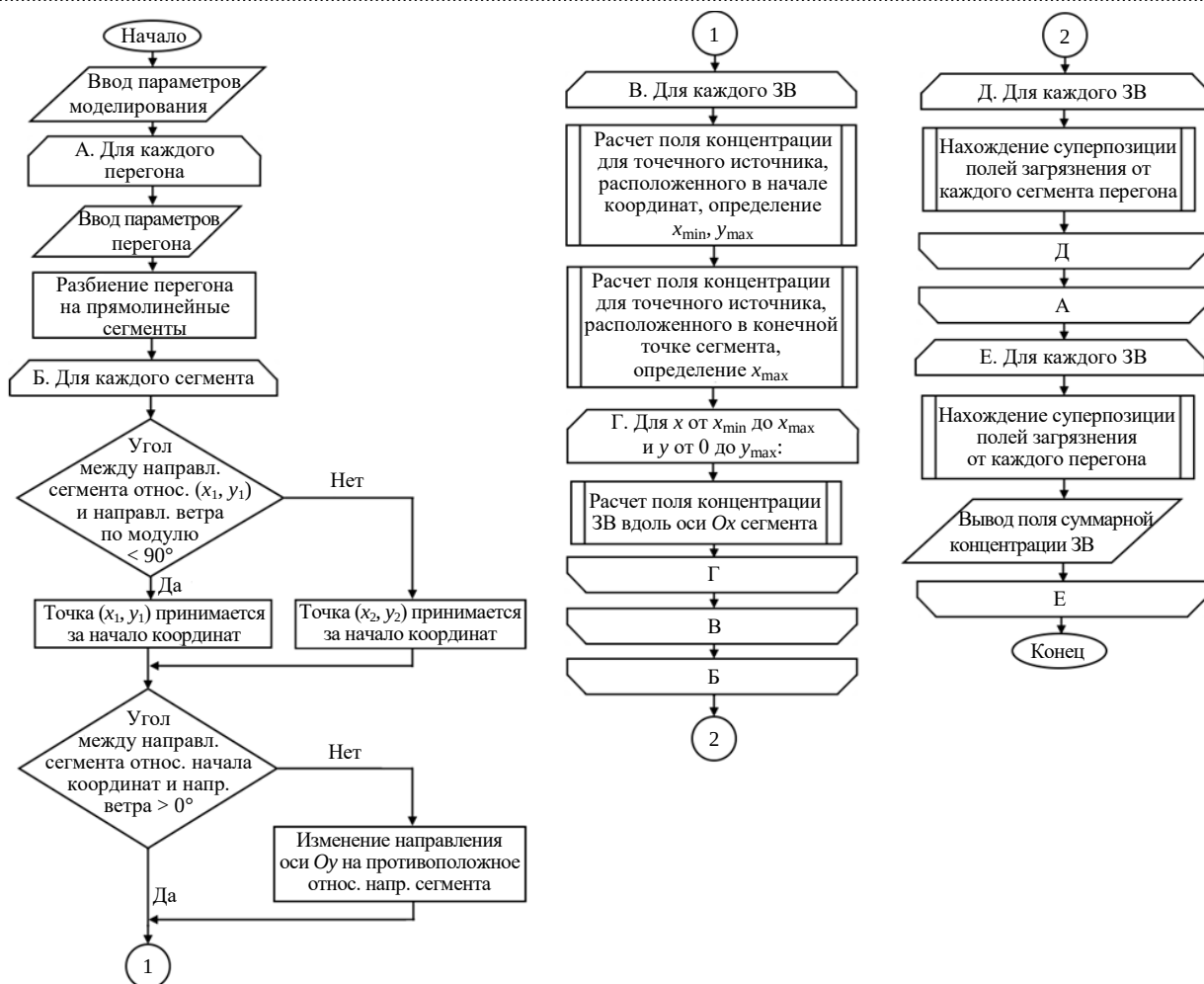


Рис. 1. Алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ

Fig. 1. Algorithm for modeling the distribution of pollutant concentrations

5. Моделирование поля концентрации для эквивалентного точечного источника, расположенного в начале координат; определение граничных условий моделирования $x_{\min}$, $y_{\max}$ в соответствии с ПДК.

6. Моделирование поля концентрации для эквивалентного точечного источника, расположенного в конце сегмента; определение $x_{\max}$, на котором достигается величина, превышающая ПДК.

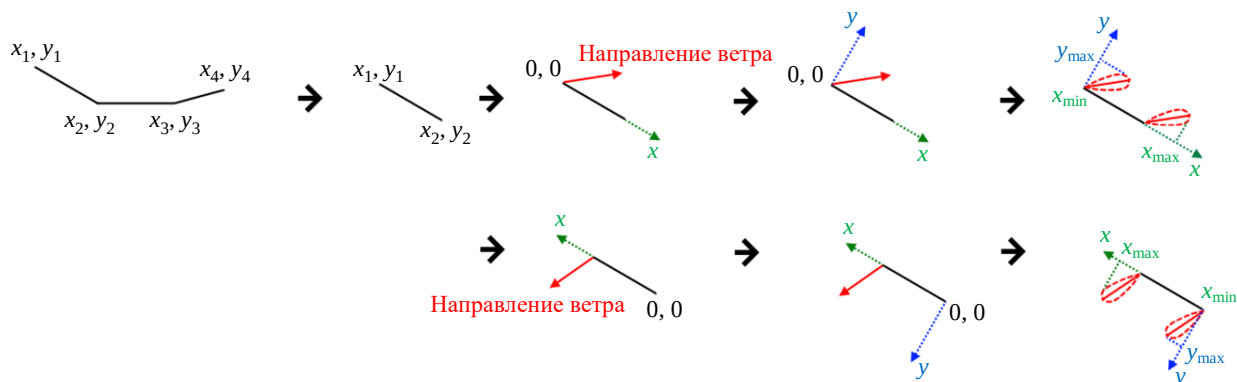


Рис. 2. Задание локальной системы координат и определение пределов интегрирования для прямолинейного сегмента дорожного перегона

Fig. 2. Setting the local coordinate system and determining the integration limits for a straight road section

7. Вычисление поля концентрации от протяженного источника путем численного интегрирования с заданным шагом для x от $x_{\min}$ до $x_{\max}$ и y от 0 до $y_{\max}$.

8. Нахождение суперпозиции полей загрязнения элементарных сегментов перегона для расчета результирующего поля концентрации каждого загрязняющего вещества.

9. Нахождение суперпозиции полей концентрации загрязнителей от каждого дорожного перегона для расчета суммарного поля концентрации от всей дорожной сети.

Результатом работы алгоритма является массив значений приземной разовой концентрации каждого загрязняющего вещества в окрестности анализируемых дорожных перегонов с заданным шагом дискретизации $c_1[x][y] \dots c_N[x][y]$.

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.

Характеристики городской среды, такие как расположение и конфигурация застройки, зеленых насаждений, структура расположения объектов гражданской инфраструктуры, требуют дополнительного учета на этапе моделирования и оценки суммарных концентраций загрязнителей и определения объектов, на которые оказывается наибольшее воздействие.

С целью обеспечения достоверности результатов моделирования за счет учета максимального числа влияющих факторов формируется геоинформационная система, позволяющая объединить данные, характеризующие: климатические условия; характеристики городской среды; пространственно-распределенные данные, интегрированные пространственной моделью дорожной сети, а также разработанные программные модули, применяемые: для вычисления массовых выбросов загрязняющих веществ; моделирования распространения приземной концентрации от точечных и протяженных источников; расчета суммарной концентрации и определения степени воздействия на урбанизированные территории. Обобщенная структура

ГИС оценки автотранспортного загрязнения представлена на рис. 3.

Пространственная модель дорожной сети реализована в геоинформационной системе QGIS. Объектом исследования выбран фрагмент территории Калининского района 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. Основные принципы построения пространственных моделей изложены в исследовании [13].

Исходные геоданные представлены в виде слоя дорог OpenStreetMap (линейные объекты), характеристик трафика, определенных для каждого участка дороги. В результате применения к данным алгоритма разбиения дорожной сети на перегоны была создана пространственная модель дорожной сети, организованная в виде реляционной базы данных, содержащей полный перечень исходных данных для моделирования автотранспортного загрязнения [14]. Результат обработки исходных данных представлен на рис. 4.

Пример моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта, представлен на рис. 5.

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

Оценка достоверности полученных результатов. Достоверность результатов оценки концентрации загрязняющего вещества определяется, главным образом, полнотой и точностью исходных данных. Суммарная стандартная неопределенность оценки разовой концентрации газообразного загрязняющего вещества в заданной пространственной точке $c(x, y)$ определяется выражением

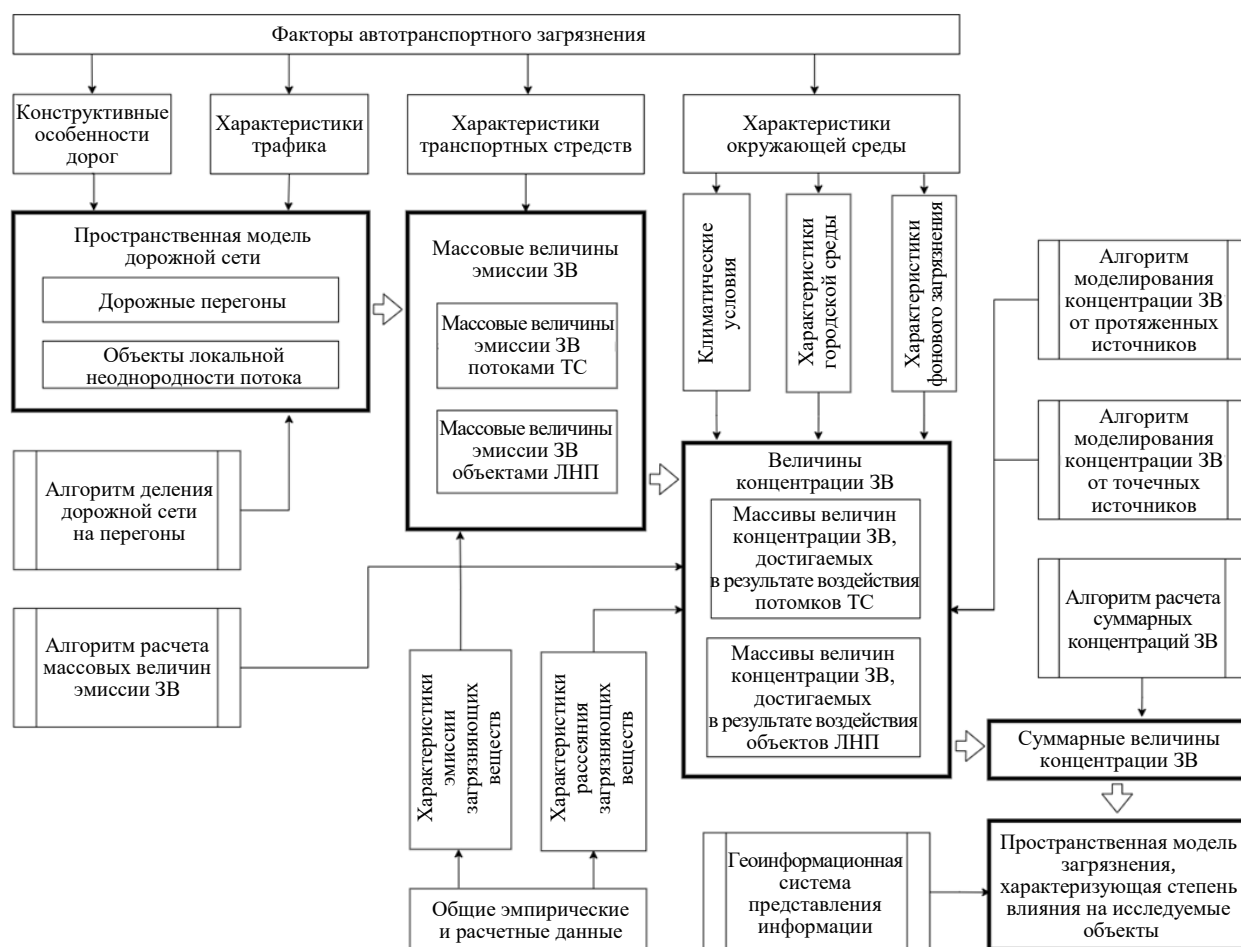


Рис. 3. Обобщённая структура геоинформационной системы оценки автотранспортного загрязнения

Fig. 3. Generalized structure of the geoinformation system for assessing air pollution under the impact of road transport

$$u(c_{x,y_i}) = \left(c_1^2 u(M_i)^2 + c_2^2 u(H)^2 + c_3^2 u(u)^2 + c_4^2 u(u_f)^2 + c_5^2 u(x)^2 + c_6^2 u(y)^2 + c_7^2 u(f)^2 \right)^{1/2},$$

где $c_1 - c_7$ – коэффициенты влияния, определяемые в соответствии с применяемыми методиками расчета соответствующих величин; $u(M_i)$, $u(H)$, $u(u)$, $u(u_f)$, $u(x)$, $u(y)$, $u(f)$ – неопределенности вычисления эмиссии i -го загрязняющего вещества, измерения высоты источника, скорости и направления ветра, координат источника, численного интегрирования. Неопределенность $u(M_i)$ определяется выражением

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

где $c_8 - c_{10}$ – коэффициенты влияния; $u(G_k)$ – неопределенность измерения интенсивности движения k -го типа транспортных средств;

$u(L)$ – неопределенность измерения протяженности перегона; $u(T)$ – неопределенность измерения временного интервала; $u(G_k)$ определяется неопределенностью измерения общей интенсивности движения $u(G)$ и неопределенностью идентификации типа транспортного средства $u(I_k)$:

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

где c_{11}, c_{12} – коэффициенты влияния. При условии соответствия точности измерений входных величин требованиям перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [15], суммарная стандартная неопределенность оценки разовой концентрации газообразного загрязняющего вещества в заданной пространственной точке будет находиться в допустимом диапазоне, позволяющем применять разработан-

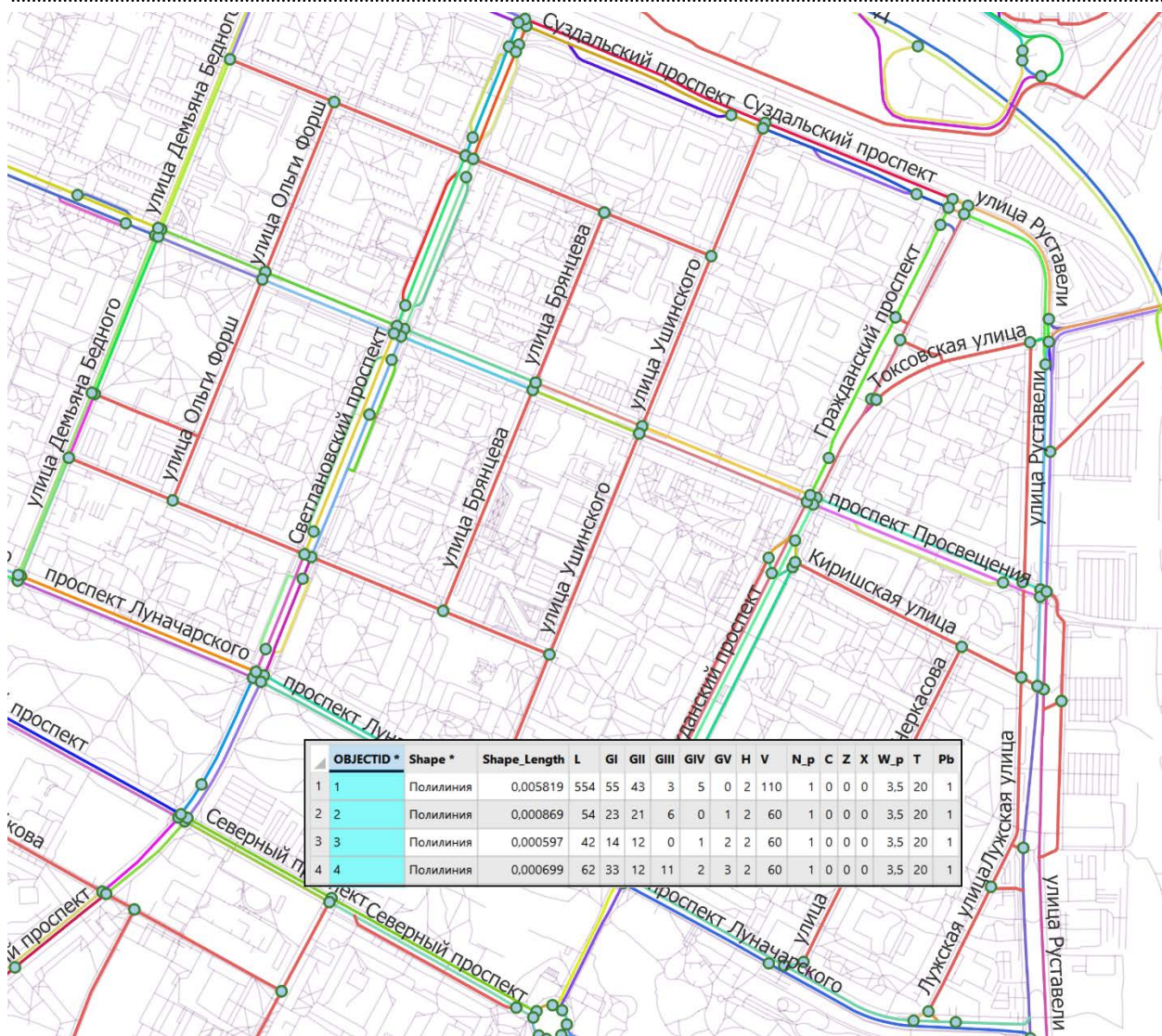


Рис. 4. Пространственная модель дорожной сети и атрибутивные данные дорожных перегонов
Fig. 4. Spatial model of a road network and attribute data of road sections

ное программно-алгоритмическое обеспечение для экстремальной оценки загрязнения воздуха автомобильным транспортом. При этом выбранный шаг дискретизации моделирования должен обеспечивать требования [10]. Граничные условия вычисления моделирования и шаг дискретизации должны выбираться таким образом, чтобы погрешность интегрирования не превышала 3 %. Расчетная погрешность численного интегрирования в заданных начальных условиях оценивается в автоматизированном режиме путем измельчения шага дискретизации до соблюдения условий, указанных в [10]. Рекомендуемый шаг дискретизации для оценки городского загрязнения воздуха составляет 1 м. Большие значения шага дискретизации могут

быть использованы для приближенной оценки загрязнения воздуха в случае, если приоритетной является скорость обработки данных.

Неопределенность оценки разовой концентрации твердых частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} помимо вышеуказанных факторов будет определяться соответствием исследуемого региона требованиям, предъявляемым методикой [8]. Факторы эмиссии невыхлопных твердых частиц в результате износа тормозной системы, протекторов шин, дорожного полотна и вторичного ресуспендирования пыли в процессе движения определены для оценки загрязнения в условиях крупного города Европейской части России с учетом совокупности влияющих климатических факторов, состояния дорожной инфраструктуры, структуры

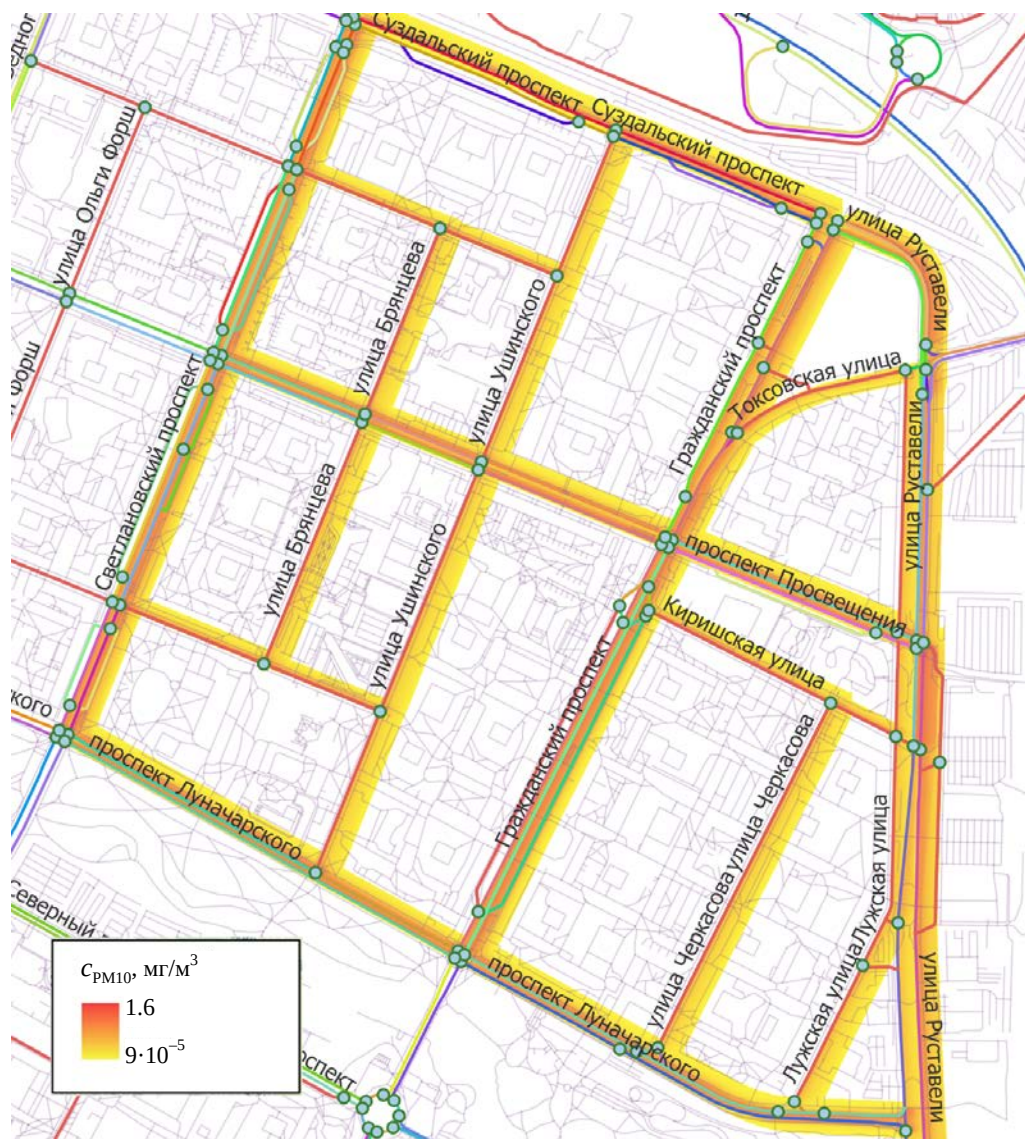


Рис. 5. Результат моделирования приземной концентрации PM10

Fig. 5. Result of modeling a ground-level PM10 concentration

автопарка по части экологического класса автомобилей и средней степени износа. Для применения разработанного программно-алгоритмического обеспечения для оценки автотранспортного загрязнения в других регионах может потребоваться верификация и корректировка факторов эмиссии загрязняющих веществ.

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 учетом твердых 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, расчета эмиссии загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта и моделирования распространения концентрации с последующей возможностью анализа степени воздей-

ствия на объекты гражданской инфраструктуры. Проведена оценка достоверности полученных результатов моделирования. Разработана цифровая модель автотранспортного загрязнения жилых территорий Санкт-Петербурга. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение

планируется интегрировать в обобщенную 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. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2022 году / под ред. А. В. Германа, И. А. Серебрицкого. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2023/06/30/40/Доклад_за_2022_г.pdf (дата обращения: 19.11.2024).

2. 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. Vol. 40, № 30. P. 5902–5928. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.003

3. Леванчук А. В. Совершенствование системы социально-гигиенического мониторинга на территории с развитым автомобильно-дорожным комплексом // Общественное здоровье и здравоохранение. 2014. № 4. С. 78–82.

4. Куракина Н. И., Мышко Р. А. Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 105–115 doi:10.32603/1993-8985-2022-25-6-90-100

5. Мышко Р. А., Куракина Н. И., Бурдин Р. А. Алгоритм формирования пространственной модели дорожно-транспортной сети для оценки загрязнения атмосферного воздуха // Материалы XXVII Международ. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024), Санкт-Петербург, 22–24 мая 2024. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2024. 264 с.

6. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. М.: Интеграл, 1999. 15 с.

7. Распоряжение Росприроднадзора от 13.12.2019 № 37-р "Об утверждении порядка организации работ по оценке выбросов от отдельных видов передвижных источников". URL: <https://docs.cntd.ru/document/499073959> (дата обращения: 19.11.2024).

8. Невмержицкий Н. В., Ложкина О. В., Ложкин В. Н. Расчетная методика и компьютерная программа для оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взве-

шенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ // Вестн. гражданских инженеров. 2016. Т. 2, № 55. С. 206–209.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662545 "Оценка дорожного трафика с использованием нейросетей". URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2024662545 (дата обращения: 19.11.2024)

10. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения: 19.11.2024).

11. Куракина Н. И., Мышко Р. А. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами в технологии геоинформационных систем // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2021. № 5. С. 21–27.

12. Myshko R. A., Kurakina N. I. GIS for assessment and modeling air pollution by industrial facilities // IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, St Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 1789–1802. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396270

13. Анализ данных с использованием ГИС / Н. И. Куракина, Р. А. Мышко, П. Т. Прохожаев, К. Д. Дмитриенко // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2024. Т. 17, № 3. С. 36–43. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-36-43

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024623146 "База данных цифровой модели дорожной сети". URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2024623146 (дата обращения: 19.11.2024).

15. Перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений / утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 нояб. 2020 г. № 1847. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302171502/titles/65401> (дата обращения: 19.11.2024).

Информация об авторах

Куракина Наталия Игоревна – кандидат технических наук (2001), доцент (2002), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий, директор УНЦ "ГИС технологии" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 180 научных работ. Сфера научных интересов – комплексная оценка; мониторинг; анализ и управление объектами на ГИС-основе.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: NIKurakina@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1827-5259>

Мышко Роман Андреевич – магистр по специальности "Приборостроение" (2021, СПбГЭТУ "ЛЭТИ"), аспирант кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – алгоритмическое и программное обеспечение ГИС-систем.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: romanmyshko@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5657-1126>

Бурдин Родион Александрович – бакалавр по специальности "Приборостроение" (2024, СПбГЭТУ "ЛЭТИ"), магистрант кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – алгоритмическое и программное обеспечение ГИС-систем.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: rodiogch@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-7698-7400>

Денисова Наталья Федоровна – кандидат физико-математических наук (2006), ассоциированный профессор-доцент (2020), ассоциированный профессор департамента информационных технологий, цифровой офицер Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева. Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – математическое и компьютерное моделирование; анализ и управление объектами на ГИС-основе.

Адрес: Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, д. 19, Усть-Каменогорск, 070004, Казахстан

E-mail: ndenisova@edu.ektu.kz

<https://orcid.org/0000-0003-0525-730X>

References

1. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Sankt-Peterburge v 2022 godu* [Report on the Environmental Situation in St Petersburg in 2022]. Ed. by A. V. German, I. A. Serebriiskii. Available at: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2023/06/30/40/Доклад_за_2022_g.pdf (accessed 19.11.2024).

2. 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, vol. 40, no. 30, pp. 5902–5928. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.003

3. Levanchuk A. V. System Development of Social-Hygienic Monitoring in the Territory with Developed Automobile-Road Complex. *Public Health and Health Care*. 2014, no. 4, pp. 78–82. (In Russ.)

4. Kurakina N. I., Myshko R. A. A Module for Calculating Pollutant Mass Emissions Produced by Traffic Flows. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 6, pp. 90–100. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-90-100 (In Russ.)

5. Myshko R. A., Kurakina N. I., Burdin R. A. *Algoritm formirovaniya prostranstvennoy modeli dorozhno-transportnoy seti dlya ocenki zagryazneniya atmosfernogo vozduha* [Algorithm for Generation of a Road Transport Network Spatial Model for Assessing Air Pollu-

tion]. *Proc. of the XXVII Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM'2024)*, SPb., 22–24 May 2024. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2024, 264 p. (In Russ.)

6. *Metodika opredeleniya vybrosov avtotransporta dlja provedeniya svodnyh raschetov zagryazneniya at-mosfery gorodov*. [Methodology for Determining Vehicle Emissions for Conducting Summary Calculations of Urban Air Pollution.]. Moscow, Integral, 1999, 15 p. (In Russ.)

7. *Rasporjazhenie Rosprirodnadzora ot 13.12.2019 № 37-r "Ob utverzhdenii porjadka organizacii rabot po ocenke vybrosov ot otdel'nyh vidov peredvizhnyh istochnikov"* [Order of Rosprirodnadzor dated 13.12.2019 № 37-r "On Approval of the Procedure for Organizing Work on Assessing Emissions from Certain Types of Mobile Sources"]. Available: <https://docs.cntd.ru/document/499073959> (accessed 19.11.2024).

8. Nevmerzhitsky N. V., Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Calculation Methodic and Computer Program for Estimation and Prognostication of Road Air Pollution by PM₁₀ and PM_{2.5}. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2016, vol. 2, iss. 55, pp. 206–209. (In Russ.)

9. *Ocenka dorozhnogo trafika s ispol'zovaniem nejrosetej* [Road traffic estimation using neural networks]. Certificate of state registration of a computer program no. 2024662545. Available at: <https://new.fips.ru/>

registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2024662545 (accessed 19.11.2024)

10. *Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh* [Methods for Calculating the Dispersion of Emissions of Harmful (Polluting) Substances in the Atmospheric Air]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (accessed 23.11.2022)

11. Kurakina N. I., Myshko R. A. Atmospheric Air Pollution Modeling by Industrial Facilities in the Technology of Geoinformation Systems. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2021, no. 5, pp. 21–27. (In Russ.)

12. Myshko R. A., Kurakina N. I. GIS for assessment and modeling air pollution by industrial facilities // IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, St Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 Jan. 2021. IEEE, 2021, pp. 1789–1802. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396270

13. Kurakina N. I., Myshko R. A., Prokhozhaev P. T., Dmitrienko K. D. Analysis of Aerial Photography Data Using GIS. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2024, vol. 17, no. 3, pp. 36–43. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-36-43 (In Russ.)

14. *Baza dannyh cifrovoy modeli dorozhnoy seti* [Digital Road Network Model Database] Certificate of state registration of a computer program no. 2024623146. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2024623146 (accessed 19.11.2024)

15. *Perechen' izmerenij, odnosjashhihsja k sfere gosudarstvennogo regulirovaniya obespechenija edinstva izmerenij*. [List of measurements related to the sphere of state regulation of ensuring the unity of measurements] Approved by Decree of the Government of the Russian Federation of November 16, 2020 no. 1847. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1302171502/titles/65401> (accessed 19.11.2024)

Information about the authors

Natalia I. Kurakina, Cand. Sci. (Eng.) (2001), Associate Professor (2002), Associate Professor of the Department of Information and Measurement Systems and Technology, Director of the Scientific and Research Center "GIS Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 180 scientific publications. Area of expertise: complex assessment; monitoring; analysis and object management on the GIS basis. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St, St Petersburg 197022, Russia E-mail: NIKurakina@etu.ru <https://orcid.org/0000-0003-1827-5259>

Roman A. Myshko, Master's degree in "Instrument Engineering" (2021, ETU), Postgraduate of the Department of Information and Measurement Systems and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: algorithmic and software support of GIS-systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St, St Petersburg 197022, Russia E-mail: romanmyshko@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5657-1126>

Rodion A. Burdin, Bachelor's degree in "Instrument Engineering" (2024, ETU), Master of the Department of Information and Measurement Systems and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: algorithmic and software support of GIS-systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St, St Petersburg 197022, Russia E-mail: rodiogch@gmail.com <https://orcid.org/0009-0004-7698-7400>

Natalya F. Denisova, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2006), Associate Professor (2020), Associate Professor of Department of Information Technologies, digital officer of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: mathematical and computer modeling; analysis and management of objects on a GIS basis. Address: D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, D. Serikbaev St, Ust-Kamenogorsk 070004, Republic of Kazakhstan E-mail: ndenisova@edu.ektu.kz <https://orcid.org/0000-0003-0525-730X>