

Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта

Н. И. Куракина[✉], Р. А. Мышко

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

✉ nikurakina@etu.ru

Аннотация

Введение. В современных условиях автомобильный транспорт становится основным источником загрязнения атмосферного воздуха в городах. Проблема оценки состояния воздуха и моделирования распространения загрязнений требует совершенствования используемых моделей и методов. В частности, в современных исследованиях обоснована необходимость учета содержания твердых частиц помимо составляющих выхлопных газов. Для оценки загрязнения воздуха в населенных пунктах требуется алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее осуществлять комплексную оценку с учетом максимального числа влияющих факторов.

Цель работы. Разработка алгоритма и программы расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта, необходимых для дальнейшего моделирования загрязнения атмосферного воздуха в условиях городской среды.

Материалы и методы. Применен математический аппарат теории измерений, теории систем, статистического исследования зависимостей и математического моделирования.

Результаты. Исследованы методы учета характеристик городской дорожной сети для оценки уровней эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Рассмотрены существующие подходы к классификации автомобильных дорог, выделены существенные характеристики, оказывающие влияние на эмиссию загрязняющих веществ, среди которых конструктивные особенности дорог, характеристики трафика и особенности городской среды. Разработан алгоритм и программный модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта.

Заключение. Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ является составной частью комплексной системы моделирования загрязнения атмосферного воздуха жилых территорий мегаполисов автомобильным транспортом. Разработанный модуль может быть использован для экологического мониторинга, оценки и прогнозирования загрязнения воздуха, выявления проблемных зон и выработки организационных решений, направленных на улучшение экологической обстановки в населенных пунктах.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, автотранспорт, массовые выбросы загрязняющих веществ, пространственная модель, геоинформационная система

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; принята к публикации после рецензирования 24.10.2022; опубликована онлайн 29.12.2022



A Module for Calculating Pollutant Mass Emissions Produced by Traffic Flows

Natalia I. Kurakina✉, Roman A. Myshko

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ nikurakina@etu.ru

Abstract

Introduction. Road transportation is increasingly becoming the main source of air pollution in cities. The problem of assessing air quality and modeling the dispersion of pollutants in the atmosphere requires improved models and methods. In particular, modern literature justifies the need to estimate the presence of particulate matter in the atmosphere along with the components of exhaust gases. Air pollution in residential zones should be comprehensively assessed using algorithmic and software support, taking the main factors of pollution into account.

Aim. Development of an algorithm and its software implementation for calculating pollutant mass emissions released by traffic flows. The developed algorithm can be used for modeling the level of urban pollution.

Materials and methods. The approaches of measurement theory, systems theory, statistical analysis, and mathematical modeling were applied.

Results. The methods currently used for assessing the impact of urban road network characteristics on air pollution levels were analyzed. The existing approaches to road classification were considered. Significant characteristics affecting pollutant emissions were identified, including those related to road construction, traffic flows, and urban environment. An algorithm and a software module for calculating pollutant mass emissions released by traffic flows were developed.

Conclusion. The developed module for calculating pollutant mass emissions released by traffic flows comprises an integral part of a system for modeling atmospheric air pollution in urban residential areas. The developed software can be used in environmental monitoring, assessment, and forecasting of air pollution to identify areas of concern and implement effective managerial solutions.

Keywords: air pollution, vehicles, pollutant mass emissions, spatial model, geoinformation system

For citation: Kurakina N. I., Myshko R. A. A Module for Calculating Pollutant Mass Emissions Produced by Traffic Flows. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 6, pp. 90–100. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-90-100

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 25.07.2022; accepted 24.10.2022; published online 29.12.2022

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.

При расчете уровней загрязнения, как правило, используются усредненные показатели, в некоторых случаях не отражающие действительных разовых уровней концентрации, которые могут достигаться при неблагоприятных метеорологических условиях. Единственным действенным методом оценки фактических уровней концентрации загрязняющих веществ остается взятие

проб воздуха в населенных пунктах с последующим лабораторным исследованием образцов. Этот подход является дорогим и не может применяться повсеместно ввиду ограниченного числа постов экологического мониторинга.

Развитие инфраструктуры, а в частности дорожно-автомобильного комплекса, обусловлено увеличением численности автотранспорта, а также скорости передвижения и объемов перевозимых грузов. В особенности для крупных городов, таких как Москва или Санкт-Петербург, доля выбросов в атмосферу от автомобильного транспорта соизмерима с выбросами предприятий. Задача минимизации влияния выбросов от автотранспорта на здоровье людей является приоритетной, поскольку в та-

Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта

A Module for Calculating Pollutant Mass Emissions Produced by Traffic Flows

ких городах наблюдается тенденция переноса промышленных предприятий за черту города. При этом автомобильный транспорт становится основным источником загрязнения. Например, вклад выбросов от автомобильного транспорта в суммарные выбросы загрязняющих веществ по Санкт-Петербургу изменялся от 73 % в 2008 г. почти до 85 % в 2017 г., что связано с увеличением количества автотранспортных средств, особенно легковых автомобилей [1]. По данным отчета об экологической ситуации [2] более чем в 40 городах России отмечено превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) по среднегодовым концентрациям взвешенных веществ, бенз(а)пирена, формальдегида, диоксида азота.

Задачи оценки распространения загрязнений с моделированием разовых концентраций, в особенности от объектов транспортной инфраструктуры, требуют наличия алгоритмического и программного обеспечения, работающего в связке с геоинформационными системами, что позволило бы автоматизировать задачу оценки состояния атмосферного воздуха в жилых зонах и наглядно отобразить сложившуюся ситуацию на карте. Для решения задачи моделирования рассеяния примесей в атмосферном воздухе применяются различные группы математических и эмпирических моделей [3] в зависимости от решаемой задачи. В данном исследовании применяется методика, основанная на численном решении уравнений турбулентной диффузии. Однако для моделирования разовых концентраций необходимо вне зависимости от применяемой модели определить массовые выбросы загрязняющих веществ, производимые потоками автотранспорта.

Целью данной статьи является разработка модуля расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта, необходимого для дальнейшего моделирования загрязнения атмосферного воздуха в условиях городской среды, выявления проблемных зон и выработки организационных решений, направленных на улучшение экологической обстановки в населенных пунктах.

Методы. Как правило, при оценке уровней загрязнения воздуха автомобильным транспортом в первую очередь рассматриваются загряз-

няющие вещества, производимые в результате сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания. В состав топлива входят в основном 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 твердых частиц [4]. Таким образом, к загрязняющим веществам, поступающим в атмосферу от автомобильного транспорта, относятся твердые частицы (ТЧ), озон, диоксид азота (NO_2) и диоксид серы (SO_2).

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.

Факторы, влияющие на загрязнение атмосферного воздуха автомобильным транспортом. Рассматриваемый объект, являющийся источником воздействия, – автомобильная дорога. Условно факторы, потенциально влияющие на эмиссию загрязняющих веществ, подразделяются на три группы:

1. Конструктивные особенности дороги.
2. Характеристики трафика.
3. Характеристики окружающей среды.

Конструктивные особенности дороги. В ходе работы были изучены основные подходы к классификации автомобильных дорог, предлагаемые нормативными документами. В соответствии со статьей 5 Федерального закона об автомобильных дорогах и дорожной деятельности в Российской Федерации [5] автомобильные дороги в зависимости от вида разрешенного использования в России подразделяются на дороги общего и необщего пользования. Преобладающим классом являются дороги общего пользования, также данный тип характеризуется боль-

шей интенсивностью трафика и представляет больший интерес с точки зрения влияния на загрязнение воздуха городских территорий, поэтому в исследовании рассматриваются только дороги общего пользования.

Классификация автомобильных дорог K_i и их отнесение к категориям автомобильных дорог (первой, второй, третьей, четвертой, пятой) осуществляются в зависимости от транспортно-эксплуатационных характеристик и потребительских свойств автомобильных дорог в порядке, установленном Правительством Российской Федерации [6]. Выделяют следующие категории автомобильных дорог:

$$K_i = \{IA, IB, IV, V\},$$

где IA – автомагистрали; IB – скоростные дороги; IV–V – обычные автомобильные дороги.

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, скоростные и обычные дороги.

Помимо указания категории к группе конструктивных особенностей можно отнести тип дорожной одежды C :

$$C_i = \{A, B, C\},$$

где A – капитальное покрытие; B – облегченное покрытие; C – переходное покрытие.

Также к конструктивным особенностям дороги относятся такие параметры, как высота поднятия дороги над уровнем земли (H), наличие защитного экрана (Z).

Приведенные факторы не используются непосредственно при расчете массовых выбросов загрязняющих веществ, однако применяются при формировании базы данных для расчета: 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 перекрестке).

С учетом категории автодороги и пространственных данных дорожной сети формируется вектор параметров дорожных перегонов:

$$R_i = \{K, L, H, v, N, S_{\text{п}}, S_{\text{о}}, S_{\text{р}}, C, Z\},$$

где L – протяжённость дороги; v – средняя скорость движения; N – число полос движения; $S_{\text{п}}$ – ширина полосы; $S_{\text{о}}$ – ширина обочины; $S_{\text{р}}$ – ширина разделительной полосы (при отсутствии 0).

Характеристики трафика. Вторая группа факторов характеризует трафик. В соответствии с [7] учет интенсивности трафика (количество транспортных средств (ТС), проходящих через поперечное сечение автомобильной дороги в единицу времени) осуществляется либо с применением непосредственного подсчета, либо автоматизированным методом.

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).

Выделяются следующие категории ТС:

I – легковые (Л);

II – автофургоны и микроавтобусы до 3.5 т (АМ);

III – грузовые от 3.5 до 12 т ($G \leq 12$);

IV – грузовые свыше 12 т ($G > 12$);

V – автобусы свыше 3.5 т ($A > 3.5$).

Статистические исследования, как правило, используют среднегодовую суточную интенсивность движения, однако для определения разовых концентраций больший интерес представляет пиковая интенсивность за временной интервал 20 мин. Также к исследуемым параметрам, характеризующим трафик, относятся средняя скорость движения на участке и характеристики светофорного регулирования (при наличии регулируемого перекрестка) – длительность действия запрещающего сигнала светофора и число циклов его работы за рассматриваемый временной промежуток, а также число транспортных средств каждой категории,

останавливающихся на перекрестке. В зависимости от полноты и характера статистических данных может учитываться среднесуточная, пиковая, среднегодовая интенсивность движения, в том числе приведенная к легковому автомобилю (коэффициенты приведения заданы ГОСТ [7]). В данном исследовании осуществляется учет пиковой интенсивности движения в расчете за 20 мин:

$$G_i = \{G_{cc1}^A \dots G_{cck}^A, G_{cc1}^B \dots G_{cck}^B\},$$

где G_{cc} – соответственно, пиковые интенсивности движения за временной интервал 20 мин; A, B – в прямом и обратном направлениях соответственно; $1 \dots k$ – типы транспортных средств.

Дополнительные характеристики при наличии на перегоне регулируемого перекрестка:

$$P_i = \{G_{cn1}^A \dots G_{cnk}^A, G_{cn1}^B \dots G_{cnk}^B, P_{\Pi}, N_{\Pi}\},$$

где $\{G_{cn1}^A \dots G_{cnk}^A, G_{cn1}^B \dots G_{cnk}^B\}$ – соответственно, числа остановок транспортных средств за временной интервал 20 мин в прямом и обратном направлениях для различных типов транспортных средств; P_{Π} – длительность действия запрещающего сигнала за период (20 мин); N_{Π} – количество циклов действия запрещающего сигнала за период (20 мин).

Таким образом, вектор параметров для расчета массовых выбросов дополняется данными, характеризующими трафик, и приобретает следующий вид:

$$R_i = \left\{ K, L, H, v, N, S_{\Pi}, S_o, S_p, C, Z, G_{cc1}^A \dots G_{cck}^A, G_{cc1}^B \dots G_{cck}^B, G_{cn1}^A \dots G_{cnk}^A, G_{cn1}^B \dots G_{cnk}^B, P_{\Pi}, N_{\Pi} \right\}. \quad (1)$$

Данный набор параметров для каждой дороги позволяет рассчитать массовый выброс загрязняющих веществ.

Характеристики окружающей среды также оказывают влияние на эмиссию загрязняющих веществ. К ним относятся параметры объектов городской среды, такие как близость и высота застройки, наличие зеленых насаждений, данные фоновых загрязнений, а также социально-экономические характеристики городских территорий. Данные характеристики влияют на распространение загрязнений или требуют уче-

та при оценке предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, но не связаны с их эмиссией и в то же время не обязательно могут коррелировать с методикой разбиения дороги на перегоны, поэтому учитываются уже дополнительно в процессе моделирования.

Определение уровня эмиссии загрязняющего вещества на перегоне. Поскольку характеристики интенсивности движения среди указанных групп факторов оказывают наибольшее влияние на эмиссию загрязняющих веществ (ЗВ), для расчета величин массовых выбросов целесообразно использовать структуру деления дорожной сети на перегоны.

Перегоны представляют собой участки дороги, на протяжении которых интенсивность движения и состав транспортного потока претерпевают изменения не более 15 % по любому из показателей. Также процесс разделения дороги на перегоны учитывает пересечения с другими дорогами, железнодорожные переезды и пешеходные переходы. Совокупность транспортных средств, одновременно участвующих в движении по перегону в одном направлении, определяется как транспортный поток.

Деление на перегоны позволяет избежать необходимости применения сложного математического аппарата и получить данные для применения полуэмпирических методик моделирования рассеяния, применяемых в соответствии с нормативными документами для определения максимально возможных уровней загрязнения в городах.

Пример разбиения дорожной сети на перегоны представлен на рис. 1: 1 – пересечение или примыкание автомагистралей в разных уровнях; 2 – пересечение или примыкание обычных дорог в одном уровне; 3 – мост или тоннель; 4 – пересечение с железнодорожными путями.

Критериями разделения дорожной сети на перегоны является значительное изменение интенсивности или скорости движения, в первую очередь границами перегонов являются регулируемые перекрестки, пересечения железнодорожных путей и пешеходные переходы.

Совокупность конструктивных особенностей и характеристик трафика является входным набором данных для определения массо-

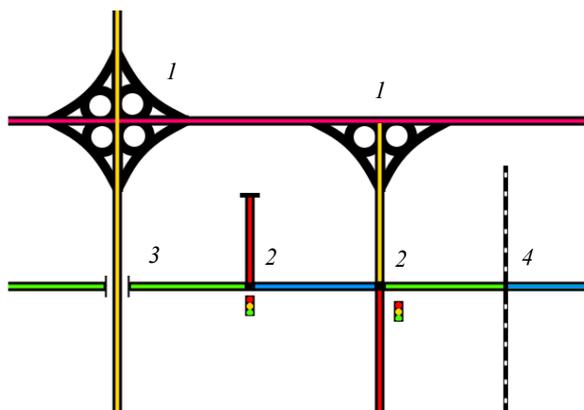


Рис. 1. Разбиение дорожной сети на перегоны

Fig. 1. Partitioning the road network into sections

вых уровней эмиссии ЗВ от каждого перегона. Процедура расчета указанных данных регулируется ГОСТ Р 56162–2019 [8]. Категория дороги включает характеристики конструктивных особенностей дороги и скоростного режима. При этом характеристики скоростного режима являются интервальными и могут отличаться для конкретных случаев. Для расчета массовых выбросов загрязняющих веществ существенными среди указанных характеристик являются средняя скорость движения и протяженность перегона. В качестве примера источника данных мониторинга интенсивности движения рассмотрены результаты измерений датчиков автоматизированного учета трафика на элементах дорожной сети Санкт-Петербурга, проводимых Центром транспортного планирования. В отношении характеристик трафика мониторинг интенсивности движения ведется одновременно в обоих направлениях движения и данные содержат фактическую общую интенсивность движения через поперечное сечение дороги. При этом соотношение интенсивностей в обоих направлениях для перегона принимается равным и вместо характеристик $G_{cc1}^A \dots G_{cck}^A, G_{cc1}^B \dots G_{cck}^B$ вводится общая характеристика $G_{cc1} \dots G_{cck}$. Аналогичным образом и для числа остановок автомобилей при запрещающем сигнале светофора вместо характеристик $G_{cn1}^A \dots G_{cnk}^A, G_{cn1}^B \dots G_{cnk}^B$ вводится общая характеристика $G_{cn1} \dots G_{cnk}$. Данные, характеризующие особенности трафика для разных направлений, являются избыточными в контексте решаемой задачи – моделирования призем-

ных концентраций, поскольку учет суммарного трафика в обоих направлениях позволяет точно оценить величину массового выброса ЗВ для перегона.

Таким образом, методом исключения избыточных параметров (1) сформирован следующий упрощенный вектор параметров, минимально достаточный для расчета массовых выбросов ЗВ для данного перегона:

$$R_i = \{L, v, G_{cc1} \dots G_{cck}, G_{cn1} \dots G_{cnk}, P_{\Pi}, N_{\Pi}\}. \quad (2)$$

Массовый выброс i -го вещества за 20-минутный интервал времени для перегона определяется следующим образом:

$$M_i = M_{\Pi_i} + M_{L_i},$$

где M_{L_i} – выброс i -го ЗВ [г/с] движущимся автотранспортным потоком на автодороге (или ее участке) фиксированной протяженности L [км], определяемый по формуле

$$M_{L_i} = \frac{1}{1200} \sum_1^k M_{ki}^L G_{cck} r_{v_{kj}}, \quad (3)$$

где M_{ki}^L – удельный пробеговый выброс i -го вредного вещества автомобилями k -й категории [г/км], определяемый по таблице, приведенной в ГОСТ [8]; $r_{v_{kj}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения транспортного потока (v_{ki} , км/ч) на выбранной автодороге (или ее участке), определяемый по таблице, приведенной в ГОСТ [8]; M_{Π_i} – выброс i -го ЗВ автомобилями по конкретному направлению движения в районе перекрестка при запрещающих сигналах светофора за 20-минутный период дополнительного обследования, определяемый по формуле

$$M_{\Pi_i} = \frac{P_{\Pi}}{60} \sum_1^{N_{\Pi}} \sum_1^x (M_{\Pi_{ki}} G_{cnk}), \quad (4)$$

где $M_{\Pi_{ki}}$ – удельный выброс i -го ЗВ автомобилями k -й категории [г/мин], находящихся в "очереди" у запрещающего сигнала светофора. Значения $M_{\Pi_{ki}}$ определяются по таблице, приведенной в ГОСТ [8], в которой приведены усредненные значения удельных выбросов

[г/мин], учитывающие режимы работы двигателей в районе перекрестка (принудительное торможение, холостой ход, разгон), а значения $P_{ц}$, $N_{ц}$, $G_{снк}$ – по результатам натурных обследований.

Расчеты выбросов выполняются для следующих ЗВ, поступающих в атмосферу с отработавшими газами автомобилей:

- оксид углерода (CO);
- оксиды азота NO_x (в пересчете на диоксид азота);
- углеводороды (СН);
- сажа;
- диоксид серы (SO_2);
- формальдегид;
- бенз(а)пирен.

После расчета величин выбросов загрязняющих веществ для каждого перегона формируется вектор массовых величин выбросов:

$$M_i = \{M_1 \dots M_n\},$$

где M_i – массовый выброс i -го ЗВ от данного перегона.

Недостатком нормативной методики по расчету массовых величин выбросов потоками автотранспорта является отсутствие учета эмиссии взвешенных частиц, для них не определены удельные массовые выбросы, поскольку процесс образования пыли в значительной степени связан с климатическими параметрами, видом дорожного покрытия и его состоянием. Этот недостаток предполагается нивелировать путем применения дополнительных методик расчета уровней эмиссии твердых частиц на этапе моделирования величин приземной концентрации.

Алгоритм расчета массовых величин выбросов загрязняющих веществ используется для обработки данных учета интенсивности движения, сформированных в соответствии с упрощенной структурой (2), при которой для каждого перегона задается суммарная интенсивность движения в обоих направлениях.

Обобщенный алгоритм расчета массовых выбросов представлен на рис. 2.

Расчет массовых величин выполняется в следующем порядке:

1. Осуществляется ввод исходных данных для дорожных перегонов в соответствии со структурой (2).

2. Инициализируются параметры расчета, включающие удельные величины выбросов ЗВ движущегося и неподвижного транспорта по категориям и поправочные коэффициенты, учитывающие среднюю скорость движения транспортного потока.

3. Для каждого исследуемого ЗВ рассчитывается массовый выброс движущимся транспортом каждой категории по (3) с использованием соответствующих параметров расчета.

4. При наличии в структуре входных данных характеристик светофорного регулирования (определяется параметром "время действия запрещающего сигнала"; для перегонов, не включающих регулируемый перекресток, эта величина равна нулю) для каждого исследуемого ЗВ выполняется расчет массового выброса неподвижным транспортом каждой катего-



Рис. 2. Обобщенный алгоритм расчета массовых выбросов

Fig. 2. Pollutant mass emissions calculation generalized algorithm

рии по (4) с использованием соответствующих параметров расчета.

5. Для каждого загрязняющего вещества выполняется суммирование массовых величин выбросов движущимся и неподвижным транспортом.

6. Формируется вектор результирующих значений суммарных массовых выбросов и сохраняется в табличном виде для дальнейшего использования при моделировании концентраций ЗВ.

Таким образом, в зависимости от категории дороги и имеющихся данных об интенсивности движения формируются значения массовых выбросов ЗВ. Данная задача выполняется модулем расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта, реализованным в среде программирования LabVIEW. Применяемая среда визуального программирования LabVIEW предоставляет широкий функционал, позволяющий осуществлять обработку данных различных форматов [9].

Результаты. Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта, представляет собой виртуальный инструмент LabVIEW.

Входными данными модуля являются данные учета интенсивности дорожного движения. Выходными данными являются значения массовых выбросов загрязняющих веществ потоками транспорта, использующиеся наряду с параметрами окружающей среды, пространственными данными жилой застройки, фоновыми концентрациями и климатическими параметрами, в качестве входных данных для модели рассеяния и построения поля приземной концентрации ЗВ в среде ArcGIS [10]. В основе алгоритма расчета приземных концентраций загрязняющих веществ лежит методика, разработанная специалистами ГГО им. А. И. Воейкова [11], базирующаяся на решении уравнений турбулентной диффузии в сочетании с полуэмпирическими выражениями, разработка которых была направлена на более удобное применение для оценки уровней загрязнения жилых территорий. Программная реализация алгоритма расчета поля рассеяния ЗВ от точечного источника была выполнена в рамках разработки инструментов для моделирования загрязнения

промышленными объектами [12, 13]. Моделирование рассеяния от протяженных источников осуществляется схожим образом с применением численного интегрирования [14].

Входные данные формируются в универсальном формате Delimited Spreadsheet [15], позволяющем осуществлять импорт и экспорт данных из базы геоданных. Чтение файла с входными данными выполняется с помощью инструмента Read Delimited Spreadsheet, компонент File Path позволяет пользователю задать путь к файлу. Ввод параметров расчета, просмотр выходных данных осуществляются с помощью компонентов Table. Данные, извлекаемые из файла, имеют формат двумерного строкового массива, для доступа к его отдельным элементам используются структуры из инструментов Array Subset и Index Array. Конвертация из строкового формата в числовой с плавающей точкой осуществляется инструментом Fract/Exp String To Number.

Вычисление массовых величин выбросов выполняется в соответствии с приведенным ранее алгоритмом с применением стандартных математических операторов и циклов For Loop. Результирующие данные конвертируются обратно в строковый формат с применением инструмента Number To Fractional String. Комбинацией инструментов Insert Into Array формируется структура выходных данных, аналогичным образом с помощью инструмента Write Delimited Spreadsheet осуществляется запись выходных данных в файл. Функция отображения данных на диаграмме реализована с применением средства отображения XY Graph. Непрерывная работа программы обеспечивается с помощью цикла While loop и Event-структуры. Расчетный модуль позволяет контролировать правильность выполнения расчетов массовых выбросов и вручную корректировать параметры расчета. Вид пользовательского интерфейса представлен на рис. 3.

В левой части экрана расположены таблицы, позволяющие контролировать параметры расчета. В верхней части отображаются загруженные входные данные перегонов, справа отображаются результирующие величины массовых выбросов (отдельно для движущегося, неподвижного транспорта и суммарные вели-

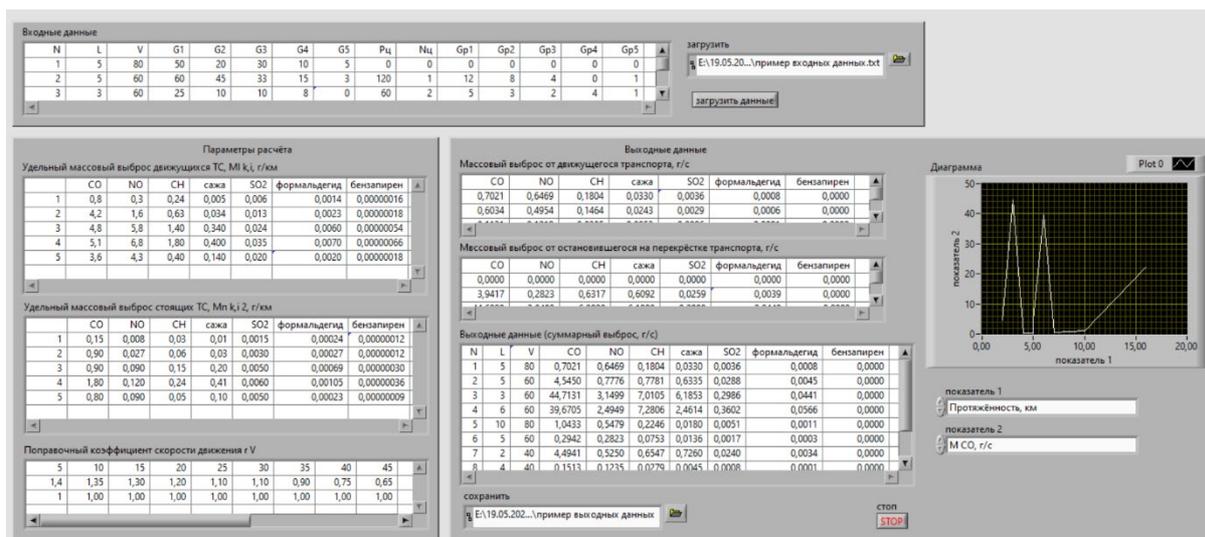


Рис. 3. Пользовательский интерфейс разработанного модуля расчета

Fig. 3. The user interface of the developed module

чины). Встроенный инструмент построения диаграмм позволяет отобразить зависимость компонента выходных данных (массового выброса ЗВ) от одного из параметров входных данных (протяженности дороги, интенсивности движения данной категории ТС и т. д.).

Заключение. В ходе работы исследованы методы учета характеристик городской дорожной сети для оценки уровней эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Рассмотрены существующие подходы к классификации автомобильных дорог, предложенные в нормативных документах, выделены существенные характеристики, оказывающие влияние на эмиссию ЗВ, среди которых конструктивные особенности дорог, характеристики

трафика и особенности городской среды. Разработан алгоритм и программный модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта. Модуль расчета является составной частью комплексной системы моделирования загрязнения атмосферного воздуха жилых территорий мегаполисов автомобильным транспортом. Применение разработанного модуля может быть использовано для экологического мониторинга, оценки и прогнозирования загрязнения воздуха, выявления проблемных зон и выработки организационных решений, направленных на улучшение экологической обстановки в населенных пунктах.

Список литературы

1. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2018 году / под ред. И. А. Серебрицко-го. СПб.: Сезам-принт, 2019. 264 с.
2. Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году" / Минприроды России. М., 2020. 1846 с.
3. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека // Региональные публикации ВОЗ. Европейская сер. 2001. № 85. 293 с.
4. Леванчук А. В. Совершенствование системы социально-гигиенического мониторинга на территории с развитым автомобильно-дорожным комплексом // Общественное здоровье и здравоохранение. 2014. № 4. С. 78–82.
5. Классификация и категория автомобильных дорог. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/about/upravlenie-fda/upravlenie-zemelno-imushchestvennykh-otnosheniy/edinyy-gosudarstvennyy-reestr-avtomobilnykh-dorog/14694> (дата обращения 23.11.2022).
6. Техническая классификация автомобильных дорог общего пользования. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850016> (дата обращения 23.11.2022)
7. Методические рекомендации по учету движения транспортных средств на автомобильных дорогах. М.: Информавтотдор, 2013. 27 с.
8. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. М.: Интеграл, 1999. 15 с.

9. What is LabVIEW? Graphical Programming for Test & Measurement // NI. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (дата обращения 03.08.2022)

10. About ArcGIS. Mapping & Analytics Software and Services // Esri. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview> (дата обращения 03.08.2022)

11. 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 23.11.2022).

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

13. Myshko R. A., Kurakina N. I. GIS for assessment and modeling air pollution by industrial facilities // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. SPb.: ETU, 2021. P. 1789–1802. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396270

14. Myshko R. A., Kurakina N. I. GIS for assessing road transport complex impact on urban air pollution // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. SPb.: ETU, 2021. P. 1545–1548. doi: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755515

15. Read Delimited Spreadsheet VI. National Instruments // NI. 03.11.2022. URL: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/glang/read_delimited_spreadsheet.html (дата обращения 03.08.2022)

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 – аспирант кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 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>

References

1. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Sankt-Peterburge v 2018 godu* [Saint Petersburg ecological situation report of 2018 year]. Ed. by I. A. Serebrikskii. SPb., Sezam-print, 2019, 264 p. (In Russ.)

2. Ministry of Natural Resources of Russia. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2019 godu* [State report on the environment state and protection of Russian Federation of 2019]. Moscow, 2020, 1846 p. (In Russ.)

3. Air quality monitoring for human health impact assessment. WHO regional publications. European Series. 2001, no. 85, 293 p. (In Russ.)

4. 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.)

5. *Klassifikacija i kategorija avtomobil'nyh dorog. Federal'noe dorozhnoe agentstvo Rosavtodor* [Classification and category of highways. Federal Road Agency Rosavtodor]. Available at: <https://rosavtodor.gov.ru/about/>

<https://rosavtodor.gov.ru/about/> upravlenie-fda/upravlenie-zemelno-imushchestvennykh-otnosheniy/edinyy-gosudarstvennyy-reestr-avtomobilnykh-dorog/14694 (accessed 23.11.2022) (In Russ.)

6. Technical classification of public roads. Library of normative documentation. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850016> (accessed 23.11.2022) (In Russ.)

7. *Metodicheskie rekomendacii po uchetu dvizhenija transportnyh sredstv na avtomobil'nyh dorogah*. [Methodological recommendations for accounting for the movement of vehicles on highways]. Moscow, *Informautodor*, 2013. 27 p. (In Russ.)

8. *Metodika opredelenija vybrosov avtotransporta dlja provedenija svodnyh raschetov zagriznenija atmosfery gorodov*. [Methodology for Determining Vehicle Emissions for Conducting Summary Calculations of Urban Air Pollution.]. Moscow, Integral, 1999. 15 p. (In Russ.)

9. What is LabVIEW? Graphical Programming for Test & Measurement. NI. Available at: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (accessed 03.08.2022)

10. About ArcGIS. Mapping & Analytics Software and Services. Asri. Available at: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview> (accessed 03.08.2022)

11. 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) (In Russ.)

12. 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.)

13. Myshko R. A., Kurakina N. I. GIS for Assessment and Modeling Air Pollution by Industrial Facilities.

IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. SPb., ETU, 2021, pp. 1789–1802. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396270

14. Myshko R. A., Kurakina N. I. GIS for Assessing Road Transport Complex Impact on Urban Air Pollution. IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. SPb., ETU, 2021, pp. 1545–1548. doi: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755515

15. Read Delimited Spreadsheet VI. National Instruments. Available at: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/glang/read_delimited_spreadsheet.html (accessed 03.08.2022)

Information about the authors

Natalia I. Kurakina, Cand. Sci. (Eng.) (2001), Associate Professor (2002), Associate Professor at the Department of Information and Measurement Systems and Technology 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, Postgraduate at the Department of Information and Measurement Systems and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 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>
