

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-24-38>
УДК 504.3.313:33(476)

Поступила в редакцию 02.10.2023
Received 02.10.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

О. Ю. Круковская, С. В. Какарека

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Автомобильный транспорт является значимой категорией поступления в атмосферный воздух многих загрязняющих веществ, количественная и пространственно-временная точность оценок выбросов от которой играет важную роль в изучении загрязнения воздуха и выработке управленческих решений. В работе представлена методология получения оценки годовых выбросов с использованием восходящего подхода на основании моделирования пробега транспортных средств с пространственным разрешением 1 км × 1 км для всей территории Беларуси. Показана высокая пространственная неоднородность и различия в территориальной структуре выбросов различных загрязняющих веществ. Представлен вклад дорог различного уровня в суммарные выбросы, выявлены категории транспортных средств, их формирующие. Рассчитаны плотности выбросов оксида углерода, оксидов азота, неметановых летучих органических соединений и тонкодисперсных твердых частиц на урбанизированных и прочих территориях.

Ключевые слова: автомобильный транспорт; выбросы; атмосферный воздух; оксид углерода; оксиды азота; твердые частицы; неметановые летучие органические соединения; урбанизированные территории.

Для цитирования. Круковская О. Ю., Какарека С. В. Моделирование выбросов загрязняющих веществ автомобильного транспорта с высоким пространственным разрешением // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 24–38.

MODELING ROAD TRANSPORT EMISSIONS OF POLLUTANTS WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

O. Yu. Krukowskaya, S. V. Kakareka

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Road transport is a significant contributor to atmospheric air pollution, and accurate estimates of emissions are crucial for understanding and managing air pollution. This paper presents a bottom-up approach for estimating annual emissions based on vehicle mileage modeling with a spatial resolution of 1 km × 1 km for the entire territory of Belarus. The study highlights the high spatial heterogeneity and differences in the territorial structure of emissions of various pollutants. It also identifies the contribution of roads of different levels and categories of vehicles that form them. The emission densities of four major pollutants, namely carbon monoxide, nitrogen oxides, non-methane volatile organic compounds, and fine particulate matter in urban and other areas were calculated.

Keywords: road transport; emissions; atmospheric air; carbon monoxide; nitrogen oxides; particulate matter; non-methane volatile organic compounds; urban areas.

For citation. Krukowskaya O. Yu., Kakareka S. V. Modeling road transport emissions of pollutants with high spatial resolution. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 24–38.

Введение. Интенсивный рост парка транспортных средств обостряет проблемы качества воздуха в городах, ухудшает качество жизни населения и является серьезной проблемой для контроля загрязнения воздуха. На урбанизированных территориях автомобильные выбросы являются причиной значительной части содержащихся в локальной атмосфере загрязняющих веществ [1, 2]. При разработке программ управления качеством воздуха наиболее часто первым шагом становится разработка кадастра (оценки) выбросов, учитывающая все категории источников выбросов, включая передвижные [2, 3]. Посредством оценок выбросов определяется количество выбрасываемых веществ, на их основе разрабатываются меры регулирования качества воздуха, определяются наилучшие доступные технологии контроля, оцениваются перспективы [2, 4].

Рекомендуется, чтобы оценки выбросов описывали пространственное распределение и временную изменчивость. Однако во многих случаях оценки выбросов от мобильных источников скудны и учитывают только суммарные выбросы, главным образом из-за отсутствия метода решения проблемы нехватки данных [2, 5, 6].

Статистические данные о выбросах от передвижных источников в Беларуси до настоящего времени формируются посредством оценок с использованием методик обобщенного уровня [7, 8] с региональным пространственным разрешением (в разрезе областей и г.Минска) [9]. Опубликованная информация о пространственной структуре выбросов передвижных источников высокого разрешения ограничена. Оценки с большей детализацией (в настоящее время по сетке $0,1^\circ \times 0,1^\circ$) для дорожных передвижных источников для отдельных загрязняющих веществ (основные загрязняющие вещества, CO, Cg, Pb, Hg) выполняются 1 раз в 4 года в Институте природопользования в рамках подготовки отчетности для Программы ЕМЕП Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния.

Заполнение пробелов в исходных данных возможно посредством моделирования с использованием различных подходов. В зависимости от используемых исходных данных они разделяются на нисходящие («сверху вниз») и восходящие («снизу вверх»). При нисходящем подходе выбросы рассчитываются на национальном уровне или берутся из национальных кадастров, а затем распределяются по желаемой сетке с использованием данных о деятельности, таких как плотность дорог [10–14], пробег транспортных средств [11, 12, 15, 16], плотность населения [12] или потребление топлива [15]. Приоритет использования данных о деятельности, наиболее близких к интенсивности движения транспортного потока, например суммарного пробега, при распределении выбросов показан в работе [17].

При применении восходящей методологии используются данные по отдельным источникам или участкам дорог, такие как пробег транспортных средств различных категорий по конкретным улицам или отдельных транспортных средств в ведении юридических лиц, с учетом различных характеристик движения транспорта, например: скорость транспортного средства, расход топлива, пробег по показаниям приборов транспортных средств, снаряженная масса, соответствие экологическим стандартам [18–20]. Сравнительные исследования двух подходов [19, 21] позволяют сделать вывод о предпочтительности восходящей оценки при наличии достаточной информации.

Вне зависимости от используемого подхода для характеристики и отображения пространственной структуры выбросов от автомобильного транспорта, который относится к источникам линейного типа, чаще всего используются два способа. В первом случае автомобильные дороги отображаются на карте как линейный объект, повторяющий форму исходной дороги и проведенный по ее осевой линии. Количество выбрасываемых загрязняющих веществ в таком случае отображается либо интенсивностью окраски линии, либо ее толщиной. Такой способ применен в работах [1, 11]. Как правило, его применяют для небольшой территории (район города, участок пригородной территории) [11]. При использовании такого способа на уровне региона или страны воспроизводятся только крупнейшие автомобильные дороги, полнота отображения источников теряется. Для пространственного представления выбросов на уровне стран и регионов чаще используется второй способ, предполагающий отображение с использованием регулярной сетки (прямоугольной, гексагональной). Интенсивность окрашивания каждой из ячеек сетки устанавливается в соответствии с суммой выбросов от всех линейных источников в ее пределах. Этот способ является универсальным и наиболее полным, используется в отдельных странах [12, 14, 16, 18, 21] и международной практике [22].

Цели работы – создать и апробировать методические подходы к моделированию годовых выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта с использованием регулярной прямоугольной сетки с пространственным разрешением $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$ для всей территории Беларуси, провести анализ территориальной структуры выбросов, выявить территории с наибольшей интенсивностью выбросов. Оценка выполнена для 2015 года. В данное исследование включены четыре загрязняющих вещества: оксид углерода (CO), неметановые летучие органические соединения суммарно (НМЛОС), оксиды азота (NO_x) и тонкодисперсные твердые частицы с аэродинамическим диаметром менее $2,5 \text{ мкм}$ (ВЧ2.5).

Методология и исходные данные. В данной работе предлагается метод оценки выбросов с высоким пространственным разрешением для автомобильного транспорта с использованием восходящего подхода, основанный на моделировании суммарного годового пробега в разрезе категорий транспортных средств с последующей оценкой выбросов с использованием метода удельных показателей. Сопоставимость с валовыми оценками для страны [23] обеспечивается за счет использования в качестве граничных условий валовых значений суммарного годового пробега автомобильного транспорта всех категорий, а также удельных показателей выбросов, приведенных на единицу пробега по категориям транспорта, полученных из таких оценок.

Исходные данные.

Парк транспортных средств. Зарегистрированный парк автомобильных транспортных средств в Беларуси в 2015 г. составил 3912,3 тыс. ед., в том числе 3037,2 тыс. легковых автомобилей, 418,0 тыс. грузовых автомобилей, 46,8 тыс. автобусов и 401,3 тыс. мотоциклов [9]. Для целей моделирования пробега и выбросов от автомобильного транспорта выполнена параметризация парка транспортных средств в соответствии с классификатором модели COPERT [24, 25], применяемой на различных этапах в данном исследовании. Транспортные средства разделены на пять категорий: легковые автомобили (LD4C), микроавтобусы (грузовые и пассажирские) (LD4T), грузовые автомобили (HDT), автобусы (HDB) и мотоциклы (включая другие двухколесные транспортные средства) (LD2).

Для целей оценки выбросов из общего числа грузовых автомобилей выделяют малые коммерческие автомобили полной массой до 7,5 т и микроавтобусы из числа автобусов. Оценено, что из общего количества транспортных средств микроавтобусами (грузовыми и пассажирскими) являются 167,4 тыс. ед., грузовыми автомобилями (HDT) – 290,0 тыс., автобусами (HDB) – 7,4 тыс. ед.

Для валовой оценки выбросов на национальном уровне используются также следующие входные параметры, касающиеся парка транспортных средств, оценка которых выполнена на основании обобщений производственно-статистической информации, данных о вторичном рынке транспортных средств и с использованием экспертной оценки [23].

Потребление топлива. Согласно статистическим данным [9], суммарный расход транспортных топлив (с учетом потребления всеми типами передвижных источников) в 2015 г. составил 1069 тыс. т бензина, 2013 тыс. т дизельного топлива, 324 тыс. т биодизельного топлива. Кроме того, на работу автомобильного транспорта также расходуется 150 тыс. т сжиженного газа и 9 млн м³ сжатого газа. Характеристики топлива использованы в соответствии с действующими стандартами.

Суммарный годовой пробег транспортных средств. Величина среднегодового пробега в разрезе категорий и экологических классов транспортных средств непосредственно используется при расчете уровня выбросов. Однако значения этого показателя не подлежат учету и не могут быть получены из официальных статистических отчетов напрямую. Ориентировочные уровни могут быть оценены по данным вторичного рынка транспортных средств. В актуальной версии модели COPERT используются механизмы статистической коррекции пробега, исходя из первичной оценки значений этого показателя, а также фактических данных о парке транспортных средств и суммарном потреблении топлива. В ходе годовой оценки выбросов в рамках работы [23] установлено, что суммарный годовой пробег автомобильного транспорта составляет 27 750 млн маш·км, в том числе 19 490 млн маш·км легкового транспорта и 4122 млн маш·км грузовых автомобилей.

Интенсивность движения транспорта предоставлена по запросу РУП «Белдорцентр» [26] для отдельных участков дорог международного и республиканского значения в разрезе категорий транспорта в суточном среднегодовом исчислении. С учетом протяженности дорог, годовой измеренный пробег автомобильного транспорта составляет 17 920 млн маш·км, в том числе 11 535 млн маш·км легкового транспорта и 3411 млн маш·км грузовых автомобилей.

Картографическая основа для моделирования построена на геоинформационной системе с открытыми данным OpenStreetMap OSM [27]. Проведена корректировка отнесения дорог к группам и выделения дорог, используемых для движения автомобильного транспорта, в отдельных случаях стыковка участков дорог. Для целей моделирования пробега и выбросов дороги разделены на две группы: первостепенного и второстепенного значения. К дорогам первостепенного значения отнесены участки улично-дорожной сети международного и республиканского значения, для которых выполняются инструментальные замеры фактической интенсивности движения. Все остальные участки улично-дорожной сети отнесены к дорогам второстепенного значения. Анализ картографической основы показал, что суммарная протяженность дорог первостепенного значения составляет 15,5 тыс. км, второстепенного – 215,2 тыс. км.

Разделение территорий на урбанизированные и прочие выполнено также с использованием картографической основы [27]. К урбанизированным территориям отнесены участки территории в пределах городских населенных пунктов. Использовано разбиение ячеек целевой сетки границами населенных пунктов с распределением смоделированного пробега и выбросов пропорционально распределению площадей.

Метеорологические параметры. Для учета работы двигателей в различных режимах и поступления загрязняющих веществ в атмосферный воздух посредством испарения топлива и других технических жидкостей в качестве исходных данных используются также метеорологические параметры: среднемесячные значения средних из максимальных и минимальных суточных температур, среднемесячная относительная влажность воздуха [25]. Данные в установленном формате модели COPERT подготовлены на основании срочных наблюдений за исследуемый период [28].

Данные о землепользовании выделены из глобальной базы типов землепользования [29], имеющей пространственное разрешение 10 м.

Моделирование территориальной структуры пробега транспорта.

Оценка интенсивности движения и пробега на всех автомобильных дорогах основана на фактических замерах среднегодовой интенсивности движения на отдельных участках дорог и суммарных значениях пробега для всей страны, используемых в качестве граничных условий для расчета интенсивности на дорогах, где не выполняются замеры интенсивности. Моделирование пробега выполнено для всей территории страны для ячеек сетки 1 км × 1 км.

Моделирование территориальной структуры пробега автомобильного транспорта включало следующие этапы:

- подготовку геоинформационной основы улично-дорожной сети;
- пространственную привязку результатов замеров интенсивности движения транспорта на отдельных участках дорог, расчет протяженности участков дорог с известной интенсивности и суммарный пробег транспорта в их пределах;
- расчет суммарных значений годового пробега автотранспорта, полученных в результате моделирования выбросов на национальном уровне с использованием модели COPERT, и суммарного пробега на дорогах с неизвестной интенсивностью движения;
- получение сплошного нормированного поля интенсивности движения транспорта путем интерполяции (иерархические базисные сплайны) фактических данных интенсивности движения в выборочных точках (регулярная пространственная выборка) для сетки 10 км × 10 км для всей страны, построение ключей перехода поля интенсивности к более дробной сетке 1 км × 1 км;
- выполнение классификации дорог в соответствии с исходными типами дорог [27] по интенсивности движения, получение коэффициентов интенсивности трафика по типам дорог;
- выполнение расчета в пределах ячеек сетки средневзвешенных коэффициентов использования автомобильного транспорта в зависимости от класса землепользования на основании данных о типах землепользования с использованием коэффициентов (табл. 1) классов поверхности;
- решение задачи распределения суммарного пробега дорог с неизвестной интенсивностью на основании равного вклада полученных ранее поля интенсивности трафика и коэффициентов трафика по типам дорог; расчет на уровне страны значений коэффициентов балансировки смоделированного, измеренного и суммарного пробега по категориям транспортных средств; получение нормированного и абсолютного распределения интенсивности движения транспорта на всех дорогах с целевым пространственным разрешением.

Таблица 1. Взвешивающие коэффициенты использования автомобильного транспорта в зависимости от класса землепользования

Table 1. Weighing coefficients for the use of road transport depending on land use category

Класс поверхности	Коэффициент использования автомобильного транспорта
Водные объекты	0
Деревья	0,001
Трава	0,004
Затопленная растительность	0
Посевы	0,004
Кустарниковая растительность	0,00001
Застройка	1
Без покрытия	1
Снег/лед	0

В результате суммарный годовой пробег автомобильного транспорта категории p в пределах ячейки i $ML_{i,p}$ определяется с использованием уравнений

$$ML_{i,p} = ML_{i,p}^{fact} + ML_{i,p}^{model}, \quad (1)$$

$$ML_{i,p}^{model} = ML_p^{model} f_{mi,p}^{model} = ML_p^{model} L_{i,f} (a \cdot f_{class_{f,p}} + b \cdot I_{i,p}) I_{u_i}, \quad (2)$$

где $ML_{i,p}^{fact}$ – суммарный годовой пробег транспортных средств категории p в пределах ячейки i на участках дорог с измеренной интенсивностью движения; $ML_{i,p}^{model}$ – суммарный годовой пробег транспортных средств категории p в пределах ячейки i на участках дорог со смоделированной интенсивностью движения; $f_{ml_{i,p}^{model}}$ – фактор территориальной структуры интенсивности движения на дорогах второстепенного значения; $L_{i,f}$ – суммарная протяженность дорог группы f в пределах ячейки i ; $f_{class_{f,p}}$ – средняя относительная интенсивность движения транспортных средств категории p для дорог группы f . Установлена на основании литературных данных и результатов собственных замеров интенсивности движения и структуры транспортного потока на различных участках дорог; $l_{i,p}$ – коэффициент нормированной распределенной интенсивности движения транспорта суммарно для всех категорий транспортных средств категории p в пределах ячейки i ; $l_{i,j}$ – средневзвешенный в пределах ячейки i коэффициент использования автомобильного транспорта в зависимости от класса землепользования; a и b – безразмерные коэффициенты для выравнивания вклада коэффициентов $f_{class_{f,p}}$ и $l_{i,p}$ соответственно в результирующую вариабельность пробега.

Выполнение граничного условия по суммарному пробегу проявляется в выполнении уравнения (1) суммарно для всех ячеек, покрывающих территорию страны, в виде уравнения

$$ML_p = ML_p^{fact} + ML_p^{model}, \quad (3)$$

где ML_p^{fact} – суммарный годовой пробег транспортных средств категории p на участках дорог с измеренной интенсивностью движения; ML_p^{model} – суммарный годовой пробег транспортных средств категории p на участках дорог со смоделированной интенсивностью движения.

Оценка выбросов на основании смоделированного пробега была выполнена с использованием метода удельных показателей отдельно для каждой ячейки целевой сетки, который может быть представлен уравнением

$$E_i^j = \sum_p ML_{i,p} EF_p^j, \quad (4)$$

где E_i^j – годовые выбросы от автомобильного транспорта вещества j в пределах ячейки i ; $ML_{i,p}$ – годовой пробег автомобильных транспортных средств категории p в пределах ячейки i ; EF_p^j – удельный показатель выбросов вещества j от автомобильных транспортных средств категории p . Значения удельных показателей получены на основании моделирования суммарных годовых выбросов с использованием модели COPERT в пределах страны в целом для рассматриваемого года [24] (табл. 2).

Таблица 2. Удельные показатели выбросов от автомобильного транспорта, т/маш·км

Table 2. Emission factors from road transport, t/vehicle·km

Категория автомобильного транспорта	Загрязняющее вещество			
	CO	NO _x	НМЛОС	ВЧ2.5
Автобусы (HDB)	1,71E-06	7,39E-06	8,48E-07	2,52E-07
Грузовые автомобили (HDT)	1,56E-06	6,09E-06	1,18E-06	2,07E-07
Легковые автомобили (LD4C)	6,41E-06	5,74E-07	1,28E-06	4,36E-08
Малые коммерческие автомобили, микроавтобусы (LD4T)	7,99E-06	8,90E-07	9,87E-07	8,94E-08
Мотоциклы (LD2)	8,67E-06	3,46E-08	5,07E-06	6,02E-08

Результаты и их обсуждение.

Пробег автомобильного транспорта. Суммарный годовой пробег на территории Беларуси, согласно выполненной оценке, составляет 27,750 млрд маш·км. Большая часть пробега (64,6 %) приурочена к крупным дорогам республиканского значения (основные дороги), на которых выполняются замеры интенсивности и структуры транспортного потока. В суммарной структуре транспортного потока преобладают легковые автомобили, суммарный годовой пробег транспорта этой категории составляет 19,490 млрд маш·км (70,2 %). Микроавтобусы и грузовые автомобили формируют в среднем 11,7

и 14,8 % суммарного годового пробега транспорта в стране соответственно. При этом основные и второстепенные дороги различаются по категориальной структуре: для основных дорог характерна более высокая, чем в среднем в стране, доля малых коммерческих и грузовых автомобилей (15,5 и 19,0 % соответственно), за счет более низкой доли легковых автомобилей и автобусов (64,4 и 0,9 % соответственно). На второстепенных дорогах легковые автомобили формируют 80,9 % общего пробега, вклад автобусов составляет 4,6 %, тогда как доля грузовых автомобилей снижена до 7,1 %, микроавтобусов – до 4,7 %. С учетом картографической протяженности дорог средняя расчетная интенсивность движения на всех дорогах страны составляет 330 ед/сут, в том числе на основных дорогах – 3164 ед/сут. Рассчитанный суммарный годовой пробег соответствует среднегодовому пробегу единичного транспортного средства 7349 км/год, в том числе 11 714 км/год для грузовых и 6755 км/год для легковых автомобилей.

С учетом используемой для всей территории страны сетки 1 км × 1 км выбросы от автомобильного транспорта происходят с площади 123,967 тыс. км², что соответствует 59,1 % территории страны. Для большей части территории, где происходят выбросы от автомобильного транспорта, суммарный годовой пробег не превышает 1000 маш·км (66,462 тыс. км²). На площади 18,001 тыс. км² пробег находится в диапазоне 1000–10000 маш·км, на площади 16,029 тыс. км² – от 10 до 100 тыс., на площади 16,840 тыс. км² – от 100 до 1000 тыс. и на площади 6,635 тыс. км² – свыше 1000 тыс. маш·км. При этом на участки с наибольшим пробегом (свыше 1000 тыс. маш·км) приходится более 70 % суммарного пробега транспорта. Наибольшая суммарная интенсивность движения отмечена в районе Минской кольцевой автомобильной дороги, пересечения магистралей международного значения вблизи столицы и областных центров, а также других крупных городов (Бобруйска, Жлобина, Молодечно, Орши, Полоцка, Новополоцка, Солигорска, Лиды). Наиболее высокое значение суммарного годового пробега автомобильного транспорта в пределах ячеек сетки 1 км × 1 км согласно выполненному моделированию составляет 66247 тыс. маш·км, оно отмечается в Минске на участке в районе пересечения МКАД и пр. Дзержинского. Для сравнения, вблизи областных центров наиболее высокие интенсивности движения составляют: в Бресте – 14 588 тыс. маш·км, в Гродно – 6960 тыс., в Витебске – 5515 тыс., в Могилёве – 9442 тыс., в Гомеле – 7187 тыс. маш·км.

Структура выбросов. Согласно выполненной оценке выбросов от автомобильного транспорта суммарно они составили: СО – 147,930 тыс. т, NO_x – 43,202 тыс., НМЛОС – 16,548 тыс., ВЧ2.5 – 2,199 тыс. т. С учетом используемого пространственного разрешения плотность выбросов (для территорий покрытых дорожной сетью) СО варьирует в диапазоне до 372,3 т/км², NO_x – до 87,2, НМЛОС – до 40,2, ВЧ2.5 – до 4,5 т/км². Пространственная вариабельность выбросов для различных загрязняющих веществ, выраженная в коэффициенте асимметрии распределения, сходна и характеризуется слабо выраженным ростом в ряду ВЧ2.5 (20,1) – NO_x (20,3) – НМЛОС (22,1) – СО (22,4) (табл. 3).

Таблица 3. Статистические характеристики пространственной структуры выбросов от автомобильного транспорта в Беларуси

Table 3. Statistical characteristics of the spatial structure of emissions from road transport in Belarus

Показатель	СО	NO _x	ВЧ2.5	НМЛОС
Плотность выбросов, кг/км ² :				
средняя	1193,7	349,3	18,5	133,9
медиана	3,7	1,0	0,1	0,4
максимум	372 307,4	87 152,5	4498,5	40 272,0
коэффициент асимметрии	22,4	20,3	20,1	22,1
коэффициент вариабельности, %	609	514	507	594
Площадь, покрытая дорожной сетью с выбросами выше среднего, км ²	17 966	18 069	17 824	18 040
Доля площади, покрытой дорожной сетью с выбросами выше среднего, %	14,5	14,6	14,4	14,6
Площадь (км ²) с выбросами (кг/км ²):				
[0, 0.1)	5571	17 202	64 560	33 633
[0.1, 1)	31 221	44 422	17 245	37 255
[1, 10)	35 368	19 805	15 261	17 183
[10, 100)	17 206	16 464	16 117	15 340
[100, 1000)	15 317	15 544	5507	16 499
[1000, 10000)	16 167	9807	149	3536
[10000, 100000)	2939	424	–	151
[100000, Inf)	136	–	–	–

Наибольшее количество выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта выбрасывается вблизи столицы и крупнейших городов в местах пересечения дорог первостепенного значения. Максимумы приурочены к пересечению МКАД (М9) с Р-1 (съезд с пр. Дзержинского) и М-4 (пересечение с пр. Партизанским) (рис. 1). Плотность выбросов NO_x от автомобильного транспорта в Беларуси свыше 10 т/км^2 характерна для территории общей площадью 424 км^2 , CO – 3075 км^2 , НМЛОС – 151 км^2 .

Полученная оценка позволяет оценить территориальную структуру выбросов с используемым разрешением в пределах отдельных административных районов и населенных пунктов. В частности, как показано на рис. 2, в Лепельском районе выбросы ВЧ2.5 от автомобильного транспорта происходят с территории площадью $0,973 \text{ км}^2$, что соответствует $52,8 \%$ площади данного административного района. В пределах участков района, где происходят выбросы от автомобильного транспорта, их плотность находится в диапазоне от $0,001$ до $408,1 \text{ кг/км}^2$; участки с плотностью выбросов выше 1000 кг/км^2 . Площади с различными уровнями выбросов ВЧ2.5 распределены следующим образом: до $0,1 \text{ кг/км}^2$ – $0,561 \text{ км}^2$, $0,1$ – $1,0 \text{ кг/км}^2$ – $0,142$, $1,0$ – $10,0 \text{ кг/км}^2$ – $0,106$, $10,0$ – $100,0 \text{ кг/км}^2$ – $0,133$, свыше 100 кг/км^2 – $0,073 \text{ км}^2$. Наибольшие выбросы ВЧ2.5 от автомобильного транспорта в Лепельском районе, согласно выполненному исследованию, характерны для пересечения дорог Р-15 и М-3 на юг от Лепеля, участка дороги М-3 на запад от города (см. рис. 2).

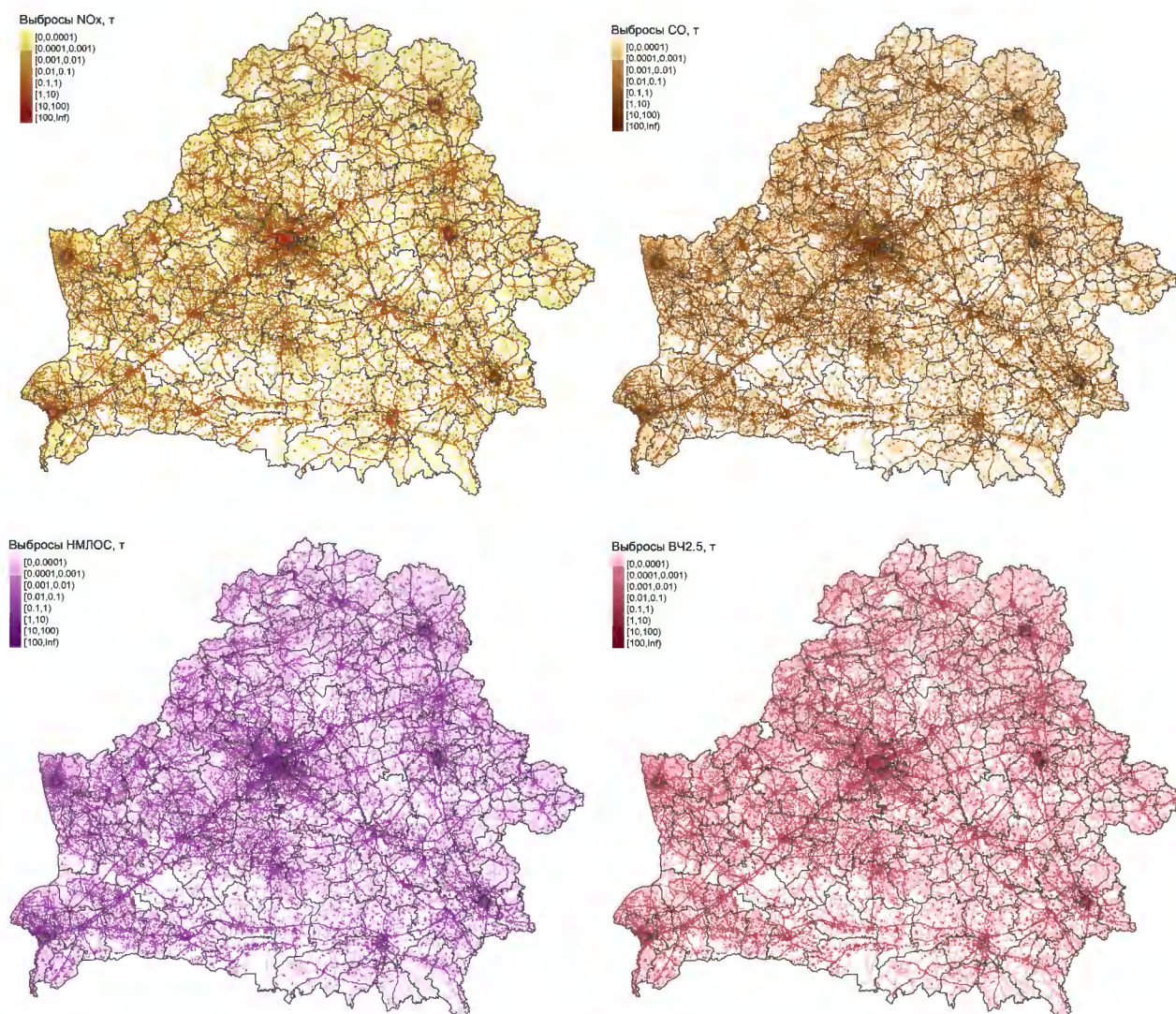


Рис. 1. Пространственная структура выбросов загрязняющих веществ (CO , NO_x , НМЛОС , ВЧ2.5) от автомобильного транспорта в Беларуси

Fig. 1. Spatial structure of emissions of pollutants (CO , NO_x , NMVOCs , PM2.5) from road transport in Belarus

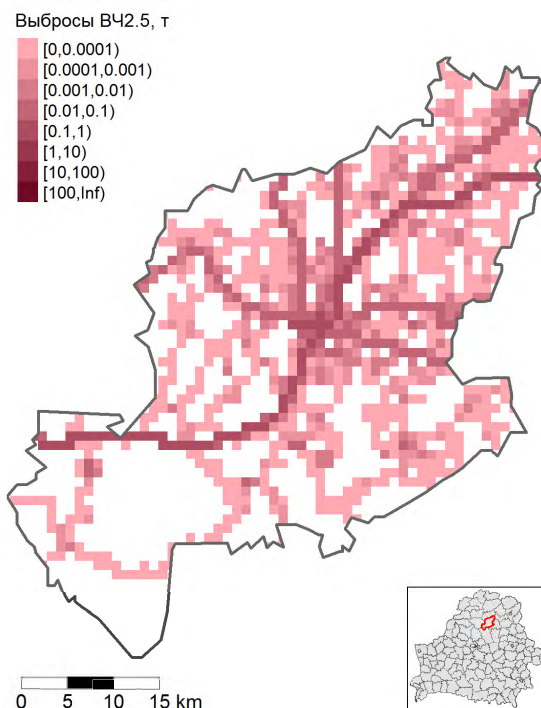


Рис. 2. Пространственная структура выбросов ВЧ2.5 от автомобильного транспорта в Лепельском районе

Fig. 2. Spatial structure of PM_{2.5} emissions from road transport in Lepel district

На всей территории страны на дорогах первостепенного значения выбрасывается большая часть рассматриваемых загрязняющих веществ от автомобильного транспорта: СО – 94,897 тыс. т (или 64,1 % от общего количества), NO_x – 30,815 тыс. (или 71,3), НМЛОС – 10,642 тыс. (64,3), ВЧ2.5 – 1,570 тыс. т (или 71,4 %). С учетом протяженности дорог различных категорий на 1 км дорог первостепенного значения в среднем приходится: СО – 5,29 т/млн маш·км, NO_x – 1,72, НМЛОС – 0,597, ВЧ2.5 – 0,088 т/млн маш·км. Дороги второстепенного значения характеризуются незначительно более высокими значениями приведенных выбросов СО и НМЛОС (на 1,9 и 0,5 % соответственно), а также более низкими значениями выбросов NO_x и ВЧ2.5. Это связано с различиями в средней структуре транспортных потоков по категориям транспортных средств, в частности, более высокой долей легковых автомобилей на дорогах второстепенного значения, около половины из которых работают на бензине и характеризуются более высокими удельными показателями выбросов СО и НМЛОС. При этом на 1 км дороги первостепенного значения приходятся значительно более высокие средние значения выбросов, чем на дороги второстепенного значения, что обусловлено различной интенсивностью движения. В частности, на первостепенных дорогах по сравнению с второстепенными на единицу длины выбрасывается в 24,9 раза больше СО, в 34,5 раза больше NO_x, в 34,7 раза больше ВЧ2.5 и в 25,1 раза больше НМЛОС.

Основной вклад в выбросы СО и НМЛОС вносят многочисленная и в значительной степени оснащенная бензиновыми двигателями категория легковых автомобилей. Они формируют 78,8 % выбросов СО (в том числе 72,7 % на дорогах первостепенного значения и 89,8 % на дорогах второстепенного значения) и 74,7 % выбросов НМЛОС (в том числе 68,7 % на дорогах первостепенного значения и 85,4 % на дорогах второстепенного значения). Другой значимой категорией транспорта для выбросов этих загрязняющих веществ являются микроавтобусы, формирующие 15,9 и 14,0 % выбросов СО и НМЛОС соответственно (рис. 3).

Мелкодисперсные твердые частицы ВЧ2.5 и NO_x поступают в атмосферный воздух в наибольшем количестве от грузовых автомобилей. Вклад этой категории в выбросы ВЧ2.5 от автомобильного транспорта составляют 52,8 % (в том числе 61,3 % на дорогах первостепенного значения и 31,5 % на дорогах второстепенного значения) и NO_x – 58,0 % (в том числе 67,5 % на дорогах первостепенного значения и 34,5 % на дорогах второстепенного значения). При этом на дорогах второстепенного значения от легковых автомобилей выбрасывается больше ВЧ2.5 и NO_x, чем от грузовых – 35,8 и 35,4 % соответственно. Тогда как среднестрановой вклад легковых автомобилей в выбросы от автомобильного транспорта на дорогах всех категорий составляет 24,9 % для NO_x и 25,1 % для ВЧ2.5. Сходная категориальная структура формирования выбросов NO_x и СО показана в исследованиях [30].

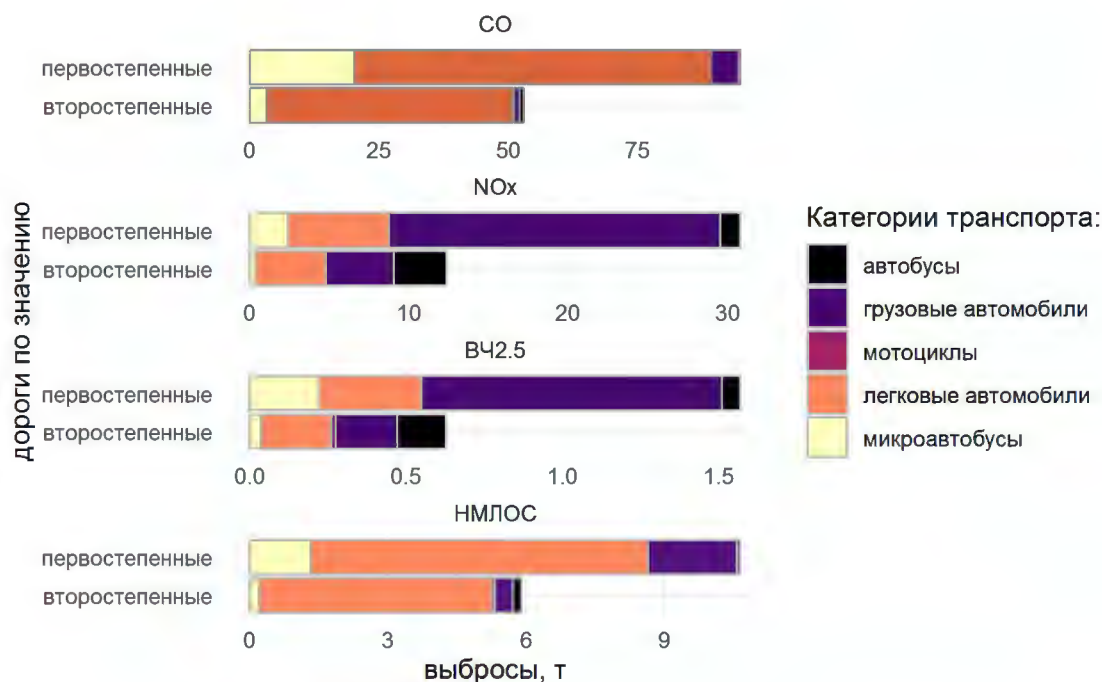


Рис. 3. Структура выбросов загрязняющих веществ в разрезе категорий транспорта и дорог

Fig. 3. Structure of emissions of pollutants by categories of transport and roads

Дороги первостепенного значения характеризуются более высоким уровнем выбросов BЧ_{2.5} и NO_x, на второстепенных больше, чем в среднем в стране, выбрасывается CO и НМЛОС. На дорогах первостепенного значения на 1 т выбросов BЧ_{2.5} приходится 7 т НМЛОС, 20,3 т NO_x и 62,6 т CO, тогда как дороги второстепенного значения характеризуются следующим соотношением этих загрязнителей: 1,0 : 9,1 : 19,1 : 81,9.

В территориальной структуре выбросов от автомобильного транспорта присутствует выраженная концентрация на урбанизированных территориях. Так, на урбанизированных территориях, занимающих менее 2 % территории страны, выбрасывается: CO – 58,118 тыс. т (или 39,3 %), NO_x – 14,269 тыс. т (или 33,0), НМЛОС – 6,410 тыс. т (или 38,7), BЧ_{2.5} – 0,729 тыс. т (или 33,2 %) (рис. 4). Более высокие доли выбросов CO и НМЛОС на урбанизированных территориях относительно других рассматриваемых загрязнителей объясняются более высоким вкладом легковых автомобилей в структуру суммарного годового пробега.

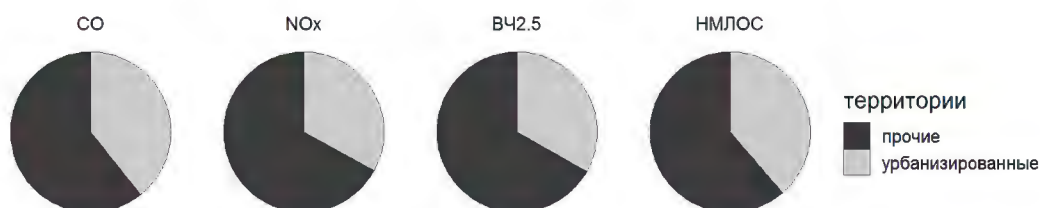


Рис. 4. Структура выбросов загрязняющих веществ по территориям

Fig. 4. Structure of emissions of pollutants by territories

С учетом занимаемых площадей средняя плотность выбросов на урбанизированных территориях составляет: CO – 19,07 т/км², NO_x – 4,68, НМЛОС – 2,10, BЧ_{2.5} – 0,24 т/км²; на прочих территориях наблюдаются значительно более низкие значения: CO – 0,44 т/км², NO_x – 0,14, НМЛОС – 0,05, BЧ_{2.5} – 0,01 т/км² (рис. 5).

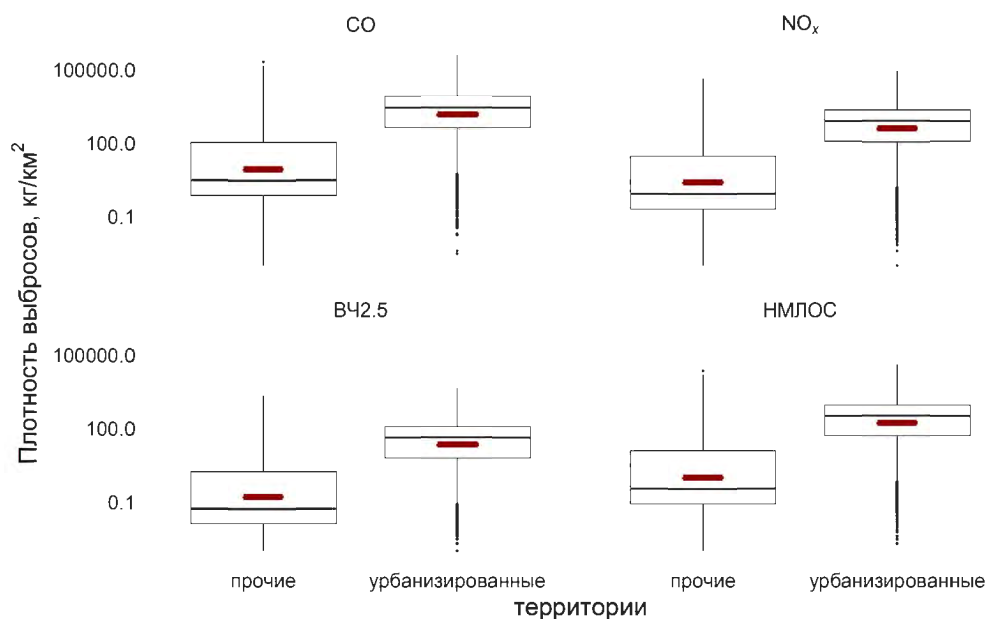


Рис. 5. Распределение плотности выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта на урбанизированных и прочих территориях (логарифмическая шкала, бордовая линия – среднее значение)

Fig. 5. Distribution of pollutant emission density from road transport in urbanized and other areas (logarithmic scale, red line represents the average value)

Для урбанизированных территорий характерны также более высокие медианные и максимальные значения плотности выбросов. Различие максимальных значений составляет около 2 раз, тогда как медианные значения для урбанизированных территорий в 815–993 раз выше, чем для прочих. Тем не менее в пределах урбанизированных территорий есть участки целевого разрешения 1 км × 1 км, на которых выбросы от автомобильного транспорта не происходят.

Обсуждение результатов. Представленная выше оценка с пространственным разрешением 1 км × 1 км для автомобильного транспорта получена для территории Беларуси впервые, что затрудняет сопоставления.

По сравнению с оценкой с пространственным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ [23], выполненной по состоянию на 2017 г., выявлены и оценены территории, где выбросы от автомобильного транспорта отсутствуют. При большем пространственном обобщении такие участки не выявляются, равно как и участки с высокой плотностью. Кроме того, при оценке с пространственным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ в Беларуси преобладают территории с плотностью выбросов CO в диапазоне 100–1000 кг/км², тогда как при большей пространственной детализации – в диапазоне 1–10 кг/км². Для других рассматриваемых поллютантов при более детализированной оценке преобладающими также являются территории с диапазоном выбросов на два порядка меньше. Большая детализация проявляется также в соотношении медианных и средних значений выбросов. При оценке с пространственным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ для NO_x среднее значение в 3,9 раза выше, чем медианное, при разрешении 1 км × 1 км это соотношение составляет более 300 (табл. 4).

Существенным улучшением представленной оценки является также учет пространственной неоднородности движения транспортных средств различных категорий, проявляющееся в том числе в отличиях статистических характеристик, а именно коэффициентов асимметрии и вариабельности. При оценке с пространственным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ по единому пространственному прокси получены одинаковые значения этих показателей для всех загрязняющих веществ.

Вместе с тем имеющиеся немногочисленные исследования для других стран, выполненные в сопоставимом пространственно-временном разрешении и для пересекающегося перечня загрязняющих веществ, позволяют оценить выявленные в данной работе особенности. Для корректного сопоставления регионов с различными суммарными показателями ниже приведены сопоставления результирующей плотности выбросов и соотношения плотностей выбросов на урбанизированных и прочих территориях.

Таблица 4. Статистические характеристики территориальной структуры выбросов от автомобильного транспорта в Беларуси при оценке с пространственным разрешением 0,1°×0,1° (2017 г., по данным [23])

Table 4. Statistical characteristics of the territorial structure of emissions from road transport in Belarus with a spatial resolution of 0.1°×0.1° (2017, based on [23] data)

Показатель	CO	NO _x	ВЧ2.5	НМЛОС
Плотность выбросов, кг/км ² :				
средняя	392,3	149,4	6,65	44,6
медиана	101,5	38,6	1,72	11,5
максимум	75 880	28 892	1287	8627
коэффициент асимметрии	21,8	21,8	21,8	21,8
коэффициент вариабельности, %	703,0	703,0	703,0	703,0
Площадь, покрытая дорожной сетью с выбросами выше среднего, км ²	41 941	41 941	41 941	41 941
Доля площади, покрытой дорожной сетью с выбросами выше среднего, %	20,2	20,2	20,2	20,2
Площадь (км ²) с выбросами в диапазоне (кг/км ²):				
[0,0.1)	427	784	8761	1994
[0.1,1)	1709	4131	79 490	11 396
[1,10)	12 963	41 597	93 237	86 897
[10,100)	88 393	101 143	25 571	92 168
[100,1000)	91 456	58 122	427	14 673
[1000,10000)	12 180	1425	142	499
[10000,100000)	499	427	0	0
[100000,Inf)	0	0	0	0

В отдельных городах региона Северный Рейн-Вестфалия (Германия), согласно [18], плотность NO_x от автомобильного транспорта находится в диапазоне 7,0–15,6 т/км², при преобладающей плотности выбросов для всего региона менее 2,5 т/км² и максимальной плотности 126,0 т/км². Такое значение для Германии преимущественно на 50 % выше, чем для Беларуси, однако соотношения между максимальными и средними значениями сходны в большей степени (16,8 и 18,6 соответственно).

Максимальная плотность выбросов в Греции для CO составляет около 550 т/км², для NO_x – 100, для ВЧ2.5 – 4,5, для НМЛОС – 125 т/км² [12], что выше, чем в настоящем исследовании для Беларуси. Различие в оценках для NO_x и ВЧ2.5 составляет 10 %, для CO и НМЛОС – 46 и 310 % соответственно. Соотношения между плотностями выбросов на урбанизированных и прочих территориях при этом сходны.

В то же время полученные оценки плотности выбросов значительно ниже, чем на в азиатском регионе. В частности, максимальной плотности выбросов CO в Беларуси соответствует среднее значение для территории Пекина с высокой интенсивностью движения, а для NO_x и ВЧ2.5 оно значительно ниже, согласно [20]. В то же время, согласно [10], в мегаполисах Индии средняя годовая плотность выбросов CO находится в диапазоне 35,3–246,3 т/км², а NO_x – 21,4–144,9 т/км², что на несколько порядков превосходит значения для урбанизированных территорий Беларуси.

Полученные максимальные значения сходны со средней плотностью выбросов в густонаселенных урбанизированных районах Аргентины [31] для CO и в 2 раза ниже для NO_x. При этом отмечается несколько более низкая, чем в Беларуси, степень концентрации плотности выбросов на урбанизированных территориях: соотношение средних плотностей выбросов на урбанизированных и прочих территориях составляет 35,7 для CO и 32,2 для NO_x, в Беларуси – 43,3 и 33,4 соответственно.

Заключение. Выполненное исследование позволило впервые для Беларуси оценить пространственную структуру выбросов отдельных загрязняющих веществ (ВЧ2.5, НМЛОС, CO, NO_x) а также основного количественного фактора ее формирующего (суммарного пробега транспортных средств) с разрешением 1 км. С учетом используемого пространственного разрешения установлено, что дорожной сетью покрыто 59,1 % территории страны, а максимальная плотность выбросов от автомобильного транспорта на территории Беларуси составляет 372,3 т/км² для CO, 87,2 т/км² для NO_x, 40,2 т/км² для НМЛОС и 4,5 т/км² ВЧ2.5. Пространственная неоднородность выбросов высока и характеризуется коэффициентом асимметрии распределения в диапазоне 20,1–22,4 для различных поллютантов.

Наибольшее количество выбросов приурочено к крупнейшим городам и местам пересечения дорог перестепенного значения. Для около 85,5 % территории страны, покрытой дорожной сетью, выбросы CO не превышают 1,194 т/км², NO_x – 0,349, НМЛОС – 0,134, ВЧ2.5 – 0,019 т/км².

Выявлено, что около 1/3 части выбросов (от 33,0 до 39,3 %, в зависимости от вещества) приходится на урбанизированные территории. Соответственно, в городах наблюдается более высокая плотность выбросов, как в среднем, так и максимальная. Среднее значение плотности выбросов CO составляет 10,99 т/км² на урбанизированных территориях и 0,76 т/км² на прочих, NO_x – 2,70 и 0,24 т/км², НМЛОС – 1,21 и 0,09 т/км², ВЧ2.5 – 0,14 и 0,01 т/км² соответственно. Максимальные значения на урбанизированных превышают аналогичные на прочих территориях в 2 раза. Сходные соотношения между выбросами в зависимости от территории получены для других стран.

Полученные результаты уточняют имевшиеся ранее пространственные оценки выбросов от автомобильного транспорта и предназначены для непосредственного использования при принятии управленческих решений в области охраны атмосферного воздуха, а также для моделирования рассеивания загрязняющих веществ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограммы «Природные ресурсы и их рациональное использование»; № госрегистрации 20160130.

Acknowledgements. The study has been performed within The State program of scientific research «Nature management and ecology», subprogram «Natural resources and environmental safety»; state registration no. 20160130.

Список использованных источников

1. A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: automotive technologies improvement / A. de S. Maes [et al.] // *Transportation Research Part D : Transport and Environment*. – 2019. – № 77. – P. 303–19. doi:10.1016/j.trd.2019.10.007
2. A comparative analysis of two highly spatially resolved European atmospheric emission inventories / J. Ferreira [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2013. – № 75. – P. 43–57. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.03.052
3. Spatial inter-comparison of Top-down emission inventories in European urban areas / M. Trombetti [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2018. – № 173. – P. 142–56. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.10.032
4. Comparison of road traffic emission models in Madrid (Spain) / R. Borge [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2012. – № 62. – P. 461–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.08.073
5. Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top-down methods / P. De. Saide, [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2009. – № 43. – P. 4914–23. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.07.013
6. Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities / D. Tuia [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2007. – № 41. – P. 3658–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.12.045
7. Инструкция о порядке учета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных источников выбросов [Электронный ресурс] : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 15 февр. 2010 г., № 6 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21022110>. – Дата доступа: 04.01.2023.
8. Об утверждении экологических норм и правил [Электронный ресурс] : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 29 дек. 2022 г., № 32-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339600p&p1=1> – Дата доступа: 18.06.2023.
9. Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://dataportal.belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 22.01.2022.
10. A comprehensive high-resolution gridded emission inventory of anthropogenic sources of air pollutants in Indian megacity Kolkata / P. Mangaraj [et al.] // *SN Applied Sciences*, Springer International Publishing. – 2022. – № 4. doi:10.1007/s42452-022-05001-3
11. Downscaling national road transport emission to street level: A case study in Dublin, Ireland / M. S. Alam [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – № 183. – P. 797–809. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.206
12. Fameli, K. M. Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters / K. M. Fameli, V. D. Assimakopoulos // *Science of the Total Environment*. – 2015. – № 505. – P. 770–86. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.015
13. Quantifying and spatial disaggregation of air pollution emissions from ground transportation in a developing country context: Case study for the Lima Metropolitan Area in Peru / Y. Romero [et al.] // *The Science of the Total Environment*. – 2020. – № 698.
14. Sun, S. Vehicle emission trends and spatial distribution in Shandong province, China, from 2000 to 2014 / S. Sun, W. Jiang, W. Gao // *Atmospheric Environment*. – 2016. – № 147. – P. 190–9. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.09.065

15. Improving high resolution emission inventories with local proxies and urban eddy covariance flux measurements / B. Gioli [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2015. – № 115. – P. 246–56. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.068>
16. An improved system for modelling Spanish emissions: HERMESv2.0 / M. Guevara [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2013. – № 81. – P. 209–21. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.08.053
17. A bottom up approach to on-road CO₂ emissions estimates: Improved spatial accuracy and applications for regional planning / C. K. Gately [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2013. – № 47. – P. 2423–30. doi:10.1021/es304238v
18. The impact of diesel vehicles on NO_x and PM₁₀ emissions from road transport in urban morphological zones: A case study in North Rhine-Westphalia, Germany / J. L. Breuer [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2020. – № 727. – P. 138583. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138583
19. Compilation of a road transport emission inventory for the Province of Turin: Advantages and key factors of a bottom-up approach / L. Pallavidino [et al.] // *Atmospheric Pollution Research*. – 2014. – № 5. – P. 648–55. doi:10.5094/APR.2014.074
20. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets / D. Yang [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2019. – № 19. – P. 8831–43. doi:10.5194/acp-19-8831-2019
21. Assessment of discrepancies between bottom-up and regional emission inventories in Norwegian urban areas / S. López-Aparicio [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2017. – № 154. – P. 285–96. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.02.004
22. European Environment Agency European Union emission inventory report 1990–2021 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). EEA Tech. Rep. 2023 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emissions-inventory-report-1990-2021/download>. – Date of access: 18.05.2023.
23. Belarusian emission inventory data informative inventory report to CLRTAP/EMEP 2020 [Electronic resource]. – Mode of access: https://webdab01.umweltbundesamt.at/download/submissions_2020/BY_IIR2020.zip?cgiproxy_skip=1. – Date of access: 14.01.2023.
24. Validation of the COPERT road emission inventory model with real-use data / M. Kousoulidou [et al.] // *Emissions Inventories-Informing Emerging Issues*. – 2010. – P. 40.
25. Какарека, С. В. Оценка выбросов загрязняющих веществ от дорожных передвижных источников с использованием модели COPERT IV / С. В. Какарека, О. Ю. Круковская // *Охрана атмосферного воздуха*. Атмосфера : сб. науч. тр. ; под. ред. А. Ю. Недре. – СПб., 2013. – С. 35–41.
26. РУП «БЕЛДОРЦЕНТР» – Республиканское унитарное предприятие «Белорусский дорожный инженерно-технический центр» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://beldor.cent.r.by/>. – Дата доступа: 12.01.2021.
27. OpenStreetMap [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.openstreetmap.org/#map=10>. – Date of access: 12.04.2023.
28. Climate Data Online: Web Services Documentation / National Center Environmental Information [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/>. – Date of access: 15.04.2023.
29. Global 10 m Land Use Land Cover Datasets: A Comparison of Dynamic World, World Cover and Esri Land Cover / Z. S. Venter [et al.] // *Remote Sensing*. – 2022. – № 14. – P. 4101. doi:10.3390/rs14164101
30. A GIS based anthropogenic PM₁₀ emission inventory for Greece / K. Markakis [et al.] // *Atmospheric Pollution Research*. – 2010. – № 1. – P. 71–81. doi:10.5094/APR.2010.010
31. High-resolution seasonal and decadal inventory of anthropogenic gas-phase and particle emissions for Argentina / S. E. Puliafito [et al.] // *Earth System Science Data*. – 2021. – № 13. – P. 5027–69. doi:10.5194/essd-13-5027-2021

References

1. Maes A. de S., Hoinaski L., Meirelles T. B. and Carlson R. C. A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: automotive technologies improvement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019, no. 77, pp. 303–19. doi:10.1016/j.trd.2019.10.007
2. Ferreira J. [et al.]. A comparative analysis of two highly spatially resolved European atmospheric emission inventories. *Atmospheric Environment*, 2013, no. 75, pp. 43–57. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.03.052
3. Trombetti M. [et al.]. Spatial inter-comparison of Top-down emission inventories in European urban areas. *Atmospheric Environment*, 2018, no. 173, pp. 142–56. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.10.032
4. Borge R. [et al.]. Comparison of road traffic emission models in Madrid (Spain). *Atmospheric Environment*, 2012, no. 62, pp. 461–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.08.073
5. Saide P., Zah R., Osses M., Eicker M.O. De Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top-down methods. *Atmospheric Environment*, 2009, no. 43, pp. 4914–23. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.07.013
6. Tuia D. [et al.]. Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities. *Atmospheric Environment*, 2007, no. 41, pp. 3658–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.12.045
7. *Instruktsiya o poryadke ucheta vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferynyy vozdukh ot mobil'nykh istochnikov vybrosov : postanovleniye Ministerstva prirodnnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus' № 6 ot 15.02.2010* [Instructions on the procedure for recording emissions of pollutants into the atmospheric air from mobile emission sources. Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of

- the Republic of Belarus, 15 February 2010, no. 6]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21022110> (accessed 4 January 2023). (in Russian)
8. *Ob utverzhdenii ekologicheskikh norm i pravil: postanovleniye Ministerstva prirodnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus' ot 29 dekabrya 2022 g. № 32-T* [On the approval of environmental norms and rules. Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 29 December 2022, no. 32-T]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339600p&p1=1> (accessed 18 June 2023). (in Russian)
 9. *Interaktivnaya informatsionno-analiticheskaya sistema rasprostraneniya ofitsial'noy statisticheskoy informatsii: Natsional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus'* [Interactive information and analytical system for disseminating official statistical information]. National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/> (accessed 22 January 2022). (in Russian)
 10. Mangaraj P., Sahu S. K., Beig G., Yadav R. A comprehensive high-resolution gridded emission inventory of anthropogenic sources of air pollutants in Indian megacity Kolkata. *SN Applied Sciences*, 2022, no. 4. doi:10.1007/s42452-022-05001-3
 11. Alam M. S., Duffy P., Hyde B., McNabola A. Downscaling national road transport emission to street level: A case study in Dublin, Ireland. *Journal of Cleaner Production*, 2018, no. 183, pp. 797–809. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.206
 12. Fameli K. M., Assimakopoulos V. D. Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters. *Science of the Total Environment*, 2015, no. 505, pp. 770–86. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.015
 13. Romero Y. [et al.]. Quantifying and spatial disaggregation of air pollution emissions from ground transportation in a developing country context: Case study for the Lima Metropolitan Area in Peru. *The Science of the Total Environment*, 2020, no. 698.
 14. Sun S., Jiang W., Gao W. Vehicle emission trends and spatial distribution in Shandong province, China, from 2000 to 2014. *Atmospheric Environment*, 2016, no. 147, pp. 190–9. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.09.065
 15. Gioli B. [et al.]. Improving high resolution emission inventories with local proxies and urban eddy covariance flux measurements. *Atmospheric Environment*, 2015, no. 115, pp. 246–56. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.05.068
 16. Guevara M. [et al.]. An improved system for modelling Spanish emissions: HERMESv2.0. *Atmospheric Environment*, 2013, no. 81, pp. 209–21. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.08.053
 17. Gately C. K., Hutrya L. R., Wing I. S., Brondfield M. N. A bottom up approach to on-road CO₂ emissions estimates: Improved spatial accuracy and applications for regional planning. *Environmental Science and Technology*, 2013, no. 47, pp. 2423–30. doi:10.1021/es304238v
 18. Breuer J. L., Samsun R. C., Peters R., Stolten D. The impact of diesel vehicles on NO_x and PM₁₀ emissions from road transport in urban morphological zones: A case study in North Rhine-Westphalia, Germany. *Science of the Total Environment*, 2020, no. 727, pp. 138583. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138583
 19. Pallavidino L. [et al.]. Compilation of a road transport emission inventory for the Province of Turin: Advantages and key factors of a bottom-up approach. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, no. 5, pp. 648–55. doi:10.5094/APR.2014.074
 20. Yang D. [et al.]. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, no. 19, pp. 8831–43. doi:10.5194/acp-19-8831-2019
 21. López-Aparicio S. [et al.]. Assessment of discrepancies between bottom-up and regional emission inventories in Norwegian urban areas. *Atmospheric Environment*, 2017, no. 154, pp. 285–96. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.02.004
 22. European Environment Agency European Union emission inventory report 1990–2021 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). EEA Tech. Rep. 2023. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emissions-inventory-report-1990-2021/download> (accessed 18 May 2023).
 23. Belarusian emission inventory data informative inventory report to CLRTAP/EMEP 2020. Available at: https://web-dab01.umweltbundesamt.at/download/submissions_2020/BY_IIR2020.zip?cgiproxy_skip=1 (accessed 14 January 2023).
 24. Kousoulidou M. [et al.]. Validation of the COPERT road emission inventory model with real-use data. *Emissions Inventories-Informing Emerging Issues*, 2010, p. 40.
 25. Kakareka S. V., Krukovskaya O. Yu. *Otsenka vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot dorozhnykh peredvizhnykh istochnikov s ispol'zovaniyem modeli COPERT IV* [Estimation of pollutant emissions from road mobile sources using the COPERT IV model]. Sbornik nauch. trudov "Okhrana atmosfernogo vozdukh. Atmosfera" [Proc. of sci. works "Atmospheric air protection"]. *Atmosphere*, 2013, pp. 35–41. (in Russian)
 26. RUP "BELDORTSENTR" – Respublikanskoye unitarnoye predpriyatiye "Belorusskiy dorozhnyy inzhenerno tekhnicheskii tsentr [RUE "BELDORTSENTR – Republican Unitary Enterprise "Belarusian Road Engineering and Technical Center"] [Electronic resource]. Available at: <https://beldor.centri.by/> (accessed 12 January 2021). (in Russian)
 27. OpenStreetMap (2023). Available at: <https://www.openstreetmap.org/#map=10> (accessed 12 April 2023).
 28. Climate Data Online: Web Services Documentation. National Center Environmental Information (2023). Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/> (accessed 15 April 2023).
 29. Venter Z. S. [et al.]. Global 10 m Land Use Land Cover Datasets: A Comparison of Dynamic World, World Cover and Esri Land Cover. *Remote Sensing*, 2022, no. 14, pp. 4101. doi:10.3390/rs14164101.
 30. Markakis K., Poupkou A., Melas D., Zerefos C. A GIS based anthropogenic PM₁₀ emission inventory for Greece. *Atmospheric Pollution Research*, 2010, no. 1, pp. 71–81. doi:10.5094/APR.2010.010.
 31. Puliafito S. E. [et al.]. High-resolution seasonal and decadal inventory of anthropogenic gas-phase and particle emissions for Argentina. *Earth System Science Data*, 2021, no. 13, pp. 5027–69. doi:10.5194/essd-13-5027-2021.

Информация об авторах

Круковская Ольга Юрьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: o-krukowskaya@tut.by

Какарека Сергей Витальевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru

Information about the authors

Olga Yu. Krukowskaya – Ph. D. (Geography), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: o-krukowskaya@tut.by

Sergey V. Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor, Head of Lab of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru