

В.Р. Битюкова¹, Н.А. Мозгунов², Г. Гапизжанулы³

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В МОСКВЕ: МИКРОГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается изменение объемов эмиссии от автотранспорта по нескольким улицам (новым и старым) в муниципальном районе Очаково-Матвеевское г. Москвы. Метод крупномасштабной оценки включил 3 этапа: натурные наблюдения за интенсивностью и структурой транспортного потока на выбранных улицах, расчет объемов выбросов и плотности загрязнения атмосферы в ареалах рассеяния выбросов. Выявлены сдвиги в факторах, определяющих пространственную специфику распространения загрязнения от автотранспорта. Определяющей характеристикой является транспортно-планировочная структура на уровне города, округа, района. Решение транспортной проблемы через трансформацию улично-дорожной сети усложняет применение инновационных приемов в решении проблемы загрязнения атмосферы в Москве. Позитивные изменения в динамике загрязнения, связанного с дорожным движением возможны в рамках постиндустриальных тенденций развития различных многофакторных подходов для разных районов города. Доказано, что строительство новых магистралей улучшает характер движения, снижает интенсивность заторов, но одновременно создает новые ареалы загрязнения. Снижение выбросов достигается только для легких грузовиков на бензине и тяжелых грузовиков на дизеле. Основным трендом последних лет стало усиление равномерности загрязнения от автотранспорта. Программы строительства нового жилья и масштабные проекты трансформации районов Москвы приводят к увеличению связности города и одновременно к выравниванию плотности автотранспортного загрязнения. Административные решения по сокращению интенсивности движения транспорта в центральных районах города и строительства новых дорог в периферийных районах города способствуют также сокращению территориальной дифференциации загрязнения, что является признаком постиндустриального этапа развития города.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Москва, автотранспорт, транспортные сети, эмиссия, экология города, ареалы загрязнения, транспортное моделирование

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: v.r.bityukova@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: mozgunoff@list.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: g.g_99@mail.ru

Victoria R. Bitukova¹, Nikita A. Mozgunov², Gandi Gapizhanuly³

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL EFFECTS OF ROAD CONSTRUCTION IN MOSCOW: MICROGEOGRAPHIC ANALYSIS

ABSTRACT

The article discusses the changes in the volume of emissions from vehicles along several streets (new and old) in the part of Ochakovo-Matveevskoye municipal district of Moscow. The large-scale assessment method included 3 stages: field observations of the intensity and structure of the traffic flow on selected streets, calculation of emission volumes and air pollution density in emission dispersion areas. In the article determines shifts in the factors of the spatial issues of the spread of pollution from vehicles. The defining characteristic is the transport and planning structure at the level of the city, district, local area. The solution of the transport problem through the transformation of the road network makes harder the using of innovative methods in solving the problem of air pollution in Moscow. Positive changes in the dynamics of traffic pollution are possible within the post-industrial trends in the development of various multifactorial approaches for different areas of the city. It is a fact that the construction of new highways improves the traffic quality, reduces the intensity of congestion, but at the same time creates new areas of pollution. Emission reductions are only achieved for gasoline light trucks and diesel heavy trucks. The main trend of recent years is the increase in the uniformity of pollution from vehicles. New housing construction programs and large-scale projects for the transformation of Moscow districts lead to more connectivity in the city's and at the same time to equalize the density of motor traffic pollution. Administrative decisions of reducing the intensity of traffic in the central areas of the city and the construction of new roads in the peripheral areas of the city also contribute to the reduction of area differentiation of pollution that is a sign of the post-industrial stage of the city's development.

KEYWORDS: Moscow, motor vehicles, transport networks, emission, city ecology, areas of pollution, transport modelling

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших результатов экономических трансформаций постсоветского периода в России применительно к внутригородскому развитию стало усиление роли автомобильного транспорта как ключевого источника состояния городской среды. Именно в столичных городах в последние десятилетия автомобильный транспорт стал ведущим источником выбросов высокотоксичных веществ и загрязнения атмосферы в городах, формируя ареалы высокой плотности загрязнения. Увеличение автомобилизации стало важной чертой постсоветского периода. Москва стала одним из лидеров данного процесса (на втором месте после Приморья и Сахалина). На сегодняшний день в Москве концентрируется 10 % автопарка России. Максимальный годовой прирост числа автомашин (19,1 %) наблюдался в начале 1990-х гг., затем ситуация несколько стабилизировалась, пока в 1996 г. прирост не стал снижаться. За период 2011–2013 гг. темпы увеличения автопарка города снизились до 2–5 % в среднем за год, что свидетельствует о насыщении рынка, а после 2014 г. – падении реальных доходов населения (личный автопарк сократился на 8 %, а автопарк организаций – на 6 %).

¹ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail*: v.r.bitukova@geogr.msu.ru

² Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia; *e-mail*: mozgunoff@mail.ru, *tel.*: 7495 9392644; *fax*: 7 495 9393812

³ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail*: g.g_99@mail.ru

В период экономического роста и роста доходов населения быстрый рост автомобилизации достигался во многом за счет качественных автомобилей. В начале строительства дорог и реконструкции транспортной сети (1997–2006 гг.) коэффициент корреляции между приростом числа автомобилей и объемом выбросов в атмосферу впервые стал статистически незначимым – 0,42, а на современном этапе – отрицательным. В период с 2009 по 2019 гг. валовый выброс от передвижных источников загрязнения сократился почти на 400 тыс. т, т.е. с 1342 до 982,4 тыс. т. После 2019 г. изменилась методика учета выбросов в атмосферу от автотранспорта; за счет изменения структуры автопарка объем выбросов г. Москвы сократился до 330 тыс. т. Поэтому при разрыве временных рядов оценку динамики можно проводить, только основываясь на натуральных наблюдениях структуры потока и его интенсивности на конкретных улицах.

Одновременно именно в крупнейших городах активно происходят трансформации социально-экономических и градостроительных условий развития, включая планировку и функции. Для постсоветских городов это осложняется тем, что одним из последствий развития рыночных отношений стал взрывной рост уровня автомобилизации населения. Однако их планировочная структура, в значительной степени сформировавшаяся до автомобильного бума, не способна выдержать такую нагрузку.

Это и определяет необходимость изучения трансформации качества городской среды в Москве для прогнозирования развития качества городской среды. Москва в настоящее время переживает период структуризации своего пространства, резкой поляризации городской среды, изменения функций места многих районов. Исследования внутригородской дифференциации качества среды в настоящее время весьма актуальны и имеют прикладное значение, прежде всего при изучении тенденций развития рынка недвижимости и городских земель, для анализа наилучших вариантов использования городских земельных участков, для выделения проблемных городских территорий и разработки программ по их развитию. Характер движения автотранспорта и, как следствие, объем и плотность выбросов в атмосферу в значительной степени зависят от планировочной структуры города, трассировки улиц и магистралей, их геометрии. Особенности планировочной структуры и разные условия развития улично-дорожной сети определяют неравномерную автотранспортную загруженность отдельных частей города, способствуя внутригородской дифференциации загрязнения окружающей среды.

Обзор исследований проблемы. Исследование автотранспортных проблем в городах находится на пересечении общественных и естественных наук: географии, социологии, истории, экологии, демографии, экономики. В работах, посвященных *воздействию автотранспорта на окружающую среду*, вопросы загрязнения рассматривают в разных аспектах (экологическом, экономическом и социальном). При этом особое внимание уделяется выбросам различных вредных веществ, прежде всего концентрации PM_{10} и NO_x . Уровень выбросов определяется на основе прямых [Colville et al., 2004; Sam, 2021] или точечных измерений [Deak et al., 2020; Gis et al., 2021], а также косвенно по различным методикам оценки воздействия транспорта (по интенсивности и средней скорости движения, расходу топлива и др.) [Parsaev et al., 2018]. Особый интерес вызывают исследования, где в качестве исходной информации для определения выбросов используются такие относительно доступные данные о дорогах и трафике, как ГИС, Google Maps [Petrovska, Stevanovic, 2015; Bityukova, Mozgunov, 2019].

Другим важнейшим аспектом исследований является моделирование, что особенно актуально, когда прямые измерения невозможны. К наиболее простым можно отнести модели, направленные на оценку воздействия какого-либо одного фактора. Например, модель рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере при переменных ветровых условиях (CFD VADIS) [Rafael et al., 2018], модель транспортных выбросов для линейных источников (TREM) [Borrego et al., 2004], модель транспортных потоков (EMITRANSYS model) [Jacyna et al., 2017]. Для более комплексного анализа, учитывающего действие

многих изменяющихся факторов, применяют комбинации подобных моделей или имитационные модели [Phung et al., 2020].

В ряде исследований рассматривается широкий диапазон *методов оптимизации транспортной системы* и города в целом, включая регулирование транспортных потоков. В них приводится обоснование снижения количества выбросов при снижении заторов и увеличении пропускной способности перекрестков за счет адаптации тайминга и сигналов к конкретной ситуации на отдельных перекрестках или в их системе [Phung et al., 2020; Janarthanan et al., 2021; Zhou et al., 2021]. В исторически сложившейся городской среде, когда физическое изменение транспортных путей затруднительно, существенное внимание уделяется перераспределению транспорта по существующим улицам [Wang, Sun, 2019].

Многие исследователи отмечают необходимость развития *общественного транспорта* [Silva et al., 2012; Chavez-Baeza, Sheinbaum-Pardo, 2014; Janarthanan et al., 2021]. Пример европейских стран показывает эффективность установки более жестких государственных нормативных требований к топливу и самим автомобилям. Кроме того, отмечается важность не только прямых, но и косвенных мер (образовательных, рекламных, просветительных), способствующих принятию населением новых политических решений, касающихся транспорта [Santos et al., 2010].

Кроме самой транспортной системы, на уровень и воздействие выбросов влияет и городская среда. Ряд исследований показывает, что при определенных подходах к планированию городской среды можно значительно уменьшить поездки людей за счет обеспечения комфортных условий для перемещения пешком или с помощью альтернативных видов транспорта [Chien, Hu, 2020; Mueller et al., 2020]. Большую роль в снижении воздействия транспортных выбросов играет озеленение [Morillas et al., 2018; Rafael et al., 2018; Mueller et al., 2020], т.к. оно поглощает шум или мешает его воздействию, а также способствует преобразованию парникового газа в кислород.

Планировочная структура города редко становится предметом отдельного анализа как фактора, влияющего на загрязнение. Однако динамика выбросов от автотранспорта зависит не только от количества машин, но и от характера их движения, определяемого совместным воздействием разнонаправленных факторов и условий. Увеличению объемов выбросов способствует высокая интенсивность движения, новое жилищное строительство, рельеф, наличие мостов, ширина дорог, низкая связность сети, наличие транзитного транспорта и др. Снижению эмиссии способствует обновление автопарка, улучшение качества топлива, расширение дорожной сети, усиление ее связности, сокращение барьеров, т.е. все, что снижает удельный выброс (в расчете на 1 км пробега), который определяется техническими свойствами автомобиля и возможностью для него двигаться с оптимальной скоростью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Плотность дорожной сети традиционно используют как фактор снижения объема выбросов от автотранспорта на 30 % при движении автомобилей без заторов [Битюкова и др., 2011]. Увеличение плотности застройки создает условия для изменения формы организации системы городского транспорта и развития интермодальных транспортных систем с акцентом на общественный транспорт [Rodrigue, 2017]. Однако дорожное строительство в столичных городах почти никогда не может успеть за темпами роста автомобильного парка. Напротив, когда строятся новые дороги, это стимулирует как рост автомобилизации, так и коэффициент выезда на дороги. К тому же строительство новых скоростных магистралей только обостряет степень напряженности движения на улицах, которые соединяют магистраль с жилыми районами. Поэтому на современном этапе очень важно провести оценку влияния изменения этой крайне инерционной структуры, которая формируется в течение длительного времени и является продуктом эволюционного развития города и ранее принятых планировочных решений. Обычно это сводится к выявлению различий на микроуровне.

Методика исследования состоит из 3 этапов:

1. Расчет структуры и интенсивности автотранспортных потоков в дневное время в обе стороны в будние и выходные дни методом наружных наблюдений (период наблюдений – апрель 2022 г.).

2. Расчет объема выбросов в атмосферу загрязняющих веществ движущимся автомобильным транспортом на каждом из выделенных участков на основе нормативов пробегового выброса каждого из загрязняющих веществ и поправочных коэффициентов, учитывающих работу климатических систем автомобиля, дорожные условия и сцепление с покрытием, а также среднюю скорость движения транспортного потока на выбранном участке автомагистрали¹.

3. Расчет показателя *плотности вредных выбросов* (т/км² в год) от каждой улицы и выделения ареалов с разной плотностью выбросов в атмосферу для определения степени загрязнения атмосферы внутри ареалов.

Расчет площади ареалов воздействия (поля концентрации с превышением ПДК) от каждого участка дорожной сети производится по методике, утвержденной Минприроды РФ на основе данных об объемах скорости и высоте выбросов газовой смеси. Основной проблемой исследования трансформации территориальной структуры загрязнения автотранспортом в Москве является разработка унифицированной методики, которая позволит провести анализ серийных наблюдений за преобразованиями в интенсивности транспортных потоков, транспортной инфраструктуры и пространственных закономерностей транспорта мегаполиса. Поскольку сложно подобрать какой-либо один конкретный показатель, отражающий уровень экологической напряженности, для определения территориальной дифференциации загрязнения атмосферы автотранспортом в методику включен метод ареалов.

Зона влияния автомагистралей с интенсивностью движения 10 тыс. машин в сутки и более составляет до 400 м, а в сухую и ясную погоду загазованность и запыленность могут проявляться на расстоянии до 1–2 км от трассы в подветренную сторону. Устойчивую зону химического воздействия (радиусом 400 м), проявляющуюся в постоянных превышениях ПДК, формируют крупные автомагистрали с интенсивностью движения около 50 тыс. машин в сутки.

Для учета выбросов от легкового авто различного экологического класса используются данные удельных пробеговых выбросов вредных веществ в разрезе транспортных средств различного экологического класса и типа двигателя по используемому топливу. Эти показатели гармонизированы с действующей международной методикой инвентаризации выбросов загрязняющих веществ ЕМЕП с учетом особенностей структуры и режимов движения автотранспортных средств.

Пространственное воздействие транспортных потоков с учетом городской застройки рассчитывается как произведение длины отрезка дороги на величину зоны воздействия (выраженную в км²); площадь воздействия автотранспортных потоков (S) рассчитывается как сумма произведений площади прямоугольника (одна сторона которого равна длине отрезка воздействия (L_i), другая – зоне воздействия (2r)) и круга с радиусом, равным радиусу воздействия r.

$$S = L_i * 2r + \pi * r^2, P = (V_i * L_i * 365 * K) / (L_i * 2r + \pi * r^2), \quad (1)$$

где:

P – итоговое значение плотности выбросов автотранспортного потока в зоне его воздействия;

L_i – длина расчетного транспортного отрезка (км);

V_i – поток автомобилей в расчетном отрезке;

¹ Методика по оценке выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от передвижных источников (автомобильный и железнодорожный транспорт) (утв. распоряжением Росприроднадзора от 13 декабря 2019 г. № 37-р «О внесении изменений в распоряжение Росприроднадзора от 1 ноября 2013 г. № 6-р»). Электронный ресурс: <https://minjust.consultant.ru/documents/36322?items=1> (дата обращения 09.02.2022)

r – радиус воздействия автотранспортного потока на прилегающую территорию (км);
 K – объем выбросов от одного автомобиля на 1 км в год (т.е. объем выбросов от автотранспорта за год, деленный на суммарный пробег по всему городу).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Плотность улично-дорожной сети в Москве имеет ярко выраженный центр-периферийный характер. В центральных районах города, а также в районах, расположенных вдоль Садового и Третьего транспортного кольца (ТТК), она составляет от 8 до 24 км/км². Наибольшие темпы роста дорожной сети были характерны для районов вытянутых вдоль крупнейших транспортных магистралей города, особенно в местах их пересечения с МКАД и другими хордовыми магистралями (Выхино-Жулебино, Зюзино, Нагатинно-Садовники, Нижегородское, Обручевское, Очаково-Матвеевское), где строились новые связывающие транспортную сеть дороги и развязки. А основное снижение выбросов было достигнуто в районах центра и среднего пояса города, также вытянутых вдоль крупнейших проспектов (Гагаринский, Обручевский, Савеловский, Академический, Алексеевский и также в Очаково-Матвеевское); ближе к МКАД снижение выбросов было достигнуто только в северной части города.

Важным фактором динамики выбросов от передвижных источников является *развитие общественного транспорта*. Создание новых линий метро, МЦК, оптимизация маршрутов общественного транспорта, в совокупности с рядом мер экономического и запретительного характера позволили значительно уменьшить трафик в центре города, где объем выбросов от автотранспорта снизился на 10–20 %. Сохранить данную тенденцию – очень сложная задача, для решения которой требуется сменить тип потребительского поведения, сломать эффект центростремительных тенденций, обустроить пространство центра.

Одним из ярких примеров изменения плотности дорожной сети и следствием интенсивности движения автотранспорта является трансформация транспортной системы города Москвы; особенно показательным является на этом фоне является район Очаково-Матвеевское. Важнейшим инфраструктурным проектом на данной территории является строительство Северо-Западной хорды (СЗХ) – высокоскоростной бессветофорной магистрали в направлении северо-восток – юго-запад. Всего в районе и на примыкающих к нему территориях расположены участки СЗХ, что привело к довольно серьезным изменениям дорожной сети за последние 5 лет (рис. 1).

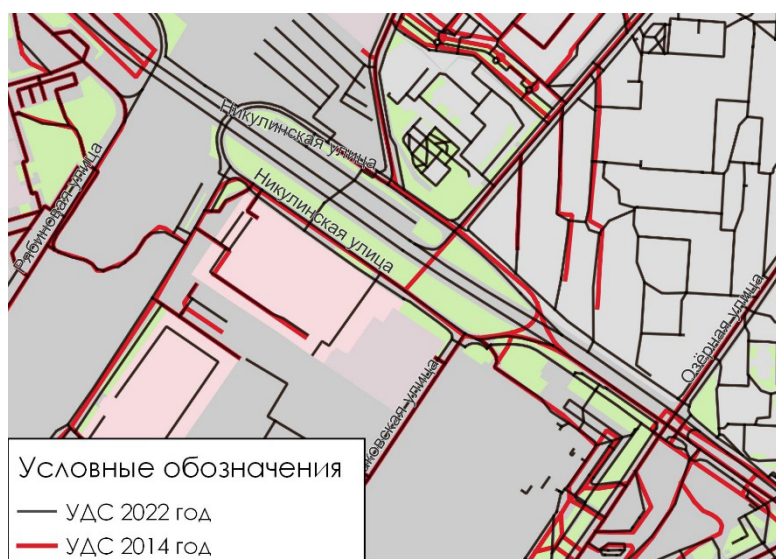


Рис. 1. Изменения улично-дорожной сети в окрестностях района Очаково-Матвеевское за 2014–2022 гг. Черным цветом показана УДС на 2022 г., красным цветом – изменения в УДС на 2014 г.

Fig. 1. Changes in the road network in the vicinity of the Ochakovo-Matveevskoye district for 2014–2022. The black color shows the road network in 2022, the red colour – changes in the road network for 2014

Изменение улично-дорожной сети привели к перераспределению нагрузки автотранспорта на территорию района. Наиболее нагруженные участки, согласно данным на 2014 г., увеличили свою пропускную способность (рис. 2), при этом количество заторов уменьшилось, а скорость прохождения трассы увеличилась.

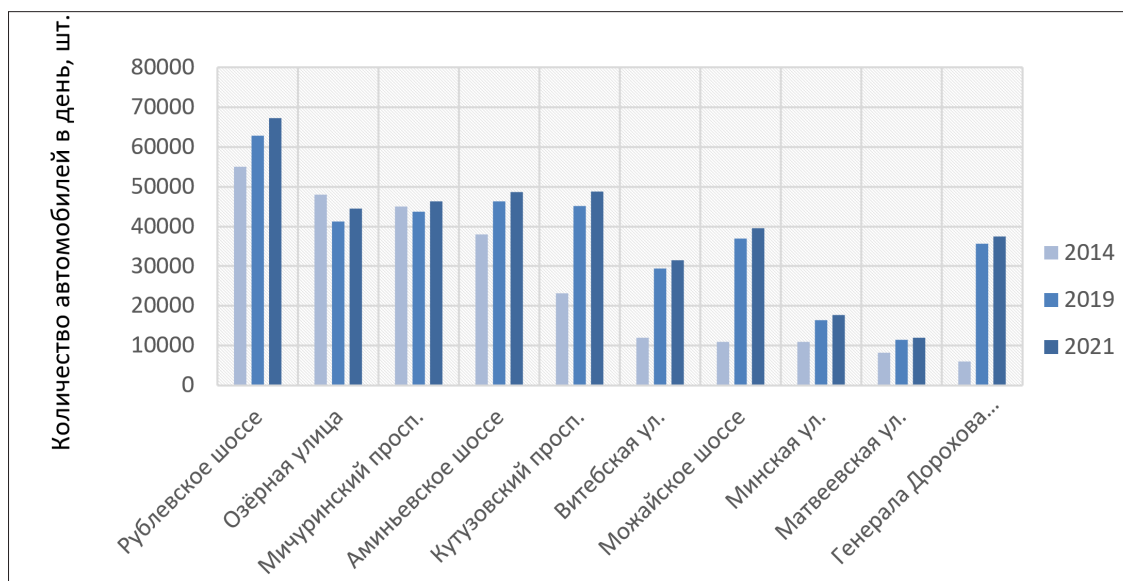


Рис. 2. Изменение среднесуточного количества автомобилей на отдельных участках территории района Очаково-Матвеевское и его окрестностей, 2014–2021гг.

Fig. 2. Changes in the average daily number of cars in certain parts of the territory of Ochackovo-Matveevskoye district, 2014–2021

Для того, чтобы учесть различные средние скорости движения, были использованы рекомендации Всемирной дорожной ассоциации (PIARC) «Выбросы в автодорожных туннелях и потребность в воздухе для вентиляции». Согласно рекомендациям, в диапазоне средних скоростей, применимых к новым построенным магистралям, выбросы увеличиваются с увеличением средней скорости. В качестве иллюстрации ниже приведены графики зависимости выбросов NO_x от средней скорости для разных типов транспортных средств. Однако расчеты показывают, что при росте интенсивности движения на новых магистралях эффект роста загрязнения на низких скоростях при заторах исчезает уже полностью для легковых автомобилей на бензиновом и дизельном двигателе, сохраняется лишь для легких грузовиков на бензине и тяжелых грузовиков на дизеле (при скорости 30 км/час, т.е. средней скорости движения в заторах, удельный выброс возрастает приблизительно в 1,5 р., а затем вновь снижается) (рис. 3).

Вышесказанное еще раз подтверждает, что строительство новых дорог дает определенные эффекты лишь для определенного класса автомобилей, выброс которых сокращается при достижении оптимальной скорости движения. Социальный эффект от отсутствия заторов в любом случае будет достигнут, но экологический нуждается в более точной оценке на микроуровне. Рост из-за увеличения протяженности дорожной сети, использования индивидуального транспорта, доли автобусов малой вместимости был отмечен ранее для периферийной зоны новой столицы Казахстана г. Нур-Султан с низкой плотностью застройки [Abilov et al., 2021].

Пример оценки выбросов транспортного потока с заданной интенсивностью движения, составом и средней скоростью приведен в таблице ниже (табл. 1.). Увеличение скорости движения от 90 до 120 км/час не предусмотрено в целевых показателях строительства новых магистралей в Москве, но, как правило, происходит, по крайней мере на начальных этапах эксплуатации. Когда интенсивность потока снижается, при средней структуре транспортного потока по расчетам удельный выброс CO возрастает в 1,91 р., NO_x – в 2,1 р., углеводородов – на 30 %, а взвешенных частиц – на 10 %.

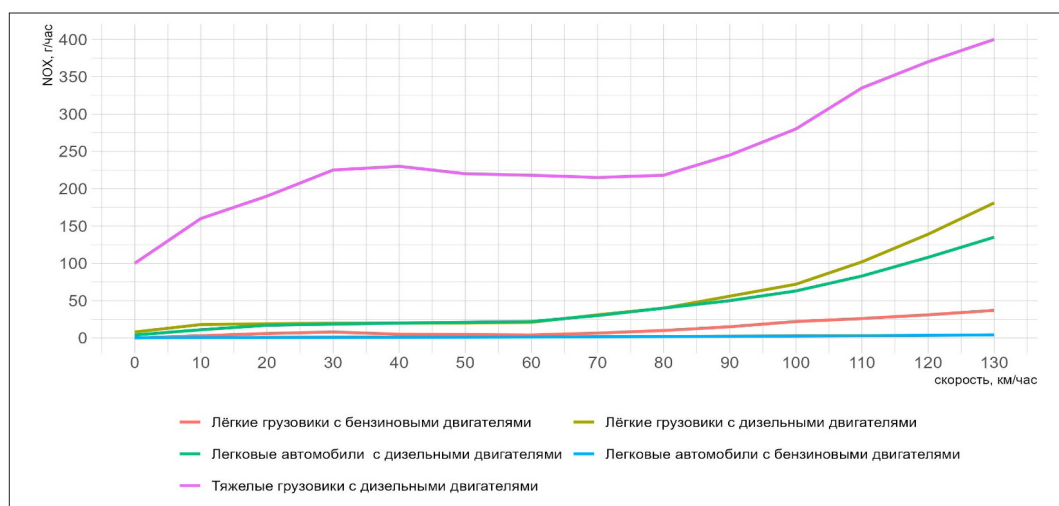


Рис. 3. Зависимость удельного выброса NO_x (г/ч) от средней скорости движения по новым магистралям

Fig. 3. NO_x (g/h) emission dependency of mean vehicles velocity in new motorways

Табл. 1. Оценка увеличения выбросов при изменении средней скорости движения
Table 1. Estimation of the increase in emissions with a change in the average speed of movement

Параметр	CO*		NO _x ¹		Углеводороды ²		Взвешенные вещества ²	
	90	120	90	120	90	120	90	120
Средняя скорость потока, км/ч	90	120	90	120	90	120	90	120
Выброс, г/ч	305,0	777,4	50,2	140			12,0	17,8
Удельный выброс, г/км	3,39	6,48	0,56	1,17	1,39	1,87	0,13	0,15
Прирост со скоростью		1,91		2,1		1,34		1,11

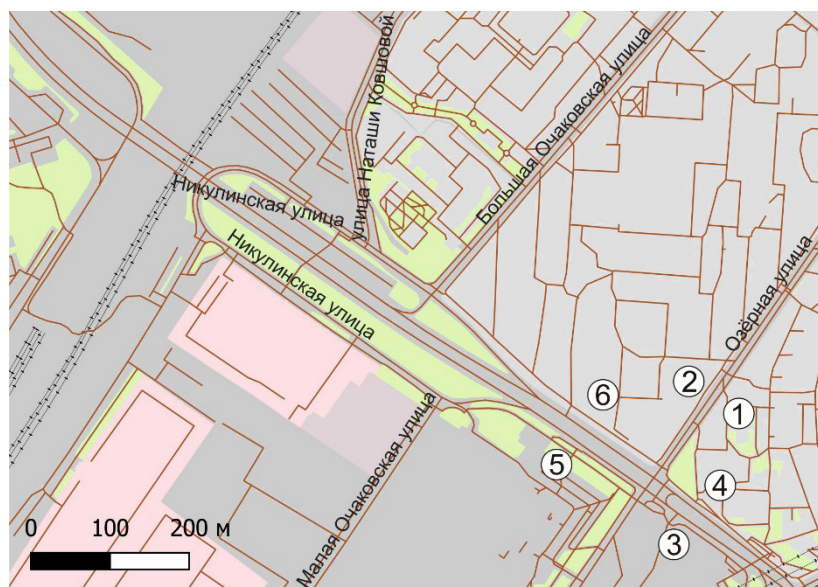


Рис. 4. Расположение точек наблюдения интенсивности транспортных потоков на микроуровне

Fig. 4. Spatial distribution of observation points for the intensity of traffic flows at the micro level

¹ Расчеты на основе рекомендаций Всемирной дорожной ассоциации “Road tunnels vehicle emissions and air demand for ventilation” («Выбросы транспортных средств в автодорожных туннелях и потребность в воздухе для вентиляции»), PIARC Tech. Com. C4, 2012

² Расчет на основе Руководства по инвентаризации выбросов ЕАОС: Автомобильный транспорт, 1999

На модельном участке были проведены наблюдения структуры и интенсивности автотранспортных потоков. Для района Москвы Очаково-Матвеевское модельным участком является пересечение улиц Озерная и Никулинская к северо-западу от Мичуринского проспекта. Данный участок представляет особенный интерес с точки зрения серии наблюдений для составления динамики изменения типов транспортных средств, их представленности в ходе развития южных участков Северо-Западной хорды.

В рамках микроисследования проявляется влияние факторов корректности работы светофоров, наличие нерегулируемых пешеходных переходов, наличие или отсутствие выделенных полос для общественного транспорта, количество полос движения на пропускную способность улично-дорожной сети. Для полноценного мониторинга дорожной ситуации было выбрано 6 участков наблюдения (рис. 4).

В структуре транспортного потока наблюдается явное преобладание легковых автомобилей, однако выезд на построенный участок Северо-Западной хорды (точки 5–6), агрегирует довольно крупный поток и грузового транспорта превышающий 300 единиц техники в час. Это еще раз подтверждает гипотезу данного исследования, что строительство автотранспортных магистралей внутри городской ткани на первом этапе дает экологический эффект от оптимальной скорости движения. Но к отрицательным эффектам надо отнести: 1) появление нового источника загрязнения в виде новой магистрали или развязки; 2) увеличение заторов на улицах, входящих в новую магистраль, особенно на въездах в вечерние и утренние часы (максимально утром в точке выезда из микрорайона на магистраль и в точке съезда с нее, начиная с 18 часов); 3) рост выбросов от заторов грузового транспорта в вечерние часы на самой магистрали, для которых существует эффект 30–50 % роста удельного выброса основных загрязняющих веществ – CO и NO_x. Поскольку в 9.00 доля грузовых автомобилей может достигать 20 % в структуре потока, объем выбросов может возрасти на 12 %.

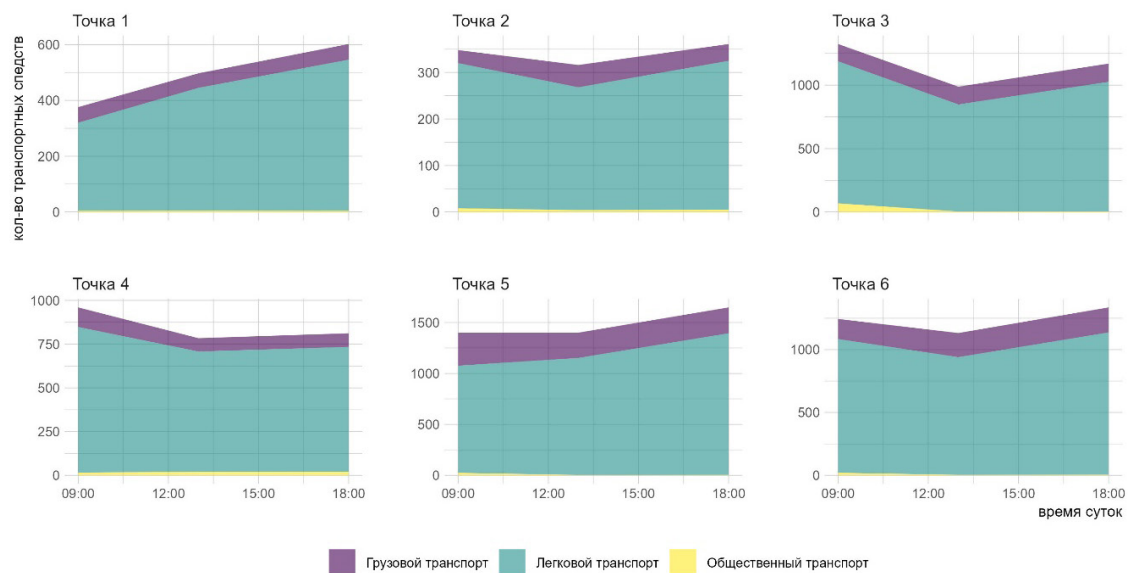


Рис. 5. Структура и интенсивность транспортных потоков днем в будний день
Fig. 5. Traffic flow structure and intensity during daytime in weekday

Дневная сезонность в рабочие дни, влияющая на динамику и немного на структуру потока также явно прослеживается по результатам полевых наблюдений. Интенсивность транспортного потока растет по мере приближения вечернего часа пик, а на точках 3 и 4 высокая интенсивность потока в начале периода наблюдений имеет увязку с утренним максимумом автомобилей на дорогах Москвы.



Рис. 6. Структура и интенсивность транспортных потоков днем в выходной день
Fig. 6. Traffic flow structure and intensity during daytime in weekend

В выходные дни на модельном участке четко видно падение интенсивности транспортного потока, достигающего в пике значений чуть более 1000 единиц техники в час. Суточная сезонность в выходные дни также отличается от активности в рабочие дни недели: появляется пик в середине дня и периоды относительно низкого траффика в утренние и вечерние часы. Интересным наблюдением является противофазная структура транспортного потока на точках 3 и 6 в течение одного дня, а также в точках наблюдения 1 и 2.

Проведение серии наблюдений в выбранном модельном районе в фазе активной перестройки транспортных потоков позволит в ближайшей перспективе перейти к расчетам пространственного воздействия транспортных потоков с учетом изменений в скорости движения автомашин. Интересным и важным дополнением к исследованию послужит проведение наблюдений в разные времена года и при различных погодных условиях, что позволит более дифференцированно подойти к оценке экологического воздействия от автотранспорта на данную территорию. Исследование также может быть дополнено наблюдениями в выбранных точках в ночное время, чтобы составить базу данных полной суточной активности всех видов транспорта на микроуровне.

ВЫВОДЫ

В отличие от мелкомасштабных исследований, проводившихся на примере отдельных городов, которые выявили обратную зависимость между плотностью УДС и плотностью выбросов в атмосферу [Битюкова и др., 2011], проведенный анализ внутригородских различий показал значительно более сложную картину. Фактически за пределами центра строятся новые дороги с большей пропускной способностью, на которых увеличивается средняя скорость движения и снижается плотность выбросов.

Наиболее существенные изменения в среднесуточной интенсивности движения автомобилей наблюдаются на Можайском шоссе (реконструкция завершилась в конце 2014 г. и включала в себя строительство нескольких путепроводов и боковых проездов). Бессветофорный проезд по новой эстакаде Можайского шоссе значительно ускорил скорость прохождения этого участка трассы. Увеличение пропускной способности Витебской улицы и улицы Генерала Дорохова связано с завершением строительства СЗХ.

Согласно данным Правительства Москвы, проведенные мероприятия должны были увеличить пропускную способность этих трасс в среднем на 25 %, но при этом данные полевых наблюдений свидетельствуют о более значительном увеличении транс-

портного потока. В результате роста средней скорости движения в районе увеличилась связанность сети, уменьшился суммарный пробег, сократился пробеговый выброс. В результате эффект сокращения выбросов в районе за период 2012–2020 гг. составил 460 тонн в год (3 %) при росте численности населения и объеме введенного многоэтажного жилья 460,5 тыс. м².

Новое строительство при нынешней планировочной структуре и пропускной способности дорог дополнительно увеличивает нагрузку на МКАД и основные радиальные магистрали. За период 2011–2020 гг. в Москве в границах 2012 г. было сдано свыше 16 млн м² жилья¹, подавляющее большинство которого располагается в тех районах города, где плотность населения и застройки была несколько ниже, в зоне между ТТК и МКАД. Северо-Восточная и Северо-Западная магистрали уже почти готовы, что может скорректировать эту картину, но вряд ли сильно, поскольку на них очень мало съездов.

Увеличение плотности населения в городе можно рассматривать не только как фактор усиления нагрузки, но и как потенциал изменения формы организации системы городского транспорта, поскольку из мировой практики известно, что города с высокой плотностью населения более склонны к выбору интермодальных транспортных систем с акцентом на общественный транспорт.

Позитивные изменения в динамике загрязнения дорожным движением возможны в рамках постиндустриальных тенденций развития различных многофакторных подходов для разных районов города. Для Москвы, учитывая нынешнюю концентрацию дорожной сети, будет невозможно адаптироваться к экстенсивной автомобилизации просто путем строительства дорог; вместо этого потребуется четкое различие между мобильностью населения и мобильностью личных транспортных средств (первое должно быть развито всеми возможными способами, второе должно быть ограниченным).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-77-30004), теоретический обзор подходов – в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 19-77-30004), theoretical review of approaches within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Moscow State University named after M.V. Lomonosov “The Future of the Planet and Global Environmental Changes”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битюкова В.Р., Касимов Н.С., Власов Д.В. Экологические портреты российских городов. Экология и промышленность России, 2011. № 4. С. 6–18.
2. Abilov A.Zh., Anzorova M.A., Bityukova V.R., Makhrova A.G., Khojikov A.A., Yaskevich V.V. Planning structure as a road traffic pollution differentiation factor: a case study of Nur-Sultan. Geography, Environment, Sustainability, 2021. V. 14. No. 3. P. 6–13.
3. Bitykova V., Mozgunov N. Spatial features transformation of emission from motor vehicles in Moscow. Geography, Environment, Sustainability, 2019. V. 12. No. 4. P. 57–73.
4. Borrego C., Tchepel O., Salmim L., Amorim J.H., Costa A.M., Janko J. Integrated modeling of road traffic emissions: application to Lisbon air quality management. Cybernetics and Systems, 2004. V. 35. P. 535–548. DOI: 10.1080/0196972049051904.
5. Chavez-Baeza C., Sheinbaum-Pardo C. Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in

¹ Данные в разрезе отдельных домов предоставлены Руководителем аналитического центра ЦИАН А.А. Поповым

- the Mexico City Metropolitan Area. *Energy*, 2014. V. 66. P. 624–634. DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.047.
6. *Chien Y.-C., Hu W.-H.* Low-carbon and sustainable urban bike lane labelling system – a case study of Taichung. Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/581/1/012035.
7. *Colville R.N., Kaur S., Britter R., Robins A., Bell M.C., Shallcross D., Belcher S.E.* Sustainable development of urban transport systems and human exposure to air pollution. *Science of the Total Environment*, 2004. V. 334–335. P. 481–487. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.052.
8. *Deak G., Raischi N., Matei M., Boboc M., Cornateanu G., Raischi M., Matei S., Yusuf S.Y.* Meteorological parameters and air pollution in urban environments in the context of sustainable development. Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. 8 p. DOI: 10.1088/1755-1315/616/1/012003.
9. *Gis W., Gis M., Wisniowski P., Taubert Sl.* Initial assessment of the legitimacy of limiting the maximum permissible speed on highways and motorways based on tests in real traffic conditions. Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/642/1/012016.
10. *Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Karoń G.* Noise and environmental pollution from transport: decisive problems in developing ecologically efficient transport systems. *Journal of Vibroengineering*, 2017. V. 19. P. 5639–5655. DOI: 10.21595/jve.2017.19371.
11. *Janarathanan R., Partheeban P., Somasundaram K., Navin Elamparithi P.* A deep learning approach for prediction of air quality index in a metropolitan city. *Sustainable Cities and Society*, 2021. V. 67. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102720.
12. *Morillas J.M.B., Gozalo G.R., González D.M., Moraga P.A., Vilchez-Gómez R.* Noise pollution and urban planning. *Current Pollution Reports*, 2018. V. 4. P. 208–219. DOI: 10.1007/s40726-018-0095-7.
13. *Mueller N., Rojas-Rueda D., Khreis H., Cirach M., Andrés D., Ballester J., Bartoll X., Daher C., Deluca A., Echave C., Milà C., Márquez S., Palou J., Pérez K., Tonne C., Stevenson M., Rueda S., Nieuwenhuijsen M.* Changing the urban design of cities for health: the superblock model. *Environment International*, 2020. V. 134. 13 p. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105132.
14. *Parsaev E.V., Malyugin P.N., Teterina I.A.* Methodology for the calculation of emissions for non-stationary transport flow. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2018. V. 15. No. 5. P. 686–697.
15. *Petrovska N., Stevanovic A.* Traffic congestion analysis visualisation tool. Presented at the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2015. P. 1489–1494. DOI: 10.1109/ITSC.2015.243.
16. *Phung P.T.K., Thi N.T., Cuc V.T.K.* A study on urban traffic congestion using simulation approach. Presented at the Proceedings of 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development, GTSD, 2020. P. 555–561. DOI: 10.1109/GTSD50082.2020.9303130.
17. *Rafael S., Vicente B., Rodrigues V., Miranda A.I., Borrego C., Lopes M.* Impacts of green infrastructures on aerodynamic flow and air quality in Porto’s urban area. *Atmospheric Environment*, 2018. V. 190. P. 317–330. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.07.044.
18. *Rodrigue J.-P.* The geography of transport systems. New York: Routledge, 2017. 440 p.
19. *Sam R.* Assessment and characterization of air pollution due to vehicular emission considering the aqi and los of various roadways in Kolkata. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021. V. 93. P. 199–208. DOI: 10.1007/978-981-15-6887-9_23.
20. *Santos G., Behrendt H., Teytelboym A.* Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics*, 2010. V. 28. P. 46–91. DOI: 10.1016/j.retrec.2010.03.002.
21. *Silva C.B.P.D., Saldiva P.H.N., Amato-Lourenço L.F., Rodrigues-Silva F., Miraglia S.G.E.K.* Evaluation of the air quality benefits of the subway system in São Paulo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 2012. V. 101. P. 191–196. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.02.009.

22. Wang Q., Sun H. Traffic structure optimization in historic districts based on green transportation and sustainable development concept. *Advances in Civil Engineering*, 2019. V. 2019. 18 p. DOI: 10.1155/2019/9196263.
23. Zhou S., Ng S.T., Yang Y., Xu J.F. Integrating computer vision and traffic modeling for near-real-time signal timing optimization of multiple intersections. *Sustainable Cities and Society*, 2021. V. 68. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102775.

REFERENCES

1. Abilov A.Zh., Anzorova M.A., Bityukova V.R., Makhrova A.G., Khojikov A.A., Yaskevich V.V. Planning structure as a road traffic pollution differentiation factor: a case study of Nur-Sultan. *Geography, Environment, Sustainability*, 2021. V. 14. No. 3. P. 6–13.
2. Bityukova V.R., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Environmental portraits of Russian cities. *Ecology and Industry of Russia*, 2011. No. 4. P. 6–18 (in Russian).
3. Bityukova V., Mozgunov N. Spatial features transformation of emission from motor vehicles in Moscow. *Geography, Environment, Sustainability*, 2019. V. 12. No. 4. P. 57–73.
4. Borrego C., Tchepel O., Salmim L., Amorim J.H., Costa A.M., Janko J. Integrated modeling of road traffic emissions: application to Lisbon air quality management. *Cybernetics and Systems*, 2004. V. 35. P. 535–548. DOI: 10.1080/0196972049051904.
5. Chavez-Baeza C., Sheinbaum-Pardo C. Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area. *Energy*, 2014. V. 66. P. 624–634. DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.047.
6. Chien Y.-C., Hu W.-H. Low-carbon and sustainable urban bike lane labelling system – a case study of Taichung. Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/581/1/012035.
7. Colville R.N., Kaur S., Britter R., Robins A., Bell M.C., Shallcross D., Belcher S.E. Sustainable development of urban transport systems and human exposure to air pollution. *Science of the Total Environment*, 2004. V. 334–335. P. 481–487. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.052.
8. Deak G., Raischi N., Matei M., Boboc M., Cornateanu G., Raischi M., Matei S., Yusuf S.Y. Meteorological parameters and air pollution in urban environments in the context of sustainable development. Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. 8 p. DOI: 10.1088/1755-1315/616/1/012003.
9. Gis W., Gis M., Wisniowski P., Taubert Sl. Initial assessment of the legitimacy of limiting the maximum permissible speed on highways and motorways based on tests in real traffic conditions. Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/642/1/012016.
10. Jacyna M., Wasiaak M., Lewczuk K., Karoń G. Noise and environmental pollution from transport: decisive problems in developing ecologically efficient transport systems. *Journal of Vibroengineering*, 2017. V. 19. P. 5639–5655. DOI: 10.21595/jve.2017.19371.
11. Janarthanan R., Partheeban P., Somasundaram K., Navin Elamparithi P. A deep learning approach for prediction of air quality index in a metropolitan city. *Sustainable Cities and Society*, 2021. V. 67. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102720.
12. Morillas J.M.B., Gozalo G.R., González D.M., Moraga P.A., Vilchez-Gómez R. Noise pollution and urban planning. *Current Pollution Reports*, 2018. V. 4. P. 208–219. DOI: 10.1007/s40726-018-0095-7.
13. Mueller N., Rojas-Rueda D., Khreis H., Cirach M., Andrés D., Ballester J., Bartoll X., Daher C., Deluca A., Echave C., Milà C., Márquez S., Palou J., Pérez K., Tonne C., Stevenson M., Rueda S., Nieuwenhuijsen M. Changing the urban design of cities for health: the superblock model. *Environment International*, 2020. V. 134. 13 p. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105132.
14. Parsaev E.V., Malyugin P.N., Teterina I.A. Methodology for the calculation of emissions for non-stationary transport flow. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2018. V. 15. No. 5. P. 686–697.

15. *Petrovska N., Stevanovic A.* Traffic congestion analysis visualisation tool. Presented at the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2015. P. 1489–1494. DOI: 10.1109/ITSC.2015.243.
 16. *Phung P.T.K., Thi N.T., Cuc V.T.K.* A study on urban traffic congestion using simulation approach. Presented at the Proceedings of 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development, GTSD, 2020. P. 555–561. DOI: 10.1109/GTSD50082.2020.9303130.
 17. *Rafael S., Vicente B., Rodrigues V., Miranda A.I., Borrego C., Lopes M.* Impacts of green infrastructures on aerodynamic flow and air quality in Porto's urban area. *Atmospheric Environment*, 2018. V. 190. P. 317–330. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.07.044.
 18. *Rodrigue J.-P.* The geography of transport systems. New York: Routledge, 2017. 440 p.
 19. *Sam R.* Assessment and characterization of air pollution due to vehicular emission considering the aqi and los of various roadways in Kolkata. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021. V. 93. P. 199–208. DOI: 10.1007/978-981-15-6887-9_23.
 20. *Santos G., Behrendt H., Teytelboym A.* Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics*, 2010. V. 28. P. 46–91. DOI: 10.1016/j.retrec.2010.03.002.
 21. *Silva C.B.P.D., Saldiva P.H.N., Amato-Lourenço L.F., Rodrigues-Silva F., Miraglia S.G.E.K.* Evaluation of the air quality benefits of the subway system in São Paulo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 2012. V. 101. P. 191–196. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.02.009.
 22. *Wang Q., Sun H.* Traffic structure optimization in historic districts based on green transportation and sustainable development concept. *Advances in Civil Engineering*, 2019. V. 2019. 18 p. DOI: 10.1155/2019/9196263.
 23. *Zhou S., Ng S.T., Yang Y., Xu J.F.* Integrating computer vision and traffic modeling for near-real-time signal timing optimization of multiple intersections. *Sustainable Cities and Society*, 2021. V. 68. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102775.
-