

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ФАКТОРЫ ДИНАМИКИ ЭМИССИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ АВТОТРАНСПОРТА В МОСКВЕ

В.Р. Битюкова¹, Н.А. Колдобская², О.Е. Прусихин³

^{1–3} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России

² Университет МГУ–ППИ в Шэньчжэне

¹ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru

² Доц., канд. геогр. наук, автор-корреспондент; e-mail: koldobskayana@my.msu.ru

³ Аспирант, e-mail: olegprus2000@mail.ru

В статье проведен полимасштабный анализ факторов динамики выбросов в атмосферу от автотранспорта Москвы за 2014–2023 гг. Выявлено, что в 2000-е гг. на фоне роста автомобилизации происходило сокращение загрязнения за счет улучшения качества автомобильного парка и топлива. В 2010-е гг. основными факторами динамики объема выбросов и его территориальных пропорций становятся изменение плотности и топологии транспортной сети, активно развивающийся общественный транспорт как следствие эффективной городской транспортной политики. Планировочная структура города до начала рассматриваемого периода обуславливала низкую связность сети, избыточный пробег и повышенное загрязнение отдельных районов города на фоне быстро меняющегося автопарка столицы. Исследование показало, что в последние годы, напротив, количество автомобилей и структура парка стали консервативным фактором, а стратегии развития города сосредоточились на строительстве и реконструкции дорог, усилении связности сети. Расчет объемов выбросов от отдельных участков дорожной сети в муниципальном районе Очаково-Матвеевское на основе данных об интенсивности и структуре транспортных потоков за 2014–2023 гг. показал, что 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. Баланс этих факторов меняется во времени (если в начале постсоветского периода основными были унаследованные факторы, то в последние годы – это в основном позитивные трансформационные) и в пространстве: промзоны сохранились только на периферии города, а железнодорожные вокзалы выносятся туда, где меняющаяся топология сети не только увеличила связанность, но и создала эффект вакуума в центре.

Ключевые слова: передвижные источники загрязнения, транспортные сети, транспортное моделирование, Очаково-Матвеевское, Москва

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.2.2

ВВЕДЕНИЕ

В столичных городах трансформация отраслевой структуры экономики, промышленности и занятости населения происходят наиболее быстрыми темпами, обуславливая не только изменение антропогенного воздействия, но и внутригородских различий состояния окружающей среды. В постсоветский период прошла деиндустриализация экономики, изменились планировочные и градостроительные условия, появился фактор реальной рыночной стоимости городских земель, ускорились темпы автомобилизации. Это существенно повлияло на уровень и характер антропогенного воздействия на городскую среду и ее экологическое состояние. Скорость и качество произошедших изменений были обусловлены как новыми, так и унаследованными факторами

развития. При этом новые факторы наиболее ярко проявляются именно в столичных городах как центрах различных инноваций.

Автомобильный транспорт в 1990–2018 гг. на фоне роста парка и кризисной деиндустриализации был ведущим источником загрязнения атмосферы, его вклад в объем выбросов превышал 50% в половине регионов и в $\frac{3}{4}$ городов России (2018) [Bityukova, Mozgunov, 2019; Кошелева и др., 2018]. Во многих городах вклад автотранспорта в суммарные выбросы превышал 90%: в южных региональных центрах, где промышленность представлена отраслями с низким уровнем выбросов (пищевая и легкая промышленность) (Назрань, Нальчик, Элиста, Ростов-на-Дону, Ставрополь, Краснодар, Калуга, Воронеж), рекреационных центрах, а также

Москве и Санкт-Петербурге. В 2019 г. Росприроднадзор утвердил новую методику учета выбросов от транспорта вследствие изменения структуры автопарка. В результате объем выбросов в России сократился в 3 раза. При этом Москва осталась на первом месте по объемам выбросов в атмосферу не только среди всех городов, но и регионов страны (980 тыс. т до 2019 г. и около 330 тыс. т после).

Исследование автотранспорта как одного из ведущих факторов территориальной дифференциации качества окружающей среды городов сталкивается с проблемой отсутствия данных статистики [Parsaev et al., 2018]. Оценки объемов выбросов в атмосферу в разрезе отдельных улиц, кварталов и районов основываются на данных об интенсивности и средней скорости движения, источником информации для которых могут служить данные ГИС о трафике [Petrovska, Stevanovic, 2015], натурных наблюдениях [Bityukova и др., 2022] или моделирования транспортных потоков (EMITRANSYS index TomTom) [Jacyna et al., 2017].

Расчет объема выбросов выхлопных газов от отдельных участков улиц является основой для моделирования ареала рассеяния выбросов от передвижных источников. 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]. Для комплексного анализа, учитывающего действие многих изменяющихся факторов, применяют комбинации подобных моделей или имитационные модели [Phung et al., 2020]. Объем невыхлопных частиц в атмосфере можно оценить на основе численного моделирования, поскольку почти все выбросы транспортных средств, не связанные с выхлопными газами (износ тормозов, шин, дорог и взвешенные частицы, а также летучие органические соединения при уходе за транспортным средством), возникают независимо от типа автомобиля и характера топлива. Выбросы от растворителей в средствах для мытья стекол и антиобледенителей в настоящее время доминируют в эмиссии летучих органических соединений (ЛОС) от дорожного движения в Великобритании и имеют совершенно иной по сравнению с эмиссией от сжигания топлива состав выбросов ЛОС [Harrison et al., 2021].

Существует большое количество моделей распространения, диффузии эмиссии от передвижных источников. Однако практически нет работ, которые рассматривали бы трансформацию территориальной структуры выбросов от автотранспорта [Ревич, 2018].

Другое направление оценки основано на данных мониторинга, включающего анализ концентрации, например, PM_{10} и NO_x и др. Уровень загрязнения

определяется на основе прямых [Kerimray et al., 2020; Sam, 2021] или точечных измерений [Gis et al., 2021; Deak, 2020]. Выбросы автомобильного транспорта являются источником вторичного загрязнения, поэтому уровни засоления, загрязнения тяжелыми металлами и металлоидами анализируются в зависимости от интенсивности движения на автодорогах и во дворах с автостоянками [Власов и др., 2022; Popovicheva et al., 2024].

Оптимизация транспортной системы рассматривается как фактор снижения количества выбросов при сокращении заторов и увеличении пропускной способности перекрестков [Janarthanan et al., 2021; Phung et al., 2020; 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], а также развития общественного транспорта как фактора снижения эмиссии [Silva et al., 2012; Chavez-Baeza, Sheinbaum-Pardo, 2014]. Пример европейских стран показывает эффективность установки более жестких государственных нормативных требований к топливу и самим автомобилям.

Планирование городской среды, способствующее уменьшению числа поездок [Chien, Hu, 2020; Mueller et al., 2020], озеленение, поглощающее шум и загрязняющие вещества [Rafael et al., 2018], рассматриваются как фактор изменения выбросов от автотранспорта. Но высокая интенсивность движения способствует увеличению объемов выбросов, как и новое жилищное строительство, рельеф, наличие мостов, ширина дорог, наличие транзитного транспорта и др. В ряде исследований доказывалось, что увеличение плотности и связанности дорожной сети способствовало равномерности движения транспорта, достижению так называемой оптимальной скорости движения, на которой удельный объем выбросов минимален [Bityukova, Mozgunov, 2019].

Недостаток магистралей способствует созданию заторов на дорогах, в которых скорость снижается до 10–20 км/ч и удельный выброс увеличивается на 30%. Однако в последнее время введение системы «стоп–старт» приводит к тому, что удельный выброс большинства автомобилей, кроме некоторых видов грузовиков, не увеличивается на низкой скорости. К тому же существует гипотеза, что строительство новых магистралей не столько перераспределяет потоки, сколько стимулирует выезд новых автомобилей. В Москве в условиях самого высокого среди мировых городов темпа развития системы каршеринга эта проблема особенно актуальна. Поэтому целью данного исследования является оценка влияния изменений в улично-дорожной сети Москвы на

уровень автотранспортного загрязнения в связи как с изменением потоков автотранспорта, его структуры, скорости движения, так и с изменением плотности и конфигурации дорожной сети на примере муниципального района Очаково-Матвеевское.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет территориальной структуры загрязнения атмосферного воздуха включал три этапа: 1) сбор информации об интенсивности движения в разрезе участков улиц; 2) расчет объема выбросов от автотранспорта в разрезе участков улиц; 3) расчет приземных концентраций, формирующихся в результате рассеяния выбросов.

В качестве информационной базы использовались данные Росстата по автомобилизации, Росприроднадзора по объемам выбросов регионов и городов, Федеральной налоговой службы по структуре автопарка, муниципальной статистики по численности населения и протяженности дорожной сети, компании «Эспар-аналитик» по интенсивности движения на участках дорожной сети в районе Очаково-Матвеевское за 2014–2024 гг., аналитического центра ЦИАН по площади нового жилищного строительства.

Динамика и структура эмиссии от автотранспорта в значительной степени определяется изме-

нением в методике расчета показателя. Расчет показателя выбросов в атмосферу от автотранспорта проводится в соответствии с методическими рекомендациями Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, которые в 2019 г. были изменены [Приказ Минприроды..., 2019]. Обоснованием к существенному снижению удельных нормативов послужили данные о значительном улучшении структуры автомобильного парка. Основные изменения в методику расчета выбросов были введены на уровне изменения структуры потока, добавился стандарт Евро-5, изменились пропорции между типами двигателей, для грузовых автомобилей и автобусов увеличился нормативный пробег. Что касается изменения пробегового выброса, то по ряду позиций норматив был увеличен, например по СО. Напротив, уменьшен норматив для сернистых соединений. Для дизельных автомобилей стандарта Евро-4 уменьшился норматив по всем веществам, кроме летучих органических соединений, не включая метан (ЛОСНМ) (табл. 1). В целом наиболее существенно изменились нормативы дизельных двигателей. Для автобусов и грузовиков увеличение норматива произошло для сажи, СО, NO_x, ЛОСНМ, существенное сокращение (в несколько раз) для SO₂, несколько меньшее для CH₄.

Таблица 1

Изменение удельных выбросов загрязняющих веществ для легковых автомобилей при движении по территории городов с численностью населения более 1 млн чел., 2013–2019 гг.

Экологический класс	Вид топлива*	Загрязняющие вещества, г/км**						
		СО	NO _x	С	SO ₂	CH ₄	ЛОСНМ	NH ₃
Евро-0	Б	20,1/22,8***	1,7/1,5****	–	0,034/0,021	0,092/0,04	3,375/3,86	0,002
	Д	0,7	3,2/3,6	0,2/0,25	0,192/0,073	0,005/–	0,145/0,2	0,001
Евро-1	Б	7,4	0,9	–	0,019	0,015	0,365	0,07
	Д	0,4/0,5	0,68/0,74	0,06/0,07	0,173/0,065	0,005/–	0,075/0,09	0,001
Евро-2	Б	4,5/5,2	0,35/0,36	–	0,03/0,019	0,04/0,01	0,053/0,08	0,07/0,095
	Д	0,5	0,74	0,07	0,065	–	0,09	0,001
Евро-3	Б	2,4/2,7	0,15/0,14	–	0,03/0,018	0,004	0,053/0,046	0,07/0,06
	Д	0,4/0,5	0,52/0,57	0,04/0,05	0,115/0,062	0,005/–	0,001/0,07	0,001
Евро-4	Б	0,3	0,08	–	0,018	0,003	0,017	0,06
	Д	0,4/0,3	0,52/0,31	0,04/0,015	0,115/0,062	0,005/–	0,001/0,04	0,001
Евро-5	Б	0,3	0,06	–	0,018	0,003	0,017	0,06
	Д	0,3	0,25	0,002	0,062	–	0,04	0,001

Примечания. *Б – бензиновый двигатель; Д – дизельный двигатель. **Числитель приводится по данным [Рекомендации..., 2013], знаменатель – по данным [Приказ Минприроды..., 2019]. ***Розовым цветом отмечен рост пробегового выброса. ****Зеленым цветом отмечено сокращение пробегового выброса.

В качестве информационной базы использовались данные Росприроднадзора по объемам выбросов от передвижных источников по Москве в целом [База данных Росприроднадзора..., 2024], Федеральной налоговой службы по структуре автопарка в разрезе муниципальных образований [База данных Федеральной налоговой службы..., 2024], муниципальной статистики по численности населения и протяженности дорожной сети, аналитического центра ЦИАН по площади нового жилищного строительства, Эспар-аналитик и натурных наблюдений по интенсивности движения и структуре потока в разрезе отдельных участков улиц (около 90 тыс. участков), а для района Очаково-Матвеевское – 186 участков с помесечным трафиком за период с марта 2023 по март 2024 г.

Расчет выбросов в атмосферу загрязняющего вещества движущимся автотранспортным потоком на автомагистрали (или ее участке) с фиксированной протяженностью L (км) определяется по формуле:

$$M_{L_i} = \frac{L - L_0}{3600} \sum_1^K M_{K,i}^{\Pi} \cdot G_K \cdot k_C \cdot r_{V_{K,i}} \text{ (г/с)},$$

где $M_{K,i}^{\Pi}$ – удельный пробеговый выброс i -го вредного вещества автомобилями K -й группы для городских условий эксплуатации (г/км); K – количество групп автомобилей; G_K – среднесуточная интенсивность движения (автомобилей в сутки); k_C – поправочный коэффициент, учитывающий работу климатических систем автомобиля, дорожные условия и сцепление с покрытием; $r_{V_{K,i}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения транспортного потока (V , км/ч) на выбранном участке автомагистрали; $1/3600$ – коэффициент пересчета «час» в «сек»; L – протяженность участка автомагистрали (км); L_0 – протяженность очереди автомобилей перед запрещающим сигналом светофора и длина соответствующей зоны перекрестка (км).

Расчет приземных концентраций, формирующихся в результате рассеяния выбросов от автомобильного транспорта, осуществлялся для модельного района Очаково-Матвеевское. Полученные значения выбросов загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух от автотранспорта, экспортировались в унифицированную программу расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА «Эколог» версия 3.0) для дальнейшего расчета приземных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере в соответствии с [Методика..., 1986]. Расчеты концентраций выполнялись для CO, NO_x (в пересчете на диоксид азота), углеводородов, сажи, SO₂ и формальдегида. Затем был рассчитан индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) как сумма отношений концентраций загрязнителей в воздухе к их ПДК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Объем выбросов от автотранспорта Москвы за период с 2012 по 2018 г. увеличился на 10 тыс. т, или 1%, однако в 2015–2016 гг. временный рост выбросов составил 66 тыс. т, что по масштабам сопоставимо с выбросами всех стационарных источников города, что возможно в результате активной интеграции Новой Москвы. В Новой Москве объем выбросов от автотранспорта составляет 6% от всего выброса города. Этот объем быстро увеличивается, темпы роста выбросов от автотранспорта самые высокие в городе.

После изменения методики в 2019–2023 гг. выброс плавно снижался с 334 до 318,6 тыс. т. Эти же изменения послужили источником различий в динамике выбросов отдельных веществ, структура которых мало меняется за рассматриваемый период. Эмиссия CO увеличилась в 2016–2017 гг. почти до 800 тыс. т, или на 7%. CO всегда доминировал в структуре выбросов от транспорта: в 2012 г. показатель составлял 80,8% (77% от объема выбросов в среднем в стране), в 2018 г. он снизился до 75,3%. В 2019–2022 гг. пробеговый выброс CO снижался только для экологического класса Евро-4 и для автомобилей с дизельным двигателем, поэтому изменение связано со структурой автомобильного парка. По новой методике именно CO дал максимальное снижение выбросов в 3 раза: с 750 до 240 тыс. т. Как следствие и вклад в суммарную эмиссию снизился почти на 10% по сравнению с началом периода. Эмиссия летучих органических соединений составляла 92 тыс. т в 2016–2017 гг. (10%). После 2019 г. объем снизился в 3 раза до 27–28 тыс. т, а доля снизилась до 8,5%, и ЛОС опустились на третье место. Объем выбросов NO_x сокращался меньшими темпами, до 43–45 тыс. т, в результате его вклад увеличился на 6–7%.

Из-за разных темпов сокращения выбросов отдельных загрязняющих веществ структура эмиссии принципиально не изменилась, CO сохранил доминирующее положение, несмотря на сокращение вклада, диоксид азота увеличил вклад и занял второе место, ЛОС, напротив, опустились на третье место. В сумме доля этих трех веществ немного снизилась: с 98,8 до 97,2–97,4%. Эмиссия NH₃ даже выросла в два раза: от 1,8–1,9 тыс. т по старой методике до 4,4 тыс. т по новой, в результате того, что по новой методике сократился пробеговый выброс только для топливного стандарта Евро-3, но доля его увеличилась более чем в 3 раза. Объем выбросов SO₂ сократился в 2 раза, что стало следствием положительных изменений в структуре парка и улучшении качества топлива, сажи – практически не изменился, как следствие ее доля увеличилась в

2 раза. Выбросы метана сократились более чем в 7 раз, а доля снизилась до 0,2%. Все три компонента в сумме сейчас дают менее 3%.

Динамика выбросов от автотранспорта и его территориальных пропорций 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, планировочная структура и 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.

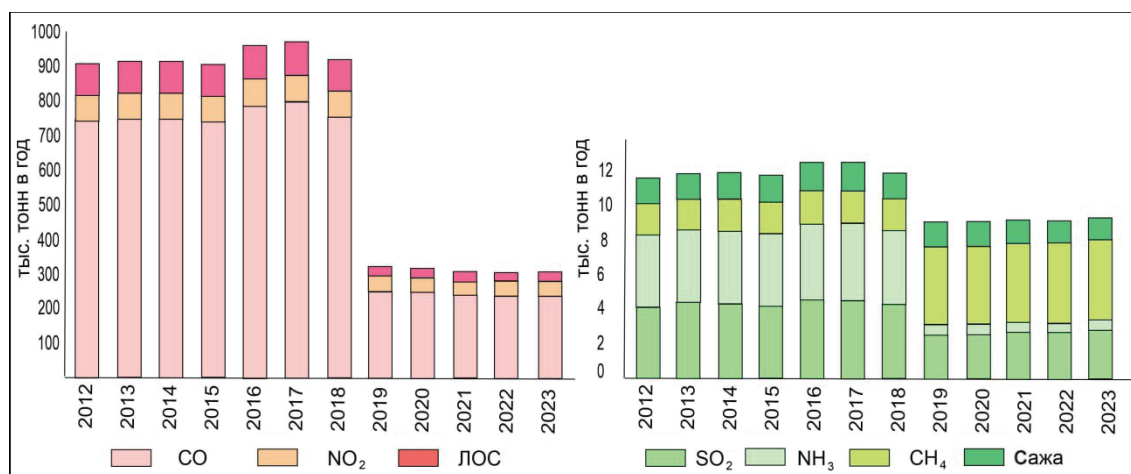


Рис. 1. Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от автомобильного транспорта, 2012–2023 гг.

Источник: по данным Росприроднадзора

Fig. 1. Volume of air pollutant emissions from motor transport, 2012–2023. Source: according to Rosprirodnadzor

Факторы загрязнения от автотранспорта в городах. Среди факторов загрязнения ведущим является *рост автомобилизации* в постсоветский период. Столица находится на третьем месте после Приморья и Сахалина по автомобилизации, в ней сосредоточено 10% автопарка России (около 4,6 млн ед., вместе с Московской областью – свыше 7 млн машин). По состоянию на начало 2023 г. автомобильный парк Москвы насчитывает 4607,5 тыс. ед., из которых 89,8% – легковые автомашины, 9,2% – грузовые, 1,0% – автобусы (www.fedstat.ru). Уровень автомобилизации определяет изменение объема выбросов только до 2009 г., поскольку влияют еще и другие факторы (качества двигателя, топлива, характера движения, числа автомобилей) (рис. 2).

До конца 1980-х гг. объем выбросов в атмосферу рос приблизительно теми же темпами, что и уровень автомобилизации. В 1990–1996 гг. уровень автомобилизации в начале менялся мало, а объем выбросов вырос на 12%, тем не менее коэффициент корреляции между ними статистически значимый (0,61), в том числе и потому, что доля грузового транспорта в структуре потока максимальная за весь период и превышает 20%. В период экономического роста и роста доходов населения (1997–2008) увеличилось

число новых автомобилей, начаты строительство дорог и реконструкция транспортной сети.

В период с 2009 по 2018 г. валовый выброс от автомобилей сократился почти на 400 тыс. т (с 1342 до 934 тыс. т). Улучшение качества бензина и структуры автопарка привели к сокращению удельного выброса (г/маш · км) в 4 раза. В структуре парка автомобилей Евро-1 и ниже уже составляют меньшую часть (38%), Евро-2 и Евро-3 – 43%, Евро-4 и выше – 19%, а коэффициент корреляции впервые стал отрицательным. В 2019–2022 гг. рост автопарка фактически прекратился и объем выбросов также стабилизировался.

Изменение в структуре автопарка способствовало тому, что объем выбросов либо сокращался, либо рос медленнее, чем количество транспортных средств: рост более высоких экологических классов двигателя происходил со скоростью 2–3% в год, а доля грузовых автомобилей в 1991–2006 гг. сократилась в 2 раза. С 2013 г. был введен запрет на использование автомобилей стандарта ниже Евро-4, а с января 2016 г. – ниже Евро-5. Эффект при переходе с моторного топлива 3-го класса на 4-й – уменьшение выбросов диоксида серы на 79%, бенз(а)пирена – на 22,7%, твердых веществ – на 13,5%, оксидов азота и оксида углерода – по 4% (рис. 3).

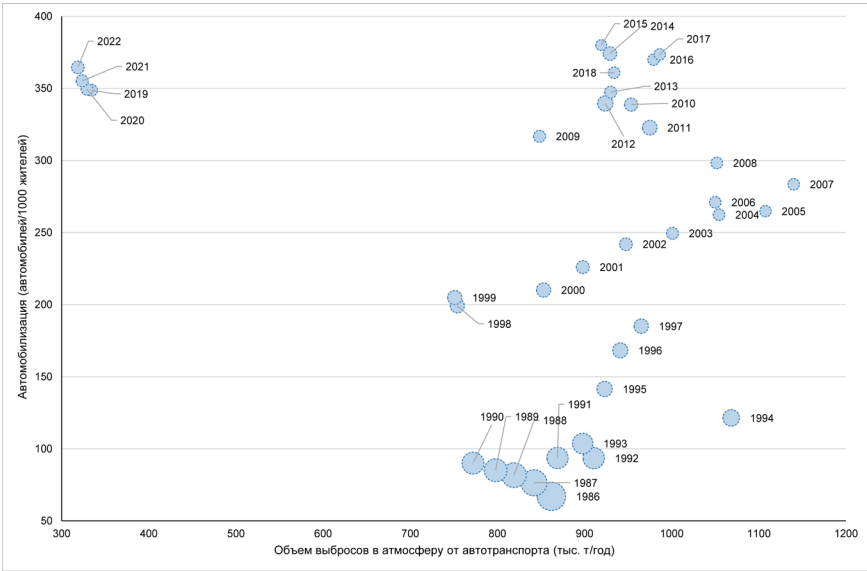


Рис. 2. Зависимость объема выбросов в атмосферу автомобильного транспорта от уровня автомобилизации населения Москвы, 1979–2022 гг. (размер значка пропорционален доле грузового транспорта в структуре потока)

Fig. 2. Dependence of the volume of emissions into the atmosphere of motor transport on the level of motorization of the population of Moscow and 1979–2022 (the size of the icon is proportional to the share of freight transport in the flow structure)

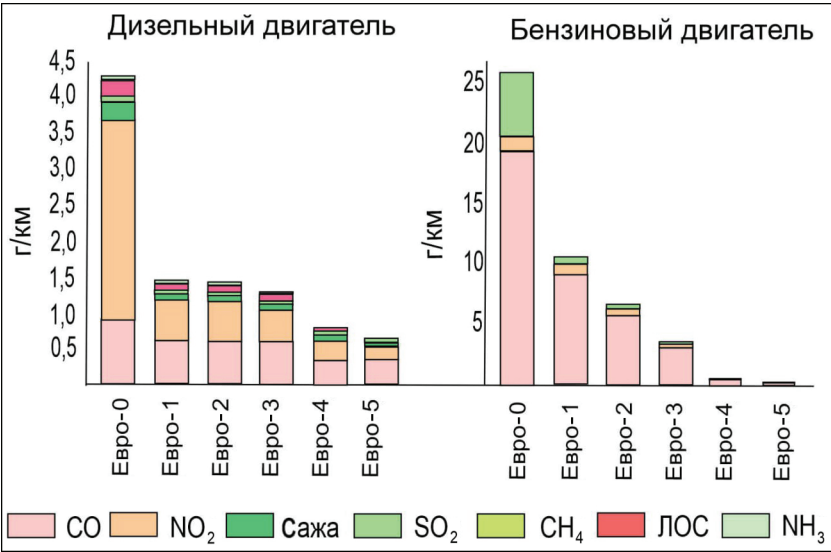


Рис. 3. Удельный выброс загрязняющих веществ (г/км пробега) при разных топливных стандартах.
Источник: [Приказ Минприроды..., 2019]

Fig. 3. Specific emission of pollutants (g/km) of mileage at different fuel standards.
Source: [Order of the Ministry of Natural Resources..., 2019]

Новое жилищное строительство является важным фактором не только роста автомобилизации (поскольку нередко новые районы не в полной мере обеспечены общественным транспортом), но и перераспределения транспортных потоков. При нынешней планировочной структуре и пропускной способности дорог дополнительно увеличивается нагрузка на МКАД и основные радиальные

магистралей. За 2012–2022 гг. в Москве в границах 2012 г. было сдано 29 млн м² жилья¹, подавляющее большинство которого располагается в тех районах города, где плотность населения и застройки была несколько ниже, чем в зоне между ТТК и МКАД.

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

Локализация крупных комплексов стимулирует к использованию радиальных автомагистралей города, которые по нашим расчетам также характеризуются довольно равномерным распространением плотностей выбросов от передвижных источников.

Но 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. Поэтому наиболее прогрессивное *развитие общественного транспорта* произошло в центре Москвы в совокупности с рядом мер экономического и запретительного характера, позволивших в последние годы значительно разгрузить центр города. В результате создания новых линий подземного транспорта (МЦК, новые линии метро) в некоторых районах центра объем выбросов от автотранспорта снизился на 10–20%.

Плотность улично-дорожной сети (УДС) – один из самых противоречивых факторов, так как строительство дорог создает новые ареалы загрязнения, но одновременно автомобили с двигателями внутреннего сгорания при снижении скорости движения ниже оптимальной (50–60 км/ч) в заторах до начала существенных изменений в структуре автопарка выбрасывали на 30% больше загрязняющих веществ, чем при установившемся режиме движения. Поэтому долгое время считалось, что загрязнение уменьшается по мере развития дорожной сети [Битюкова и др., 2011].

По опыту Москвы стало ясно, что значение имеет не только строительство новых дорог, но и планировочные особенности, увеличение связности дорожной сети. Поэтому на современном этапе очень важно учесть влияние изменения этой крайне инерционной структуры, которая формируется в течение длительного времени и является продуктом эволюционного развития города и ранее принятых планировочных решений [Блинкин, 2015].

В Москве около 7 тыс. км дорог (по данным Федерального дорожного агентства). Плотность УДС в Москве имеет ярко выраженный центр-периферийный характер. В центральных районах города она составляет от 8 до 24 км/км². Долгое время, когда велось строительство и реконструкция кольцевых магистралей, это лишь консервировало радиально-кольцевую структуру, которую предлагалось «сломать» еще в 1970-х гг. путем создание «вакуум-эффекта» для центра города с помощью «хордового треугольника» [Якшин, 1975]. Фактически современное строительство хорд – реализация данной стратегии.

Отличительная особенность последнего десятилетия – интенсивная реконструкция городской транспортной сети. Увеличение плотности УДС в 2011–2018 гг. происходило именно в тех районах, где она была несколько ниже уровня среднего по городу. Наибольшие темпы роста УДС были характерны для районов, вытянутых вдоль крупнейших транспортных магистралей города, особенно в местах их пересечения с МКАД и другими хордовыми магистралями, где строились новые связывающие транспортную сеть дороги и развязки. Результатом планирования и развития дорог в проблемных зонах центра (юго-западном секторе среднего пояса (между Садовым и Третьим транспортным кольцом), а также в северной части районов, прилегающих к МКАД) стала более равномерная плотность дорожной сети. Снижение объемов выбросов наблюдалось именно в этих районах, где увеличилась плотность дорог, либо в районах центра за счет ограничения въезда [Bityukova, Mozgunov, 2019].

В 2019–2023 гг. темпы роста длины УДС немного замедлились, изменилась их территориальная структура: если в 2012–2018 гг. основной прирост был характерен для части районов центра, срединного пояса и некоторых развязок на вылетных магистралях, то в 2019–2022 гг. основной прирост сместился в зону Новой Москвы и отдельных районов у МКАД. Прирост составил 347 км, или 26% к уровню 2019 г. Однако в период с 2019 по 2022 г. изменилась не только стратегия строительства сети, но и главное – *степень влияния характера движения на объем выбросов в атмосферу*. Современные автомобили оснащены системой «старт-стоп» («Start-stop» system), т. е. технологией, предназначенной для автоматического отключения и перезапуска двигателя при временной остановке (например, на светофоре) с целью экономии топлива, снижения выбросов загрязняющих веществ и уровня шума за счет сокращения времени работы двигателя на холостом ходу, в том числе и в заторах. Расчеты показывают, что при росте интенсивности движения на новых магистралях эффект увеличения загрязнения на низких скоростях 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/ч, т. е. средней скорости движения в заторах, удельный выброс возрастает приблизительно в 1,5 раза, а затем вновь снижается). Поэтому по сравнению с предыдущим периодом в районах строительства дорог наблюдается наибольший прирост выбросов (рис. 4).

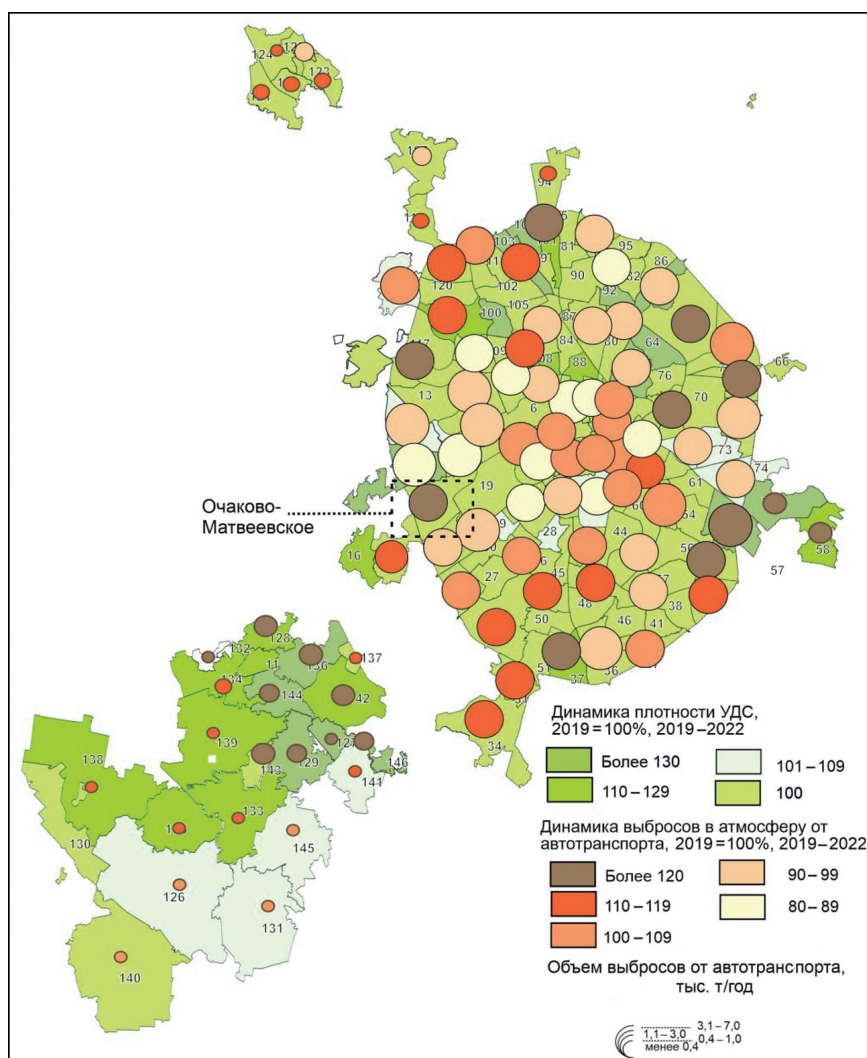


Рис. 4. Изменение плотности улично-дорожной сети по муниципалитетам Москвы, 2019–2022.

Источник: данные Росстата, Росприроднадзора; расчеты авторов

Fig. 4. Change in the density of the street and road network by municipalities in 2019–2022.

Source: data from Rosstat, Rosprirodnadzor; authors' calculations

Одним из ярких примеров изменения плотности УДС и как следствие интенсивности движения автотранспорта является трансформация транспортной системы в районе Очаково-Матвеевское. Всего в районе и на примыкающих к нему территориях расположены участки строительства Северо-Западной хорды (СЗХ) (Мичуринский проспект – Можайское шоссе, Аминьевское шоссе – ул. Генерала Дорохова – МКАД). Кроме участка радиальной магистрали на эстакаде (более 6 км), хордовых дорог вблизи МКАД (37%), значительная часть нового строительства приходится на развязки на МКАД (13%), крупнейшую радиальную магистраль параллельно Кутузовскому проспекту (19%) и хордовую Минскую улицу (4,8%).

Изменение улично-дорожной сети привело к перераспределению нагрузки автотранспортом на территорию района. Наиболее нагруженные участ-

ки, согласно данным на 2014 г., увеличили свою пропускную способность, при этом количество заторов уменьшилось, а скорость прохождения трассы увеличилась к 2019 г. 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. Однако, уже к 2024 г. новые магистрали, реконструированные участки магистралей, параллельные платные дороги характеризовались наибольшим приростом трафика – в 1,5–2 раза (рис. 5).

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 транспортного потока (суммарно интенсивность движения по рассматриваемым улицам увеличилась на 44% по сравнению с 2019 г. и почти в 2 раза по сравнению с 2014 г.). В результате эффект сокращения выбросов в районе за 2012–2018 гг. составил 460 т в год (3%) при росте численности населения на 9% и объеме введенного многоэтажного жилья 460,5 тыс. м².

На радиальных дорогах доля грузового транспорта минимальна. Особенностью района Очаково-Матвеевское является наличие крупной промзоны, что обуславливает повышенную долю грузового транспорта прежде всего по хордовым трассам,

а также по новой эстакаде, которая проложена по краю промзоны Очаково. Новые магистрали выделяются самой высокой долей грузовиков (5,1%), поскольку они в значительной степени пользуются развязками на МКАД.

Доля новых магистралей в суммарном объеме выбросов в атмосферу от автотранспорта района немного ниже, чем в трафике, но, вероятно, при таких темпах роста интенсивности движения в ближайшей перспективе можно прогнозировать снижение средней скорости движения, что при высокой доле грузового транспорта будет способствовать опережающему росту загрязнения. В целом объем выбросов во многом пропорционален трафику: доля в выбросах легкового транспорта совпадает с долей в трафике для радиальных магистралей, для грузового транспорта доли совпадают на хордовых улицах (табл. 2).

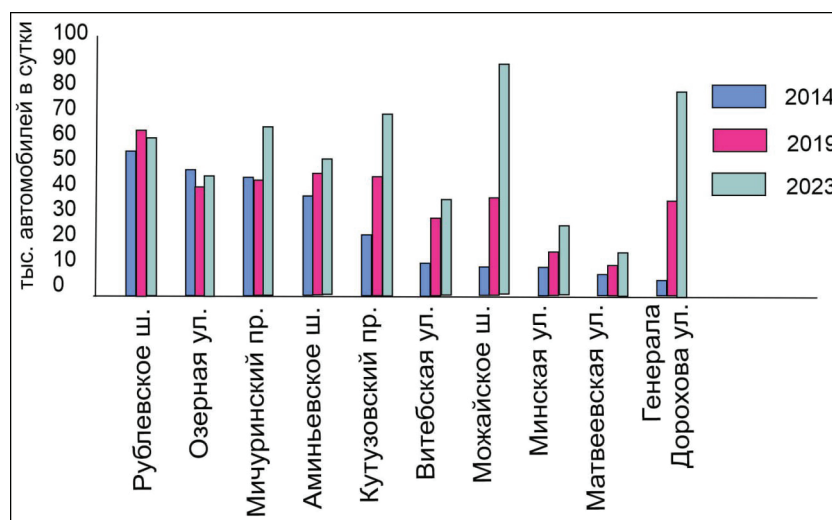


Рис. 5. Изменение среднесуточного количества автомобилей на отдельных участках территории района Очаково-Матвеевское и его окрестностей, 2014–2024 гг. *Источник:* по данным натурных наблюдений

Fig. 5. Change in the average daily number of cars in certain areas of the Ochakovo-Matveevskoye district and its environs, 2014–2024. *Source:* based on field observations

Важнейшим инфраструктурным проектом на данной территории является строительство СЗХ – высокоскоростной бессветофорной магистрали в направлении северо-восток – юго-запад. Это привело к довольно серьезным изменениям дорожной сети за последние пять лет. В итоге было выявлено, что строительство магистралей не снижает уровень загрязнения в результате снижения выброса в «пробках», оно:

- создает новый ареал загрязнения воздуха, но относительно изолировано от жилых районов, поскольку магистрали прокладываются в некотором отдалении и с соответствующей инфраструктурой, создающей дополнительные барьеры. При увеличении скорости движения от 90 до 120 км/ч, что, как

правило, происходит на начальных этапах эксплуатации новых магистралей, когда интенсивность потока снижается, при средней структуре транспортного потока удельный выброс СО возрастает в 1,91 раза, NO_x – в 2,1 раза, углеводородов – на 30%, а взвешенных частиц – на 10%;

- перераспределяет потоки между улицами и магистралями, оптимизируя их, что скорее положительный эффект, т. к. улучшает характер движения, уровень мобильности населения и немного снижает выбросы от грузового транспорта;

- создает зоны «заторов» и ареалы высокой плотности выбросов у съездов и въездов на магистраль, максимально утром в точке выезда на магистраль и в точке съезда с нее, начиная с 18 часов.

Таблица 2

Изменение трафика и объемов выбросов от разных типов дорог района Очаково-Матвеевское в период с марта 2023 по март 2024 г.²

Показатели	Улицы			
	радиальные	хордовые	вновь построенные	всего
Трафик (авт. в сутки)	32 546 00	2 316 200	1 838 100	7 408 900
Средний трафик (авт. в сутки по одной улице)	61 408	41 361	45 953	49 574
Максимальный трафик (авт. в сутки)	314 200	349 400	172 100	349 400
Минимальный трафик (авт. в сутки)	24 000	1400	1900	1400
Автобусы (средний трафик; авт. в сутки по одной улице)	582	454	148	395
Грузовики (средний трафик; авт. в сутки по одной улице)	2457	2259	2413	2376
Доля грузовиков в трафике (%)	44	31	25	100
Доля автобусного трафика (%)	50	41	9,9	100
Доля грузового трафика (%)	37	36	27	100
Доля грузовиков в потоке (%)	4,16	4,9	5,1	4,8
Индекс трафика (%; март 2023 = 100%)	106,6	106	138	108
Скорость потока (км/ч)	32	28	31	30
Объем выбросов легкового транспорта всех улиц (т/год)	7253	5243	3324	15 820
Объем выбросов грузовиков и автобусов всех улиц (т/год)	1097	1142	518	
Доля выбросов легкового транспорта (%)	45,8	33,2	21	100
Доля выбросов грузового транспорта и автобусов (%)	39,8	41,4	19	100

В качестве интегрального показателя загрязнения рассмотренными загрязняющими веществами был построен индекс загрязнения атмосферы (ИЗА). В 2019 г. в пределах исследуемой территории величина ИЗА индекса варьировала от 0,1 до 1,55 при среднем значении 0,54, что соответствует низкой интенсивности воздействия (рис. 6).

На пересечениях крупных магистралей ИЗА увеличивается в 2–2,5 раза. Начиная с 2010 г., величина данного индекса постепенно снижается, и к 2019 г. максимальное его значение составляет лишь 0,03, что свидетельствует о низком загрязнении атмосферы данными источниками. Однако к 2024 г. ИЗА вновь вырос, хотя и меньшими темпами, чем трафик. Рост также связан со строительством СЗХ, где ранее не было ареала, и в районах развязок, где увеличилась доля грузового транспорта. Пространственное распределение индекса наиболее близко к распределению концентраций оксидов азота, так как именно это загрязняющее вещество вносит решающий вклад в его величину.

²Рассчитано по данным Эспар-аналитик, натурным наблюдениям месячного трафика по 162 участкам улиц района Очаково-Матвеевское.

ВЫВОДЫ

Важным следствием постиндустриального развития города стал рост автопарка, увеличение мобильности личного транспорта, реконструкция промзон, формирование новой топологии сети и новой транспортной политики. Полимасштабный анализ тенденций динамики выбросов в атмосферу от автотранспорта Москвы за 2014–2023 гг. показал:

- 1) баланс факторов, определяющих влияние автотранспорта на качество атмосферного воздуха в Москве, существенно изменился за последние годы: в 2000-е гг. на фоне роста автомобилизации происходило сокращение загрязнения за счет улучшения качества автомобильного парка и топлива. В 2010-е гг. размер и структура парка стали консервативными факторами, а увеличение плотности дорожной сети и изменение ее конфигурации – модернизационными;
- 2) население, размер автопарка, параметры планировочной структуры территории, объем жилого фонда – эндогенные характеристики соответ-

ствующих муниципальных районов. При этом выбросы от автотранспорта сегодня намного сильнее связаны с условно экзогенными характеристиками, в первую очередь с транспортно-географическим положением, степенью транзитности того или иного района, пропускной способностью основных пересекающих район магистралей;

3) новое строительство в сочетании с мерами по увеличению связности УДС и развитию системы общественного транспорта дали наибольший эффект в 2014–2019 гг. Исследование в районе Очаково-Матвеевское показало, что эффект развития инфраструктуры временный, поскольку он во многом стимулирует использование личного транспорта, прирост трафика на новых магистралях в 2023–2024 гг. нивелировал положительный эффект от перераспределения потоков и создал новые ареалы загрязнения;

4) основное сокращение выбросов наблюдается в центре и в среднем поясе города, где происходит интенсивное строительство новых дорог и развязок, а также развитие общественного транспорта. Однако одни из самых высоких темпов прироста

УДС наблюдались в зоне пересечения основных вылетных магистралей города с МКАД, и эти меры экологического эффекта пока не дали;

5) территориальная структура загрязнения в городе постепенно выравнивается, что приводит, с одной стороны, к исчезновению локальных максимумов загрязнения в центре города, а с другой – к увеличению загрязнения в спальных районах. Территориальные различия несколько сократились, поскольку выбросы сократились именно в тех районах, где они и были очень высокими. В Новой Москве наблюдается обратная тенденция: очень высокие темпы роста выбросов, нарастающий уровень локализации их в ближнем поясе и в основных районах строительства. В настоящее время практически все ареалы повышенной плотности загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу, располагаются только в пределах воздействия автотранспортных магистралей, наблюдается уменьшение амплитуды колебания плотности выбросов в атмосферу (в 1,5 раза), что позволяет говорить о нивелировании различий в загрязнении атмосферы районов города.

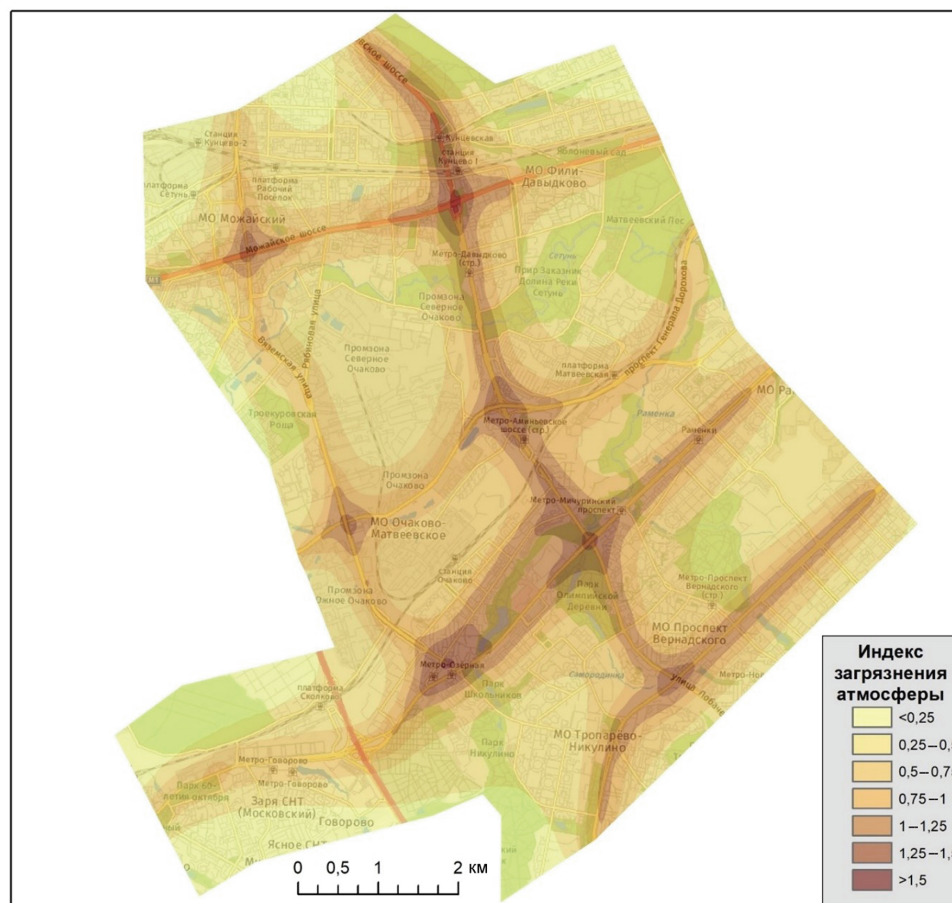


Рис. 6. Индекс загрязнения атмосферного воздуха, рассчитанный по данным за 2023–2024 гг.

Fig. 6. Atmospheric air pollution index calculated from data for 2023–2024

Благодарности. Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Битюкова В.Р., Касимов Н.С., Власов Д.В. Экологический портрет российских городов // *Экология и промышленность России*. 2011. № 4. С. 6–18.
- Блинкин М.Я. Качество планирования городских транспортных сетей в зеркале классических моделей теории транспортного потока // *Городские исследования и практики*. 2015. С. 55–67.
- Власов Д.В., Кукушкина О.В., Кошелева Н.Е. и др. Уровни и факторы накопления металлов и металлоидов в придорожных почвах, дорожной пыли и их фракции РМ₁₀ в Западном округе Москвы // *Почвоведение*. 2022. № 5. С. 538–555. DOI: 10.31857/S0032180X22050112.
- Кошелева Н.Е., Дорохова М.Ф., Кузьминская Н.Ю. и др. Влияние автотранспорта на экологическое состояние почв в западном административном округе Москвы // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2018. № 2. С. 16–27.
- Ревич Б.А. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // *ПЭММЭ*. 2018. Т. XXIX. № 3. С. 53–78.
- Якишин А.М. Перспективы развития сети городских магистралей. М.: Стройиздат, 1975. 110 с.
- Bitiyukova V.R., Mozgunov N.A. Spatial Features Transformation of Emission From Motor Vehicles In Moscow, *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12, no. 4, p. 57–73.
- Bitiyukova V.R., Mozgunov N.A., Gapizhanuly G. Assessing the Impact of Road Construction on the Environment in Moscow: Microgeographical Analysis, *InterCarto. InterGIS*, 2022, vol. 28(1), p. 115–128.
- Borrego C., Tchepel O., Salmim L. et al. Integrated modeling of road traffic emissions: Application to Lisbon air quality management, *Cybernetics and Systems*, 2004, vol. 35, p. 535–548, DOI: 10.1080/0196972049051904.
- 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, vol. 66, p. 624–634, DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.047.
- Chien Y.-C., Hu W.-H. Low-Carbon and Sustainable Urban Bike Lane Labelling System-A Case Study of Taichung, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020 9 p., DOI: 10.1088/1755-1315/581/1/012035.
- Deak G., Raischi N., Matei M. et al. Meteorological parameters and air pollution in urban environments in the context of sustainable development, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, DOI: 10.1088/1755-1315/616/1/012003.
- Gis W., Gis M., Wisniewski P. et al. Initial assessment of the legitimacy of limiting the maximum permissible speed on highways and motorways based on tests in real traffic conditions, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 642, 012016, DOI: 10.1088/1755-1315/642/1/012016.
- Harrison R.M., Allan J., Carruthers D. et al. Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic. A review, *Atmospheric Environment*, 2021, vol. 262, 118592, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118592.
- Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K. et al. Noise and environmental pollution from transport: Decisive problems in developing ecologically efficient transport systems, *Journal of Vibroengineering*, 2017, vol. 19, p. 5639–5655, DOI: 10.21595/jve.2017.19371.
- Janarthanan R., Partheeban P., Somasundaram K. et al. A deep learning approach for prediction of air quality index in a metropolitan city, *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 67, DOI: 10.1016/j.scs.102720.
- Kerimray A., Azbanbayev E., Kenessov B. et al. Spatiotemporal Variations and Contributing Factors of Air Pollutants in Almaty, Kazakhstan, *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, p. 1340–1352, DOI: 10.4209/aaqr.2019.09.0464.
- Mueller N., Rojas-Rueda D., Khreis H. et al. Changing the urban design of cities for health. The superblock model, *Environment International*, 2020, vol. 134, 13 p., DOI: 10.1016/j.envint.2019.105132.
- 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, vol. 15, no. 5, p. 686–697.
- Petrovska N., Stevanovic A. Traffic Congestion Analysis Visualisation Tool, *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC*, 2015, p. 1489–1494, DOI: 10.1109/ITSC.2015.243.
- Phung P.T.K., Thi N.T., Cuc V.T.K. A Study on Urban Traffic Congestion Using Simulation Approach, *Proceedings of the 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development, GTSD*, 2020, p. 555–561, DOI: 10.1109/GTSD50082.2020.9303130.
- Popovicheva O., Diapouli E. et al. Aerosol characterization and peculiarities of source apportionment in Moscow, the largest and northernmost European megacity, *Science of the Total Environment*, 2024, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170315.
- Rafael S., Vicente B., Rodrigues V. et al. Impacts of green infrastructures on aerodynamic flow and air quality in Porto's urban area, *Atmospheric Environment*, 2018, vol. 190, p. 317–330, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.07.044.
- 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, vol. 93, p. 199–208, DOI: 10.1007/978-981-15-6887-9_23.
- Silva C.B.P.D., Saldiva P.H.N., Amato-Lourenço L.F. et al. Evaluation of the air quality benefits of the subway system in São Paulo, Brazil, *Journal of Environmental Management*, 2012, vol. 101, p. 191–196, DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.02.009.
- Wang Q., Sun H. Traffic Structure Optimization in Historic Districts Based on Green Transportation and Sustainable Development Concept, *Advances in Civil Engineering*, 2019, vol. 2, 18 p., DOI: 10.1155/2019/9196263.
- Zhou S., Ng S.T., Yang Y. et al. Integrating computer vision and traffic modeling for near-real-time signal timing optimization of multiple intersections, *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 68, DOI: 10.1016/j.scs.2021.102775.

Электронные ресурсы

База данных показателей муниципальных образований (БДПМО). Федеральная служба государственной ста-

- истики (Росстат). URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 10.09.2023).
- База данных Росприроднадзора (Федеральная служба по надзору в сфере природопользования). URL: [http:// https://fedstat.ru/indicator/42723](http://https://fedstat.ru/indicator/42723) (дата обращения 07.09.2023).
- База данных Федеральной налоговой службы. Отчет о налоговой базе и структуре начислений по транспортному налогу. URL: [https://www.nalog.ru/ related_activities/statistics_and_analytics/forms/](https://www.nalog.ru/related_activities/statistics_and_analytics/forms/) (дата обращения 08.09.2023).
- Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий (ОНД-86). URL: [https:// docs.cntd.ru/document/1200000112](https://docs.cntd.ru/document/1200000112) (дата обращения 08.09.2023).
- Приказ Минприроды России от 27.11.2019 № 804 «Об утверждении методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха» (зарегистрировано в Минюсте России 24.12.2019 № 56957). URL: [http:// publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912260052](http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912260052) (дата обращения 08.09.2023).
- Рекомендации, утвержденные распоряжением Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 1 ноября 2013 г. № 6-р «Об утверждении Порядка организации работ по оценке выбросов от отдельных видов передвижных источников (с изменениями и дополнениями)». URL: <https://base.garant.ru/70573338/> (дата обращения 08.09.2023).

Поступила в редакцию 16.12.2024

После доработки 10.01.2025

Принята к публикации 21.01.2025

CURRENT TRENDS AND FACTORS OF THE DYNAMICS OF POLLUTANT EMISSIONS FROM MOTOR TRANSPORT IN MOSCOW

V.R. Bityukova¹, N.A. Koldobskaya², O.E. Prusikhin³

¹⁻³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia*

² *Shenzhen MSU-BIT University, Faculty of Geography*

¹ *Prof., D.Sc. in Geography; e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru*

² *Associate Prof., Ph.D. in Geography, corresponding author; e-mail: koldobskaya@my.msu.ru*

³ *Post-graduate student; e-mail: olegprus2000@mail.ru*

The article provides a comprehensive analysis of the factors governing the dynamics of motor vehicles emissions into the atmosphere of Moscow during 2014–2023. It has been found that in the 2000s, against the background of increased motorization, pollution was reduced by improving the quality of the vehicle fleet and fuel. In the 2010s, changes in the density and topology of the transport network, and actively developing public transport as a result of the effective urban transport policy, became the main factors governing the dynamics of emissions and their territorial proportions. Before the period under study, the planning structure of the city dictated low network connectivity, excessive mileage and increased pollution in certain areas of the city under the rapidly changing vehicle fleet of the capital. The study showed that in recent years, on the contrary, the number of cars and the structure of the fleet have become a conservative factor, and the city's development strategies have focused on the construction and reconstruction of roads, thus strengthening the network connectivity. The calculation of emissions from individual sections of the road network in the Ochakovo-Matveevskoye municipal area based on data on the intensity and structure of traffic flows for the 2014–2023 period showed that emissions became lower only for light trucks with gasoline and heavy trucks with diesel. The main trend in recent years was an increasing uniformity of pollution from motor vehicles. New housing construction programs and large-scale projects for the transformation of Moscow's districts lead to the increasing connectivity of the city and at the same time the equalizing density of traffic pollution. The balance of these factors changes over time (the inherited factors were the main ones at the beginning of the post-Soviet period, while in recent years the positive transformation factors have become predominant) and in space (industrial zones have been preserved only on the periphery of the city, and railway stations are being moved there; the changing network topology has not only increased connectivity, but also created a vacuum effect in the center).

Keywords: mobile sources of pollution, transport networks, emissions, transport modeling, Ochakovo-Matveevskoye, Moscow

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-77-30004).

REFERENCES

- Bitjukova V.R., Kasimov N.S., Vlasov D.V. *Ekologicheskii portret rossiiskikh gorodov, Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2011, vol. 4, p. 6–18. (In Russian)
- Bitjukova V.R., Mozgunov N.A. Spatial Features Transformation of Emission from Motor Vehicles in Moscow, *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12(4), p. 57–73.
- Bitjukova V.R., Mozgunov N.A., Gapizhanuly G. Assessing the Impact of Road Construction on the Environment in Moscow, *Microgeographical Analysis, InterCarto. InterGIS*, 2022, vol. 28(1), p. 115–128.
- Blinkin M.Ya. The quality of urban transport network planning in the mirror of classical models of traffic flow theory, *Urban research and practice*, 2015, p. 55–67. (In Russian)
- Borrego C., Tchepel O., Salmim L. et al. Integrated modeling of road traffic emissions: Application to Lisbon air quality management, *Cybernetics and Systems*, 2004, vol. 35, p. 535–548, DOI: 10.1080/0196972049051904.
- 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, vol. 66, p. 624–634, DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.047.
- 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.
- Deak G., Raischi N., Matei M. et al. 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, DOI: 10.1088/1755-1315/616/1/012003.
- Gis W., Gis M., Wisniewski P., Taubert S.I. 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.
- Harrison R.M., Allan J., Carruthers D. et al. Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review, *Atmospheric Environment*, 2021, vol. 262, p. 118592 DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118592.
- 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, vol. 19, p. 5639–5655, DOI: 10.21595/jve.2017.19371.
- 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, vol. 67, DOI: 10.1016/j.scs.102720.
- Kerimray A., Azbanbayev E., Kenessov B. et al. Spatiotemporal Variations and Contributing Factors of Air Pollutants in Almaty, Kazakhstan, *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, vol. 20, p. 1340–1352, DOI: 10.4209/aaqr.2019.09.0464.
- Kosheleva N.E., Dorokhova M.F., Kuzminskaya N.Yu. et al. Vliyaniye avtotransporta na ekologicheskoe sostoyaniye pochv v Zapadnom administrativnom okruge Moskvyy [Impact of motor vehicles on the ecological state of soils in the Western district of Moscow], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, vol. 2, p. 16–27. (In Russian)
- Mueller N., Rojas-Rueda D., Khreis H. et al. Changing the urban design of cities for health: The superblock model, *Environment International*, 2020, vol. 134(13), DOI: 10.1016/j.envint.2019.105132.
- 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, vol. 15(5), p. 686–697.
- 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.
- Phung P.T.K., Thi N.T., Cuc V.T.K. A Study on Urban Traffic Congestion Using Simulation Approach, *Proceedings of 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development, GTSD*, 2020, p. 555–561, DOI: 10.1109/GTSD50082.2020.9303130.
- Popovicheva O., Diapouli E., Chichaeva M. et al. Aerosol characterization and peculiarities of source apportionment in Moscow, the largest and northernmost European megacity, *Science of the Total Environment*, 2024, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170315.
- Rafael S., Vicente B., Rodrigues V. et al. Impacts of green infrastructures on aerodynamic flow and air quality in Porto's urban area, *Atmospheric Environment*, 2018, vol. 190, p. 317–330, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.07.044.
- Revich B.A. Melkodispersnye vzveshennyye chastitsy v atmosfere vozdukh i ikh vozdeystvie na zdorov'e zhitel'ey megapolisov, 2018, PEMME, vol. 29(3), p. 53–78. (In Russian)
- Sam R. Assessment and characterization of air pollution due to vehicular emission considering the AQI and loss of various roadways in Kolkata, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, vol. 93, p. 199–208, DOI: 10.1007/978-981-15-6887-9_23.
- Silva C.B.P.D., Saldiva P.H.N., Amato-Lourenço L.F. et al. Evaluation of the air quality benefits of the subway system in São Paulo, Brazil, *Journal of Environmental Management*, 2012, vol. 101, p. 191–196, DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.02.009.
- Vlasov D.V., Kukushkina O.V., Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Levels and factors of the accumulation of metals and metalloids in roadside soils, road dust and their PM₁₀ fraction in the Western okrug of Moscow, *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55. no. 5, p. 556–572.
- Wang Q., Sun H. Traffic Structure Optimization in Historic Districts Based on Green Transportation and Sustainable Development Concept, *Advances in Civil Engineering*, 2019, vol. 18, DOI: 10.1155/2019/9196263.
- Yakshin A.M. *Perspektivy razvitiya seti gorodskikh magistral'ey* [Prospects of evolution of the urban motorway network], Moscow, Stroiizdat Publ., 1975, vol. 110, p. 18. (In Russian)
- Zhou S., Ng S.T., Yang Y. et al. Integrating computer vision and traffic modeling for near-real-time signal timing optimization of multiple intersections, *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 68, DOI: 10.1016/j.scs.2021.102775.

Web sources

- Database of Municipality Indicators Federal State Statistics Service (Rosstat), URL: <http://www.gks.ru> (access date 10.09.2023). (In Russian)
- Federal Tax Service database. Report on the tax base and structure of charges for transport tax, URL: https://www.nalog.ru/related_activities/statistics_and_analytics/forms/ (access date 08.09.2023). (In Russian)
- Metodika rascheta kontsentratsii v atmosfernom vozdukh vrednykh veshchestv, sodержashchikh-sya v vybrosakh promyshlennykh predpriyatii (OND-86) [Methodology for calculating concentrations in atmospheric air of harmful substances contained in emissions from industrial enterprises (OND-86)], URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000112> (access date 08.09.2023). (In Russian)
- Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 27.11.2019 No. 804 "On approval of the methodology for determining emissions of pollutants into the atmospheric air from mobile sources for conducting consolidated calculations of atmospheric air pollution" (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 24.12.2019 No. 56957), URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912260052> (access date 08.09.2023). (In Russian)
- Rekomendatsii, utverzhdenye rasporyazheniem Federal'noi sluzhby po nadzoru v sfere prirodopol'zovaniya ot 1 noyabrya 2013 g. № 6-r "Ob utverzhenii Poryadka organizatsii rabot po otsenke vybrosov ot otdel'nykh vidov peredvizhnykh istochnikov (s izmeneniyami i dopolnениyami)" [Recommendations approved by the order of the Federal Service for Supervision of Natural Resources of November 1, 2013 No. 6-r "On approval of the Procedure for organizing work on assessing emissions from certain types of mobile sources (with amendments and additions)"], URL: <https://base.garant.ru/70573338/> (access date 08.09.2023). (In Russian)
- Rosprirodnadzor database (Federal Service for Supervision of Natural Resources), URL: <http://https://fedstat.ru/indicator/42723> (access date 07.09.2023). (In Russian)

Received 16.12.2024

Revised 10.01.2025

Accepted 21.01.2025