

## ОЦЕНКА ВКЛАДА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ В СУММАРНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Нартов А. С., Кожевникова В. В., Кузнецова В. В., Мельникова А. В.

Государственный университет по землеустройству, г. Москва, Российская Федерация,

e-mail: [nartovalexander@gmail.com](mailto:nartovalexander@gmail.com)

**Аннотация:** В статье рассматривается актуальная экологическая проблема оценки вкладов конкретных подвижных источников выбросов загрязняющих веществ в общее загрязнение атмосферного воздуха городских территорий. Для решения данного вопроса предлагается применять вероятностный подход, основанный на расчёте условной вероятности с использованием формулы Байеса. Приведены результаты использования предложенной методики для оценки вклада транспортных средств различных категорий (L — мотоциклы и мопеды, M1 — легковые автомобили, M2 — автобусы (кроме электробусов) и N — грузовые автомобили) в суммарное загрязнение атмосферного воздуха двух территорий г. Москвы (участок Басманного района и участок района Коньково) и двух городских территорий Московской области (участки г. Балашиха и г. Раменское) тремя токсичными летучими неорганическими оксидами (диоксид азота  $\text{NO}_2$ , диоксид серы  $\text{SO}_2$ , угарный газ  $\text{CO}$ ), а также твёрдыми частицами  $\text{PM}_{2.5}$  и  $\text{PM}_{10}$  в час пик (период с 17 до 18 часов).

**Ключевые слова:** качество атмосферного воздуха, автотранспорт, летучие неорганические оксиды, твёрдые частицы, вероятность, формула Байеса

### Введение

Количество единиц автотранспорта в мире ежегодно растёт. Несмотря на появление автомобилей и автобусов, работающих на электродвигателе, их доля в общем автопарке пока всё ещё незначительна. По данным аналитического агентства «Автостат», на 1 июля 2024 года только легковых автомобилей в Москве было зарегистрировано 4,06 млн, тогда как электробусов примерно 2300, т. е. порядка 0,05 % даже без учёта грузовых автомобилей и автобусов на горючем топливе [Тимерханов, 2024].

При этом автотранспорт, функционирующий на основе углеводородного топлива, остаётся одним из наиболее значимых факторов негативного воздействия на экологическое состояние атмосферного воздуха. Автотранспорт является источником таких токсичных выбросов, как угарный газ (оксид углерода (II)), оксиды азота и серы, тяжёлые металлы (ртуть, медь, никель и др.) [Stojić et al., 2023], полициклические ароматические углеводороды, относящиеся к канцерогенным веществам и стойким органическим загрязнителям [Хаустов, Редина, 2024], включая супертоксикант бенз(а)пирен, относящийся к 1 классу опасности и являющийся токсичным даже при крайне малых концентрациях (в атмосферном воздухе его среднесуточная ПДК<sub>с.с.</sub> составляет  $10^{-6}$  мг/м<sup>3</sup>) [СанПиН 1.2.3685-21], и другие загрязняющие вещества.

Дорожная пыль увеличивает риск онкологических заболеваний у людей, проживающих в городах-миллионниках. В состав дорожной пыли входит большое количество различных компонентов, таких как фрагменты резины от автомобильных шин, дорожного покрытия, мелкий мусор и остатки антигололёдных реагентов, которые становятся ядрами конденсации. На них в свою очередь легко оседают и закрепляются более опасные загрязняющие вещества — тяжёлые металлы и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Среди ПАУ наиболее опасным

считается бенз(а)пирен, поскольку его попадание в организм человека увеличивает риск развития рака. Бенз(а)пирен выделяется в атмосферу при неполном сгорании топлива в автомобильных двигателях. Пыль легко поднимается с поверхности автомобильных дорог и тротуаров в воздух, с которым при дыхании, проглатывании и через контакт с кожей попадает в организм человека и животных [Абдурахманова, 2015; Нартов, 2022].

Во многих странах регулярно проводят исследования по загрязнению автотранспортом городских территорий. Исследования играют важную роль в понимании масштаба, характера проблемы, разработке эффективных решений, обмене опытом и международном сотрудничестве.

Так, в работе специалистов из Норвежского института исследований воздуха и Технического университета Мюнхена рассматриваются экологические последствия роста Варшавы и моделируются последствия развития города для выбросов загрязняющих веществ из-за дорожного движения и уровней загрязнения. Исследование представляет комплексную оценку множества факторов, связанных с городским развитием Варшавы и дорожной сети. Для оценки последствий различных потенциальных вариантов будущего роста Варшавы авторами были разработаны два сценария: продолжающееся разрастание и альтернативный компактный городской дизайн. Эти сценарии оценивались на основе выбросов углекислого газа и оксидов азота путём применения цепочки моделирования к каждому сценарию.

Результаты показывают, что разрастание городов привело к снижению доступности общественного транспорта, социальных услуг и природных территорий. Перераспределение рабочих мест по пригородным районам способствует зависимости от автомобиля и увеличивает расстояние и время в пути до места работы. В случае сценария компактного городского дизайна центральный деловой район обеспечивает незначительное увеличение доли видов транспорта и нагрузки на дорожную сеть. Сужение дороги снижает долю автомобилей в общем транспортном потоке и нагрузку в центральных городских районах, но увеличивает среднее время в пути.

Компактное развитие города снижает выбросы углекислого газа, в то время как разрастание города приводит к его увеличению. Среди проанализированных стратегий вмешательства в дорожную сеть наиболее эффективным оказывается повышение привлекательности общественного транспорта в обоих сценариях развития города [Lopez-Aparicio et al., 2025].

Загрязнение автотранспортом также может нанести удар по экономике страны, так как увеличиваются расходы на здравоохранение, восстановление окружающей среды, снижается производительность труда, наносится ущерб сельскому хозяйству.

Так, согласно исследованию [Li et al., 2024], в Австралии транспортный сектор является основным источником выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ в атмосферу, которые увеличивают риск развития заболеваний у человека. Стоимость статистической жизни рассчитывалась с использованием уточнённого подхода к человеческому капиталу, который учитывал смертность, а также потерю производительности на работе, дома и в обществе. Общее экономическое бремя объединяло расходы на случаи смертности и заболеваемости.

Результаты анализа показали, что в 2018 году, исходя из предположений этого исследования, транспортные выбросы стали причиной преждевременных смертей, случаев госпитализации из-за сердечно-сосудистых заболеваний, приступов астмы и эпизодов хронической обструктивной болезни лёгких, что привело к общему экономическому бремени в размере 910 млн австралийских долларов. К сожалению, в указанной статье не приведена информация о том, какие именно категории транспортных средств вносят наибольший вклад в эмиссию того или иного загрязнителя в атмосферный воздух, хотя такие сведения могли бы в значительной мере способствовать выявлению корреляционных зависимостей между эксплуатационными характеристиками ТС и частотой различных заболеваний.

В Китае Пекин, Шанхай, Сиань и Чэнду входят в число наиболее экономически развитых мегаполисов, значительно загрязнённых твердыми частицами. В исследовании [Mao et al., 2024] предлагается новый метод измерения сезонных концентраций твёрдых частиц  $PM_{2.5}$  с высоким пространственным разрешением и анализируются значения этого показателя в четырёх китайских мегаполисах в течение 2022 года. Метод, предложенный авторами, позволяет оценивать локальные, а не глобальные значения параметров. Предложенная ими модель использовалась для расчёта источников, переноса, химического преобразования и траекторий диффузии загрязняющих воздух веществ. Также была использована потенциальная функция вклада источника загрязнения, которая идентифицировала потенциальные источники твёрдых частиц  $PM_{2.5}$ .

Результаты показали последовательную сезонную закономерность с самыми высокими концентрациями частиц  $PM_{2.5}$  в зимнее время года и с самыми низкими — летом. Сезонные колебания данного показателя являются результатом сложного взаимодействия между метеорологическими условиями и антропогенной деятельностью. Зимой главными влияющими факторами в северных городах являются увеличение вклада ТЭЦ в общую эмиссию частиц и температурные инверсии. Летние месяцы характеризуются повышенным количеством осадков и усилением ветрового режима, что способствует рассеиванию загрязняющих веществ и, следовательно, приводит к снижению концентрации твёрдых частиц в воздухе.

В работе [Golubić, Vogrin, 2013] показано, что загрязнение воздуха в городе Загребе происходит из-за ненадлежащих условий эксплуатации двигателей, относительно низких скоростей автотранспорта (ниже 80 км/ч), большого количества транспортных средств, включая значительную долю легковых автомобилей, высокого процента неисправных транспортных средств, низкого качества топлива. Авторами показано, что наибольшая проблема заключается в загрязнении оксидами азота и углерода, приземным озоном, а содержание в воздухе твёрдых частиц  $PM_{10}$  три года подряд превышало допустимые значения.

В данной статье показано, что актуальной для городских территорий остаётся проблема поиска и внедрения модели организации дорожного движения, которая значительно снизит загрязнение окружающей среды. Исследователи предложили ряд мер по решению данной проблемы: увеличение пропускной способности перекрёстков, изменение инфраструктуры, связанной с парковочными местами, развитие общественного транспорта, внедрение экотестов при технических осмотрах. Стоит подчеркнуть, что авторы отмечают необходимость модернизации систем мониторинга городского воздуха, которые на момент исследования не позволяли достаточно точно измерить эмиссию загрязняющих веществ от автотранспорта.

В более современном исследовании хорватских учёных [Kranjčić et al., 2022] также отмечается значительная эмиссия загрязняющих веществ личными и большегрузными автомобилями. Авторы предлагают снижать количество выбросов и воздействие этих токсикантов на окружающую среду посредством частичного ограничения движения в центральной части города, использование более экологически чистого транспорта, создание «зелёной» инфраструктуры. Результатом внедрения последней из перечисленных мер стало создание цифровой базы данных «Кадастр зелени», разработанной с применением машинного обучения. В итоге была отмечена проблема отсутствия растений, которые могли бы поглощать загрязнители вокруг дорог, и выявлены суточные и сезонные тенденции поглощения деревьями загрязняющих веществ из атмосферы.

Авторы статьи [Pryciński et al., 2024] отмечают, что в 2022 году в Польше количество зарегистрированных автомобилей превысило численность населения страны. В статье основное внимание уделяется вопросу измерения выбросов загрязняющих веществ в воздух легковыми автомобилями, поскольку эта категория автотранспорта составляет самую многочисленную категорию транспортных средств в Польше. Кроме того, в данной статье представлены сравнение

результатов измерений фактических выбросов загрязняющих веществ в воздух для различных типов легковых автомобилей и разработка модели выбросов загрязняющих веществ в воздух в зависимости от скорости и ускорения тестируемого автомобиля.

Было показано, что минимальное количество выбросов угарного газа, углекислого газа наблюдается у гибридных автомобилей, а наиболее высокое — у автомобилей, работающих на дизельном топливе. В то же время выбросы оксидов азота максимальны также у дизельных ТС, а минимальны у автомобилей на бензиновом двигателе. На основе полученных данных авторы разработали модель выбросов загрязняющих воздух веществ и предложили метод, позволяющий определить зависимость количества выбросов отдельных типов загрязняющих веществ в зависимости от изменения ускорения и скорости автомобиля.

Группой китайских исследователей [Guo et al., 2024] была проведена оценка вклада различных транспортных средств в загрязнение атмосферного воздуха в городе Чанчжоу (Китай) с учётом множества факторов, включая тип ТС, пройденное расстояние, виды используемого топлива и др. Авторами также отмечается значительное превышение ТС малой грузоподъёмности в общем потоке (90,8 % легковых автомобилей). Исследователи пришли к выводу, что основные источники эмиссии токсикантов в атмосферу различаются для разных загрязняющих веществ.

Подобные исследования проводятся и российскими учёными. Так, в статье [Каргаполов, Рафаилова, 2019] приведены результаты расчётов загрязнения атмосферного воздуха автотранспортом на участке пересечения МКАД и Каширского шоссе в вечернее время. При этом проводилось измерение интенсивности движения различных категорий ТС, а выбросы загрязняющих веществ (9 показателей) были рассчитаны на основании мощности двигателя (объёма цилиндров), характеристик автомобиля, особенностей используемого топлива с учётом режима работы двигателя и его экологической характеристики, соответствующей классу Евро. Авторы статьи отмечают превышение ПДК по угарному газу, диоксиду серы и азота, а также по некоторым другим показателям, обусловленное напряжённым трафиком и значительным количеством легковых автомобилей, а также грузовых автомобилей, не соответствующих высоким стандартам Евро. Отметим, что в данной работе не проводился анализ по соотношению степени эмиссии загрязняющих веществ автотранспортом различных категорий.

В работе [Горшкова, Макарова, 2014] определялась интенсивность потока ТС различных категорий на крупных автомагистралях Центрального района Санкт-Петербурга и были рассчитаны массы углеводородов, оксидов азота, серы и углерода в отработанных газах. Показано, что основными источниками этих токсикантов является легковой автотранспорт, а выбросы сажи прежде всего связаны с эксплуатацией автобусов и, в несколько меньшей степени, грузовых автомобилей. Однако основной акцент в указанной статье сделан на определение концентраций и рассеивание загрязняющих веществ от автотранспортных средств, нежели на установление их источников с детализацией по категориям ТС.

В работе [Огорелкина, Аксёнов, 2023] проведены расчёты удельных пробеговых выбросов ряда загрязняющих веществ от различных категорий автотранспорта на примере города Ярославля. Авторами также отмечается значительный вклад легковых автомобилей в выбросы угарного газа. Но ни в этой, ни в других упомянутых выше статьях, как российских, так и зарубежных, не приводится оценка относительного содержания загрязняющих веществ в выхлопах автотранспорта той или иной категории.

Заметим, что СанПиН 1.2.3685-21 устанавливает предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений для более 700 соединений [СанПиН 1.2.3685-21]. Однако практически все вышеперечисленные токсиканты присутствуют также в выбросах стационарных источников загрязнения, таких как промышленные предприятия, мусоросжигательные заводы, теплоэлектроцентрали и т.п.

Определение происхождения загрязняющих веществ, обнаруженных в атмосферном воздухе при проведении экологического мониторинга, позволяет приблизиться к решению сразу двух задач:

- лучше понять особенности миграции загрязняющих веществ в атмосфере;
- более эффективно осуществлять экологический надзор и контроль.

Однозначно установить происхождение того или иного загрязняющего вещества зачастую оказывается весьма затруднительно, особенно, если речь идёт о промышленных зонах или урбанизированных территориях, которые пересекаются крупными магистралями с интенсивным автомобильным движением. В атмосферном воздухе таких территорий смешиваются загрязнения из различных многочисленных источников, как стационарных, так и подвижных; на миграцию загрязнителей в окружающей среде влияет множество антропогенных и природных факторов, включая общее количество транспортных средств (ТС), их возраст, изношенность, ширину и протяжённость дорог, качество используемого топлива, частоту и длительность образования заторов в часы пик, климатические и физико-географические показатели атмосферы [Дементьев и др., 2020; Каргаполов, Рафаилова, 2019].

Тем не менее возможно осуществить оценку вероятности происхождения того или иного токсиканта из конкретного источника выбросов, что также можно интерпретировать как оценку вклада определённого источника загрязнения атмосферного воздуха в суммарную концентрацию загрязняющего вещества, измеренную в процессе экологического мониторинга.

## Материал и методы

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны два района г. Москвы (Басманный и Коньково) и центральные участки двух городов Московской области (Балашиха и Раменское). Выбор обусловлен тем, что данные территории пересекают крупные автомагистрали с интенсивным движением, но в то же время каждый из этих районов имеет свои географические, инфраструктурные и прочие особенности, что позволяет сравнить полученные результаты между собой и сделать предположения о причинах выявленных различий. Географическое положение исследованных районов показано на рисунке 1, а характеристики районов, использованные для расчётов, — в таблице 1 [Подрубный, Широкова, 2022; Регионы России ... , 2024; Алексеев, Хорев, 2004; Характеристика Басманного района].

Город Раменское расположен в юго-восточной части Московской области, примерно в 40 км от Москвы. Город Балашиха расположен в восточной части Московской области, примерно в 25 км от Москвы. Оба города находятся в центре Восточно-Европейской равнины, на Мещерской низменности с преимущественно равнинным рельефом. Климат умеренно-континентальный, с выраженной сезонностью и достаточным увлажнением. Территории городов являются водосборным бассейном Москвы-реки. В Раменском функционирует ОАО «Раменский приборостроительный завод», занимающийся выпуском навигационных приборов для авиации. В Балашихе более развитый НПК, крупнейшим предприятием является ОАО «Балашихинский литейно-механический завод», специализирующийся на выпуске авиационных колёс и агрегатов управления тормозными системами для самолетов [Экологический атлас ... , 2013; Подрубный, Широкова, 2022; Регионы России ... , 2024].

Район Коньково расположен в юго-западной части Москвы и входит в состав Юго-Западного административного округа столицы. Территория района находится в центральной части Тепло-станской возвышенности и представлена равнинным рельефом с незначительными колебаниями высот. Климат района умеренно-континентальный, с холодной зимой, относительно тёплым летом и умеренным уровнем осадков. Гидрографическая сеть района включает малые водоёмы

(Коньковские пруды), а также подземные и поверхностные водотоки, функционирующие в рамках городской инфраструктуры. Промышленные предприятия на территории района отсутствуют [Алексеев, Хорев, 2004].

Басманный район расположен в северо-восточной части центра Москвы и входит в состав Центрального административного округа. Климат района умеренно-континентальный, аналогичен климату Москвы в целом. Гидрографическая сеть представлена двумя открытыми водными объектами: Чистыми прудами, рекой Яузой и её притоками, а также подземными реками. Басманный район отличается высоким уровнем городской застройки [Характеристика Басманного района].



Рис. 1. Географическое положение исследованных районов Москвы и Московской области

Таблица 1

Площади исследованных районов и характеристики проходящих по ним автодорог, использованные для расчётов

| Характеристика                                                 | Басманный район | Коньково | г. Балашиха | г. Раменское |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|----------|-------------|--------------|
| Общая площадь исследованной территории, км <sup>2</sup>        | 8,37            | 7,18     | 81,30       | 29,73        |
| Площадь автодорог на исследованной территории, км <sup>2</sup> | 0,0511          | 0,0832   | 0,5287      | 0,0926       |
| Протяжённость исследованных автодорог, км                      | 2,39            | 5,70     | 9,63        | 5,03         |

Измерения проводились в ноябре — декабре 2024 года, еженедельно, каждый четверг (8 измерений каждого из пяти показателей в каждом районе), в период с 17 до 18 часов, поскольку этот промежуток времени является частью пикового временного интервала, в течение которого наблюдается не только увеличение интенсивности транспортного потока, но и образование заторов. Для расчётов вероятностей использовались усреднённые значения. Данные обрабатывались с помощью онлайн-сервиса Allcalc [[Среднее квадратичное отклонение](#)] и с применением инструментов Excel.

Образование автомобильных пробок приводит к увеличению эмиссии основных компонентов выхлопных газов, что значительно влияет на среднегодовую эмиссию этих токсикантов. При этом максимальный скачок концентраций загрязняющих веществ ожидаемо наблюдается в центральных городских районах [[Дементьев и др., 2020](#)].

Данные о среднесуточных концентрациях диоксида азота и диоксида серы (ppb) были взяты с сайта Мосэкомониторинга [[Карта качества воздуха](#)]. В качестве погрешности измерений были приняты величины среднеквадратичного отклонения, рассчитанного на основании 8 значений, зафиксированных в течение указанного выше периода.

Данные о концентрации остальных трёх загрязнителей получены в ходе собственных измерений с использованием двух портативных анализаторов качества воздуха (газоанализатор «ОС-905» для измерения концентрации угарного газа (ppb) и счётчик частиц «НТ-9600» для измерения концентрации твёрдых частиц  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  (мкг/м<sup>3</sup>), погрешности измерений составили 3 и 20 % в соответствии с паспортами данных средств измерения). Информация о содержании вышеуказанных токсикантов фиксировалась в режиме реального времени на дисплее соответствующего средства измерения (прямые измерения согласно ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [[Об обеспечении ... , 2008](#)]). Затем производился пересчёт концентраций в кг/км<sup>3</sup> для приведения всех единиц измерения к единому виду.

Параллельно с каждым измерением содержания загрязняющих веществ проводилась оценка интенсивности потока транспортных средств с разделением на три категории: М1 — легковые автомобили, М2 — автобусы (автобусы на электродвигателе не учитывались) и N — грузовые автомобили. Подсчёты проводились посредством визуального наблюдения и регистрации в соответствии с п. 4.2 ГОСТ 32965-2014, за исключением длительности регистрации, которая была сокращена до 1 ч [[ГОСТ 32965-2014](#)].

Результаты расчётов по транспортным средствам категории L (мотоциклы и мопеды) не учитывались, поскольку доля мототранспорта в общем потоке на всех четырёх территориях не превышала 0,1 %, а с учётом заметно меньшей мощности двигателей, по сравнению с двигателями ТС других категорий, вероятность обнаружить загрязняющее вещество, поступившее в атмосферу от мототранспорта, по нашим оценкам, составляла порядка  $10^{-8}$ .

Таким образом, можно выделить следующие ограничения проведённых исследований:

1) физико-географические — измерения проводились в районах г. Москвы и Московской области, то есть на территориях с весьма близкими физико-географическими характеристиками, включая климат, который является одним из наиболее важных факторов трансформации и миграции загрязняющих веществ в атмосфере. На территориях с иными климатическими условиями поведение частиц загрязняющих веществ в атмосферном воздухе может быть иным, что будет влиять на соотношение их концентраций [[Guo et al., 2024](#)];

2) инфраструктурные — исследованные территории достаточно заметно различаются по составу инфраструктуры (Центральный и Юго-Западный районы г. Москвы и два города Московской области), но, разумеется, не исчерпывают всех возможных вариантов взаимного расположения автодорог, застройки, коммуникаций и т. д. При этом перечисленные факторы могут оказывать существенное влияние на процессы переноса вещества в атмосфере, что достаточно

подробно рассмотрено в работе [Литвинова, Азаров, 2021]. Данные о пространственном распределении автотранспортных выбросов, представленные в указанной статье, частично учитывались нами при проведении расчётов;

3) временные — сбор данных осуществлялся на протяжении двух месяцев в осенне-зимний период, по одному часу в неделю. Однако интенсивность потоков автотранспорта заметно меняется в течение суток и различается в разные сезоны года [Дементьев и др., 2020; Каргаполов, Рафаилова, 2019; Шепелев и др., 2022], из чего следует, что вклад автотранспорта в суммарное загрязнение атмосферного воздуха также не будет постоянным;

4) ограничения по объектам исследования — для апробации предлагаемой методики нами были выбраны пять загрязняющих веществ из множества токсикантов, вырабатываемых автомобильными двигателями, и три наиболее распространённые категории ТС. В ходе исследований не учитывалось влияние на качество атмосферного воздуха электротранспорта и стационарных источников загрязнения;

5) метрологические — точность проведённых исследований ограничена метрологическими возможностями методик и приборов, использованных при проведении работы. Результаты измерения концентраций загрязняющих веществ и оценки интенсивности потока автомобилей (таблица 2) представлены с учётом погрешности измерений или среднеквадратичного отклонения (СКО) для 8 параллельных измерений.

Для оценки вклада потенциального источника загрязнения  $U$  в суммарную концентрацию загрязняющего вещества  $T$  предлагается использовать одну из классических формул расчёта условной вероятности — теорему Байеса, которая в общем виде выражается нижеприведённой формулой:

$$P_A(B) = \frac{P(B) \cdot P_B(A)}{P(A)}, \quad (1)$$

где  $P_A(B)$  — апостериорная (условная) вероятность события  $B$  (вероятность того, что событие  $B$  произошло по причине  $A$ );  $P_B(A)$  — апостериорная (условная) вероятность события  $A$  (вероятность того, что событие  $A$  является следствием события  $B$ );  $P(B)$  — априорная (безусловная) вероятность события  $B$ ;  $P(A)$  — априорная (безусловная) вероятность события  $A$  [Пытьев, Шишмарёв, 2023].

С целью решения поставленной задачи компонентам формулы (1) были приписаны следующие смысловые значения:

1) апостериорная (условная) вероятность  $P_A(B) \rightarrow P_T(U)$  — вероятность того, что загрязнение атмосферного воздуха токсическим веществом  $T$  обусловлено воздействием конкретного источника  $U$  (определённого вида автотранспорта);

2) апостериорная (условная) вероятность  $P_B(A) \rightarrow P_U(T)$  — вероятность того, что в выбросах источника  $U$  будет обнаружено вещество  $T$ . Согласно геометрической интерпретации вероятности, данную величину можно понимать как вероятность обнаружения частицы загрязнителя  $T$ , имеющего происхождение из источника выбросов  $U$ , в исследуемом объёме атмосферного воздуха. Очевидно, что чем больше таких частиц будет находиться в рассматриваемом объёме, то есть чем выше будет их концентрация, тем пропорционально выше будет значение  $P_U(T)$ . Поэтому в формуле Байеса второй множитель в числителе можно заменить значением концентрации  $C_U$  загрязняющего вещества  $T$ , которое ожидается обнаружить в анализируемом объёме воздуха из-за воздействия источника  $U$ . Для расчёта этой величины были использованы данные

о выбросах исследованных загрязнителей различными видами автотранспорта на единицу пройденного пути. Исходя из этих данных, величина  $P_U(T) = C_U$  рассчитывалась по формуле (2):

$$P_U(T) = C_U = \frac{w \cdot l}{V}, \quad (2)$$

где  $w$  — выработка загрязняющего вещества данным видом автотранспорта, кг/км;  
 $l$  — протяжённость исследуемой трассы, проходящей по территории с площадью  $S$ , км;  
 $V$  — исследованный объём атмосферы, км<sup>3</sup>.

Объём  $V$  рассчитывался через площадь исследованной территории  $S$  и с учётом того, что основная масса загрязняющих веществ от автотранспорта накапливается на высоте до 30 метров (0,03 км) [Литвинова, Азаров, 2021];

3) априорная (безусловная) вероятность  $P(A) \rightarrow P(T)$  — вероятность обнаружить загрязняющее вещество  $T$  в случайной точке исследуемого объёма атмосферного воздуха. Численно соответствует измеренной концентрации  $C_T$  данного загрязнителя в атмосферном воздухе без учёта его происхождения из определённого источника выбросов (рассуждения аналогичны выводам, приведённым в п. 2);

4) априорная (безусловная) вероятность  $P(B) \rightarrow P(U)$  — вероятность обнаружить данный источник загрязнения (автотранспорт определённой категории) на исследуемой территории. Эта величина рассчитывалась как произведение доли транспортных средств определённой категории в общем потоке на долю площади автодорог от общей площади исследованной территории:

$$P(U) = \frac{n_U}{n} \cdot \frac{S_U}{S}, \quad (3)$$

где  $n$  — общий поток транспортных средств на данной территории, авт/ч;  $n_U$  — поток транспортных средств определённой категории, авт/ч;  $S$  — общая площадь исследованной территории, км<sup>2</sup>;  $S_U$  — площадь автодорог на данной территории, км<sup>2</sup>.

Таким образом, с учётом вышеуказанных преобразований итоговая формула, использованная для расчёта вкладов транспортных средств различных категорий в суммарное загрязнение атмосферного воздуха, выглядит следующим образом:

$$P_T(U) = \frac{n_U}{n} \cdot \frac{S_U}{S} \cdot \frac{w \cdot l}{V} \cdot \frac{1}{C_T}, \quad (4)$$

где  $n$  — общий поток транспортных средств на данной территории, авт/ч;  $n_U$  — поток транспортных средств определённой категории, авт/ч;  $S$  — общая площадь исследованной территории, км<sup>2</sup>;  $S_U$  — площадь автодорог на данной территории, км<sup>2</sup>;  $w$  — выработка загрязняющего вещества данным видом автотранспорта, кг/км;  $l$  — протяжённость исследуемой трассы, км;  $V$  — исследованный объём атмосферы, км<sup>3</sup>;  $C_T$  — концентрация загрязняющего вещества  $T$ , зарегистрированная на данной территории, кг/км<sup>3</sup>.

## Результаты и обсуждение

Использованные для расчётов данные по среднему потоку автотранспорта в исследованных районах и по уровням загрязнения атмосферного воздуха, полученные на основе 8 параллельных еженедельных измерений с учётом погрешности измерения (в соответствии с паспортами на средства измерения для угарного газа и твёрдых частиц и среднеквадратичного отклонения для других показателей), приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений потока автотранспорта и уровня загрязнения воздуха в исследованных районах за ноябрь — декабрь 2024 г.

| Показатель                                                          | Басманный район | Коньково      | г. Балашиха  | г. Раменское  |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|
| <i>Средний поток транспортных средств, авт/ч</i>                    |                 |               |              |               |
| Легковые автомобили                                                 | 5600,0 ± 100,6  | 3295,0 ± 27,1 | 948,0 ± 19,7 | 1476,0 ± 30,6 |
| Автобусы                                                            | 20,6 ± 1,0      | 23,4 ± 1,2    | 116,6 ± 5,5  | 45,4 ± 2,1    |
| Грузовые автомобили                                                 | 214,6 ± 12,3    | 147,4 ± 6,4   | 22,6 ± 1,0   | 38,6 ± 3,5    |
| <i>Средние концентрации загрязняющих веществ, кг/км<sup>3</sup></i> |                 |               |              |               |
| Диоксид азота                                                       | 47,2 ± 9,0      | 41,1 ± 11,9   | 39,6 ± 8,6   | 13,3 ± 4,9    |
| Диоксид серы                                                        | 60,0 ± 9,1      | 11,4 ± 4,3    | 20,0 ± 5,1   | 8,6 ± 2,2     |
| Угарный газ                                                         | 243,8 ± 7,3     | 262,9 ± 7,9   | 307,9 ± 9,2  | 230,0 ± 6,9   |
| Твёрдые частицы PM <sub>2,5</sub>                                   | 23,7 ± 4,7      | 18,0 ± 3,6    | 16,0 ± 3,2   | 12,3 ± 2,5    |
| Твёрдые частицы PM <sub>10</sub>                                    | 28,7 ± 5,7      | 25,0 ± 5,0    | 18,0 ± 3,6   | 17,7 ± 3,5    |

Сведения об удельной выработке загрязняющих веществ транспортными средствами различных категорий были взяты из предшествующих научных публикаций, связанных с автотранспортом [Огорелкина, Аксёнов, 2023; Пепина, Созонтова, 2017; Шепелев и др., 2022].

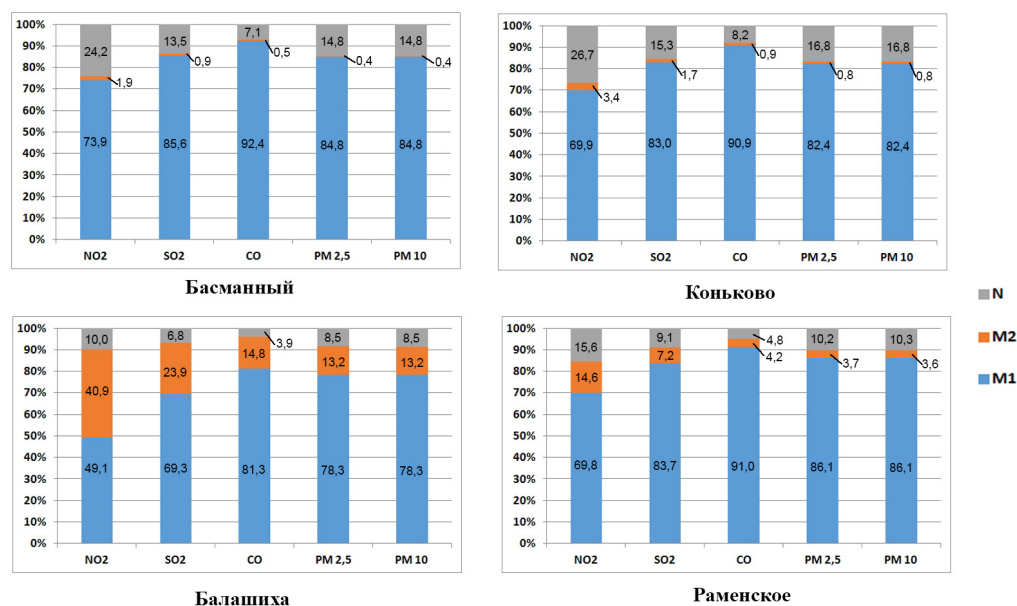
Поскольку вероятности  $P_T(U)$ , рассчитанные по формуле (4), для всех упомянутых загрязняющих веществ по каждой из трёх категорий транспортных средств не превысили 0,004, для наглядности полученные результаты были переведены в проценты, соответствующие:

- вкладу каждой категории ТС в поступление того или иного токсиканта в атмосферу на определённой территории (рисунок 2);
- доле каждого из пяти загрязняющих веществ в выбросах определённой категории ТС на данной территории (рисунок 3).

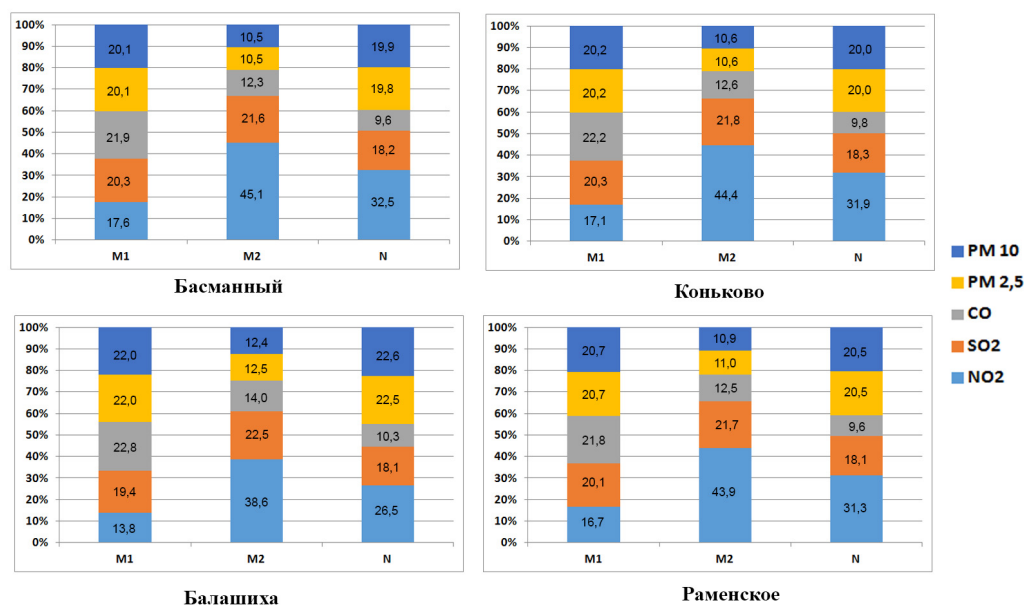
Ниже приведён анализ полученных данных и их сравнение с результатами подобных исследований российских и зарубежных учёных (таблица 3 и рисунок 4). Для проведения сравнительного анализа использовались усреднённые данные по четырём исследованным районам.

Из диаграмм, приведённых на рисунке 2, видно, что основной вклад в загрязнение атмосферного воздуха городских территорий по всем пяти показателям вносят легковые автомобили. Очевидно, это связано с тем, что их доля в общем потоке значительно превышает доли транспортных средств других категорий, достигая 95 % на трёх исследованных территориях (кроме г. Балашихи, где доля легковых автомобилей снижается до 87 % за счёт увеличения доли автобусов (см. табл. 2)).

Вклад грузовых автомобилей заметно меньше, но всё же остаётся существенным. Это объясняется тем, что их двигатели вырабатывают в несколько раз большее количество загрязняющих веществ, чем двигатели легковых автомобилей при перемещении на одинаковое расстояние. Весьма близкие соотношения вкладов ТС различных категорий в общее загрязнение атмосферного воздуха приведены в работе исследователей Андижанского машиностроительного института (Республика Узбекистан) [Каримходжаев, Нумонов, 2020], что видно из таблицы 3 и рисунка 4 (очень сильная корреляционная зависимость для суммы выбросов, коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9972$ ).



**Рис. 2.** Относительный вклад транспортных средств разных категорий в загрязнение атмосферного воздуха отдельных районов г. Москвы и городов Московской области (по данным за ноябрь — декабрь 2024 г.)



**Рис. 3.** Относительный вклад загрязняющих веществ в выбросах транспортных средств разных категорий (по данным за ноябрь — декабрь 2024 г.)

Вклад автобусов (категория M2, без учёта автобусов с электродвигателями) в загрязнение атмосферы г. Москвы не превышает 1 % (кроме диоксида азота в Басманном районе и диоксида серы в Конькове), но заметно возрастает на городских территориях Московской области. Вероятно, это связано с тем, что на территории Москвы для общественных перевозок используется преимущественно электротранспорт, принимающий на себя основную нагрузку пассажиропотока, как железнодорожный (метрополитен, наземные поезда московских центральных диметров (МЦД) и др.), так и электробусы, более активное внедрение которых наблюдается в столице, нежели в городах Московской области.

Таблица 3

Сравнение полученных результатов с результатами исследований российских и зарубежных учёных

| Сравниваемый показатель                                                      |                                   | Нартов,<br>Кожевникова,<br>Кузнецова,<br>Мельникова* | Горшкова,<br>Макарова,<br>2014 | Каримходжаев,<br>Нумонов,<br>2020 | Guo et al.,<br>2024 |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Вклад легковых автомобилей в эмиссию ЗВ                                      | угарный газ                       | 88,7                                                 | 80,0                           | –                                 | 74,3                |
|                                                                              | оксиды азота                      | 65,7                                                 | 73,1                           | –                                 | 11,1                |
|                                                                              | твёрдые частицы PM <sub>2,5</sub> | 82,9                                                 | –                              | –                                 | 29,4                |
|                                                                              | сумма ЗВ                          | 80,2                                                 | 76,5                           | 83,0                              | 38,3                |
| Вклад грузовых автомобилей в эмиссию ЗВ                                      | угарный газ                       | 6,0                                                  | 11,0                           | –                                 | 17,7                |
|                                                                              | оксиды азота                      | 19,1                                                 | 8,9                            | –                                 | 66,2                |
|                                                                              | твёрдые частицы PM <sub>2,5</sub> | 12,6                                                 | –                              | –                                 | 45,0                |
|                                                                              | сумма ЗВ                          | 12,3                                                 | 10,0                           | 12,0                              | 43,0                |
| Вклад автобусов в эмиссию ЗВ                                                 | угарный газ                       | 5,3                                                  | 9,0                            | –                                 | 5,1                 |
|                                                                              | оксиды азота                      | 15,2                                                 | 18,0                           | –                                 | 22,1                |
|                                                                              | твёрдые частицы PM <sub>2,5</sub> | 4,5                                                  | –                              | –                                 | 24,1                |
|                                                                              | сумма ЗВ                          | 7,5                                                  | 13,5                           | 2,2                               | 17,1                |
| Доля СО в выхлопах (дизельные двигатели / бензиновые двигатели)              |                                   | 0,51                                                 | –                              | 0,10 – 0,50                       | –                   |
| Доля NO <sub>x</sub> в выхлопах (дизельные двигатели / бензиновые двигатели) |                                   | 2,26                                                 | –                              | –                                 | –                   |
| PM <sub>2,5</sub> /PM <sub>10</sub>                                          |                                   | 1,0                                                  | –                              | –                                 | ≈ 1,0               |

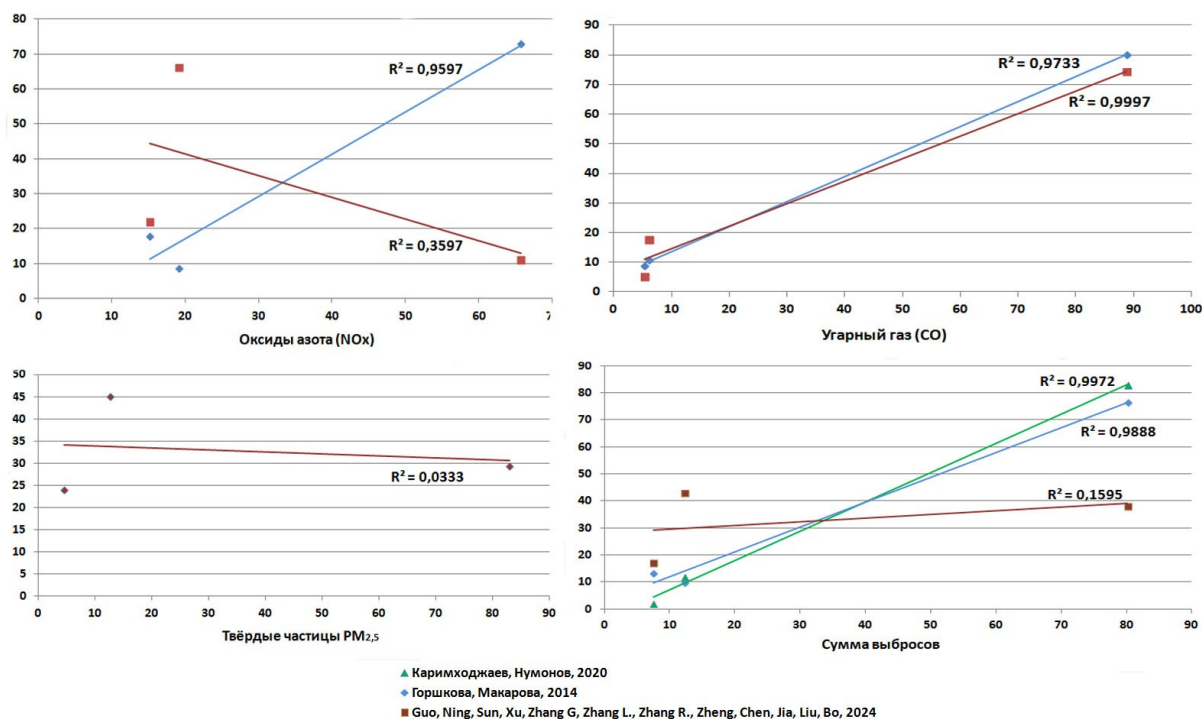
\* неопубликованные данные

Из диаграмм, показанных на рисунке 3, следует, что легковые автомобили вносят примерно равные вклады в эмиссию каждого из пяти проанализированных загрязнителей (иногда с небольшим перевесом в сторону угарного газа). Вероятность обнаружить в атмосферном воздухе угарный газ, выброшенный грузовыми автомобилями, заметно меньше, а вероятность выброса диоксида азота, образовавшегося в результате эксплуатации грузовых автомобилей, во всех случаях выше, чем вероятность обнаружить этот газ, выработанный легковыми автомобилями.

Скорее всего, это связано с особенностями химического состава дизельного топлива, которое чаще всего используется для работы двигателей грузовых автомобилей, а также с теми процессами, которые происходят при его сжигании. Есть сведения, что увеличение содержания полиароматических углеводородов в автотранспортных выбросах влечёт повышение в них концентрации оксидов азота, что более характерно для двигателей, работающих на дизельном топливе [Каримходжаев, Нумонов, 2020; Nelson, Tibbett, Day, 2008].

Кроме того, в транспортных средствах, использующих дизельное топливо, устанавливаются каталитические нейтрализаторы с сажевым фильтром, а в автомобилях с бензиновыми двигателями — керамические или металлические катализаторы. Благодаря действию последних преобразование углеводородов до оксидов углерода, а восстановление оксидов азота до молекулярного азота у легковых автомобилей происходит более эффективно, что также объясняет наблюдающуюся на диаграммах разницу в вероятностном распределении загрязняющих веществ в выхлопных газах транспортных средств различных категорий [Яшник, 2022].

На группе диаграмм, представленных на рисунке 3, отчётливо видно, что доля диоксида азота в выхлопных газах автобусов значительно превышает долю этого токсиканта в выбросах транспортных средств двух других категорий, достигая 45 % от общей суммы вероятностей выбросов автобусов из пяти представленных на диаграмме загрязнителей. Можно предположить, что такая тенденция связана с частым торможением автобусов на остановках, в результате чего и повышается выработка двигателями диоксида азота [Пепина, Созонтова, 2017].



**Рис. 4.** Корреляции между полученными результатами и результатами исследований российских и зарубежных учёных

На обеих группах диаграмм видно, что доля твёрдых частиц  $PM_{10}$  во всех случаях практически равна доле более крупных твёрдых частиц  $PM_{2,5}$ . В соответствии с данными [Guo et al., 2021] можно предположить, что наблюдаемые закономерности связаны с тем, что в районах, где проводились измерения, регистрируются твёрдые частицы, попадающие в атмосферный воздух с выхлопными газами, а не благодаря таким процессам, как износ шин, тормозной системы, дорожного полотна и т. п., поскольку в остальных перечисленных случаях выработка двигателями  $PM_{10}$  в несколько раз выше выработки  $PM_{2,5}$ .

Приведённые результаты, как правило, хорошо согласуются с выводами, к которым пришли авторы предшествующих исследований [Горшкова, Макарова, 2014; Гуртяк, 2016; Каргаполов, Рафаилова, 2019]. Например, все перечисленные авторы отмечают ключевой вклад легковых автомобилей в эмиссию угарного газа, в некоторых из перечисленных работ отмечается больший вклад грузовых ТС в эмиссию оксидов азота по сравнению с выбросами угарного газа и т. д.

Отдельно отметим, что сравнение полученных нами результатов показало отсутствие значимых корреляций с данными по вкладу различных категорий автотранспорта в эмиссию оксидов азота, твёрдых частиц и суммарных выбросов, представленными в работе [Guo et al., 2024]. Но рассчитанные нами значения эмиссии оксида углерода хорошо согласуются с аналогичными данными в вышеуказанном исследовании (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9997$ , см. рис. 4).

В указанной работе китайских учёных отмечается значительно больший вклад грузовых автомобилей в эмиссию твёрдых частиц и оксидов азота. На наш взгляд, обнаруженные расхождения могут быть связаны с тем, что в этой статье приведены значения, усреднённые по годовому периоду, в то время как наши измерения проводились в осенне-зимний период. Также, вероятно, оказывают влияние различные климатические условия, различия в инфраструктуре, учёт разных влияющих факторов и др. В случае с оксидами азота немаловажен и тот факт, что в исследовании китайских учёных расчёты велись для группы соединений  $NO_x$ , то есть учитывалась суммарная

концентрация оксидов азота, а в нашем случае фиксировалась концентрация только одного вещества из этой группы — диоксида азота. Наконец, отметим, что в приведённых выводах сравниваются результаты расчётов не одноимённых величин, а массовые доли загрязнителей в общем количестве автомобильных выбросов [Guo et al., 2024] и отношения вероятностей того, что транспортное средство определённой категории будет являться источником выбросов того или иного загрязнителя (в нашей работе).

### Выводы

Загрязнение атмосферного воздуха городских территорий и последующая миграция и трансформация токсикантов является крайне сложным процессом, зависящим от множества природных и антропогенных факторов. Достоверное установление источников выбросов загрязняющих веществ и определение их вклада в суммарное загрязнение атмосферы на данный момент представляется практически неосуществимой задачей.

Однако проведённые исследования показали, что применение модифицированной формулы Байеса, одной из основных формул (теорем) теории вероятности, для оценки вклада различных категорий транспортных средств в суммарное загрязнение воздуха урбанизированных территорий позволяет продвинуться в решении обозначенной проблемы. Предложенная нами формула даёт важные, непротиворечивые и практически значимые результаты. По многим показателям они согласуются с данными предыдущих исследований по данной теме, как российских, так и зарубежных авторов, и являются логически обоснованными. Частичные расхождения результатов с данными предшествующих исследований объясняются рядом факторов, среди которых можно отметить разные временные промежутки, в течение которых проводились исследования, различные климатические, инфраструктурные и иные условия проведения измерений, учёт разных влияющих факторов, погрешности и неопределённости измерений параметров, использованных для расчётов, и другие ограничения исследования, указанные в разделе «Материалы и методы».

Наибольший вклад в суммарное загрязнение атмосферного воздуха по пяти проанализированным показателям вносит легковой автотранспорт, что связано с большой численностью транспортных средств этой категории на городских автодорогах.

Вклад автобусов в загрязнение атмосферы наиболее выражен в городах Московской области, нежели в самой Москве. Это обусловлено более интенсивным использованием электротранспорта в Москве, чем в городах Подмосковья.

Доля угарного газа, по нашим оценкам, больше в выхлопах легковых автомобилей, а доля диоксида азота — в выбросах грузовых автомобилей и автобусов. Причинами такого распределения может быть использование разных каталитических нейтрализаторов в бензиновых и дизельных двигателях. Кроме того, значительная часть диоксида азота вырабатывается автобусами при частых остановках, что также наблюдается на диаграммах, построенных по результатам наших исследований.

Твёрдые частицы  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  во всех проанализированных случаях вносят примерно равные вклады в суммарное загрязнение, что косвенно указывает на их происхождение непосредственно из выхлопных газов.

В дальнейшем планируется осуществить ряд новых измерений с целью более детальной статистической обработки данных. Это позволит определить границы применимости теоремы Байеса для оценки вклада различных источников в суммарное загрязнение атмосферного воздуха, усовершенствовать предложенный способ, в том числе путём включения в расчёты дополнительных параметров. При подтверждении достоверности данных, получаемых с помощью

модифицированной формулы Байеса (например, путём сравнения результатов оценки с аналогичными результатами, полученными независимым методом), разработанный способ может быть использован в качестве вспомогательного инструмента для управления потоками автотранспорта, особенно на городских территориях с интенсивным автомобильным движением.

Кроме того, при достаточной достоверности данных предлагаемый способ может служить источником информации для расчёта эколого-экономических, гигиенических и других смежных показателей.

### Список литературы

1. Абдурахманова Э. Г. Влияние выхлопных газов на организм человека // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – № 1-1. – С. 53–57. – <https://elibrary.ru/vlcdrp>
2. Алексеев П. Д., Хорев Д. Ю. Коньково. История и современность. Природные условия // Москва. Юго-Запад. Тёплый стан : [сайт]. – 2004. – URL: [https://testan.narod.ru/knigi\\_moskow/konkov/0201.htm](https://testan.narod.ru/knigi_moskow/konkov/0201.htm) (дата обращения: 01.02.2025).
3. Горикова И. А., Макарова О. Ю. Анализ загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспортных средств в условиях сложившейся градостроительной ситуации в центральной части Санкт-Петербурга // Наукоедение : интернет-журн. – 2014. – № 4. – Ст. 08TVN414. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN414.pdf>
4. ГОСТ 32965-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учёта интенсивности движения транспортного потока : введен впервые : дата введения 2016-09-08 // Кодекс : электрон. фонд правовых и нормат.-техн. документов : [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200132267> (дата обращения: 01.02.2025).
5. Гуртяк М. А. Анализ загрязнения атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 9-1. – С. 32–35. – <https://elibrary.ru/wmjryz>
6. Дементьев А. А., Цурган А. М., Чудинин Н. В., Соловьёв Д. А. Оценка динамики загрязнения атмосферного воздуха городского центра выбросами автомобильного транспорта картографическим методом // Системы контроля окружающей среды. – 2020. – № 3. – С. 81–89. – <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-3-81-89>
7. Каргаполов Н. В., Рафаилова А. Л. Оценка загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом в московском регионе // International Journal of Professional Science. – 2019. – № 10. – С. 52–65. – <https://elibrary.ru/obtguj>
8. Каримходжаев Н., Нумонов М. З. Сравнительный анализ токсичности выхлопных газов автомобилей и пути ее снижения // Universum: технические науки : электрон. науч. журн. – 2020. – № 11. – С. 12–18. – <https://doi.org/10.32743/UniTech.2020.80.11-2.12-18>
9. Карта качества воздуха // Мос-экомониторинг : [сайт]. – URL: <https://mosecom.mos.ru/karta/> (дата обращения: 26.12.2024).
10. Литвинова Н. А., Азаров В. Н. О закономерностях вертикального распределения концентраций загрязнителей в атмосферном воздухе от автотранспорта жилых зон территорий города // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2021. – № 4. – С. 113–129. – <https://doi.org/10.21869/2311-1518-2021-36-4-113-129>
11. Нартов А. С. Геоэкологическая оценка состояния промышленно-урбанизированных территорий на основе индикативного метода определения воздействия ПАУ (на примере предприятий Москвы и Московской области) : дис. ... канд. геогр. наук : 1.6.21 (25.00.36). – Москва, 2022. – 160 с.

12. Об обеспечении единства измерений : Федер. Закон № 102-ФЗ от 26.06.2008 // Законодательство Российской Федерации : [сайт]. – URL: <https://fzrf.su/zakon/ob-obespechenii-edinstva-izmerenij-102-fz/> (дата обращения: 01.02.2025).
13. Огорелкина А. Ф., Аксёнов В. А. Исследования загрязнения воздуха автотранспортом в городе Ярославле // Проблемы безопасности российского общества. – 2023. – № 2. – С. 35–42. – <https://elibrary.ru/ucbkni>
14. Пепина Л. А., Созонтова А. Н. Загрязнение атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом // Alfabuild. – 2017. – № 1. – С. 99–110. – <https://elibrary.ru/parvkf>
15. Подрубный Д. Г., Широкова В. А. Геоэкологические особенности зелёной инфраструктуры (на примере городского округа Балашиха Московской области) // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2022. – № 6. – С. 569–572. – [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_65\\_6\\_569](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_569)
16. Пытьев Ю. П., Шишмарёв И. А. Теория вероятностей, математическая статистика и элементы теории возможностей для физиков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Изд-во МГУ, 2023. – 410 с.
17. Регионы России. Основные социально-экономические показатели городов / Федер. служба гос. статистики. – Офиц. изд. – Москва : Росстат, 2024. – 436 с.
18. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. 28.01.2021 (с изм. от 30.12.2022) // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (дата обращения: 23.01.2025).
19. Среднее квадратичное отклонение // Allcalc : онлайн-калькулятор. – URL: <https://allcalc.ru/node/1011> (дата обращения: 23.01.2025).
20. Тимерханов А. В. В Москве зарегистрировано более 4 млн легковых автомобилей // АВТОСТАТ. Аналитическое агентство : [сайт]. – 12 авг. 2024. – URL: <https://www.autostat.ru/news/58263/> (дата обращения: 29.11.2024).
21. Характеристика Басманного района // Портал правительства Москвы. Управа Басманного района города Москвы : [сайт]. – URL: [https://basman.mos.ru/basmannyy\\_rayon/index.php](https://basman.mos.ru/basmannyy_rayon/index.php) (дата обращения: 15.02.2025).
22. Хаустов А. П., Редина М. М. Оценка вклада дорожно-транспортной системы в загрязнение окружающей атмосферы твёрдыми частицами // Транспортное строительство. – 2024. – № 1. – С. 29–32. – <https://elibrary.ru/zoknif>
23. Шепелев В. Д., Слободин И. С., Бауэр А. А., Смирнов К. И. Модель оценки количества и концентрации мелкодисперсионных выбросов вредных веществ от автотранспорта на основе нейросетевых алгоритмов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 186–196. – <https://elibrary.ru/xjktgh>
24. Экологический атлас Раменского муниципального района / Администрация Рамен. муницип. р-на. – Раменское : Рамен. регион. экол. центр, 2013. – 72 с.
25. Яшник С. А. Каталитические системы нейтрализации выбросов автомобилей с дизельным двигателем: современные задачи и технологические решения по улучшению окислительного катализатора // Катализ в промышленности. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 25–41. – <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2022-2-25-41>
26. Golubić J., Vogrin Z. Analysis of harmful emissions generated by road traffic in the city of Zagreb and proposals of measures // Transport Problems. – 2013. – Vol. 8, iss. 2. – P. 73–82. – <https://elibrary.ru/tpkpa2d>

27. Guo M., Ning M., Sun S., Xu C., Zhang G., Zhang L., Zhang R., Zheng J., Chen C., Jia Z., Liu Y., Bo Y. Estimation and analysis of air pollutant emissions from on-road vehicles in Changzhou, China // *Atmosphere*. – 2024. – Vol. 15, iss. 2. – Art. 192. – <https://doi.org/10.3390/atmos15020192>
28. Guo D., Wei H., Guo Y., Wang C., Yin Z. Non-exhaust particulate matter emission from vehicles : a review // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 268. – Art. 01015. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126801015>
29. Kranjčić N., Dogančić D., Durin B., Siročić A. P. Analyzing air pollutant reduction possibilities in the city of Zagreb // *International Journal of Geo-Information*. – 2022. – Vol. 11, iss. 4. – Art. 259. – <https://doi.org/10.3390/ijgi11040259>
30. Li J., Wang C., Abdoli S., Yuen A. C. Y., Kook S., Yeoh G. H., Chan Q. N. Economic burden of transport related pollution in Australia // *Journal of Transport & Health*. – 2024. – Vol. 34. – Art. 101747. – <https://doi.org/10.1016/j.jth.2023.101747>
31. Lopez-Aparicio S., Grythe H., Drabicki A., Chwastek K., Toboła K., Górski-Niemas L., Kierpiec U., Markelj M., Strużewska J., Kud B., Santos G. S. Environmental sustainability of urban expansion: Implications for transport emissions, air pollution, and city growth // *Environment International*. – 2025. – Vol. 196. – Art. 109310. – <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109310>
32. Mao K., Yao Y., Wang K., Liu C., Tang G., Feng S., Shen Y., Ju A., Zhou H., Li Z. Analysis of PM<sub>2.5</sub> pollution transport characteristics and potential sources in four Chinese megacities during 2022: seasonal variations // *Atmosphere*. – 2024. – Vol. 15, iss. 12. – Art. 1482. – <https://doi.org/10.3390/atmos15121482>
33. Nelson P. F., Tibbett A. R., Day S. J. Effects of vehicle type and fuel quality on real world toxic emissions from diesel vehicles // *Atmospheric Environment*. – 2008. – Vol. 42, iss. 21. – P. 5291–5303. – <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.049>
34. Pryciński P., Pielecha P., Korzeb J., Pielecha J., Kostrzewski M., Eliwa A. Air pollutant emissions of passenger cars in Poland in terms of their environmental impact and type of energy consumption // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, iss. 21. – Art. 5357. – <https://doi.org/10.3390/en17215357>
35. Stojić N., Štrbac S., Čurčić L., Pucarević M., Prokić D., Stepanov J., Stojić G. Exploring the impact of transportation on heavy metal pollution: A comparative study of trains and cars // *Transportation Research. Pt. D: Transport and Environment*. – 2023. – Vol. 125. – Art. 103966. – <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103966>

## ASSESSMENT OF THE CONTRIBUTION OF VARIOUS CATEGORIES OF TRANSPORT VEHICLES TO THE TOTAL POLLUTION OF THE ATMOSPHERE OF URBAN AREAS

Nartov A. S., Kozhevnikova V. V., Kuznecova V. V., Mel'nikova A. V.

*State University of Land Use Planning, Moscow, Russian Federation,*

*e-mail: [nartovalexander@gmail.com](mailto:nartovalexander@gmail.com)*

**Abstract:** The article considers the current environmental problem of assessing the contribution of specific mobile sources of pollutant emissions to the total pollution of the atmospheric air of urban areas. To solve this issue, it is proposed to apply a probabilistic approach based on the calculation of conditional probability using the Bayes formula. The article presents the results of using the proposed methodology to assess the contribution

of vehicles of various categories (L — motorcycles and mopeds, M1 — cars, M2 — buses (except electric buses) and N — trucks) to the total air pollution of two areas of Moscow (a section of the Basmanny district and a section of the Konkovo district) and two urban areas of the Moscow region (areas of the cities of Balashikha and Ramenskoye) with three toxic volatile inorganic oxides (nitrogen dioxide NO<sub>2</sub>, sulfur dioxide SO<sub>2</sub>, carbon monoxide CO), as well as solid particles PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> during rush hour (the period from 5 to 6 p. m.).

**Keywords:** air pollution, motor transport, volatile inorganic oxides, solid particles, probability, Bayes' formula

#### Сведения об авторах

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Нартов<br>Александр<br>Сергеевич     | кандидат географических наук, доцент, ФГБОУВО «Государственный университет по землеустройству», ул. Казакова, 15, г. Москва, 105064, Российская Федерация,<br><a href="mailto:nartovalexander@gmail.com">nartovalexander@gmail.com</a>                                                                          |
| Кожевникова<br>Виктория<br>Вадимовна | студент 4 курса кафедры геоэкологии и природопользования по направлению «экология и природопользование», ФГБОУВО «Государственный университет по землеустройству», ул. Казакова, 15, г. Москва, 105064, Российская Федерация,<br><a href="mailto:kozhevnikova.victo@yandex.ru">kozhevnikova.victo@yandex.ru</a> |
| Кузнецова<br>Вера<br>Валерьевна      | студент 4 курса кафедры геоэкологии и природопользования по направлению «экология и природопользование», ФГБОУВО «Государственный университет по землеустройству», ул. Казакова, 15, г. Москва, 105064, Российская Федерация,<br><a href="mailto:verakurteva@yandex.ru">verakurteva@yandex.ru</a>               |
| Мельникова<br>Анна<br>Викторовна     | студент 4 курса кафедры геоэкологии и природопользования по направлению «экология и природопользование», ФГБОУВО «Государственный университет по землеустройству», ул. Казакова, 15, г. Москва, 105064, Российская Федерация,<br><a href="mailto:raito.zm@yandex.ru">raito.zm@yandex.ru</a>                     |

*Поступила в редакцию 26.12.2024 г.  
Принята к публикации 07.04.2025 г.*