

УДК 656.13+551.588.74
DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96

Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации

Ю.В. Трофименко¹, В.А. Гинзбург², А.Н. Якубович¹,
В.М. Лытов², С.В. Шелмаков¹, М.С. Зеленова²

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
г. Москва, Россия

²Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
г. Москва, Россия

Аннотация: Предложена методика, позволяющая получать непротиворечивые и согласованные оценки объемов выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров от автотранспорта и внедорожных мобильных машин и количественно оценивать их точность и неопределенность. Повышение точности оценок достигается за счет детализации исходных данных, отражающих специфику структуры национального автопарка и показателей транспортной деятельности, для чего используется широкий спектр статистических, вероятностных и экспертных методов. С использованием методики, реализованной в «Транспортной модели», возможно как восстановление временных рядов выбросов за предшествующие периоды с оценкой их точности и неопределенностей, так и выполнение сценарного моделирования в целях прогнозирования объемов выбросов в будущем. На основе методики получены количественные оценки выбросов трех видов парниковых газов и трех газов-прекурсоров от автотранспорта и внедорожных мобильных машин за период с 2010 по 2022 год, выполнено сопоставление результатов с данными Национального кадастра, впервые получены оценки выбросов для четырех категорий внедорожной техники, выполнена оценка потребления топлива и изменения численности автотранспорта всех категорий на период с 1990 по 2022 год. Сформирован информационный массив, содержащий официальные статистические данные о косвенных показателях транспортной деятельности по категориям автотранспортных средств за период с 1990 по 2022 год, с использованием методов множественной регрессии выполнено сопоставление результатов расчетов выбросов с косвенными показателями и количественно оценены точность и неопределенности этих результатов. Расчетные объемы выбросов парниковых газов при этом считались случайными величинами, для каждой из которых определялись доверительный интервал как показатель неопределенностей и медианная поправка как показатель точности. Подтверждено высокое качество результатов расчетов, выполненных на основе рассматриваемой методики.

Ключевые слова: парниковые газы, автотранспорт, прогнозирование выбросов, вероятностно-статистическое моделирование, методика расчета выбросов, показатели транспортной деятельности.

Для цитирования: Трофименко Ю.В. Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации / Ю.В. Трофименко, В.А. Гинзбург, А.Н. Якубович, В.М. Лытов, С.В. Шелмаков, М.С. Зеленова // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 78–96. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96

Improved methodology for the calculated monitoring of greenhouse gas emissions from the activities of road and off-road transport in the Russian Federation

Y.V. Trofimenko¹, V.A. Ginzburg², A.N. Yakubovich¹,
V.M. Lytov², S.V. Shelmakov¹, M.S. Zelenova²

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
Moscow, Russia

²Institute of Global Climate and Ecology Named after Academician Y.A. Israel,
Moscow, Russia

Abstract: A methodology is proposed to obtain consistent and coherent estimates of greenhouse gas and precursor gas emissions from road transport and off-road vehicles and to quantify their accuracy and uncertainty. Accuracy increase of the estimates is achieved by detailing the initial data, reflecting the specific features of the national vehicle fleet structure and transport activity

indicators, for which a wide range of statistical, probabilistic and expert methods are used. Using the methodology implemented in the “Transport Model” software product, it is possible to reconstruct time series of emissions for previous periods with an assessment of their accuracy and uncertainties, as well as to perform scenario modelling in order to forecast future emissions. The methodology was used to obtain quantitative estimates of three types of greenhouse gases emissions and three precursor gases from road transport and off-road vehicles for the period of 2010 to 2022, to compare the results with National Inventory data, to produce emission estimates for four categories of off-road vehicles for the first time, and to estimate fuel consumption and changes in the number of vehicles of all categories for the period of 1990 to 2022. An information array containing official statistical data on indirect indicators of transport activity by vehicle category for the period of 1990 to 2022 was compiled, the results of the emissions calculations were compared with the indirect indicators using multiple regression methods, and the accuracy and uncertainties of these results were quantitatively assessed. The estimated greenhouse gas emissions were considered as random values for which a confidence interval was calculated as an indicator of uncertainty and a median correction as an indicator of accuracy. The high quality of the results of the calculations based on the methodology considered was confirmed.

Key words: greenhouse gases, motor transport, emission forecasting, probabilistic and statistical modeling, emission calculation methodology, transport activity indicators.

For citation: Trofimenko, Y.V., Ginzburg, V.A., Yakubovich, A.N., Lytov, V.M., Shelmakov, S.V., Zelenova, M.S. (2025). Improved methodology for the calculated monitoring of greenhouse gas emissions from the activities of road and off-road transport in the Russian Federation. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 1, pp. 78–96. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96

Введение

Задача достижения углеродной нейтральности, обусловленная необходимостью противодействия глобальным климатическим изменениям, требует наличия достоверных количественных оценок объемов парниковых газов (ПГ), генерируемых во всех сферах жизнедеятельности человеческого общества. Определение объемов эмиссии парниковых газов проводится расчетными методами, которые основаны на данных о показателях деятельности и удельных значениях выбросов. Этому посвящено значительное количество исследований.

Ежегодно данные о выбросах и поглощениях парниковых газов, обусловленных деятельностью человека, в целом для территории России представляются в Национальном докладе о кадастре парниковых газов¹ (далее – Национальный кадастр), который подается в секретариат Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). Существующая проблема учета выбросов ПГ от автомобильного транспорта в Национальном кадастре связана с отсутствием требуемой детализации данных о транспортной деятель-

ности автомобильного парка страны, то есть данных о численности и структуре парка автотранспортных средств (АТС), среднегодовых пробегах автомобилей, об удельных нормах расхода топлива и коэффициентах пробеговых выбросов. Выбросы от внедорожного транспорта в Национальном кадастре не выделяются в отдельную категорию источников в связи с отсутствием необходимых статистических данных о деятельности. Для уточнения расчетов и повышения чувствительности Национального кадастра к мерам по регулированию транспортной деятельности, проводимым в стране, и в отсутствии нужной статистической информации необходима национальная методика подготовки данных о деятельности автомобильного и внедорожного транспорта, позволяющая учитывать особенности российского парка для оценки выбросов парниковых газов.

Задача усовершенствования подходов к оценке выбросов парниковых газов от транспортных средств важна не только на национальном уровне, но и может быть эффективно применима для отчетности транспортных предприятий, для оценки углеродного следа перевозок и для других задач углеродной повестки.

Оценки выбросов парниковых газов по различным методикам в территориальном или отраслевом аспектах показаны, в частности, в [1–4]. Результаты сравнения трех методик расчета выбросов парниковых газов от

¹ НДК. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре выбросов из источников и адсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. М., 2023. Т. 1. 479 с.

парка автотранспортных средств (АТС) приведены в [5], где показано, что выбор способа верификации исходных данных оказывает заметное влияние на количественные оценки выбросов. Влияние структуры парка автотранспортных средств на выбросы парниковых газов рассмотрено в [6], где обоснована необходимость детализации структуры автопарка в рамках государственной статистической отчетности относительно вида используемого топлива и экологического класса. Установлено, что самостоятельно генерируемая структура автопарка приводит к погрешностям расчетных значений выбросов парниковых газов: до 4 % при настройке годовых пробегов АТС и до 30 % без настройки. Методический подход к оценке погрешностей в оценках выбросов ПГ, основанный на рассмотрении выбросов как случайных величин с дальнейшим использованием для их идентификации кривых Пирсона, предложен в [7].

Вследствие часто встречающегося недостатка прямых данных о транспортной работе особый интерес приобретает оценка объемов эмиссии парниковых газов на основе косвенных показателей, в первую очередь макроэкономических. Анализ факторов, определяющих выбросы углекислого газа от автотранспорта в странах Европы, выполнен в [8]; аналогичное исследование [9] посвящено транспортной отрасли в Китае. Математические модели, отражающие взаимосвязь между выбросами углекислого газа и несколькими экономическими и социальными параметрами, предложены в [10, 11]. Расчет объемов выбросов парниковых газов в пределах крупного города с использованием косвенных показателей экономической и транспортной деятельности с различными уровнями детальности выполнен в [12–14], где подтверждена практическая пригодность данного подхода и целесообразность использования геоинформационных технологий, практически реализованных в [15]. Аналогичные методы расчета эмиссии парниковых газов на основе макроэкономических показателей реализованы в [16, 17]. Отдельной перспективной возможностью при оценке выбросов парниковых газов является использование методов искус-

ственного интеллекта, позволяющих в отдельных случаях снижать неопределенности результатов расчета при недостатке исходных данных [18] или фиксировать в реальном времени количественные параметры транспортных потоков, обуславливающие объемы эмиссии выхлопных газов [19].

Прогнозные оценки выбросов парниковых газов на период до 2050 года получены в [20], где показано, что в ближайшей перспективе темпы декарбонизации автомобильного транспорта в России могут существенно замедлиться. Это обусловлено сохраняющимся преобладанием в структуре автопарка автомобилей с двигателями внутреннего сгорания на углеводородном топливе. Анализ влияния ужесточения топливных стандартов на сокращение выбросов парниковых газов, выполненный в [21], также подтвердил, что существенного снижения декарбонизации не ожидается – как в силу проявления сильных обратных эффектов и наращивания уровня автомобилизации населения, так и вследствие возрастания выбросов при выработке электроэнергии, используемой в транспортных средствах с нулевым уровнем выбросов.

Значительное количество неопределенностей и погрешностей, объективно присущих как расчетным моделям, так и исходным данным, закономерно снижает точность результатов расчетов объемов эмиссии парниковых газов, что может приводить к заметному искажению реальной картины влияния техногенных факторов на глобальные климатические изменения. От точности же расчетных объемов выбросов в решающей степени зависит адекватность и эффективность инженерно-технических, организационных и в конечном счете политических решений, направленных на снижение негативных эффектов от продолжающегося глобального потепления климата. Соответственно, совершенствование методик расчета эмиссии парниковых газов является актуальной задачей, решению которой применительно к автомобильному и внедорожному транспорту посвящена настоящая работа.

Методы и методология

Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации (далее – Методика) включает в себя четыре структурных элемента. Первым из них является процедура *распределения парка по расчетным группам* с формированием двух группировочных массивов: для автотранспортных средств и для внедорожных мобильных машин (ВММ). Процедура построения группировочного массива **НА** для АТС в общем виде может быть представлена как

$$BA(BS(\mathbf{D}, y), \mathbf{G}) \rightarrow \mathbf{НА}, \quad (1)$$

где **D** – массив данных, содержащий сведения о парке АТС России за 2010–2022 годы (реляционная база данных. Более подробно формирование реляционной базы данных по АТС было рассмотрено в [22]); *y* – год, для которого выполняется построение группировочного массива; *BS* – обобщенный оператор формирования структуры **S** автопарка для года *y*; **G** – массив официальных статистических данных о парке АТС для года *yG*; *BA* – обобщенный оператор перестроения массива **G** в соответствии со структурой **S** при сохранении основных статистических показателей (численности АТС по категориям и экологическим классам, возрастной структуры парка и т. д.).

Массив **D** основан на базах данных Автостата и ГИБДД (форма № 1-БДД), содержит сведения о пяти категориях АТС (РС – легковые автомобили, LCV – легкие коммерческие грузовики, HDT – грузовые автомобили, BUS – автобусы, MT – мототранспорт) и по полноте информации разделяется на три информационных кластера. Первый кластер (2010–2016) характеризуется укрупнением данных (относительно небольшое количество записей, в каждой из которых отражена достаточно большая численность АТС) и отсутствием записей с полностью известными классификационными признаками, что делает необходимым восстановление пропущенных

данных для каждой записи кластера. Второй кластер (2017–2019) отличается подробной детализацией данных и малым относительным количеством записей, для которых полностью или частично отсутствуют классификационные признаки. Это делает данные второго кластера наиболее подходящими для формирования структуры автопарка, в том числе методами искусственного интеллекта. Дополнительно для формирования структуры могут быть использованы и данные третьего кластера (2020–2022), содержащего сведения только о категории РС.

Всего в массиве **D** содержится 68,9 млн записей с данными о более чем 663 млн учетных единиц автотранспорта (одной физической единице АТС в каждой записи за разные годы соответствует самостоятельная логическая учетная единица). Такой значительный объем хранимой и используемой в расчетах информации делает целесообразным реализацию массива **D** в форме реляционной базы данных, в результате чего достигается сокращение объема хранимых данных, приведение данных из различных источников к единому формату, позволяющему использовать при анализе информации стандартные процедуры (в том числе SQL-запросы), а также существенное повышение быстродействия обработки информации при ее анализе и формировании структуры автопарка **S**.

Оператор формирования структуры *BS* реализует распределение АТС из массива **D** по отдельным расчетным группам на основе значений классификационных признаков в соответствии с набором predetermined правил. Для всех категорий АТС классификационными признаками являются тип используемого топлива и экологический класс. Третьим классификационным признаком для категорий РС и MT служит объем двигателя или мощность (для электрокаров), для категорий LCV, HCV и BUS – полная масса. Для категории BUS дополнительно в качестве четвертого признака используется тип кузова.

При наличии в соответствующих полях записи базы данных полного перечня значений, требуемых для количественной оценки необходимых классификационных призна-

ков, вся численность АТС, указанная в рассматриваемой записи, однозначно относится к определенной расчетной группе. При отсутствии каких-либо данных выполняется их восстановление с использованием вероятностных методов искусственного интеллекта. Эти методы не всегда приводят к однозначному результату; соответственно, и процедура формирования структуры в этом случае может приводить к распределению численности АТС по нескольким группам. Для восстановления пропущенных данных используются одинаковые для всех категорий АТС атрибутивные признаки: марка, модель и год выпуска. В отличие от классификационных атрибутивных признаков влияют на отнесение АТС к определенной расчетной группе не непосредственно, а косвенным образом, через набор образцов, признанных по совокупности имеющихся атрибутивных и классификационных признаков совпадающими с рассматриваемой АТС, и далее – через вероятности ассоциирования этой АТС с тем или иным образцом. Использование атрибутивных признаков существенно расширяет возможности корректного восстановления пропущенных данных; в отдельных случаях, когда несколько (или даже все) классификационные признаки в записи базы данных отсутствуют, только атрибутивные признаки позволяют достоверно восстанавливать данные.

Вероятностное распределение численности АТС по расчетным группам, формируемое на основе характеристической выборки, представляет собой спектральный профиль (далее – профиль), соответствующий совокупности всех известных признаков – атрибутивных и классификационных. Чем больше пропущенных признаков, тем шире размах профиля АТС, определяемый максимальной и минимальной группой, имеющих ненулевую вероятность попадания в них данной АТС. И наоборот, в случае когда все признаки известны (пропущенные данные отсутствуют), профиль АТС сосредоточен в единственной расчетной группе. Формирование профилей является частью процедуры восстановления исходных данных, влияющих на структурную модель парка АТС. При нали-

чии записи с неполными классификационными признаками выполняется построение профиля, и далее численность АТС распределяется по всем стандартным группам профиля – в соответствии с вероятностями попадания АТС в каждую из групп.

Массив официальных статистических данных **G** формируется на основе информации, ежегодно публикуемой на сайте ГИБДД (код формы 560, раздел 03). Для определения численности АТС, использующих компримированный природный газ, дополнительно учитываются статистические данные ПАО «Газпром» как более точно отражающие реальную численность автопарка на этом виде газомоторного топлива.

Оператор *ВА* выполняет перенос структуры **S** на массив **G**, в результате чего формируется группировочный массив **НА**, далее используемый в третьем структурном элементе Методики как одно из исходных данных для количественного расчета выбросов парниковых газов. При этом первично суммарная численность АТС по категориям и укрупненным группам (электромобили; АТС с гибридной силовой установкой; АТС, использующие компримированный или сжиженный природный газ и т. д.) определяется исходя из данных массива **G**; в пределах категорий АТС и укрупненных групп численность распределяется по отдельным группам в соответствии со структурой **S**. Далее, при отсутствии полного соответствия между данными из **G** и какой-либо группой **НА** соответствующая численность АТС перераспределяется в группу с наиболее близкими показателями выбросов парниковых газов или удельного расхода топлива. В завершение выполняется приведение **НА** к структуре экологических классов, зафиксированной в массиве **G**, что заключается в частичном переносе АТС из тех классов, где численность группы превышает численность из **G**, в наиболее близкие им классы с недостаточной численностью. Такой перенос осуществляется между всеми группами с соответствующими экологическими классами с соблюдением ранее достигнутого соответствия численности категорий и укрупненных групп аг-

регированным показателям общей численности по данным ГИБДД из массива **Г**. Итоговый группировочный массив **НА** включает в себя 206 расчетных групп с распределением их количества по отдельным категориям АТС: РС – 99 групп, LCV – 14 групп, HDT – 43 группы, BUS – 32 группы, МТ – 18 групп.

Группировочный массив **НМ** отражает численность внедорожных мобильных машин по четырем категориям: строительно-дорожные машины (СДМ, 234 группы), сельскохозяйственная техника и технологические машины лесопромышленных предприятий (СХЛ, 99 групп), самоходная техника горно-рудной промышленности (ГРМ, 84 группы) и аэродромная техника (АМ, 54 группы). При группировке используется 5 признаков, сочетание которых определяет расчетную группу: вид топлива (2 градации: дизельное топливо, бензин), режим работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) (2 градации: постоянный, переменный), мощность ДВС (7 градаций, от «менее 19 кВт» до «более 560 кВт»), технологический уровень ДВС (3 градации: до EU Stage III или US Tier 3, EU Stage IV или US Tier 4, EU Stage V) и применение (количество градаций зависит от категории, например, для категории АМ предусмотрено 5 градаций: автобусы перронные, буксиры и тягачи аэродромные, погрузчики аэродромные, посадочные пандусы, прочие аэродромные). Алгоритмы формирования массива **НМ** различаются по категориям и основаны на использовании статистических, вероятностных и экспертных методов.

Вторым структурным элементом Методики является *актуализация данных* относительно пробегов АТС и норм работы ВММ разных классов, а также других расчетных параметров, используемых программой COPERT в отношении автотранспортных средств и методикой ЕМЕР/ЕЕА в отношении внедорожных мобильных машин. Среднегодовые пробеги АТС оцениваются методом OSINT с использованием данных из открытых источников. Для определения среднегодовых пробегов транспортных средств различных классов формируются матрицы, в которых оцениваются данные, начиная с

5-летнего возраста и заканчивая 20-летним возрастом каждого транспортного средства. На основе полученного массива информации для каждой возрастной подгруппы вычисляется средний кумулятивный пробег и среднегодовой пробег (делением кумулятивного пробега на возраст). По вычисленным значениям для кумулятивного пробега Z определяются аппроксимирующие полиномиальные зависимости $Z(t)$ второй степени и для среднегодового пробега – зависимости третьей степени $z(t)$. Далее производится уточнение среднегодовых пробегов АТС в расчетных группах с использованием объемов потребления разных видов топлива автомобильным транспортом. Аналогичным образом формируются зависимости годовой наработки от возраста $w(t)$ для укрупненных групп ВММ, также с последующим уточнением этих зависимостей по данным о потреблении топлива.

Третий структурный элемент Методики – *оценка выбросов* по отдельным видам парниковых газов, периодам и расчетным группам АТС и ВММ и получение суммарной оценки объемов выбросов. Для оценки выбросов от АТС используется специализированная общепризнанная компьютерная модель – программа COPERT, часть исходных данных для которой (множество расчетных групп в массиве **НА** и среднегодовые пробеги по расчетным группам) сформирована в рамках вышеописанных структурных элементов Методики. Остальные показатели, необходимые для расчетной оценки выбросов парниковых газов (удельные расходы топлива, скоростной режим, тип автомобильных дорог, прогрев автомобиля, природно-климатические факторы, доли пробегов на разных режимах движения автомобилей, коэффициенты активности АТС разных возрастных групп) принимаются по умолчанию из базы данных COPERT или устанавливаются с использованием экспертных оценок.

Алгоритм оценки расхода топлива и выбросов парниковых газов от всех категорий внедорожных мобильных машин базируется на методике третьего уровня ЕМЕР/ЕЕА (2023). Потребление топлива FC , выбросы i -го ПГ рассчитываются по формуле

$$FC(E_{GHI}) = N \cdot HRS \cdot P \cdot LFA \cdot SFC(EFB_i) \cdot \left(1 + DFA(DFA_i) \cdot \frac{AGE}{ASL}\right) \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где N – количество ВММ данной расчетной группы из группировочного массива **НМ**, ед.; HRS – средняя годовая наработка, определяемая для рассматриваемой группы по ранее сформированной зависимости $w(t)$, ч; P – средняя мощность двигателей для рассматриваемой группы, кВт; LFA – коэффициент использования мощности двигателей ВММ данной расчетной группы (вычисляется для абстрактного двигателя, работающего по наиболее характерному нагрузочному циклу, задаваемому в соответствии с действующими нормативами ГОСТ ISO 8178-4-2013); SFC – средний удельный расход топлива двигателей для рассматриваемой группы (в зависимости от вида топлива, мощности и технологической группы), г/кВт·ч; EFB_i – средний удельный выброс i -го парникового газа для рассматриваемой группы (в зависимости от вида топлива, мощности и технологической группы), г/кВт·ч; DFA – коэффициент изменения расхода топлива, выбросов i -го ПГ двигателей за средний срок службы (в зависимости от вида топлива, мощности и технологической группы); AGE – средний возраст парка для рассматриваемой группы (принимается экспертным путем исходя из существующих оценок возраста некоторых категорий и типов ВММ, а также исходя из сроков введения экологических норм в странах ЕС и США), лет; ASL – средний срок службы ВММ данной расчетной группы (в зависимости от категории, вида топлива и применения), лет.

Выбросы CO_2 для каждой расчетной группы рассчитываются по формуле

$$E_{CO_2} = FC \cdot SE_{CO_2}, \quad (3)$$

где SE_{CO_2} – удельные выбросы CO_2 для каждого используемого вида топлива (могут использоваться данные ЕМЕР/ЕЕА или МГЭИК), (г CO_2)/(г топлива).

Четвертый структурный элемент Методики – *верификация расчетных значений выбросов* парниковых газов от автомобильного и внедорожного транспорта, определение ко-

личественных показателей точности и неопределенностей результатов расчетов. Процедура количественной оценки точности и неопределенности ранее полученных расчетных объемов выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров автомобильным и внедорожным транспортом основана на следующих принципах и допущениях.

1. Отсутствие эмпирических данных об объемах выбросов как основы для прямого сравнения с результатами расчетов. Соответственно, оценка неопределенности расчетных значений выбросов возможна только при применении также расчетных (косвенных) методов путем сопоставления полученных значений выбросов со значениями, определенными альтернативными способами.

2. Использование принципа согласованности выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров с косвенными показателями транспортной и экономической деятельности как показателя достоверности и неопределенности расчетных значений выбросов в масштабах страны.

3. Применение множественной линейной регрессии как модели, отражающей зависимости между косвенными показателями транспортной деятельности и выбросами парниковых газов и газов-прекурсоров. В ходе предварительных исследований было установлено, что значимость данной модели является достаточно высокой для всех рассматриваемых видов выбросов. Объемы выбросов, определенные по регрессионным моделям, в дальнейшем называются модельными и сопоставляются с расчетными значениями, полученными при реализации третьего структурного элемента Методики.

4. Рассмотрение неопределенностей как случайных величин, реализациями которых являются расхождения между расчетными (по методикам COPERT и ЕМЕР/ЕЕА) и модельными значениями (восстановленными по косвенным показателям). Для описания этих случайных величин привлекается вероятностно-статистический аппарат, основанный

Таблица 1
Table 1

Распределение количества доступных статистических показателей по категориям дорожной и внедорожной техники (данные Росстата), ед.
Distribution of the number of available statistical indicators by categories of road and off-road equipment (Rosstat data), units

№ п/п	Группа показателей	Количество показателей по категориям АТС и ВММ				
		АТС	ДСМ	ГРМ	СХЛ	АМ
1	Национальные экономические показатели	3	3	3	3	3
2	Отраслевые экономические показатели, включая трудовые ресурсы	–	3	5	11	–
3	Численность техники по отдельным видам	–	8	–	9	–
4	Годовое производство техники по видам	–	–	7	23	–
5	Приобретение и выбытие техники по видам (в том числе новой)	–	4	–	17	–
6	Производственная мощность и степень ее использования по видам техники	6	–	4	25	2
7	Технические характеристики парка АТС, машин и оборудования	23	–	8	6	–
8	Объемы выполненной работы (по видам работ)	2	2	–	12	14
9	Полученная и реализованная продукция	–	2	–	9	–
10	Показатели эффективности (удельные)	–	–	–	5	2
Всего по категориям		34	22	23	120	21

на методе моментов (семейство кривых Пирсона), и для сравнения корректности результатов может дополнительно использоваться нормальный закон распределения.

Источником данных по косвенным показателям транспортной деятельности является Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС), которая содержит официальную статистическую информацию, формируемую субъектами статистического учета в рамках Федерального плана статистических работ. Структура косвенных показателей транспортной деятельности, используемых для верификации выбросов парниковых газов, показана в табл. 1.

Формализованно процедура построения модели множественной линейной регрессии в целях верификации выбросов парниковых газов может быть представлена как

$$R[H(V, P), U, Y, q] \rightarrow \{K, C\}, \quad (4)$$

где H – оператор подготовки исходных данных; V – совокупность исходных временных

рядов по отдельным показателям, извлеченная из ЕМИСС и прочих источников; P – набор правил для обработки исходных данных, включающий пять изменяемых параметров; U – множество известных значений выбросов; Y – правила построения регрессионной модели, в том числе периоды ее построения и использования; q – критерий, определяющий качество модели; K – множество косвенных показателей транспортной деятельности, учтенных в модели (факторы регрессии); C – параметры регрессии.

При реализации процедуры построения регрессии варьируемыми величинами являются P , q и Y . Даже в предположении, что в формируемом множестве K все показатели характеризуются одинаковыми правилами, поиск оптимального значения функции $q(P, Y)$ в 9-мерном пространстве (с учетом четырех параметров Y) представляет нетривиальную вычислительную задачу, которая требует весьма значительных затрат вычислительных ресурсов и может не иметь гарантированного точного оптимального решения.

Процедура вероятностно-статистического анализа точности и неопределенностей значений выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров включает три этапа расчета. На первом этапе выполняется фиксирование параметров построения множества регрессионных моделей, по каждой из которых далее определяется реализация случайной величины. Первыми двумя параметрами являются границы периода построения моделей (возможные значения с 1990 по 2022 год). Третий параметр – диапазон размеров модели Ω , который может составлять от 5 до 10 лет. Четвертый и пятый параметры определяют минимальный уровень качества модели, при котором она далее используется для определения значения выбросов как реализации случайной величины: скорректированный коэффициент детерминации R_A и уровень значимости регрессионной модели в целом ξ .

На втором этапе производится формирование множества реализаций случайных величин по отдельным годам. На этом шаге выполняется построение множества регрессионных моделей, у которых диапазон Ω не выходит за границы периода построения. При этом построение модели с диапазоном Ω выполняется по Ω вариантам; каждый вариант модели не учитывает данные за какой-то один год; после построения модели за «пропущенный» год определяется расхождение модельных и расчетных данных z . Для каждого варианта определяются показатели качества, и, если они соответствуют минимально допустимым значениям R_A и ξ , значение z добавляется в выборку Z_i (i – порядковый номер «пропущенного» года); в противном случае z игнорируется (выбраковывается) и в дальнейших расчетах не участвует. Как результат, после завершения второго этапа формируются выборки Z_i для каждого года в границах периода построения моделей, каждая из которых содержит различное количество реализаций случайной величины $\tilde{z}_i$.

Третий этап – определение количественных показателей точности и неопределенностей в расчетных значениях выбросов вероятностно-статистическими методами. Выявление наиболее подходящего закона распре-

деления каждой из случайных величин $\tilde{z}_i$ осуществляется из условия совпадения первых четырех моментов для выборочной совокупности Z_i и для закона распределения случайной величины, задаваемого плотностью вероятностей $f(z)$. В качестве показателя неопределенностей используется доверительный интервал $[\rho_{\min}^p; \rho_{\max}^p]$ с заданным уровнем вероятностей (обеспеченностью) p , границы которого определяются из условий

$$\int_{-\infty}^{\rho_{\min}^p} f(z)dz = \frac{1-p}{2}; \quad \int_{-\infty}^{\rho_{\max}^p} f(z)dz = \frac{1+p}{2}. \quad (5)$$

При определении границ доверительных интервалов на основе кривых Пирсона $f(z)$ возможны значения, асимметричные относительно среднего значения рассматриваемой случайной величины. Количественным показателем точности является медианное значение поправки δz , вводимое к расчетному значению выбросов:

$$\delta z = z_m - z_0, \quad (6)$$

где z_0 – расчетное значение выбросов, для которого оценивается точность и неопределенности; z_m – медианное значение выбросов, для которого

$$\int_{-\infty}^{z_m} f(z)dz = \int_{z_m}^{+\infty} f(z)dz = 0,5. \quad (7)$$

Все составные элементы Методики реализованы в «Транспортной модели», включающей следующие программные модули: «Автомобильный транспорт» (реализует первый структурный элемент Методики в части формирования группировочного массива **НА** и второй структурный элемент для вычисления дополнительных параметров, далее передаваемых в программу расчета выбросов COPERT); «Внедорожные мобильные машины» (реализует первые три структурных элемента Методики в отношении всех категорий ВММ); «Верификация» (реализует четвертый структурный элемент Методики – в целом для АТС, по отдельным категориям ВММ и по суммарным выбросам парниковых газов и

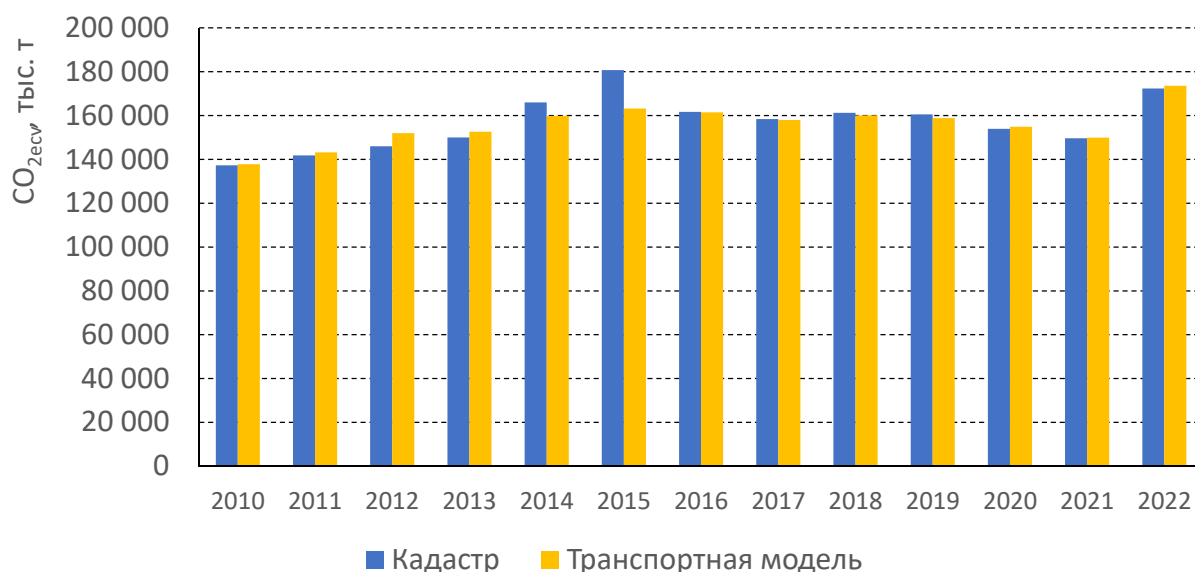


Рис. 1. Суммарные выбросы парниковых газов автомобильным транспортом, приведенные в Национальном кадастре за 2023 год и полученные по «Транспортной модели»

Fig. 1. Total greenhouse gas emissions from road transport, shown in the National Inventory for 2023 and obtained from the Transport Model

газов-прекурсоров от всех рассматриваемых видов автотранспорта); «Прогнозы» (предназначен для хранения и анализа статистической информации и расчетных данных с целью выявления зависимостей и формирования экспертного мнения). С использованием Методики возможно как восстановление временных рядов выбросов за предшествующие периоды с оценкой их точности и неопределенностей, так и выполнение сценарного прогнозирования объемов выбросов в будущем.

Результаты и обсуждение

С использованием вышеописанной Методики средствами «Транспортной модели» были сформированы группировочные массивы НА с 2010 по 2022 год, расчетные группы в которых соответствовали стандартным группам COPERT. В процессе расчетов выбросов были учтены национальные особенности при определении значений требуемых показателей, которые в программе COPERT принимаются по умолчанию, среди них: природно-климатические факторы; распределе-

ние пробегов транспортных средств по дорогам разных категорий; распределение кумулятивного пробега, среднесуточная интенсивность движения на автомобильных дорогах разных категорий для всех типов АТС; средняя дальность поездки автомобилей разных типов. Как результат, в соответствии с Методикой были актуализированы содержащиеся в Национальном кадастре оценки выбросов основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) и газов-прекурсоров (CO , NO_x , NMVOC) в период с 2010 по 2022 год от дорожного транспорта (рис. 1).

Можно видеть, что значения суммарных выбросов парниковых газов автомобильным транспортом за этот период, приведенные в Национальном кадастре и полученные по Методике, хорошо согласуются. Средневзвешенное отклонение значений составляет 0,55 %, только в 2015 году разница достигает 9,7 %.

Сравнительный анализ расчетных значений валовых выбросов газов-прекурсоров (CO , NO_x , VOC) автомобильным транспортом по Национальному кадастру и Методике показал, что по CO значения в отдельные годы отличаются на 42...95 %. По VOC различие составляет 28,7...71,4 %. Причем как по

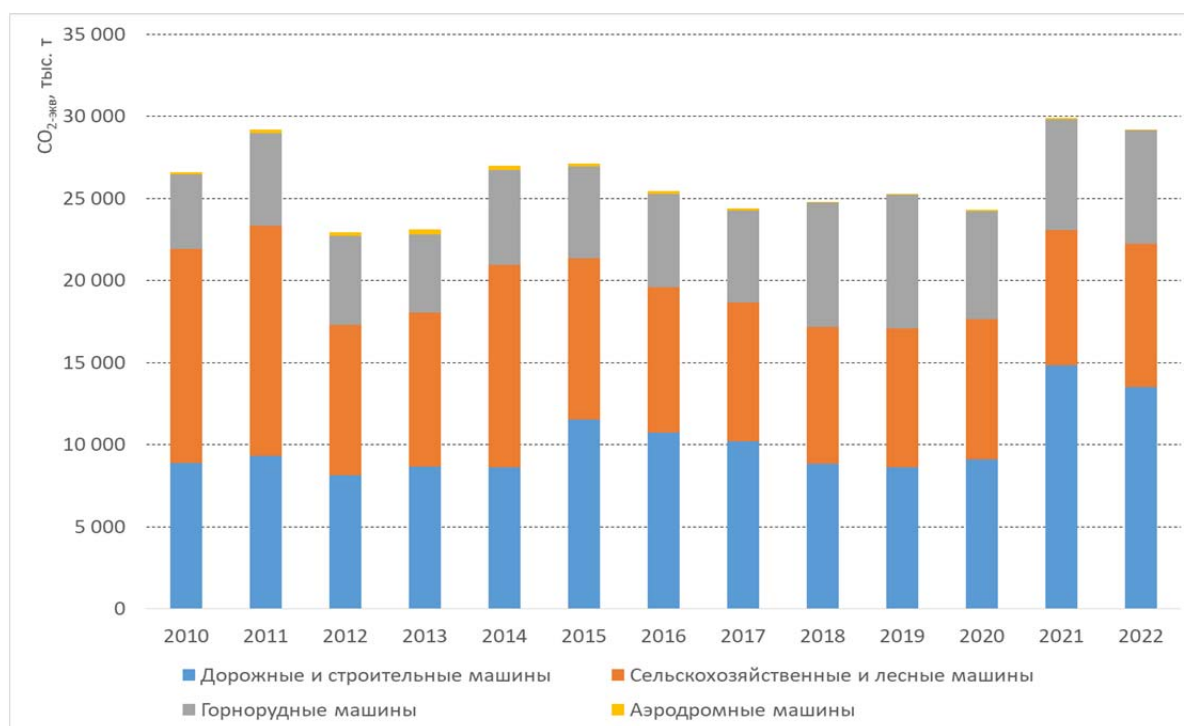


Рис. 2. Суммарные выбросы парниковых газов внедорожным транспортом по видам внедорожной техники
Fig. 2. Total greenhouse gas emissions from off-road transport by type of off-road equipment

одному, так и по второму газу по Методике значения во всех календарных годах превышают значения, приведенные в Национальном кадастре. По выбросам NO_x согласованность значений по Кадастру и Методике в период 2016–2022 годов намного лучше, максимальная разница составляет 4,6 % в 2021 году.

В соответствии с Методикой впервые была проведена количественная оценка выбросов ПГ от категории «Внедорожный транспорт», значения которых ранее в Национальном кадастре не отражались. Это позволяет как уточнить данные Национального кадастра, так и выделить вклад внедорожных машин по отраслям и оценить возможность регулирования выбросов от этих источников. Необходимо отметить, что по внедорожной мобильной технике в отличие от АТС отсутствует в открытом доступе обобщенная и систематизированная детальная информация с основными показателями и характеристиками, что обуславливает необходимость использования экспертно-аналитических методов восстановления недостающей информа-

ции о численности, характеристиках, интенсивности использования различных категорий и подкатегорий внедорожной техники на основании выявления трендов изменения показателей и их достоверного математического описания в виде устойчивых корреляционных зависимостей с показателями, используемыми для оценки выбросов парниковых газов внедорожным транспортом.

На основе информации о численности, номенклатуре внедорожной техники и других сведениях о наработке машин, содержащихся в статистических формах Росстата и в ЕМИСС, в других публичных источниках информации, нормативных и методических документах, научно-технических отчетах, результатах маркетинговых, аналитических исследований, были сформированы группировочные массивы **НМ** по отдельным годам с 2010 по 2022 год. Результаты расчета валовых выбросов ПГ и газов-прекурсоров от внедорожного транспорта представлены на рис. 2.

Основные положения и алгоритмы Методики были использованы при выполнении

Таблица 2
Table 2

Выбросы парниковых газов автомобильной техникой за период 1990–2022 годов (фрагмент)
Greenhouse gas emissions from automotive vehicles for the period 1990–2022 (fragment)

Год	Численность парка АТС, тыс. ед.	Потребление топлива, тыс. т/год	Валовые выбросы, тыс. т/год						
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	VOC	NO _x	Приведенные выбросы ПГ
1990	16 802	50 690	160 280	44	4,5	8 992	1 708	1 049	162 745
1995	23 218	34 782	109 699	35	2,8	8 982	1 083	932	111 407
2000	29 052	25 905	81 507	28	2,1	8 164	773	798	82 817
2005	35 695	32 115	100 991	31	2,7	9 525	855	881	102 565
2010	43 679	43 261	136 002	32	3,3	8 838	796	784	137 789
2015	53 588	51 332	161 545	27	3,4	6 443	721	583	163 253
2020	58 550	49 055	153 388	22	3,1	4 213	519	398	154 872

Таблица 3
Table 3

Выбросы парниковых газов внедорожной техникой за период 1990–2022 годов (фрагмент)
Greenhouse gas emissions from off-road vehicles for the period 1990–2022 (fragment)

Год	Численность парка ВММ, тыс. шт.	Потребление топлива, тыс. т/год	Валовые выбросы, тыс. т/год						
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	VOC	NO _x	Приведенные выбросы ПГ
1990	7 714	17 627	55 742	11	2,0	1 887	273	951	56 603
1995	7 210	11 849	37 494	14	1,3	2 253	309	587	38 222
2000	6 643	10 588	33 515	18	1,1	2 492	374	512	34 294
2005	6 329	9 043	28 609	11	1,0	1 488	231	464	29 168
2010	6 226	8 257	26 119	9,0	0,90	1 161	194	424	26 610
2015	6 133	8 440	26 685	6,3	0,94	729	145	434	27 124
2020	6 181	7 567	23 924	5,6	0,85	611	127	384	24 318

ретроспективного прогноза потребления разных видов топлива и энергии, валовых выбросов парниковых газов, а также численности рассматриваемых видов дорожных и внедорожных машин на период с 1990 по 2022 год, которые приведены в табл. 2.

В табл. 3 представлены значения численности, потребления топлива, валовых выбросов парниковых газов внедорожной техникой в этот же период.

Результаты реализации Методики в части оценки неопределенностей расчетных значений суммарных выбросов от всех рассмотренных категорий автомобильного транспорта показаны в табл. 4. Доверительные интервалы (6) были вычислены с максимальной высотой обеспеченностью 99 %; с увеличением «размаха» доверительного интервала увеличивается и неопределенность расчетного зна-

Таблица 4
Table 4

Доверительные интервалы к расчетным значениям выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров АТС и ВММ с обеспеченностью 99 % (фрагмент)
Confidence intervals to the calculated values of the emissions of greenhouse gases and precursor gases of road and off-road mobile vehicles with 99% sufficiency (fragment)

Год	Парниковый газ, газ-прекурсор, %					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	VOC	NO _x
1990	–3,0 / +4,2	–1,9 / +1,5	–2,6 / +3,6	–2,1 / +0,9	–2,3 / +0,8	–2,5 / +3,3
1995	–11,3 / +14,4	–5,1 / +7,9	–6,7 / +11,1	–4,6 / +6,8	–4,4 / +6,5	–7,5 / +11,1
2000	–10,6 / +15,4	–7,6 / +7,5	–7,8 / +14,6	–4,7 / +5,1	–6,2 / +6,5	–8,5 / +14,5
2005	–4,0 / +6,2	–4,5 / +6,5	–8,9 / +9,2	–6,3 / +4,7	–4,9 / +4,8	–9,3 / +9,5
2010	–15,3 / +17,4	–18,4 / +18,5	–26,8 / +26,2	–42,4 / +40,3	–31,6 / +29,7	–35,0 / +35,7
2015	–14,0 / +12,2	–15,8 / +15,8	–20,0 / +18,8	–21,3 / +22,9	–21,8 / +22,9	–22,0 / +21,9
2020	–27,0 / +28,1	–16,8 / +23,1	–15,1 / +27,1	–40,1 / +39,8	–26,9 / +30,1	–25,2 / +31,8

Таблица 5
Table 5

Медианные значения поправок к расчетным значениям выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров АТС и ВММ (фрагмент)
Median values of corrections to the calculated values of greenhouse gases emissions and precursor gases of road and off-road mobile vehicles (fragment)

Год	Значения поправки, %					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	VOC	NO _x
1990	0,58	–0,20	0,48	–0,60	–0,74	0,41
1995	1,58	1,40	2,19	1,12	1,08	1,80
2000	2,40	–0,05	3,39	0,20	0,16	2,96
2005	1,09	1,00	0,13	–0,82	–0,06	0,11
2010	1,02	0,06	–0,31	–1,02	–0,95	0,35
2015	–0,88	0,04	–0,61	0,80	0,54	–0,06
2020	0,56	3,19	6,00	–0,16	1,58	3,29

чения выбросов для соответствующего года и вида парникового газа или газа-прекурсора.

По результатам анализа медианных значений поправок к расчетным значениям выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров ВММ и АТС (7) как главного количественного показателя точности (табл. 5) можно сделать вывод о достаточно высокой точности ранее полученных расчетных значений выбросов по Методике: за период 1990–2019 годов зафиксировано только три значения медианной поправки, превышаю-

щей 3 %, по отдельным газам (2000 год, N₂O, $\delta z = 3,39$ %; 2016 год, CO, $\delta z = -3,58$ %; 2018 год, NO_x, $\delta z = -3,08$ %). При этом отрицательные значения поправок свидетельствуют о переоценке объемов выбросов (целесообразно их уменьшение на величину поправки), а положительные значения, наоборот, отражают недооценку расчетных значений выбросов.

В целом внедорожные мобильные машины характеризуются заметно более низкой точностью и более высокими неопределенно-

стями расчетных значений выбросов газов по сравнению с автотранспортными средствами. В то же время в суммарных выбросах по всем видам газов выбросы от АТС доминируют, что существенно улучшает показатели точности и неопределенностей расчетной оценки суммарных выбросов.

При практическом использовании и интерпретации показателей точности и неопределенностей расчетных значений выбросов парниковых газов необходимо учитывать следующее. Достоверность результатов, основанных на согласованности расчетных значений выбросов парниковых газов с косвенными показателями транспортной деятельности, определяется как адекватностью расчетной модели (наличием реально существующих зависимостей между косвенными показателями и значениями выбросов по отдельным видам показателей и категориям внедорожных мобильных машин и автотранспортных средств), так и полнотой и точностью статистических данных, отражающих значения косвенных показателей транспортной деятельности в отдельные годы. По объему и качеству доступной статистической информации можно выделить четыре расчетных периода. Первый период (1990–1999) характеризуется малым количеством косвенных показателей транспортной деятельности и минимальными (по сравнению с остальными периодами) объемами фактических данных, использованных при расчете выбросов. Соответственно, показатели точности и неопределенностей за этот период являются наименее достоверными. Второй период (2000–2009) характеризуется несколько более высокой фактологической обеспеченностью расчетных значений выбросов, и показатели точности и неопределенностей для этого периода можно считать более достоверными. Третий период (2010–2019) отличается максимальной достоверностью результатов, в том числе и показателей точности и неопределенностей. Для четвертого периода (2020–2022) значимо проявляется недостаточность возможных реализаций случайных величин, возникающая вследствие малого количества доступных регрессионных моделей, что снижает достовер-

ность вероятностных оценок точности и неопределенностей.

Система государственных статистических наблюдений России за рассматриваемый период (1990–2022) не отличается достаточно полной согласованностью данных: некоторые показатели транспортной деятельности в разные годы рассчитывались как минимум по трем различным методикам. Это обстоятельство является дополнительным источником неопределенностей, не связанных непосредственно с неопределенностями расчетных значений выбросов. В рамках Методики с помощью нормирования, сглаживания и использования временного лага эти дополнительные неопределенности в максимально возможной степени были снижены и их влияние может быть признано несущественным.

Заключение

Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта дает возможность повышения точности и достоверности результатов при оценке объемов выбросов парниковых газов от автотранспортных средств и впервые позволяет оценить объемы выбросов от внедорожных мобильных машин. Высокая точность и достоверность результатов достигаются за счет детализации исходных данных, отражающих специфику национального парка АТС и ВММ в части его структуры, а также показателей транспортной деятельности.

Методика дает возможность получения достоверных количественных оценок точности и неопределенностей по отдельным годам, категориям АТС и ВММ, видам парниковых газов и газов-прекурсоров. Полученные в работе значения точности и неопределенностей можно считать «оценкой снизу», выполненной в условиях недостатка статистических данных.

Разработанная «Транспортная модель» формирует единую систему сбора и обработки исходной информации о функционировании автомобильного парка в детализации, необхо-

димой для достоверной оценки выбросов ПГ от автомобильного и внедорожного транспорта. Вероятностно-статистический анализ точности и неопределенности значений итоговых выбросов от автомобильного и внедорожного транспорта на основе анализа согласованности моделей множественной линейной регрессии позволяет восстановить отсутствующую или скорректировать ошибочную информацию, приведенную в формах государственных статистических наблюдений по автомобильному и внедорожному транспорту. Это позволяет проводить дополнительную верификацию данных топливной статистики и выявлять существенные отклонения в потреблении моторного топлива в отдельные годы, в которых могут содержаться ошибки. Использование разработанной методики в Национальном кадастре повышает прозрачность расчетов выбросов парниковых газов мобильными источниками и способствует лучшему пониманию основных факторов, влияющих на изменение выбросов.

Дальнейшее развитие Методики в первую очередь должно быть направлено на повышение полноты охвата и достоверности исходных статистических данных, используемых как непосредственно при расчете объемов выбросов парниковых газов, так и при оценке точности и неопределенностей результатов этих расчетов. В целом Методика, реализованная в виде «Транспортной модели», является высокоэффективным средством информационной поддержки управленческих решений в области противодействия негативным последствиям климатических изменений, обусловленных выбросами парниковых газов транспортными средствами.

В перспективе «Транспортная модель» может не ограничиваться только наземными видами транспорта, а распространяться также на воздушный, водный и железнодорожный транспорт.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая наци-

ональная система мониторинга климатически активных веществ», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 3240-р, в ходе реализации научно-исследовательской работы по теме «Актуализация распределения автомобильного парка России по видам топлива и экологическим классам, определения расхода топлива, средневзвешенных пробегов автотранспортных средств разных классов для автопарка Российской Федерации» по договору № 32312317348 от 17 мая 2023 года ООО «ЦТИ».

В данной работе также принимали участие сотрудники МАДИ В.И. Комков, Е.В. Шашина, Д.А. Деянов, В.А. Зорин.

Список литературы

1. **Зырянов И.В.** Оценка выбросов парниковых газов автотранспортом АК «АЛРОСА» / И.В. Зырянов, Н.Е. Кулинич, Ф.Ю. Иванов, В.А. Кожин // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 1 (119). С. 9–13.
2. **Шагидуллин А.Р.** Расчет выбросов парниковых газов при эксплуатации автотранспорта на территории крупных городов Республики Татарстан / А.Р. Шагидуллин, А.Р. Магдеева, А.Ф. Гилязова, Г.Ф. Амирянова, Р.А. Шагидуллина, Р.Р. Шагидуллин // Российский журнал прикладной экологии. 2016. № 2 (6). С. 22–25.
3. **Ложкина О.В., Ложкин В.Н.** Количественная оценка выбросов поллютантов и парниковых газов автотранспортом по европейской методологии COPERT, адаптированной к условиям Санкт-Петербурга // Проблемы управления рисками в техносфере. 2013. № 4 (28). С. 19–26.
4. **Двоеглазова Н.В., Чубаренко Б.В., Козлова Я.А.** Антропогенная составляющая эмиссии парниковых газов с территории Калининградской области // Гидрометеорология и экология. 2020. № 58. С. 94–110. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-94-110
5. **Максимова О.В., Лытов В.М., Гинзбург В.А.** Сравнительный анализ методик расчета углеродного следа автотранспорта

в России // Контроль качества продукции. 2020. № 7. С. 44–48.

6. Трофименко Ю.В. Влияние структуры парка автотранспортных средств по виду топлива и экологическому классу на выбросы парниковых газов / Ю.В. Трофименко, В.А. Гинзбург, В.И. Комков, В.М. Лытов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15, № 6 (64). С. 898–910.

7. Якубович И.А. Погрешности в оценках объемов выбросов парниковых газов автотранспортом и способы их снижения // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сборник трудов 77-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. Москва, 29–30 января 2019 г. М.: Техполиграфцентр, 2019. С. 127–130.

8. Amin A., Altinoz B., Dogan E. Analyzing the determinants of carbon emissions from transportation in European countries: the role of renewable energy and urbanization // Clean Technologies and Environmental Policy. 2020. Vol. 22. Pp. 1725–1734. DOI: 10.1007/s10098-020-01910-2

9. Liang Y. Factors affecting transportation sector CO₂ emissions growth in China: an LMDI decomposition analysis / Y. Liang, D. Niu, H. Wang, Y. Li [Электронный ресурс] // Sustainability. 2017. Vol. 9, iss. 10. ID: 1730. DOI: 10.3390/su9101730 (дата обращения: 19.07.2024).

10. Mishalani R.G. Modeling the relationships among urban passenger travel carbon dioxide emissions, transportation demand and supply, population density, and proxy policy variables / R.G. Mishalani, P.K. Goel, A.M. Westra, A.J. Landgraf // Transportation Research. Part D. Transport Environment. 2014. Vol. 33. Pp. 146–154. DOI: 10.1016/j.trd.2014.08.010

11. Шестаков Н.И. Методы расчета углеродного следа объектов дорожно-строительного комплекса / Н.И. Шестаков, Д.К. Таргонский, Н.С. Аргат, Б.А. Моргоев // Экология урбанизированных территорий. 2024. № 1. С. 76–81. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-1-76-81

12. Дехнич В.С. Моделирование объемов выбросов парниковых газов в городах с использованием данных различной детальности // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26, № 1. С. 257–270. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-257-270

13. Ибрагимова Н.А., Косякова А.А., Тайсаринова А.С. Оценка загрязнения воздуха в Алматы с использованием косвенных методов // Новости науки Казахстана. 2017. № 2. С. 175–188.

14. Вохмин Д.М., Козин Е.С. Основы мониторинга углеродного следа транспортных потоков крупных городов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2024. № 6. С. 11–17. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-06-2

15. Якубович А.Н., Якубович И.А. Использование геоинформационных технологий при анализе и прогнозировании экологического состояния территорий дорожной сети // В мире научных открытий. 2015. № 6 (66). С. 52–63. DOI: 10.12731/wsd-2015-6-5

16. Sarkodie S.A. Environmental sustainability assessment using dynamic autoregressive-distributed lag simulations nexus between greenhouse gas emissions, biomass energy, food and economic growth / S.A. Sarkodie, V. Strezov, H. Weldekidan, E.F. Asamoah, P.A. Owusu, I.N.Y. Doyi // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 668. Pp. 318–332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.432

17. Nasreen S., Saidi S., Ozturk I. Assessing links between energy consumption, freight transport, and economic growth: evidence from dynamic simultaneous equation models // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25. Pp. 16825–16841. DOI: 10.1007/s11356-018-1760-5

18. Тунакова Ю.А. Нейросетевой расчет концентраций диоксида углерода / Ю.А. Тунакова, С.В. Новикова, А.Р. Шагидуллин, В.С. Валиев // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 6. С. 18–23. DOI: 10.25699/SSSB.2021.40.6.050

19. Шепелев В.Д. Влияние пропускной способности регулируемых пересечений на количество выхлопных газов от автотранспорта / В.Д. Шепелев, А.И. Глушков, О.С. Фа-

дина, В.Е. Кутузова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2023. Т. 17, № 1. С. 168–178. DOI: 10.14529/em230116

20. Трофименко Ю.В., Комков В.И. Актуализированный прогноз численности, структуры автомобильного парка России по типу энергоустановок и выбросов парниковых газов до 2050 года // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20, № 3. С. 350–361. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361

21. Иосифов В.В. Стандарты топливной эффективности как инструмент достижения целей климатической политики: анализ результативности // Экономический вестник ИПУ РАН. 2021. Т. 2, № 1. С. 40–52. DOI: 10.25728/econbull.2021.1.4-iosifov

22. Trofimenko Y.V., Yakubovich A.N., Lytov V.M. Development of approaches to updated database on the vehicle fleet of various countries for assessing gross greenhouse gas emissions // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). Moscow, 2023. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332670

References

1. Zyryanov, I.V., Kulinich, N.E., Ivanov, F.Y., Kozhin, V.A. (2016). Assessment of greenhouse gas emissions by motor transport of “Alrosa”. *Mining Equipment and Electromechanics*, no. 1 (119), pp. 9–13. (in Russian)

2. Shagidullin, A.R., Magdeeva, A.R., Gilyazova, A.F., Amiryanova, G.F., Shagidullina, R.A., Shagidullin, R.R. (2016). Calculation of greenhouse gas emissions during operation of motor vehicles in the big cities of the republic of Tatarstan. *Russian Journal of Applied Ecology*, no. 2 (6), pp. 22–25. (in Russian)

3. Lozhkina, O.V., Lozhkin, V.N. (2013). Quantitative estimation of road transport pollutants and green house gases by means of the European methodology copert adapted to the conditions of Saint-Petersburg. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, no. 4, pp. 19–26. (in Russian)

4. Dvoeglazova, N.V., Chubarenko, B.V., Kozlova, Y.A. (2020). Anthropogenic component of greenhouse gas emissions from the territory of the Kaliningrad region. *Hydrometeorology and ecology*, no. 58, pp. 94–110. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-94-110 (in Russian)

5. Maksimova, O.V., Lytov, V.M., Ginzburg, V.A. (2020). A comparative analysis of methods for calculating the carbon footprint of vehicles in Russia. *Product quality control*, no. 7, pp. 44–48. (in Russian)

6. Trofimenko, Yu.V., Ginzburg, V.A., Komkov, V.I., Lytov, V.M. (2018). Influence of the motor vehicle parking structure by fuel type and ecological class on greenhouse gas emissions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, vol. 15, no. 6 (64), pp. 898–910. (in Russian)

7. Yakubovich, I.A. (2019). Errors in estimates of greenhouse gas emissions from motor vehicles and ways to reduce them. In: *Problemy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobilnogo transporta: sbornik trudov 77-oy nauchno-metodicheskoy i nauchno-issledovatel'skoy konferentsii MADI*. Moscow: Tekhpolograftsentr, pp. 127–130. (in Russian)

8. Amin, A., Altinoz, B., Dogan, E. (2020). Analyzing the determinants of carbon emissions from transportation in European countries: the role of renewable energy and urbanization. *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 22, pp. 1725–1734. DOI: 10.1007/s10098-020-01910-2

9. Liang, Y., Niu, D., Wang, H., Li, Y. (2017). Factors affecting transportation sector CO₂ emissions growth in China: an LMDI decomposition analysis. *Sustainability*, vol. 9, issue 10. ID: 1730. DOI: 10.3390/su9101730 (accessed: 19.07.2024).

10. Mishalani, R.G., Goel, P.K., Westra, A.M., Landgraf, A.J. (2014). Modeling the relationships among urban passenger travel carbon dioxide emissions, transportation demand and supply, population density, and proxy policy variables. *Transportation Research. Part D. Transport Environment*, vol. 33, pp. 146–154. DOI: 10.1016/j.trd.2014.08.010

11. Shestakov, N.I., Targonskij, D.K., Argat, N.S., Morgoev, B.A. (2024). Methods for calculating the carbon footprint of road construction facilities. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*, no. 1, pp. 76–81. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-1-76-81 (in Russian)

12. Dekhnich, V.S. (2020). Modeling volumes emissions of greenhouse gas in cities using data with various details. *InterCarto. InterGis*, vol. 26, no. 1, pp. 257–270. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-257-270 (in Russian)

13. Ibragimova, N.A., Kosyakova, A.A., Tajsarinova, A.S. (2017). Assessment of air pollution in Almaty using indirect methods. *Novosti nauki Kazakhstana*, no. 2, pp. 175–188. (in Russian)

14. Vohmin, D.M., Kozin, E.S. (2024). Basics of monitoring the carbon footprint of traffic flows in large cities. *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection*, no. 6, pp. 11–17. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-06-2 (in Russian)

15. Yakubovich, A.N., Yakubovich, I.A. (2015). Use of geographic information technologies for the analysis and prediction of environmental status of the road network. *V mire nauchnykh otkrytiy*, no. 6 (66), pp. 52–63. DOI: 10.12731/wsd-2015-6-5 (in Russian)

16. Sarkodie, S.A., Strezov, V., Weldekidan, H., Asamoah, E.F., Owusu, P.A., Doyi, I.N.Y. (2019). Environmental sustainability assessment using dynamic autoregressive-distributed lag simulations nexus between greenhouse gas emissions, biomass energy, food and economic growth. *Science of the Total Environment*, vol. 668, pp. 318–332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.432

17. Nasreen, S., Saidi, S., Ozturk, I. (2018). Assessing links between energy con-

sumption, freight transport, and economic growth: evidence from dynamic simultaneous equation models. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, pp. 16825–16841. DOI: 10.1007/s11356-018-1760-5

18. Tunakova, Y.A., Novikova, S.V., Shagidullin, A.R., Valiev, V.S. (2021). Neural network calculation of carbon dioxide concentrations. *South-Siberian Scientific Bulletin*, no. 6, pp. 18–23. DOI: 10.25699/SSSB.2021.40.6.050 (in Russian)

19. Shepelev, V.D., Glushkov, A.I., Fadina, O.S., Kutuzova, V.E. (2023). Influence of the capacity of regulated crossings on the quantity of exhaust gases from vehicles. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Economics and Management*, vol. 17, no. 1, pp. 168–178. DOI: 10.14529/em230116 (in Russian)

20. Trofimenko, J.V., Komkov, V.I. (2023). Updated number forecast, Russian car fleet structures by type of power plants and greenhouse gas emissions until 2050. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 350–361. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361 (in Russian)

21. Iosifov, V.V. (2021). Fuel efficiency standards as a tool for achieving climate policy goals: performance analysis. *Economic Bulletin of ICS RAS*, vol. 2, no. 1, pp. 40–52. DOI: 10.25728/econbull.2021.1.4-iosifov (in Russian)

22. Trofimenko, Y.V., Yakubovich, A.N., Lytov, V.M. (2023). Development of approaches to updated database on the vehicle fleet of various countries for assessing gross greenhouse gas emissions. In: *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. Moscow, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332670

Сведения об авторах

Трофименко Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), uwtrofimenko@mail.ru.

Гинзбург Вероника Александровна, кандидат географических наук, заместитель директора Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ), veronika.ginzburg@gmail.com.

Якубович Анатолий Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техносферной безопасности Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 54081@mail.ru.

Лытов Владислав Михайлович, научный сотрудник отдела исследования процессов стабилизации глобального климата Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ), vladislav.lytoff@gmail.com.

Шелмаков Сергей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), shelwood@yandex.ru.

Зеленова Мария Сергеевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ), mszelenova@gmail.com.

Information about the authors

Yurij V. Trofimenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Technosphere Safety Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), ywtrofimenko@mail.ru.

Veronika A. Ginzburg, Candidate of Geographical Sciences, Deputy Director of the Institute of Global Climate and Ecology Named after Academician Y.A. Izrael (IGCE), veronika.ginzburg@gmail.com.

Anatolij N. Yakubovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Technosphere Safety Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 54081@mail.ru.

Vladislav M. Lytov, Researcher at the Department of Global Climate Stabilization Research, Institute of Global Climate and Ecology Named after Academician Y.A. Izrael (IGCE), vladislav.lytoff@gmail.com.

Sergej V. Shelmakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technosphere Safety Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), shelwood@yandex.ru.

Mariya S. Zelenova, Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Institute of Global Climate and Ecology Named after Academician Y.A. Izrael (IGCE).

Поступила в редакцию	01.11.2024	Received	01.11.2024
Одобрена после рецензирования	02.12.2024	Approved after reviewing	02.12.2024
Принята в печать	23.01.2025	Accepted for publication	23.01.2025