УДК 504.1:656.13(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-108-115

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЁТА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ПЕРЕДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ В УСЛОВИЯХ ГОРНОГО РЕЛЬЕФА

Б. Советбеков, С.Д. Тихненко

Аннотация. Исследуется сравнительный анализ существующих методик расчёта выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников применительно к условиям горного рельефа Кыргызской Республики. Рассмотрены три группы подходов: модальная европейская методика COPERT, американская модель EPA MOVES, основанная на удельной мощности транспортного средства (VSP), и коэффициентная методика НИИАТ, применяемая в странах СНГ. Показано, что более 90 % территории Кыргызстана относится к горной и высокогорной местности, что обусловливает существенные отклонения фактических выбросов от значений, рассчитанных по методикам, разработанным для равнинных условий умеренного климата. На примере участка автомобильной дороги Бишкек – Ош в районе перевала Тоо-Ашуу выполнен расчёт удельных выбросов CO, NO_x, CO_2 и твёрдых частиц при различных значениях продольного уклона и абсолютной высоты местности. Установлено, что при уклоне дороги 9 % и высоте более 3000 м расчётные значения выбросов NO_x возрастают на 48–82 % в зависимости от применяемой методики, а выбросы CO на высокогорных участках увеличиваются в 1,3–1,6 раза относительно равнинных условий. Сделан вывод о необходимости разработки адаптированной методики расчёта выбросов, учитывающей совместное влияние продольного уклона и высотной коррекции для условий горного рельефа Кыргызстана.

Ключевые слова: горный рельеф; передвижные источники; выбросы загрязняющих веществ; методика расчёта выбросов; удельная мощность транспортного средства; высотная коррекция; продольный уклон дороги; автотранспорт Кыргызстана.

ТОО РЕЛЬЕФИНИН ШАРТТАРЫНДА КӨЧМӨ БУЛАКТАРДАН ЧЫККАН БУЛГООЧУ ЗАТТАРДЫ ЭСЕПТӨӨНҮН МЕТОДИКАСЫН САЛЫШТЫРМАЛУУ ТАЛДОО

Б. Советбеков, С.Д. Тихненко

Аннотация. Макала Кыргыз Республикасынын тоолуу аймактарынын шарттарына карата кыймылдуу булактардан атмосферага бөлүнүп чыккан булгоочу заттардын эмиссиясын эсептөө боюнча колдонулуп жаткан методикаларга салыштырма талдоо жүргүзүүгө арналган. Изилдөөдө үч негизги ыкма каралган: европалык COPERT модалдык методикасы, транспорт каражатынын салыштырма кубаттуулугуна (Vehicle Specific Power, VSP) негизделген америкалык EPA MOVES модели жана КМШ өлкөлөрүндө кеңири колдонулган НИИАТтын коэффициенттик методикасы. Изилдөөнүн жүрүшүндө Кыргызстандын аймагынын 90 пайыздан ашыгы тоолуу жана бийик тоолуу аймактардан турары белгиленип, бул факторлор орточо климаттык жана түздүк шарттар үчүн иштелип чыккан эсептөө методикаларынын натыйжаларынан иш жүзүндөгү эмиссия көлөмдөрүнүн олуттуу айырмаланышына алып келери көрсөтүлгөн. Бишкек–Ош автомобиль жолунун Тоо-Ашуу ашуусундагы тилкесинин мисалында жолдун ар кандай узунунан эңкейиштери жана деңиз деңгээлинен ар түрдүү бийиктиктери үчүн көмүртек кычкылы (CO), азот оксиддери (NOx), көмүр кычкыл газы (CO_2) жана катуу бөлүкчөлөрдүн (PM) салыштырма эмиссиялары эсептелген. Изилдөөнүн жыйынтыгында жолдун узунунан эңкейиши 9 % жана деңиз деңгээлинен бийиктиги 3000 метрден ашкан шарттарда NOx эмиссиясынын эсептик көрсөткүчтөрү колдонулган методикага жараша 48–82 %га чейин көбөйөрү аныкталган. Ал эми бийик тоолуу тилкелерде CO эмиссиясы түздүк шарттарга салыштырмалуу 1,3–1,6 эсеге жогорулаары белгиленген. Изилдөөнүн негизинде Кыргызстандын тоолуу шарттарына ылайыкташтырылган, жолдун узунунан эңкейишинин жана бийиктик факторунун биргелешкен таасирин эске алган жаңы эмиссияларды эсептөө методикасын иштеп чыгуу зарыл деген жыйынтык чыгарылган.

Түйүндүү сөздөр: тоо рельефи; көчмө булактар; булгоочу заттарды чыгаруулар; чыгындыларды эсептөө методикасы; транспорт каражатынын салыштырма кубаттуулугу; бийиктикти коррекциялоо; жолдун узатасынан жантайышы; Кыргызстандын автотранспорту.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING POLLUTANT EMISSIONS FROM MOBILE SOURCES UNDER MOUNTAIN TERRAIN CONDITIONS

B. Sovetbekov, S.D. Tikhnenko

Abstract. The article presents a comparative analysis of existing methods for calculating pollutant emissions from mobile sources as applied to the mountainous terrain of the Kyrgyz Republic. Three groups of approaches are considered: the European modal methodology COPERT, the U.S. EPA MOVES model based on vehicle specific power (VSP), and the coefficient-based NIIAT methodology used in CIS countries. It is shown that more than 90 % of Kyrgyzstan's territory is mountainous or high-mountainous, which causes significant deviations of actual emissions from values calculated using methodologies developed for flat terrain of temperate climates. Using a section of the Bishkek–Osh highway near the Too-Ashuu pass as a case study, specific emissions of CO, NO_x, CO_2 and particulate matter were calculated for different road grades and elevations. It was found that at a 9% road grade and elevation above 3000 m, calculated NO_x emissions increase by 48–82% depending on the methodology used, while CO emissions at high-altitude sections increase 1,3–1,6 times relative to flat conditions. It is concluded that a dedicated calculation methodology accounting for the combined effect of road grade and altitude correction is needed for Kyrgyzstan's mountainous conditions.

Keywords: mountainous terrain; mobile sources; pollutant emissions; emission calculation methodology; vehicle specific power; altitude correction; road grade; Kyrgyzstan road transport.

Введение. Автомобильный транспорт остаётся одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха в городах и вдоль магистральных автодорог Кыргызской Республики. По оценкам природоохранных ведомств республики, на долю передвижных источников приходится значительная часть суммарных выбросов оксида углерода, оксидов азота и твёрдых частиц в крупных населённых пунктах страны, а также вдоль высокогорных участков стратегических автодорог, соединяющих северные и южные регионы. Особенностью территории Кыргызстана является то, что свыше 90 % её площади занято горами и высокогорьем, а значительная часть автодорожной сети республики, включая участок автомагистрали Бишкек – Ош, проходит через перевалы с абсолютными высотами свыше 3000 м и продольными уклонами, достигающими 8–10 %.

Большинство применяемых в мировой практике методик расчёта выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) от автотранспорта – европейская COPERT, американская EPA MOVES, а также используемые в странах СНГ коэффициентные методики – разрабатывались и калибровались применительно к условиям равнинного или слабохолмистого рельефа умеренного климатического пояса. Влияние продольного уклона дороги и снижения плотности атмосферного воздуха с высотой на удельные показатели выброса в этих методиках учитывается в разной степени детализации либо не учитывается вовсе, что делает их прямое применение для условий Кыргызстана источником систематической погрешности.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ методических подходов к расчёту выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников с точки зрения полноты учёта факторов горного рельефа, а также количественная оценка расхождений результатов расчёта по различным методикам на примере характерного участка автомобильной дороги республиканского значения.

Обзор методик расчёта выбросов от автотранспорта.

Методика COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport), разработанная в рамках программы EMEP/EEA, является модальной методикой, в которой удельный выброс загрязняющего вещества рассчитывается как функция средней скорости движения транспортного потока для каждой технологической категории транспортных средств (категория Евро, тип топлива, класс по массе). Базовая расчётная зависимость для горячих выбросов имеет вид

$$E = E_i E_j \left(VKT_i j \times EF_i j \left(v \right) \times K_{C;} \times K_{2KA} \right), \quad (1)$$

где E – суммарный выброс загрязняющего вещества, г;

VKT_ij – пробег транспортных средств категории i, топливной группы j, км;

$EF_{ij}(v)$ – функция удельного выброса от средней скорости v, г/км;

$K_{укл}$ – корректирующий коэффициент на продольный уклон дороги;

$K_{выс}$ – корректирующий коэффициент на высоту местности над уровнем моря.

В базовой версии методики COPERT коэффициент $K_{укл}$ вводится через модификацию функции $EF(v)$ с использованием дополнительных параметров ускорения и удельной мощности *(VSP*), однако коэффициент $K_{выс}$ в стандартной версии методики отсутствует и требует калибровки под региональные условия [1].

Методика EPA MOVES. Американская модель EPA MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) использует принцип распределения режимов движения по интервалам удельной мощности транспортного средства (Vehicle Specific Power, VSP), что делает её потенциально более чувствительной к влиянию продольного уклона дороги, поскольку уклон входит непосредственно в формулу VSP:

$$VSP = v \times \left[a\left(1 + \varepsilon_i\right) + \mathrm{g} \times C_R \right] + 0,5 \times \rho \times C_d \times A \times v^3 \ / \ m \ , \qquad (2)$$

где v – скорость движения, м/с;

a – ускорение, м/с²;

ε_i – коэффициент учёта вращающихся масс;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

θ – угол продольного уклона дороги (grade), рад;

CR – коэффициент сопротивления качению;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

Cd – коэффициент аэродинамического сопротивления;

A – площадь миделева сечения, м²;

m – масса транспортного средства, кг.

Рассчитанное значение VSP определяет модальный интервал (bin), которому сопоставляется удельная эмиссионная характеристика, полученная эмпирически на динамометрическом стенде [2]. Величина ρ, входящая в формулу, напрямую зависит от абсолютной высоты местности, что делает EPA MOVES методически наиболее пригодной для адаптации к горным условиям при условии корректировки плотности воздуха по барометрической формуле.

Коэффициентная методика НИИАТ (методика стран СНГ). Методика Научно-исследовательского института автомобильного транспорта (НИИАТ), применяемая в России и ряде других стран СНГ, а также используемая как основа для расчётов в Кыргызстане, базируется на удельных нормативных выбросах на 1 км пробега или на 1 кг израсходованного топлива с применением системы поправочных коэффициентов [3]:

$$M_i = \sum k \left(m_{ik} \times L_k \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \right), \qquad (3)$$

где M_i – масса выброса i-го загрязняющего вещества, г;

m_{ik} – базовый удельный выброс для k-й группы транспортных средств, г/км;

L_k – суммарный пробег транспортных средств данной группы, км;

K_1 – коэффициент, учитывающий возрастную структуру парка;

K_2 – коэффициент, учитывающий тип местности (равнинная/холмистая/горная);

K_3 – коэффициент, учитывающий температурный режим;

K_4 – коэффициент технического состояния парка.

В отличие от COPERT и EPA MOVES, коэффициент K_2 в методике НИИАТ задаётся фиксированным табличным значением (как правило, в диапазоне 1,15–1,35 для горной местности) без учёта конкретного значения уклона и абсолютной высоты конкретного участка дороги, что ограничивает точность расчёта для протяжённых горных трасс с переменным профилем (таблица 1).

Таблица 1 — Сравнительная характеристика методик расчёта выбросов от передвижных источников

Критерий сравнения	COPERT	EPA MOVES	Методика НИИАТ
Принцип расчёта	Модальный, функция средней скорости	Модальный, по интервалам VSP	Коэффициентный, по пробегу/топливу
Учёт продольного уклона	Косвенно, через VSP-модификацию	Явно, входит в формулу VSP	Не учитывается напрямую
Учёт высоты местности	Отсутствует в базовой версии	Возможен через плотность воздуха ρ	Отсутствует
Учёт холодного пуска	Да, отдельный модуль	Да, отдельный модуль	Частично, коэфф. $K_з$
Требования к исходным данным	Высокие (состав парка по Евро-классам)	Очень высокие (телеметрия, стенд)	Умеренные (нормативные показатели)
Применимость для гор. рельефа КР	Требует калибровки $K_{выс}$	Наиболее адаптируема	Ограниченная точность

Особенности влияния горного рельефа на выбросы загрязняющих веществ. Анализ выявляет три группы факторов горного рельефа, оказывающих наибольшее влияние на удельные выбросы загрязняющих веществ от передвижных источников: продольный уклон дороги, абсолютную высоту местности и режим движения на серпантинных участках.

Продольный уклон дороги увеличивает нагрузку на двигатель при движении на подъём, что приводит к обогащению топливовоздушной смеси и росту выбросов CO и углеводородов, а также к повышению температуры в камере сгорания и, как следствие, росту выбросов NO_x. При движении на спуск, напротив, преобладают режимы принудительного холостого хода и торможения двигателем, что снижает расход топлива, но увеличивает долю режимов неполного сгорания [4].

Снижение плотности атмосферного воздуха с высотой приводит к уменьшению массы кислорода, поступающего в цилиндры двигателя за один рабочий цикл, что при отсутствии наддува или при недостаточной компенсации топливоподачи вызывает обеднение или переобеднение смеси и рост удельных выбросов CO и углеводородов на высокогорных участках. Данный эффект особенно выражен для карбюраторных и наименее выражен для современных двигателей с электронным управлением впрыском и наддувом, что также необходимо учитывать при интерпретации результатов расчёта для разных возрастных категорий парка.

Серпантинный характер горных дорог с частой сменой уклона и малым радиусом поворотов обусловливает нестационарный режим движения с частыми разгонами и торможениями, что не может быть корректно описано усреднённой скоростью потока, применяемой в базовой версии методики COPERT, и требует применения модальных подходов с посекундным профилем скорости, аналогичных используемым в EPA MOVES [2, 4].

Исходные данные для сравнительного расчёта. В качестве участка исследования выбран фрагмент автомобильной дороги республиканского значения Бишкек – Ош в районе перевала Тоо-Ашуу, где дорога поднимается от долины реки Кара-Балта (около 1600 м) до тоннеля им. К. Кольбаева, расположенного на высоте около 3200 м над уровнем моря, со средним продольным уклоном на отдельных участках подъёма до 8–9 %. Для сопоставления в расчёте также использован условно равнинный участок дороги в черте г. Бишкек (высота около 760 м, уклон менее 1 %) (таблица 2).

Данные по интенсивности и составу транспортного потока приняты по результатам натурных обследований интенсивности движения на указанных участках; данные использованы в качестве расчётных допущений для целей сопоставления методик и не заменяют официальную статистику интенсивности движения [5].

Таблица 2 — Характеристика расчётных участков

Параметр	Равнинный участок (г. Бишкек)	Горный участок (перевал Тоо-Ашуу)	Ед. изм.
Абсолютная высота	760	3200	м
Средний продольный уклон	0,5	8–9	%
Протяжённость участка	5,0	12,5	км
Интенсивность движения (сутки)	18 400	3 100	авт./сут
Доля грузовых и автобусов в потоке	22	38	%
Средняя скорость потока	45	32	км/ч

Таблица 3 – Удельные выбросы загрязняющих веществ (г/км) для легкового автомобиля на равнинном и горном участках по трём методикам

Методика	CO, г/км	NOx, г/км	CO_2, г/км	PM, г/км	Прирост к равнинному участку
COPERT – равнина	1,42	0,31	168	0,018	–
COPERT – горы (Тоо-Ашуу)	2,05	0,56	241	0,027	NO_x + 82 %
EPA MOVES – равнина	1,38	0,29	171	0,017	–
EPA MOVES – горы (Тоо-Ашуу)	1,96	0,51	246	0,026	NO_x +76 %
НИИАТ – равнина	1,50	0,33	175	0,019	–
НИИАТ – горы (Тоо-Ашуу)	1,95	0,49	228	0,024	NO_x +48 %

Примечание. Расчёт выполнен для условного среднего легкового автомобиля экологического класса Евро-3/Евро-4 при указанных в таблице 2 параметрах участков; значения носят иллюстративный характер и предназначены для сопоставления чувствительности методик к факторам горного рельефа.

Результаты сравнительного расчёта. Расчёт удельных выбросов выполнен по трём рассмотренным методикам для легкового автотранспорта категории Евро-3/Евро-4 (наиболее массовая категория в составе парка республики) при движении на равнинном и горном участках. Результаты расчёта приведены в таблице 3.

Как видно из рисунка 1, наибольшую чувствительность к изменению продольного уклона демонстрирует методика COPERT, что объясняется явным учётом ускорения и удельной мощности в модальной функции выброса. Методика EPA MOVES показывает близкие, но систематически несколько заниженные значения прироста, что связано с усреднением модальных интервалов VSP. Коэффициентная методика НИИАТ показывает наименьший и практически линейный прирост, отражающий использование фиксированного табличного коэффициента K_2, не чувствительного к конкретному значению уклона [2, 6].

Для оценки влияния абсолютной высоты местности на выбросы CO построена модельная зависимость корректирующего коэффициента *K_в* от высоты (рисунок 2), основанная на обобщении данных о снижении плотности атмосферного воздуха и связанном с этим обеднении/переобеднении топливовоздушной смеси для карбюраторных и инжекторных двигателей без наддува.



Рисунок 1 – Расчётный прирост удельного выброса NO_x
в зависимости от продольного уклона дороги по трём методикам

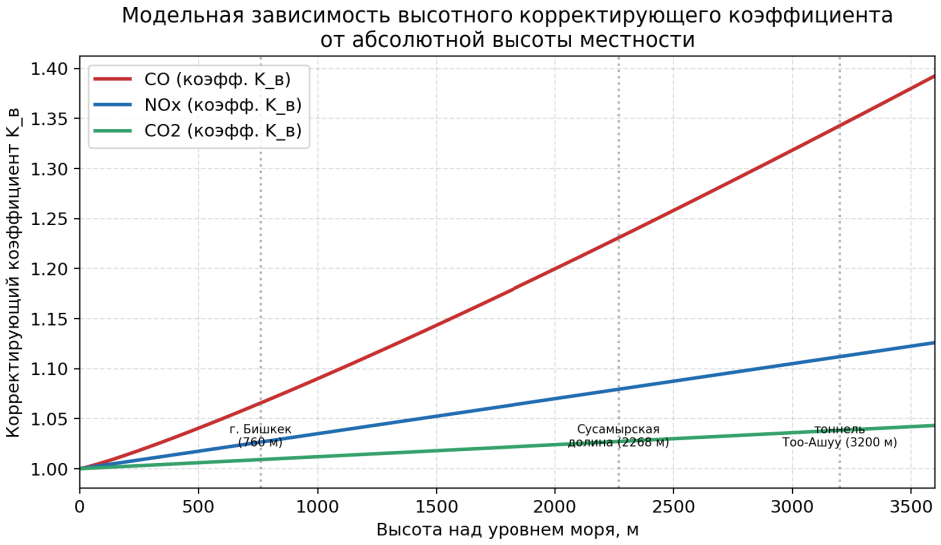


Рисунок 2 – Модельная зависимость высотного корректирующего коэффициента K_в
от абсолютной высоты местности для CO, NO_x и CO_2

Согласно представленной зависимости, при высоте тоннеля Тоо-Ашуу (около 3200 м) корректирующий коэффициент для CO может достигать значений 1,3–1,4, что подтверждается расхождением расчётных значений CO по трём методикам, приведённых в таблице 3, и указывает на необходимость введения аналогичной высотной коррекции во все три рассмотренные методики при их адаптации для условий Кыргызстана [7].

Результаты. Проведённый сравнительный анализ показывает, что ни одна из трёх рассмотренных методик в базовой (неадаптированной) версии не обеспечивает полного и совместного учёта факторов продольного уклона и абсолютной высоты местности, характерных для горных автодорог Кыргызстана. Методика EPA MOVES обладает наиболее подходящей структурой для адаптации благодаря явному включению угла уклона и плотности воздуха в формулу VSP, однако требует значительного объёма исходных данных (детальные профили скорости, характеристики парка), сбор которых в условиях Кыргызстана затруднён из-за отсутствия развитой системы мониторинга транспортных потоков [7, 8].

Методика COPERT является более реализуемой с точки зрения доступности исходных данных (усреднённая скорость потока, структура парка по экологическим классам), однако требует региональной калибровки коэффициента высотной коррекции $K_{выс}$, отсутствующего в базовой версии.

Коэффициентная методика НИИАТ, наиболее широко применяемая в практике природоохранных расчётов в Кыргызстане и странах СНГ, показывает наименьшую чувствительность к параметрам горного рельефа и, как следствие, наибольший риск занижения фактических выбросов на протяжённых горных участках с большими перепадами высот, что подтверждается систематически меньшим приростом расчётных значений NOx (48 % против 76–82 % по двум другим методикам) при сопоставимых исходных условиях [9, 10].

Полученные результаты позволяют сформулировать предложение о разработке комплексной методики расчёта выбросов для условий Кыргызстана, основанной на структуре COPERT (с учётом доступности исходных данных для республики) с введением двух дополнительных корректирующих коэффициентов – на продольный уклон конкретного участка дороги и на абсолютную высоту местности, – калиброванных по результатам натурных измерений на характерных горных участках республиканской дорожной сети.

Заключение

1. Сравнительный анализ трёх методик расчёта выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников – COPERT, EPA MOVES и методики НИИАТ – показал существенные различия в полноте учёта факторов горного рельефа: продольного уклона дороги и абсолютной высоты местности.

2. На примере участка автодороги Бишкек – Ош в районе перевала Тоо-Ашуу установлено, что при уклоне дороги 8–9 % и высоте около 3200 м расчётный прирост удельного выброса NO_x составляет от 48 % (методика НИИАТ) до 82 % (методика COPERT) относительно равнинных условий, что свидетельствует о высокой чувствительности результатов расчёта к выбору методики.

3. Наиболее пригодной для адаптации к условиям горного рельефа Кыргызстана по структуре расчёта признана методика EPA MOVES, однако с точки зрения практической реализуемости при существующем уровне транспортного мониторинга в республике более целесообразна адаптация методики COPERT с введением региональных коэффициентов высотной и уклонной коррекции.

4. Дальнейшие исследования должны быть направлены на проведение натурных измерений выбросов на характерных горных участках дорожной сети Кыргызстана с целью калибровки предложенных корректирующих коэффициентов и разработки национальной методики расчёта выбросов от передвижных источников, адаптированной к условиям горного рельефа.

Поступила: 25.06.2026; рецензирована: 09.07.2026; принята: 10.07.2026.

Литература

1. *Ntziachristos L., Samaras Z. et al*. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – Road transport: COPERT methodology. European Environment Agency, 2023. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023 (дата обращения: 07.07.2026).
2. U.S. Environmental Protection Agency. Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) – Technical Guidance: Using MOVES for Emission Inventory Preparation. EPA-420-B-20-011, 2021. URL: https://www.epa.gov/moves (дата обращения: 07.07.2026).
3. Методика проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу автотранспортными средствами (расчётным методом). НИИАТ, 2016.
4. ГОСТ Р 56163-2019. Выбросы загрязняющих веществ автомобильным транспортом. Методы определения. М.: Стандартинформ, 2019.
5. *Frey H.C., Unal A., Chen J.* Recommended Strategy for On-Board Emission Data Analysis and Collection for the New Generation Model // North Carolina State University, Raleigh, 2003. URL: https://projects.ncsu.edu (дата обращения: 07.07.2026).
6. *Bai S., Eisinger D., Niemeier D.* Traffic Emission Models: A Comparative Analysis of Modal and Average-Speed Models // Transportation Research Record. 2009. Vol. 2123. URL: https://journals.sagepub.com/home/trr (дата обращения: 07.07.2026).
7. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Кыргызской Республики / Министерство природных ресурсов, экологии и технического надзора КР. Бишкек, 2024.
8. Национальный статистический комитет Кыргызской Республики. Транспорт и связь Кыргызской Республики: статистический сборник. Бишкек, 2024.
9. *Смит Дж.* Влияние горного рельефа на удельные показатели расхода топлива и выбросов автотранспорта: обзор международного опыта / Дж. Смит, К. Ли // Транспорт: наука, техника, управление. 2022. № 4.
10. *Советбеков Б.* Экологическая безопасность автомобильного транспорта в условиях горных территорий Кыргызской Республики: проблемы и перспективы / Б. Советбеков // Вестник КРСУ. 2025. Т. 25. № 3.