

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

**К.А. Ростислав, Д. Ю. Евдокимов**

**Обзор подходов к эколого-экономическому моделированию и оценке  
эффектов от развития транспорта и транспортной инфраструктуры на  
экологические показатели территорий**

Москва 2023

**РОСТИСЛАВ** Ксения Аркадьевна, научный сотрудник, Лаборатория инфраструктурных и пространственных исследований ИПЭИ РАНХиГС  
**ЕВДОКИМОВ** Дмитрий Юрьевич, младший научный сотрудник, Лаборатория инфраструктурных и пространственных исследований ИПЭИ РАНХиГС

## **АННОТАЦИЯ**

В работе рассмотрены основные теоретические и эмпирические подходы к моделированию взаимодействия между социально-экономическими показателями и антропогенной нагрузкой на окружающую среду. В частности, наиболее распространенные подходы к измерению экологической нагрузки на территории и население – экологические модели IPAT, STIRPAT, моделирующие влияние социально-экономических характеристик на окружающую среду. Расширение моделей позволяет также учитывать характеристики транспортной отрасли и моделировать их влияние на объем выбросов от автомобильного транспорта. Согласно экономическим исследованиям, развитие автодорожной инфраструктуры оказывает двойственное влияние на экологию. Более совершенная инфраструктура может способствовать снижению выбросов от автотранспорта, но при этом её развитие также стимулирует экономическую активность и спрос на поездки, что увеличивает количество выбросов. Эффект снижения выбросов от развития автодорожной сети чаще наблюдается в регионах, где насыщенность инфраструктурой превышает уровень, необходимый для удовлетворения текущего, в т. ч. скрытого спроса на поездки. Таким образом, развитие автотранспортной инфраструктуры темпами, опережающими экономическое развитие региона, может способствовать снижению экологической нагрузки. В дополнение рассмотрены подходы к анализу причинно-следственных связей между переменными и оценки общего, прямого и косвенного влияния факторов на экологию: структурное моделирование и анализ путей на основе структуры простого ориентированного графа.

**Ключевые слова:** измерение экологической нагрузки, моделирование влияния объемов выбросов, экологические модели, эффекты от развития транспорта

The main theoretical and empirical approaches to modeling the interaction between socio-economic indicators and anthropogenic load on the environment are considered. The most common approaches to measuring the environmental load on territories and population are environmental models IPAT, STIRPAT, modeling the impact of socio-economic characteristics on the environment. Extension of the models also allows taking into account the characteristics of the transportation industry and modeling their impact on the volume of emissions from road transport. According to economic studies, road infrastructure development has a dual impact on the environment. While better infrastructure can help reduce emissions from road transport, it also stimulates economic activity and travel demand, which increases emissions. The emission reduction effect of road network development is more likely to be observed in regions where infrastructure saturation exceeds the level needed to meet current, including latent, travel demand. Thus, the development of road transport infrastructure at a pace that outpaces the economic development of the region can contribute to reducing the environmental burden. In addition, approaches to analyzing causal relationships between variables and assessing the overall, direct and indirect effects of factors on ecology are discussed: structural modeling and path analysis based on the structure of a simple directed graph.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Обзор подходов к моделированию взаимодействия между социально-экономическими показателями и антропогенной нагрузкой на окружающую среду .....	5
1.1 Экологические модели STIRPAT .....	5
1.2 Экологические модели причинно-следственных связей .....	14
1.3 Структурные экологические модели .....	16
2 Обзор подходов к оценке эффектов от развития транспорта и транспортной инфраструктуры на экологические показатели территорий .....	18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	27

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках исследования рассматриваются основные подходы к эколого-экономическому моделированию и оценке эффектов от развития транспорта и транспортной инфраструктуры на экологические показатели территорий.

В экономической литературе большое внимание уделяется моделированию взаимодействия между социально-экономическими показателями и антропогенной нагрузкой на окружающую среду. К наиболее известным подходам к измерению экологической нагрузки на территории и население относятся экологическая модель IPAT и её модификация STIRPAT. Вышеуказанные модели получили большое распространение в иностранной и отечественной литературе. Несмотря на ряд преимуществ, подходы имеют ряд ограничений: общая проблема моделей класса IPAT заключается в том, что они не учитывают причинно-следственные связи между переменными и пренебрегают ими.

В действительности факторы экологической нагрузки взаимодействуют между собой, т.е. оказывают взаимное влияние друг на друга. Ранние подходы к анализу причинно-следственных связей, как РОЕТ, также несовершенны: модельная структура, описываемая ими, на языке статистического моделирования не идентифицируема из-за большого числа избыточных связей и циклов. Для анализа причинно-следственных связей между переменными и оценки влияния факторов на экологию используется структурное моделирование и анализ путей на основе структуры простого ориентированного графа.

Эколого-экономические модели могут быть адаптированы для учета характеристик транспортной отрасли и моделирования их влияния на объем выбросов от автомобильного транспорта. Расширение моделей позволяет тестировать наличие нелинейной зависимости между уровнем экономического развития и экологической нагрузкой.

Обзор теоретических и эмпирических подходов к моделированию влияния транспорта и инфраструктуры показал, что развитие транспортной инфраструктуры оказывает комплексное влияние на окружающую среду и неразрывно связано с экономическим и социальным развитием территорий.

# 1 Обзор подходов к моделированию взаимодействия между социально-экономическими показателями и антропогенной нагрузкой на окружающую среду

## 1.1 Экологические модели STIRPAT

Для того, чтобы оценить и измерить экологическую нагрузку на территории и население, необходимо обратиться к моделям, которые описывают зависимости между населением, благосостоянием и воздействием на окружающую среду. К ним относятся экологические модели IPAT (Commoner, 1972 [1]; Ehrlich и Holdren (1972) [2]), STIRPAT (Dietz, Rosa, 1994 [3]), ImPACT (Waggoner, Ausubel, 2002 [4]).

Большое внимание в экологических моделях уделено влиянию на экологию роста численности населения и экономики и связанной с этим антропогенной нагрузки. Экологическое воздействие как результат жизнедеятельности человека пропорционально выше в многочисленных обществах [1]. Ehrlich и Holdren (1972) [2] отмечают, что рост численности населения вносит ощутимый вклад в ухудшение экологии и состояния окружающей среды. В дополнение в литературе рассматривается изменение технологических характеристик производств – удельной величины экологической нагрузки (воздействия на окружающую среду) на единицу выпуска [1]. На примере США Commoner (1972) [1] показал, что подъем экономики и производства, наблюдавшийся в стране в послевоенное время с 1946 года, сопровождался усугублением множественного числа экологических проблем: увеличением и накоплением в атмосфере тетраэтилсвинцовых соединений, содержащихся в автомобильном бензине, выбросами парниковых газов из-за чрезмерного применения азотных удобрений. Для расчетов удельной величины воздействия на окружающую среду на единицу выпуска использовалось математическое тождественное выражение, имеющее мультипликативную форму (1):

$$Impact = Population \cdot Affluence \cdot Technology, \quad (1)$$

Где *Impact* (*I*) – индекс воздействия на окружающую среду (процентное изменение);

*Population* (*P*) – численность населения;

*Affluence* (*A*) – доход / благосостояние / выпуск на душу населения;

*Technology* (*T*) – воздействие на единицу выпуска.

Каждая компонента выражения (*P*, *A*, *T*) имеет одинаковый вес, равный единице. Для оценки изменения воздействия на окружающую среду в расчете на единицу выпуска на примере потребления синтетических органических пестицидов Commoner (1972) [1] использовал данные о процентном изменении численности населения, производства сельскохозяйственных культур на душу населения, потребления синтетических органических пестицидов. Автор пришёл к выводу, что за период с 1950 года по 1967 год

потребление пестицидов на единицу выпуска ( $T$ ) выросло на 168%, т.к. потребление синтетических органических пестицидов выросло на 266% ( $I$ ), численность населения увеличилась на 30%, производство сельскохозяйственных культур на душу населения выросло на 5% (2). По аналогии было рассчитано воздействие на окружающую среду от накопления в атмосфере оксида азота (3) и тетраэтилсвинца (4) из-за увеличившейся интенсивности автомобильного движения. За период с 1947 года по 1967 год численность населения увеличилась на 41%, объем транспортной работы легкового пассажирского автотранспорта (число пройденных миль) в расчете на душу населения увеличился на 100%, объем выбросов в атмосферу оксида азота вырос на 630%, тетраэтилсвинца – на 415%. Как следствие, удельный объем выбросов оксида азота и тетраэтилсвинца в расчете на число автотранспортных средств вырос на 158% и 83% соответственно.

Так, разложение на составляющие и оценка вклада каждой компоненты показали, что наибольший вклад в величину экологической нагрузки вносило изменение технологических характеристик производств, нежели рост численности населения или выпуска. Повышение экологической нагрузки от автомобильного транспорта было связано, прежде всего, с увеличением числа регулярных маятниковых поездок населения из пригородов в города, а также повышением удельных выбросов из-за технологических изменений в конструкции двигателя, характеристиках химического состава используемого топлива.

$$3,66 = 1,3 \cdot 1,05 \cdot 2,68 \quad (2)$$

$$7,3 = 1,41 \cdot 2 \cdot 2,58 \quad (3)$$

$$5,15 = 1,41 \cdot 2 \cdot 1,83 \quad (4)$$

Ehrlich и Holdren (1972) [2] отмечают, что в случае одновременного увеличения численности населения и удельной величины воздействия на окружающую среду в расчете на душу населения общая экологическая нагрузка будет изменяться в несколько раз больше, чем первые два фактора, из-за мультипликативного эффекта (5)–(6).

$$I + \Delta I = (P + \Delta P) \cdot (F + \Delta F), \quad (5)$$

Где  $I$  – величина общего воздействия на окружающую среду;

$\Delta I$  – изменение величины общего воздействия на окружающую среду за некоторый период времени;

$P$  – численность населения;

$\Delta P$  – изменение численности населения;

$F$  – величина воздействия на окружающую среду в расчете на душу населения;

$\Delta F$  – изменение величины воздействия на окружающую среду в расчете на душу населения.

Формула для расчета относительного изменения (прироста) каждой компоненты принимает вид:

$$1 + \frac{\Delta I}{I} = \left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta F}{F}\right) \quad (6)$$

Так, при изменении потребления энергии (в исследовании [2] – показатель воздействия на окружающую среду) на 140% ( $\frac{\Delta I}{I} = 1,4$ ), численности населения – на 53% ( $\frac{\Delta P}{P} = 0,53$ ) в соответствии с (6) потребление энергии в расчете на душу населения увеличится на 56% ( $\frac{\Delta F}{F} = 0,56$ ). Это подтверждает, что изменение двух компонент тождества  $P$  и  $F$  приводит к более существенному – двукратному изменению  $I$ .

Несмотря на простоту уравнения и попытку систематизировать факторы экологического воздействия, сами авторы [2] отмечают, что сильным допущением в модели является независимость факторов друг от друга. Иными словами, изменения в численности населения не вызывают изменения в уровне благосостояния, а изменения в уровне доходов и благосостояния не вызывают изменения технологических характеристик производства и наоборот.

Мультипликативное выражение IPAT легло в основу тождества Кая (7), названного в честь японского экономиста Ёити Кая (Yoichi Kaya) [5]. Тождество Кая используется в эколого-экономическом анализе для декомпозиции вклада в объем выбросов каждой из четырех компонент (численность населения, подушевой доход, энергоёмкость и углеродоёмкость) (8) [6]. Метод используется для межстрановых и межвременных сравнений, а также для составления климатических прогнозов.

$$C = \frac{C}{E} \cdot \frac{E}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \cdot P, \quad (7)$$

$$\Delta C = \frac{C_t}{C_0} = \Delta P \cdot \Delta G \cdot \Delta EI \cdot \Delta CI, \quad (8)$$

Где  $C$  – объем выбросов углекислого газа ( $C_t$  – объем выбросов углекислого газа в конечном периоде времени  $t$ ,  $C_0$  – объем выбросов углекислого газа в начальном периоде времени 0);

$E$  – потребление энергии;

$GDP$  – валовой внутренний продукт (ВВП);

$P$  – численность населения;

$G$  – валовой внутренний продукт на душу населения;

$EI$  – энергоёмкость (величина потребленной энергии в расчете на ВВП);

$CI$  – углеродоёмкость (величина выбросов на единицу потребленной энергии);

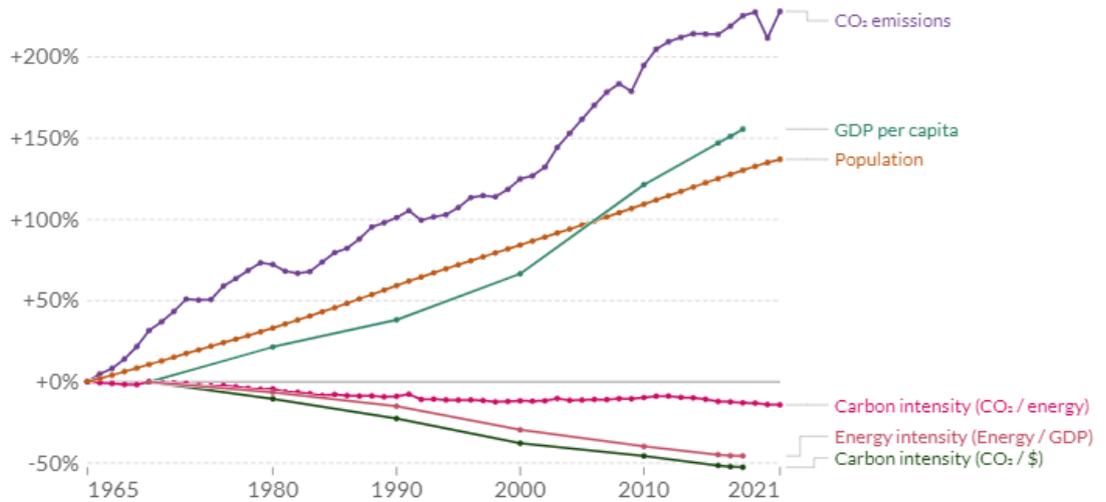
показатели в дельтах – отношение показателя в конечном периоде времени  $t$  к показателю в начальном периоде 0.

Совокупный вклад компонент – валового внутреннего продукта на душу населения и численности населения – в объем выбросов (воздействия на окружающую среду) в литературе носит название «эффект ВВП», а вклад углеродоемкости и энергоёмкости – «эффект структурных изменений» [7]. Через показатель углеродоемкости возможно оценить процесс декарбонизации – переход от ископаемых источников топлива к возобновляемым и более экологичным видам, через показатель энергоёмкости – повышение энергоэффективности производств, в том числе благодаря внедрению энергосберегающих технологий.

Объем выбросов загрязняющих веществ в мире отмечает устойчивый рост с 1965 года. Относительное изменение численности населения, валового внутреннего продукта на душу населения, энергоёмкости и углеродоемкости показано на рисунке 1. Основным фактором растущей экологической нагрузки в странах был рост ВВП. Вклад роста численности населения был долгое время преобладающим, но с 2000-х годов увеличение выбросов стало в большей степени объясняться экономическим ростом. Для того, чтобы компенсировать отрицательное воздействие на окружающую среду, страны стремились снижать показатели энергоёмкости – интенсивности потребленной энергии в расчете на ВВП и углеродоемкости – интенсивности выбросов на единицу потребленной энергии. В случае, если энергоёмкость и углеродоемкость снижались медленно или оставались на том же уровне, объем выбросов значительно рос [8].

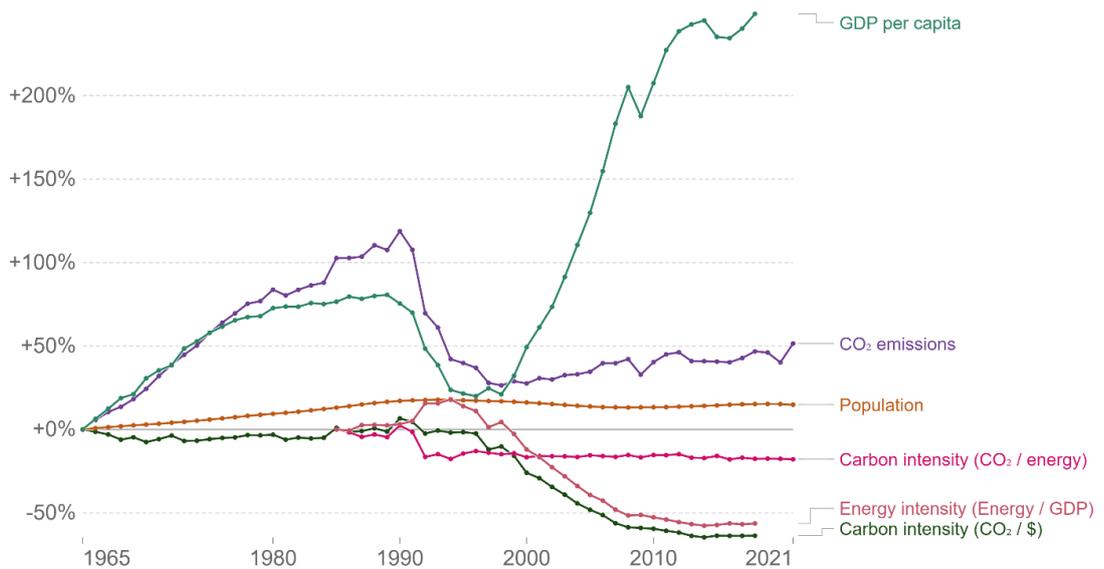
В России, как и в целом в мире, основной и значительный вклад в увеличение углеродного следа вносил рост ВВП на душу населения. Вклад роста численности населения и снижения углеродоемкости относительно других факторов были постоянны. С 2000-х годов в России отмечалось снижение показателя энергоёмкости, что отражает повышение энергоэффективности производств и рациональное потребление энергоресурсов

национальной экономикой. Общий объем выбросов углекислого газа в России отмечает умеренный рост, в значительной степени ниже показателя 1980-х годов (см. рисунок 2).



Примечание – Источник: [8].

Рисунок 1 – Динамика процентного изменения каждой из компонент тождества Кая для объема выбросов углекислого газа в мире, 1965–2021 гг.



Примечание – Источник: [8].

Рисунок 2 – Динамика процентного изменения каждой из компонент тождества Кая для объема выбросов углекислого газа в России, 1965–2021 гг.

Fan, Lei (2016) [9] расширили уравнение (7), включив в него характеристики транспортной отрасли: грузоёмкость экономики (отношение объемов транспортной работы – грузооборота к ВВП) и обратную ей величину – объем ВВП транспортной отрасли в расчете на единицу транспортной работы (9).

$$C = \sum_i C_i = \sum_i \frac{C_i}{E_i} \cdot \frac{E_i}{E} \cdot \frac{E}{GDP_{tr}} \cdot \frac{GDP_{tr}}{V} \cdot \frac{V}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \cdot P, \quad (9)$$

Где  $C$  – совокупный объем выбросов углекислого газа;

$C_i$  – объем выбросов углекислого газа из-за сгорания топлива  $i$  в результате транспортной работы;

$E$  – совокупный объем потребления первичной энергии;

$E_i$  – объем потребления топлива  $i$ ;

$GDP$  – валовой внутренний продукт;

$P$  – численность населения;

$GDP_{tr}$  – валовой внутренний продукт транспортной отрасли;

$V$  – объем транспортной работы;

$\frac{C_i}{E_i}$  – коэффициент выбросов углекислого газа топлива  $i$ ;

$\frac{E_i}{E}$  – коэффициент потребления топлива  $i$  в общем объеме потребления, отражающий структуру потребления энергии;

$\frac{E}{GDP_{tr}}$  – коэффициент потребления энергии на единицу ВВП транспортной отрасли;

$\frac{GDP_{tr}}{V}$  – ВВП транспортной отрасли на единицу транспортной работы;

$\frac{V}{GDP}$  – коэффициент интенсивности транспортной работы (грузоёмкости экономики)

– объем транспортной работы к ВВП;

$\frac{GDP}{P}$  – валовой внутренний продукт на душу населения.

В работе Zhu, Du (2019) [6] анализ декомпозиции факторов, влияющих на выбросы углерода от автомобильного транспорта в странах Азиатско-Тихоокеанского региона в 1990–2016 гг., показал, что существенный вклад в рост экологической нагрузки вносило увеличение объемов производства. Кроме того, дополнительное влияние оказывал рост численности населения, в то время как изменения энергоёмкости и грузоёмкости экономики в большинстве стран отрицательно влияли на выбросы. В Китае и России повышение энергоёмкости было основным фактором, влияющим на снижение выбросов углерода от автомобильного транспорта. В большей степени рост грузоёмкости экономики оказывал воздействие на окружающую среду в Индии. Значительный рост обрабатывающего производства и повышение уровня жизни населения привели к увеличению трафика автотранспорта, в результате чего темп роста объемов автомобильных грузовых и пассажирских перевозок превышал темп роста ВВП.

Waggoner и Ausubel (2002) [10] сформулировали модель ImPACT для анализа влияния как на агрегированном национальном, так и на более дезагрегированном уровне – уровне отдельных отраслей. В качестве факторов экологического воздействия анализируются те же показатели, что в исходной модели и в тождестве Кая, но

энергоёмкость рассматривается как фактор, характеризующий поведение потребителей, а углеродоёмкость – производителей (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Описание факторов, используемых в модели ImPACT

Показатель	Характеристика
Im	Выбросы
P	Численность населения
A	ВВП на душу
C	Потребление энергии в расчете на ВВП
T	Выбросы на единицу потребленной энергии
A*C	Потребление энергии на душу населения
P*A*T	Производство ВВП и выбросов на единицу потребленной энергии
P*A*C	Потребление энергии
P*A	ВВП
C*T	Выбросы на единицу ВВП

Примечание – Источник: [4].

Залог устойчивой экологической повестки, по мнению исследователей, – поощрение производителей к снижению воздействия производственных процессов на окружающую среду, а потребителей – к умеренному потреблению энергетических ресурсов.

Ограничения вышеперечисленных моделей (в сущности, тождеств) IPAT, ImPACT в том, что они не пригодны для тестирования и проверки гипотез о (немонотонной и непропорциональной) взаимосвязи между антропогенными факторами и воздействиями на эмпирических данных, т.к. предполагают эти связи заданными в рамках модели. Так, первоначальной идеей этих моделей был расчет – выведение неизвестной величины T из тождества IPAT при известном значении компонент P, A, I [11]. Кроме того, существенным ограничением моделей является прямая пропорциональность всех факторов и переменной воздействия: при увеличении численности населения на 10% объем выбросов возрастет на 10%, при увеличении экономического благосостояния на 10% объем выбросов также возрастет на 10% [12]. В действительности рост численности населения не ведет к пропорциональному росту объема выбросов. Тем более влияние роста численности населения на экологию не аналогично влиянию роста экономического благосостояния. Этот вывод подтверждается на реальных данных, которые мы рассматривали в рамках тождества Кая. Как известно из гипотезы экологической кривой Кузнеца, экономическое благосостояние может оказывать как непропорциональное влияние на экологическую нагрузку, так и немонотонное, когда увеличение благосостояния может фактически приводить к уменьшению воздействия на окружающую среду [12].

Rosa и Dietz (1998) [12] сформулировали функциональную (стохастическую) форму тождества – модель STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology) для проверки статистических гипотез о связи между антропогенными движущими силами и воздействием на окружающую среду. Она сохраняет мультипликативную форму, как и предшествующая ей модель IPAT, не усложняя вид

первоначальной экологической модели, позволяет систематизировать связи между переменными в математической функциональной форме (10).

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (10)$$

Где  $I$  – воздействие на окружающую среду;

$P$  – численность населения;

$A$  – доход / благосостояние / выпуск на душу населения;

$T$  – воздействие на единицу выпуска;

$a, b, c, d$  – параметры,

$e$  – величина остатка в модели.

В модели IPAT предполагается, что  $a = b = c = d = e = 1$ , в модели STIRPAT эти коэффициенты оцениваются с помощью регрессионного анализа.

Логарифмическое преобразование даёт вид модели (11):

$$\log(I) = a + b \log(P) + c \log(A) + d \log(T) + e \quad (11)$$

Преимуществом модели STIRPAT является её гибкость и применимость к широкому кругу переменных, характеризующих воздействие на окружающую среду (выбросы углекислого газа, вырубка лесов и др.). Расширения модели позволяют учесть неоднородное влияние факторов во времени и между странами / регионами. В модели STIRPAT в качестве фактора  $T$  могут быть выбраны любые характеристики, влияющие на состояние окружающей среды, кроме численности населения и подушевого дохода.

В эмпирической литературе экологическая модель STIRPAT нашла широкое применение. Она используется в качестве базового эмпирического уравнения для оценки влияния факторов на экологическую составляющую.

В работе Liu и Xiao (2018) [13] на основе модели STIRPAT проводилось тестирование экологической гипотезы Кузнецца о наличии обратной U-образной зависимости между уровнем доходов на душу населения и объемом выбросов углекислого газа. Авторы учитывали пространственную неоднородность экологической нагрузки в провинциях: уровень загрязнения выше в центральной и западной частях Китая по сравнению с восточной, что связано не только с быстрым экономическим подъемом и развитием этих территорий, но и большей сосредоточенностью в них населения и месторождений топливно-энергетических ресурсов. Авторы расширяют исходную модель, добавляя дополнительные факторы, характеризующие структуру потребления видов топлива, инвестиционную активность провинций и добавленную стоимость сферы услуг.

Polloni-Silva et al. (2021) [14] на региональных данных по 27 штатам Бразилии оценили модель STIRPAT для изучения взаимосвязи между экономическим ростом и выбросами CO<sub>2</sub>. В зависимости от уровня доходов разбили штаты на три группы: бедные, среднего уровня доходов, богатые. Наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают наиболее богатые и наиболее бедные штаты. В течение исследуемого периода: с 2006 года по 2015 год в Бразилии численность населения выросла на 9,5%, а реальный ВВП на душу населения вырос на 23,4%, что привело к значительному увеличению потребления домохозяйствами электроэнергии и товаров длительного пользования, потребляющих электроэнергию. Экономика страны, напротив, проходила через этап деиндустриализации. Авторы предполагают, что в случае снижения общей доли промышленности в объеме ВВП использование этого показателя в качестве технологического параметра T в модели STIRPAT неинформативно. Общее влияние всех процессов, в том числе повышение энергоёмкости производств (вероятно, вследствие неэффективности текущей политики по энергосбережению), привело к повышению экологической нагрузки на территорию из-за снижения производительности и технологической эффективности.

Anser (2019) [15] для случая Пакистана оценили уравнение STIRPAT с использованием модели с распределенным лагом и модели коррекции ошибок. Автор пришел к выводу, что факторами, способствовавшими росту выбросов углерода, были рост благосостояния и численности населения, повышение потребления ископаемых видов топлива, урбанизация населения. Примечательно, что государственные меры по борьбе с бедностью также способствовали росту выбросов, т.к. стимулировали потребление недорогих ископаемых видов топлива. Напротив, потребление возобновляемых источников энергии снижает объем выбросов, а значит, может быть рекомендовано в качестве меры по повышению экологической устойчивости.

Модель STIRPAT также составляет методологическую основу отечественных эколого-экономических исследований. Например, в работе Шкиперов, Лукашова, Дружинин (2015) [16], основываясь на модельном подходе STIRPAT при выборе факторов, авторы строят эмпирическую экологическую модель влияния социально-экономических и технологических характеристик на уровень выбросов в РФ и Киргизии. Авторы рассматривают расширенную версию модели STIRPAT, включив в неё кроме численности городского населения, объема и структуры ВВП показатели динамики промышленного производства, уровня урбанизации, энергопотребления (потребления электричества в форме валового показателя и на единицу ВВП), экспорта (валового и в расчете на ВВП), доли экспорта топливно-энергетических ресурсов. Определено, что рост ВВП, объема промышленного производства, потребления энергии и доли добычи полезных ископаемых вел к росту уровня загрязнений (воздуха и сточных вод). Демографические показатели оказались незначимыми для динамики уровня загрязнения окружающей среды в России, в то время как для случая Киргизии наблюдалась связь между этими показателями. Авторы также оценивали функции загрязнения для учета структурных сдвигов в экономике и модернизации производств.

Особый интерес вызывает моделирование технологического фактора в модели STIRPAT. В статье Мариев, Давидсон, Борзова (2021) [17] для анализа детерминант экологической нагрузки, измеряемой уровнем выбросов в атмосферу на душу населения (от промышленных источников, но не от транспорта), в качестве показателей технологии используются доля городского населения, потребление электроэнергии на душу населения, подушевой объем прямых иностранных инвестиций, среднесуточная температура в январе и производство подушевого объема затрат на технологические инновации и доли городского населения. Авторы приходят к выводу, что технологические затраты положительно влияют на состояние окружающей среды, в то время как рост уровня урбанизации, напротив, создаёт нагрузку на экологию в регионах.

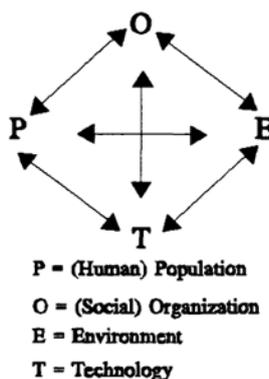
## 1.2 Экологические модели причинно-следственных связей

Общая проблема моделей класса IPAT заключается в том, что они не учитывают причинно-следственные связи между переменными и пренебрегают ими. Упрощенные модели, где влияние одного фактора выражается через влияние других, не могут должным образом оценить связи между факторами и мерой экологического воздействия на окружающую среду. В действительности факторы экологической нагрузки (или как их еще называют в литературе «движущие силы») взаимодействуют между собой, т.е. оказывают взаимное влияние друг на друга. Из-за того, что существуют взаимозависимости между факторами, величина их истинного влияния на экологическую нагрузку не может быть

оценена вычитанием других переменных из математического уравнения, как в модели IPAT, поэтому необходима более сложная системная (структурная) модель.

Экологическая модель должна описывать сложную систему из взаимосвязанных элементов – факторов, оказывающих влияние на окружающую среду напрямую и косвенно через другие элементы (блоки). К числу моделей, описывающих причинно-следственные взаимосвязи между социально-экономическими показателями и антропогенной нагрузкой на окружающую среду, относятся ранние экологические модели POET (Duncan, 1961) [18] и PISTOL (Bailey, 1990) [19].

Причинно-следственная модель POET была сформулирована как результат описания взаимосвязей между системой социально-экономических и экологических показателей. В частности, модель была предложена Duncan [18], описавшему структурные связи между показателями, характеризующими население (P), социальную организацию (O), окружающую среду (E) и технологии (T), на примере экологического загрязнения воздуха в Лос-Анджелесе во времена Первой мировой войны. Модель состоит из четырех компонент, заглавные буквы названия которых образуют название модели (см. рисунок 3).



Примечание – Источник: [18].

Рисунок 3 – Графическое представление экологической модели POET

Связи между компонентами модели были определены эмпирическим путем – на основе наблюдений. Автор приводит иллюстративное описание, что жители Лос-Анджелеса стали сталкиваться с эпизодами голубовато-серого тумана в атмосфере, который уменьшал видимость и вызывал раздражение глаз и дыхательных путей  $E \rightarrow P$ . Смог повреждал новые растения  $E \rightarrow E$ , из-за растрескивания резины вследствие испарений ускорялся износ автомобильных шин  $E \rightarrow T$ . В ответ были назначены инициативные группы и организации, общественные движения по борьбе со смогом  $E \rightarrow O$ .

Так как в то время мало было известно об источниках загрязнения, был утвержден орган государственного контроля за загрязнением воздуха в Лос-Анджелесе, исполнявший функции регулятора и исследовательского центра. По инициативе этого органа на всех промышленных предприятиях были установлены устройства (датчики) по снижению

выбросов  $O \rightarrow T$ . Химические исследования в свою очередь подтверждали связь между горением на фабриках и выбросами несгоревших углеводородов и оксидов азота  $T \rightarrow E$ .

Провоцирующим накопление смога фактором были метеорологические условия: окруженность горами, низкая средняя скорость ветра, неподвижный теплый воздух под воздействием солнца, как следствие, химические реакции, высвобождение озона, образование смога  $E \rightarrow E$ .

Кроме того, было обнаружено, что выхлопные газы автомобилей являются основными источниками загрязняющих веществ, вызывающих образование смога  $T \rightarrow E$ . Усилил экологическую проблему быстрый рост численности горожан, числа автомобилей – основного средства передвижения  $P \rightarrow E$ . Как следствие, были созданы научно-исследовательские организации, нацеленные на изучение вопросов и мер по снижению загрязненности воздуха, принят закон об оснащении автомобилей каталитическими нейтрализаторами и глушителями выхлопных газов, форсажными камерами  $O \rightarrow T$ .

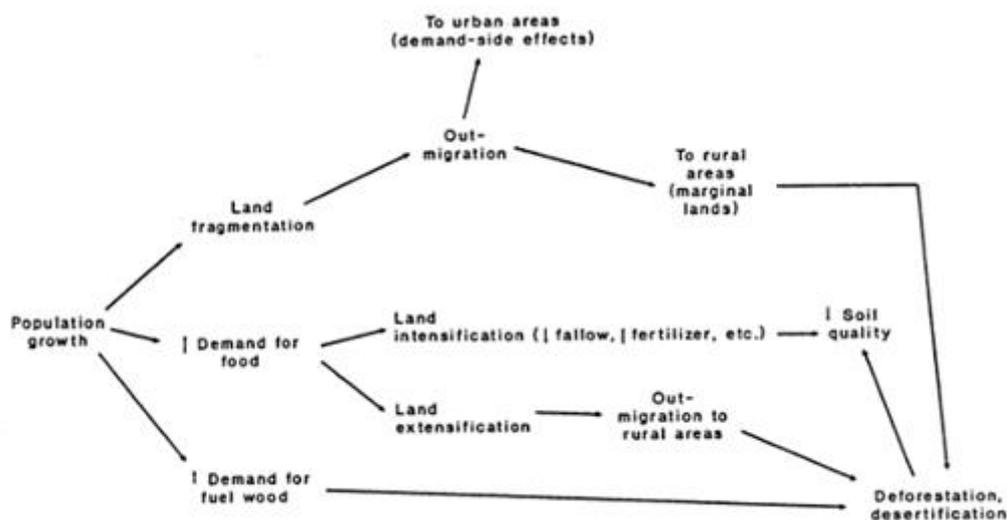
Bailey [19] предложил расширить модель РОЕТ, включив в неё такие факторы, как информация (описывает культуру, религию, науку), пространство (характеристики территории проживания населения), качество жизни и окружающей среды, которые, по его мнению, были пропущены в модели РОЕТ. При этом модель подходит для описания как связей на макроуровне (всего общества), так и на микроуровне (отдельного индивида). Автор также допускает двунаправленные причинно-следственные связи (А влияет на Б, Б влияет на А).

Важно отметить, что обе модели позволяют рассмотреть проблему с учетом причинно-следственных взаимосвязей, но также имеют ограничения, в частности проблему переоценивания факторов. В моделях все компоненты связаны друг с другом, в результате чего структура на языке статистического моделирования не идентифицируема (число переменных системы меньше числа уравнений, а значит, система переопределена и может не иметь решений). Кроме того, существует проблема взаимного одновременного влияния факторов на окружающую среду: движущие силы влияют на экологию, а экология в свою очередь влияет на них. Одновременное влияние целевой переменной на факторы, которые влияют на целевую переменную, также ведет к проблемам идентификации.

### 1.3 Структурные экологические модели

Идея представлять связи между экологическим воздействием и факторами в виде простого ориентированного графа – структуры, состоящей из вершин и ребер (путей между ними) была описана в работе Bilsborrow (1992) [20]. Автор представил и описал, что существуют различные пути влияния факторов на экологию. В частности, демографический рост населения оказывал влияние на вырубку лесов не только через миграцию в сельскую местность, но и через рост потребления тепловой энергии и

продовольствия и связанными с этим изменениями в экстенсивном и интенсивном землепользовании (см. рисунок 4). В отличие от графических представлений в моделях РОЕТ и PISTOL в этой модели нет избыточных связей и циклов и, как правило, нет проблемы переопределенности системы.



Примечание – Источник: [20].

Рисунок 4 – Графическое представление причинно-следственных связей между ростом численности населения и воздействием на окружающую среду

Подход к анализу причинно-следственных связей применялся при моделировании влияния сельской миграции на экологию (Qin, 2010) [21], а также влияния автомобилизации на экономическое развитие и экологию города (Wang, Lu, Peng, 2008) [22]. Структурное моделирование для анализа причинно-следственных связей между характеристиками транспортной инфраструктуры и экологией использовалось в работах Chen, Lei (2017) [23] и Ou, Zheng, Nam (2022) [24]. Подробнее эти работы, посвященные непосредственно моделированию влияния развития транспортной инфраструктуры на уровень выбросов от передвижных источников, будут рассмотрены в следующей части раздела (1.3).

Среди отечественных исследований также встречаются работы, использующие методологию структурного моделирования для анализа связей между эколого-экономическими показателями. В частности, в статье Иванова (2018) [25] строится структурная модель регионального промышленного комплекса, связывающая показатели выпуска с экологическим ущербом от производства на примере Самарской области. Результат моделирования показал, что существует прямая зависимость уровня загрязнения окружающей среды от улучшения экономической ситуации в регионе: рост выпуска энергии ведет к росту выбросов загрязняющих веществ. Работа Диденко, Скрипнюк (2017) [26] предлагает структурный подход к построению модели окружающей среды, состоящей из семи взаимозависимых уравнений – ADL-моделей (моделей авторегрессии и

распределённого лага). Авторы оценивают качество окружающей среды показателями выбросов углекислого газа в расчете на единицу выпуска продукции, выбросов от промышленных источников и сельского хозяйства, изменения глобальной температуры, истощения запасов пресной воды, сокращения площади лесов, экономического ущерба от климатологических катастроф.

Для изучения причинно-следственных взаимосвязей используются и другие подходы, кроме структурного моделирования. Так, Ильичев и др. (2021) [27] на примере Орловской области изучали причинно-следственную связь между приростом численности населения и выбросами загрязняющих веществ на урбанизированных территориях (от промышленных источников и автомобильного транспорта) с помощью имитационного моделирования. Исследователи посмотрели на другой аспект взаимосвязи, а именно – влияние экологической нагрузки на демографические показатели, и обнаружили, что ухудшение показателей качества окружающей среды приводит не только к сокращению численности населения, но и воздействует на здоровье и репродуктивную способность населения. Результаты анализа и оценки одновременных уравнений показали положительную зависимость объема выбросов от объемов производства (добавленной стоимости) транспортной отрасли и коммуникаций и отрицательную зависимость – от увеличения протяженности дорожной сети. К сокращению выбросов от промышленности приводил также рост показателя оборота железнодорожных перевозок.

## **2 Обзор подходов к оценке эффектов от развития транспорта и транспортной инфраструктуры на экологические показатели территорий**

Развитие автотранспортной инфраструктуры оказывает комплексное влияние на окружающую среду. Развитие транспортной инфраструктуры приводит к росту количества транспорта и поездок, что негативно сказывается на экологической обстановке, кроме того, сам процесс строительства транспортной инфраструктуры оказывает мощное негативное влияние на экологию. Однако развитие транспортной инфраструктуры неразрывно связано с экономическим и социальным развитием территорий, поэтому от него невозможно отказаться. Поэтому определение каналов влияния автотранспортной инфраструктуры на экологию для их последующего государственного регулирования в целях минимизации ущерба является одной из задач экологической политики.

Одними из основных механизмов влияния автотранспортной инфраструктуры на экологию являются расширение автотранспортной инфраструктуры, изменение конфигурации автотранспортной инфраструктуры, а также влияние некоторых характеристик автотранспорта на экологическую нагрузку и способы их регулирования.

Предполагается, что строительство как один из процессов расширения инфраструктурных объектов может рассматриваться как инвестиция с отрицательной

стоимостью для экологии, поскольку непосредственно во время строительства, а также производства и доставки материалов и оборудования выделяется повышенное количество загрязняющих веществ во все элементы биосферы, включая выбросы загрязняющих веществ и углекислого газа в атмосферу.

В работах [28] и [29] с использованием разных методологических подходов рассматривается широкий спектр экологических проблем, включая проблемы связанные с ущербом экологии при строительстве инфраструктурных проектов, а также косвенные эффекты, возникающие, например, при производстве цемента, необходимого для строительства. Как и в ряде других работ, исследователи подтверждают тезис о негативном влиянии на экологию самого процесса строительства инфраструктурных объектов, а также широкого круга сопутствующих процессов, также оставляющих свой собственный экологический след (производство материалов для строительства, доставка материалов, работа строительной техники, генерация электроэнергии).

В работе [30] представлено исследование влияния дорожных заторов, пробок на выбросы CO<sub>2</sub> дорожным транспортом на примере региона Мумбай. Авторы определили, что выбросы CO<sub>2</sub> в регионе, рассчитанные на основе фактического потребления топлива автотранспортом, на 53% выше, чем расчетное значение, полученное на основе оценок пробега транспорта в регионе. Авторы определили величину индекса заторов в 1,51, что говорит об увеличении времени перемещения из точки А в точку Б в среднем на 51% из-за несоответствия интенсивности транспортных потоков в регионе и пропускной способности автодорожной инфраструктуры, ввиду чего образуются пробки, оказывающие существенное влияние на время в пути и количество потребленного топлива относительно потенциальных значений. Таким образом, авторы заключают, что увеличенное на 51% ввиду заторов время в пути может приводить к росту выбросов CO<sub>2</sub> на 53%.

В работе [5] авторы анализируют возможные сценарии мер долгосрочных политик, направленных на снижение выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта до 2025 г. Рассматривается четыре основных сценария: переход на экологический стандарт Евро-6, увеличение средней скорости движения внутри городов за счет повышений ограничений, увеличение доли общественного транспорта в структуре поездок, увеличение доли электромобилей и гибридных автомобилей. Результаты сценарного анализа показывают, что применение стандарта Евро-6 значительно снижает объем выбросов парниковых газов, а совместно с параллельным ускоренным переходом на электромобили – уровень выбросов парниковых газов может достичь целей Парижской соглашения по климату (2015 г.). Увеличение доли общественного транспорта на 10% (за счет снижения доли индивидуальных поездок на автомобилях) позволяет снизить выбросы на 3%. Увеличение скорости городского движения на 10 км/ч может снизить выбросы на 1,38%.

Повышение скорости городского движения, в приведенном исследовании, моделируется через повышение разрешенной скорости движения, однако этот эффект может возникнуть и при повышении фактической средней скорости передвижения. Таким образом, снижение заторов и перегруженных трафиком дорог в городе также способствует снижению выбросов парниковых газов, поэтому сокращение разрыва между номинальной (разрешенной) скоростью передвижения в городе и фактической – является одним из инструментов городской экологической политики. Следует отметить, что снижение заторов, может быть компенсировано большим объемом транспорта, так как снижение издержек на поездку, повышает спрос на нее. Данный эффект может компенсировать позитивный эффект от снижения пробок на экологию.

Для учета характеристик транспортной отрасли и моделирования их влияния на объем выбросов от автомобильного транспорта используется модификация представленной модели STIRPAT.

В работе Andres, Padilla (2017) [31] в модели учтены доли всех видов транспорта и доли всех источников энергии в общей используемой энергии, а также влияние разных факторов на выбросы: численности населения, экономической активности, объемов перевозок и характеристик транспортной деятельности. Результаты моделирования влияния факторов оказались разными для Западной и Восточной Европы. Так, переход с автомобильного на железнодорожный транспорт на 1% сократит транспортные выбросы в обоих регионах (в среднем на 0,528%), но величина эффекта выше для стран, относящихся к западному сегменту ЕС (2,851%), чем для стран восточного сегмента (0,444%). Главная причина заключается в том, что использование нефтепродуктов в качестве источника энергии в железнодорожном транспорте ниже в западной части ЕС (30,0%), чем в восточной части (45,4%). В результате проведенного анализа получены следующие основные выводы. Рекомендуется активно заменять нефтепродукты на электроэнергию и возобновляемые источники энергии, в силу их большого вклада в снижение транспортных выбросов. Для Восточной Европы отмечается, что наблюдался необычайный рост владения и использования частных автомобилей, что отрицательно влияло на объемы выбросов. Оговаривается, что в большей степени на экологическую нагрузку от транспорта в ЕС влиял рост численности населения и транспортной энергоемкости по сравнению с ростом объемов экономической деятельности. Авторы поддерживают рекомендации «Белой книги по транспорту» (2011) [32], направленные на то, чтобы снизить количество выбросов от транспортной деятельности на 60% к 2050 г. по сравнению с 1990 годом. В частности, рекомендации затрагивают постепенное снижение числа автомобилей, работающих на традиционном топливе, замещение 50% автомобильного транспорта железнодорожным и водным.

В работе Rasool, Zaidi, Zafar, 2019 [33] для Пакистана модель STIRPAT использовалась для анализа влияния факторов на уровень выбросов загрязняющих веществ от транспортного сектора – второго по степени воздействия на окружающую среду после промышленного сектора. В фокусе исследования – изучение роли таких факторов, как протяженность автомобильных дорог, энергоёмкость, стоимость нефти и численность населения, в повышении экологической нагрузки в стране. Дополнительно с использованием методов анализа временных рядов авторы оценивают краткосрочную и долгосрочную зависимость между переменными. Результаты показали, что строительство и расширение дорожной инфраструктуры с течением времени приводит к повышению объемов выбросов. Подобный вывод был сделан и для показателя численности населения. Рост обоих показателей: численности населения, протяженности автомобильных дорог ведут к увеличению уровня автомобилизации населения и числа автотранспортных средств на дорогах, что является одним из основных источников загрязнения атмосферы. К похожим выводам пришли исследователи в работе Xie, Fang, Liu (2017) [34], изучив влияние транспорта на уровень выбросов в 283 городах Китая с 2003 года по 2013 год. В качестве базового подхода использовалась та же экологическая модель STIRPAT, но с динамической компонентой (временным лагом зависимой переменной).

Wu et al. (2021) [35] смотрели на другой аспект: экологические эффекты перехода транспорта на потребление возобновляемой энергии. Исследователи определили, что именно наращивание доли возобновляемой энергии в потреблении транспорта и снижение зависимости от ископаемого топлива будут основными факторами сокращения объемов выбросов в ближайшие десятилетия.

В исследовании по ЮАР Oladunni, Mrofu, Olanrewaju (2022) [36] определили, что главные компоненты модели STIRPAT – рост численности населения и экономический рост оказывают существенное воздействие на окружающую среду, а все другие факторы так или иначе влияют на экологическую нагрузку через них. Эффективная транспортная инфраструктура, напротив, снижает объем выбросов (хорошие дороги снижают количество заторов и транспортные издержки). Авторы определили несколько каналов влияния развития транспортной инфраструктуры на снижение экологической нагрузки: положительное влияние на качество окружающей среды оказывают распространение автомобилей с более низким коэффициентом расхода топлива и внедрение современных систем железнодорожного транспорта.

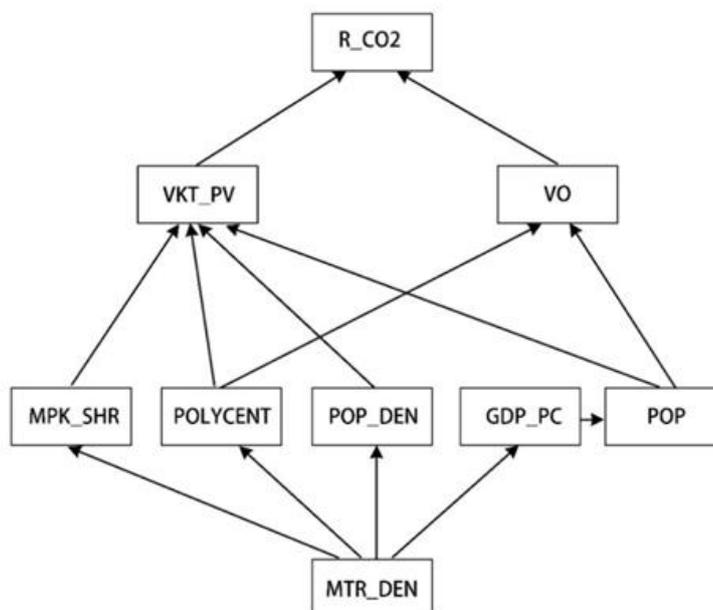
Интересное направление: связь между взиманием дорожных и транспортных сборов и уровнем выбросов от автотранспорта, – представлено в работе Cavallaro, Giaretta, Nocera (2018) [37]. Рассматривались различные схемы транспортных сборов: плата в зависимости от расстояния, уровня загрузки и заторов, а также от манеры вождения и пробега (англ.,

pay-as-you-drive). Опираясь на результаты симуляций и наблюдений за действующими схемами сборов в Лондоне, Милане, Калифорнии и городах Нидерландов, авторы подтверждают эффективность данных мер по снижению экологической нагрузки: их внедрение позволяет добиться в отдельных случаях 10%-сокращения выбросов углерода. Наиболее эффективна с точки зрения снижения экологической нагрузки от автотранспорта схема взимания платы за передвижение в зависимости от уровня загрузки и заторов, к чему относится также плата за доступ в перегруженные центральные части городов. Исследователи предлагают осуществлять привязку дорожных сборов к экологическим классам транспортных средств (типу двигателя, массе ТС и др.), что сделает экономическую политику и транспортное регулирование более эффективными и ориентированными на повышение экологичности транспорта.

Одним из подходов к анализу эффектов от развития транспорта и транспортной инфраструктуры на экологические показатели территорий является структурное моделирование, используемое для анализа причинно-следственных связей между переменными [23]; [24]. В статье Chen, Lei (2017) [23] для анализа причинно-следственных связей между переменными и оценки общего, прямого и косвенного влияния факторов на выбросы от автомобильного транспорта в Пекине используется структурное моделирование. В основе – анализ путей (комбинация факторного анализа и модели одновременных уравнений). Цель исследования заключалась в получении оценки причинно-следственной связи между переменной (источника) воздействия и результатом воздействия. Согласно структурному подходу, каждому пути, состоящему из одного или нескольких ребер графа, соответствует структурное уравнение, оценить которое можно с помощью уравнения регрессии. Оценка регрессии в случае линейной модели – коэффициент корреляции. Косвенное влияние получается путем перемножения прямых эффектов в составе одного причинно-следственного пути. Авторы оценили систему структурных уравнений и пришли к выводу, что ключевыми факторами в снижении объема выбросов были снижение энергоемкости и интенсивности транспортной работы. Рост численности населения оказывает как прямое (через увеличение потребления энергии и числа автотранспортных средств), так и косвенное (через повышение энергоемкости и интенсивности транспортной работы) влияние на рост уровня выбросов загрязняющих веществ.

Ou, Zheng, Nam (2022) [24] изучали влияние городского железнодорожного транспорта на выбросы углекислого газа в 90 городах Китая в 2015 году с помощью структурного моделирования. Ребра графа, соединяющие источник воздействия (плотность городской железнодорожной сети) и результат воздействия (выбросы углекислого газа), составляют 6 различных путей (см. рисунок 5). Авторы оценили эластичность для каждой

пары вершин, соединенных ребром, рассчитав влияние источника воздействия на результат воздействия путем перемножения эластичностей для каждого ребра в составе пути. Кроме того, оценив уравнение, включающее все переменные, авторы получили оценку прямого влияния плотности железнодорожной сети на выбросы (-0,0175).



#### Примечания

1 Источник: [24];

2 R\_CO2 – выбросы углекислого газа, VKT\_PV – объем транспортной работы в км на один автомобиль, VO – число собственных автомобилей, MPK\_SHR – Доля железных дорог в общей протяженности (%), POLYCENT – полицентричность города, POP\_DEN – плотность городского населения, GDP\_PC – среднедушевой доход, POP – численность городского населения, MTR\_DEN – плотность железнодорожной сети.

Рисунок 5 – Графическое представление причинно-следственных связей между плотностью железнодорожной сети и уровнем выбросов углекислого газа

В России было опубликовано достаточно мало исследований, посвященных моделированию факторов воздействия на окружающую среду от автомобильного транспорта. К исключениям относится работа Зиязова (2021) [38]. В данной работе были проанализированы данные по 56 городам России с населением более 300 тыс. человек за 2013–2018 годы. В результате для выбросов от нестационарных источников (семь загрязнителей) не было обнаружено подтверждения экологической кривой Кузнеца, была получена N-образная связь. Зависимости исследовались для выделенных 3 групп городов с точки зрения численности населения. Была исследована зависимость выбросов от таких факторов, как численность населения (+, значительный положительный эффект), плотность населения (+ для крупных городов), плотность дорожной сети (- для крупных городов),

количество автозаправочных станций на душу населения, доля аграрного сектора, природоохранные затраты на душу населения и стоимость бензина (-).

В статье Чмыхалова (2011) [39] проводится экологическая оценка рабочих процессов автотранспорта: производительности, расхода топлива, выбросов и токсичности отработавших газов; сравниваются характеристики автотранспортных средств. При одинаковой нагрузке автомобили с бензиновым двигателем расходуют в 1,4 раза больше топлива, чем автомобили с дизельным топливом. Снижение экономичности расходования топлива и экологичности автотранспортных средств в городских условиях связано с особенностями перевозочного процесса, в частности с вынужденными остановками на светофорах и в пробках, возникающих на участках автомобильных дорог с недостаточной пропускной способностью, а также с движением на неэкономичных скоростях и длительной работой двигателя в режиме холостого хода. Предлагаются комплексные меры по снижению отрицательного воздействия автомобильного транспорта на окружающую среду, в частности через улучшение экологических характеристик топлива и автотранспортных средств, качества дорожного покрытия, увеличение протяженности дорог, строительство развязок и магистралей, улучшение организации дорожного движения в городских условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно экономическим исследованиям, посвященным изучению вопросов экологии и транспорта, развитие автодорожной инфраструктуры оказывает двойственное влияние на экологию. Более совершенная инфраструктура может способствовать снижению выбросов от автотранспорта, но при этом её развитие также стимулирует экономическую активность и спрос на поездки, что увеличивает количество выбросов. Эффект снижения выбросов от развития автодорожной сети чаще наблюдается в регионах, где насыщенность инфраструктурой превышает уровень, необходимый для удовлетворения текущего, в т. ч. скрытого спроса на поездки. Таким образом, развитие автотранспортной инфраструктуры темпами, опережающими экономическое развитие региона, может способствовать снижению экологической нагрузки.

В рамках исследования были рассмотрены основные теоретические и эмпирические подходы к моделированию взаимодействия между социально-экономическими показателями и антропогенной нагрузкой на окружающую среду. Наиболее распространенные подходы к измерению экологической нагрузки на территории и население – экологические модели IPAT, STIRPAT и др., моделирующие влияние социально-экономических характеристик на окружающую среду. Модель STIRPAT может быть адаптирована для учета характеристик транспортной отрасли и моделирования их влияния на объем выбросов от автомобильного транспорта. Расширение моделей позволяет также тестировать наличие нелинейной зависимости между уровнем экономического развития и экологической нагрузкой. Экологические модели также составляют методологическую основу отечественных исследований, посвященных изучению и оценке экологической нагрузки преимущественно от промышленных источников загрязнения.

Однако вышеуказанные экологические модели имеют ряд ограничений, в частности не учитывают причинно-следственные взаимосвязи между переменными. Экологическим моделям причинно-следственных связей уделяется сравнительно меньшее влияние. Ранние подходы к анализу причинно-следственных связей также несовершенны: модельная структура, описываемая ими, на языке статистического моделирования не идентифицируема из-за большого числа избыточных связей и циклов. Для анализа причинно-следственных связей между переменными и оценки общего, прямого и косвенного влияния факторов на экологию, в частности выбросы от автотранспорта, используется структурное моделирование и анализ путей на основе структуры простого ориентированного графа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Препринт подготовлен на основе материалов научно-исследовательской работы, выполненной в соответствии с Государственным заданием РАНХиГС при Президенте Российской Федерации на 2023 год

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Commoner B., "The Environmental Cost of Economic Growth," *Population, resources, and the environment*, Vol. 3, 1972. P. 339.
2. Ehrlich P., Holdren J., "Impact of population growth," *Population, resources, and the environment*, Vol. 3, 1972. pp. 365-377.
3. Dietz T., Rosa E. A., "Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology," *Human ecology review*, Vol. 1, No. 2, 1994. pp. 277-300.
4. Waggoner P. E., Ausubel J. H., "A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 99, No. 12, 2002. pp. 7860-7865.
5. Kaya Y. et al. (ed.). *Environment, energy, and economy: strategies for sustainability*. Tokyo: United Nations University Press, 1997. pp. 16-26.
6. Zhu C., Du W., "A research on driving factors of carbon emissions of road transportation industry in six Asia-Pacific countries based on the LMDI decomposition method," *Energies*, Vol. 12, No. 21, 2019. P. 4152.
7. Bersalli G., Tröndle T., Lilliestam J., "Most industrialised countries have peaked carbon dioxide emissions during economic crises through strengthened structural change," *Communications earth & environment*, Vol. 4, No. 1, 2023. P. 44.
8. Ritchie H., Roser M., Rosado P. CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions // OurWorldInData.org. 2020. URL: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
9. Fan F., Lei Y., "Decomposition analysis of energy-related carbon emissions from the transportation sector in Beijing," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 42, 2016. pp. 135-145.
10. Waggoner P. E., Ausubel J. H., "A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 99, No. 12, 2002. pp. 7860-7865.
11. York R., Rosa E. A., Dietz T., "STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts," *Ecological economics*, Vol. 46, No. 3, 2003. pp. 351-365.
12. Rosa E. A., Dietz T., "Climate change and society: Speculation, construction and scientific investigation," *International sociology*, Vol. 13, No. 4, 1998. pp. 421-455.
13. Liu D., Xiao B., "Can China achieve its carbon emission peaking? A scenario analysis based on STIRPAT and system dynamics model," *Ecological indicators*, Vol. 93, 2018. pp. 647-657.

14. Polloni-Silva E. et al., "The drivers of energy-related CO<sub>2</sub> emissions in Brazil: a regional application of the STIRPAT model," *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28, No. 37, 2021. pp. 51745-51762.
15. Anser M. K., "Impact of energy consumption and human activities on carbon emissions in Pakistan: application of STIRPAT model," *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, No. 13, 2019. pp. 13453-13463.
16. Шкиперова Г. Т., Лукашова И. В., Дружинин В. П., "Сравнительный анализ влияния экономики на окружающую среду в странах с разным уровнем развития," *Экономический анализ: теория и практика*, Т. 25, № 424, 2015. С. 20-31.
17. Мариев О. С., Давидсон Н. Б., Борзова И. А., "Моделирование влияния урбанизации на загрязнение атмосферы в российских регионах," *Журнал экономической теории*, Т. 18, № 4, 2021. С. 627-641.
18. Duncan O. D., "From social system to ecosystem," *Sociological Inquiry*, Vol. 31, No. 2, 1961. pp. 140-149.
19. Bailey K. D., "From POET to PISTOL: Reflections on the ecological complex," *Sociological Inquiry*, Vol. 60, No. 4, 1990. pp. 386-394.
20. Bilsborrow R. E., "Population growth, internal migration, and environmental degradation in rural areas of developing countries," *European Journal of Population/Revue européenne de Démographie*, 1992. pp. 125-148.
21. Qin H., "Rural-to-urban labor migration, household livelihoods, and the rural environment in Chongqing Municipality, Southwest China," *Human Ecology*, Vol. 38, 2010. pp. 675-690.
22. Wang J., Lu H. U., Peng H., "System dynamics model of urban transportation system and its application," *Journal of Transportation Systems engineering and information technology*, Vol. 8, No. 3, 2008. pp. 83-89.
23. Chen W., Lei Y., "Path analysis of factors in energy-related CO<sub>2</sub> emissions from Beijing's transportation sector," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 50, 2017. pp. 473-487.
24. Ou Y., Zheng J., Nam K. M., "Impacts of Urban Rail Transit on On-Road Carbon Emissions: A Structural Equation Modeling Approach," *Atmosphere*, Vol. 13, No. 11, 2022. P. 1783.
25. Иванова Д. В., "Системный анализ и моделирование экологической эффективности региональной энергетики на примере Самарской области," *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*, Т. 4, № 60, 2018. С. 6-18.

26. Диденко Н. И., Скрипнюк Д. Ф. Моделирование окружающей среды // Экономика, экология и общество России в 21-м столетии. Санкт-Петербург. 2017. С. 368-380.
27. Ильичев В. А. и др., "Модель демографического прироста населения региона," *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*, № 3, 2021. С. 3-13.
28. Zhu , Dabo G., Wei W., and et al., "Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China," *Nature*, No. 524, 2015. pp. 335–338.
29. Shabanzadeh-Khoshrody M., Azadi H., Khajooeipour A., and Nabavi-Pelesaraei A., "Analytical investigation of the effects of dam construction on the productivity and efficiency of farmers," *Journal of Cleaner Production*, No. 135, 2016. pp. 549 - 557.
30. Bharadwaja S., Ballare S., Rohit, and Chandel M. Impact of congestion on greenhouse gas emissions for road transport in Mumbai metropolitan region // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. C. No. 25. pp. 3542–3555.
31. Andres L., Padilla E., "Driving factors of GHG emissions in the EU transport activity," *Transport Policy*, No. 61, 2018. pp. 60-74.
32. White paper. Roadmap to a Single European Transport Area – towards a Competitive and Resource Efficient Transport System. COM/2011/0144 final // European Commission. 2011. URL: [http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011\\_white\\_paper\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011_white_paper_en.htm)
33. Rasool Y., Zaidi S. A. H., Zafar M. W., "Determinants of carbon emissions in Pakistan’s transport sector," *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, 2019. pp. 22907-22921.
34. Xie R., Fang J., Liu C., "The effects of transportation infrastructure on urban carbon emissions," *Applied Energy*, Vol. 196, 2017. pp. 199-207.
35. Wu R. et al., "The drivers of declining CO2 emissions trends in developed nations using an extended STIRPAT model: A historical and prospective analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 149, 2021. P. 111328.
36. Oladunni O. J., Mpofu K., Olanrewaju O. A., "Greenhouse gas emissions and its driving forces in the transport sector of South Africa," *Energy Reports*, Vol. 8, 2022. pp. 2052-2061.
37. Cavallaro F., Giaretta F., Nocera S., "The potential of road pricing schemes to reduce carbon emissions," *Transport Policy*, Vol. 67, 2018. pp. 85-92.
38. Зиязов Д.С. Взаимосвязь между загрязнением атмосферного воздуха от автомобильного транспорта и социально-экономическим развитием крупных городов России // Сборник статей по материалам XVII Осенней конференции молодых ученых в новосибирском Академгородке. 2021.

39. Чмыхалова С. В., "Ресурсно-экологическая оценка автомобильного транспорта крупных городов," *Транспорт на альтернативном топливе*, Т. 3, № 21, 2011. С. 55-60.