
Влияют ли технологические инновации на выбросы CO₂? Анализ межстрановых панельных данных.

Наталья Апанасович, Татьяна Апанасович, 2023

BEROC Green Economy Paper Series, WP no. 32

В статье представлены результаты эмпирического анализа влияния технологических инноваций на выбросы углекислого газа (CO₂) используя регрессионный анализ панельных данных по 83 странам за три десятилетия. Предложенные в работе гибридные модели позволили улучшить оценки и снизить стандартные ошибки. Для устранения неоднородности и мультиколлинеарности, которые обусловлены разнообразием страновых данных, было использовано разделение стран на три группы по уровню валового национального дохода (ВНД). Полученные результаты подтверждают важность рассмотрения уровней доходов и их взаимозависимость с расходами на R&D при обсуждении экологической политики. В странах с уровнем дохода ниже среднего наблюдается ограниченное влияние R&D на загрязнение, в то время для стран с доходом выше среднего и высоким уровнем – существенное влияние.

Ключевые слова: технологические инновации, выбросы CO₂, регрессионный анализ панельных данных, экологическая политика.

1 Введение

Деятельность человека за последние несколько десятилетий способствовала возникновению экологических проблем, в частности увеличению выбросов углекислого газа (CO₂). Последствия увеличения выбросов CO₂, такие как глобальное потепление и изменение климата, стимулировали исследования, направленные на понимание причин и потенциальных способов решения этой проблемы.

Согласно теории эндогенного экономического роста, увеличение инвестиций в знания и технологические инновации повышает эффективность экономического производства и использования ресурсов (Romer, 1990). Экологи часто утверждают, что экономический рост необходимо сдерживать, поскольку увеличение доходов населения происходит за счет ухудшения состояния окружающей среды. Тем не менее более высокий уровень экономического развития не обязательно означает более сильное негативное воздействие на окружающую среду в долгосрочной перспективе, а при определенных условиях может способствовать улучшению качества окружающей среды (Churchill et al., 2019; Ahmed et al., 2016). Поэтому взаимосвязь между технологическими инновациями, экономическим ростом и выбросами CO₂ была предметом обширных исследований на уровне компаний и стран (Gonenc & Poleska, 2022; Chen & Lee, 2020; Cheng et al., 2021; Avenyo & Tregenna, 2022).

Технологические инновации включают в себя разработку и применение новых технологий, а также модификацию существующих производственных процессов (Oslo Manual, 2018). А одним из основных источников технологических инноваций, как подчеркивается в Руководстве Осло (2018) является научно-исследовательская и опытно-конструкторская деятельность (R&D). Под R&D понимается творческая и систематическая работа, проводимая для расширения знаний и разработки новых приложений в различных областях науки и техники, что требуют объективного улучшения характеристик продукта или способа его производства (Oslo Manual, 2018).

Можно выделить ряд наиболее значимых исследований, которые анализируют механизм влияния технологических инноваций на выбросы CO₂ в широком спектре стран. Chen & Lee (2020) исследуют влияние технологических инноваций на выборке из 96 стран за период 1996-2018 гг. Полученные результаты свидетельствуют о том, что чем выше уровень глобализации в стране, тем больше влияние технологических инноваций на сокращение выбросов CO₂. Cheng et al. (2021) анализируют, как развитие технологических инноваций снижает выбросы CO₂ в 35 странах ОЭСР за 1996–2015 годы, используя подход панельной квантильной регрессии. Эмпирические результаты показывают, что технологические инновации сокращают выбросы CO₂. Однако это влияние неоднородно по анализируемым квантилям.

Avenyo & Tregenna (2022) изучают влияние технологической интенсивности на выбросы CO₂ в развивающихся странах в период 1990-2016 годов. Эмпирические результаты показывают, что средне- и высокотехнологичные обрабатывающие отрасли связаны с более низкими выбросами углекислого газа, чем низкотехнологичные отрасли. Эти результаты позволяют предположить, что переход к более технологичным производственным процессам может стать экологически устойчивым путем индустриализации для развивающихся стран. Petrović & Lobanov (2020) изучили влияние расходов на R&D (% от ВВП) на выбросы CO₂ в 16 странах

ОЭСР за период 1981-2014 гг. Результаты исследования показывают, что более высокие расходы на R&D сокращают выбросы CO₂. Однако это не относится примерно к 40% стран. Churchill et al. (2019) изучили влияние затрат на R&D на выбросы CO₂ в странах «Большой семерки» за период с 1870 по 2014 год с использованием непараметрической модели панельных данных. Авторы обнаружили, что зависимость между R&D и выбросами CO₂ менялась с течением времени и в основном была отрицательной.

Взаимосвязь между загрязнением окружающей среды и экономическим ростом, часто называемая экологической кривой Кузнеца (ЭКК), стала предметом обширных исследований (Grossman & Krueger 1991, Dinda, 2004; Harbaugh et al., 2002). Доказательства наличия U-образной связи между деградацией окружающей среды и экономическим ростом были представлены в литературе (Shahbaz & Sinha, 2018; Dong et al., 2019; Munir et al., 2020). Теория ЭКК предполагает, что по мере роста дохода на душу населения деградация окружающей среды сначала увеличивается, но затем достигает определённой точки, после которой она начинает снижаться. Интерес вызывает регрессионная модель стохастического взаимодействия показателей STIRPAT. Эту модель можно рассматривать как аналитический инструмент, который основывается на концепции ЭКК, предоставляя комплексную основу для оценки взаимосвязи между воздействием на окружающую среду и набором переменных-предсказателей, включая доход, население и технологии (Hashmi & Alam, 2019; 2022; York et al., 2003; He et al., 2020; Zhang et al., 2017). Модель позволяет количественно оценить относительную важность каждой переменной. Были проведены также исследования, которые включают дополнительные факторы, влияющие на воздействие на окружающую среду, такие как объем инвестиций (Shahbaz et al., 2019; 2020; Zhao et al., 2016), международная торговля (Бенто и Моутинью, 2016), импорт и экспорт (Wang and Ang, 2018; Haug and Ucal, 2019; Muhammad et al., 2020), плотность населения и урбанизация.

Представленное в настоящей статье исследование направлено на изучение сложной взаимосвязи между расходами на R&D и выбросами CO₂ с использованием регрессионного анализа панельных данных. Анализ охватывает обширный набор данных, включающий 83 страны в различных регионах за значительный временной промежуток в три десятилетия. В панельный регрессионный анализ дополнительно включены ковариаты, которые тесно связаны с выбросами CO₂. Это включение имеет значение для контроля факторов, которые потенциально могут исказить истинную взаимосвязь между расходами на R&D и уровнями загрязнения. К тому же использование ковариат не только усиливает содержательное описание предложенной модели, но и защищает от проблем, связанных с эндогенностью.

Наше исследование также содержит два новаторских методологических подхода. Во-первых, применяется подход, основанный на данных, для классификации стран на более однородные группы на основе уровня валовой национальной доход (ВНД). Во-вторых, предлагается гибридная модель, которая объединяет элементы универсальной модели, применимой ко всем группам, с отдельными моделями, адаптированными к каждой однородной подгруппе. Эти методологические инновации позволяют получить более детальное понимание взаимосвязи между расходами на R&D, экономическим развитием и загрязнением окружающей среды в странах с различным уровнем доходов.

Данная статья построена следующим образом. В разделе 2 представлена теоретическая модель исследования и описываются используемые данные. В разделе 3 содержится методология получения оценок, а также обсуждаются эмпирические результаты. Раздел 4 включает итоги проведенного исследования.

2 Данные и модель

2.1 Общие положения

Экономический рост и научно-технологическая деятельность могут служить факторами, различающими страны по уровню загрязнения окружающей среды, в частности по выбросам CO₂ на душу населения. Более высокие уровни экономического роста, как правило, связаны с увеличением промышленной деятельности и энергопотребления, что может привести к увеличению выбросов CO₂. С другой стороны, страны, которые инвестируют больше средств в R&D, часто сосредотачиваются на разработке более чистых технологий и внедрении устойчивых практик, что может привести к снижению выбросов CO₂. Таким образом, изучение взаимосвязи между экономическим ростом и технологическими инновациями дает представление о том, как страны могут различаться с точки зрения принимаемых мер по сокращению выбросов CO₂ на душу населения.

2.2 Описание данных и переменных

Были проанализированы данные по 83 странам за период с 1996 по 2019 год включительно. Страны с низкими доходами по классификации Всемирного банка в 2022 году были исключены из анализа. В качестве показателя технологических инноваций используются расходы на R&D (Chen & Lee, 2020; Petrović & Lobanov, 2020; Avenyo & Tregenna, 2022).

В таблице 1 представлено описание переменных, используемых в исследовании. Выбросы CO₂ на душу населения служат зависимой переменной, в то время как независимые переменные включают расходы на R&D, показатели экономического развития, торговли, потребления возобновляемой энергии, городского населения, потребления энергии и др. Перед подгонкой модели мы применили логарифмические преобразования ко всем переменным, кроме МНТ и Urban. Эти преобразования были направлены на решение проблем гетероскедастичности и нормализацию распределения переменных.

Таблица 1. Описание переменных

Переменная	Описание
CO2	Выбросы CO2 (метрические тонны выбросов на душу населения)
GDP	ВВП на душу населения, ППС (в текущих межд. долл. США)
RD	Расходы на R&D (% ВВП)
Trade	Торговля (% ВВП)
RenEn	Потребление возобновляемой энергии (% от общего потребления энергии)
MHT	Доля добавленной стоимости средне- и высокотехнологичных отраслей промышленности (% от всей добавленной стоимости в промышленности)
Urban	Городское население (% от общей численности населения)
EnUse	Потребление энергии (кг нефтяного эквивалента на душу населения)

Основные данные для исследования взяты из базы данных Всемирного банка международной статистики глобального развития¹ (WDI). Данные об энергетике взяты из Статистического обзора мировой энергетики², а данные по расходам на R&D после 2014 года представлены Институтом статистики ЮНЕСКО³.

Таблица 2 содержит сводные статистические характеристики переменных модели, которые включают минимальные и максимальные значения, 25-й и 75-й процентиля, средние значения, стандартные отклонения, асимметрию и эксцесс. Стоит отметить, что на относительно высокий эксцесс логарифмически преобразованной переменной RenEn в первую очередь влияют несколько экстремальных значений. В целом, логарифмическое преобразование успешно улучшило симметрию того, что изначально было распределением с перекосом вправо.

Таблица 2. Описательная статистика переменных

	Min	1st Qu.	Med	Mean	3rd Qu.	Max	Skewness	Kurtosis
GDP	5.55	8.24	9.24	9.15	10.25	11.73	-0.34	2.35
Trade	2.90	4.01	4.34	4.35	4.72	6.08	0.19	3.36
RenEn	-4.61	1.69	2.60	2.35	3.32	4.25	-1.56	7.48
MHT	0.04	26.92	44.48	43.15	59.14	85.39	-0.15	2.10
Urban	18.26	57.40	68.64	68.60	80.18	100.00	-0.39	2.89
RD	-4.13	-1.11	-0.34	-0.75	0.50	1.63	-0.55	2.92
EnUse	7.76	9.67	10.24	10.17	10.74	12.06	-0.35	2.90
CO2	-7.70	-5.89	-5.19	-5.36	-4.80	-3.67	-0.54	2.68

¹ www.datatopics.worldbank.org/world-development-indicators

² www.ourworldindata.org/energy. Retrieved on June 20th, 2023

³ www.uis.unesco.org. Retrieved on June 20th, 2023

2.3 Классификация по уровню благосостояния

На основе существующей литературы, в которой подчеркиваются значительные различия между странами с разным уровнем экономического развития, особенно в контексте нашего исследования взаимосвязи между расходами на R&D и уровнями CO₂ (Cheng et al., 2021; Chen & Lee, 2020; Petrović & Lobanov, 2020; Avenyo & Tregenna, 2022), было принято решение классифицировать страны на отдельные группы на основе ВНД. Эта категоризация служит двум основным целям: 1) повышение однородности групп для улучшения качества оценок и 2) решение потенциальной проблемы мультиколлинеарности, учитывая наблюдаемую корреляцию между GDP и RD. Кроме того, первоначальный анализ выявил серьезные опасения по поводу потенциальной мультиколлинеарности с коэффициентом корреляции 0,6682 между GDP и RD при рассмотрении всего набора данных.

Для разделения стран на отдельные группы применялся Mclust метод из пакета R, который использует итерационный алгоритм для оценки параметров смешанной модели (Scrucca et al., 2016; Fraley & Raftery, 2002). Эти параметры включают количество кластеров, их средние значения, ковариации и пропорции. Алгоритм максимизации ожидания (Expectation-Maximization – EM) используется для максимизации вероятности наблюдаемых данных с учетом параметров модели. Метод Mclust определяет оптимальное количество кластеров и распределяет наблюдения по соответствующим группам. В результате проведенного анализа получены конкретные пороговые значения для определения уровней благосостояния на основе медианных значений ВНД.

Для выделения уровней благосостояния мы установили следующие критерии: высокий уровень благосостояния (H) соответствует верхнему распределению, значения из нижнего распределения ниже среднего относятся к группе нижнего среднего уровня благосостояния (LM), а значения выше среднего - к группе верхнего среднего уровня благосостояния (UM). Пороговые значения следующие: значения ниже 8,41 по медианной шкале ВНД с логарифмическим преобразованием классифицируются как уровень благосостояния ниже среднего (LM). Значения между 8,41 и 10,15 по медианной логарифмически преобразованной шкале ВНД попадают в уровень благосостояния выше среднего (UM). Значения выше 10,15 по медианной логарифмической шкале ВНД относятся к категории высокого (H) уровня благосостояния. Используя эти пороговые значения, мы можем различать разные уровни благосостояния и получить представление об экономическом неравенстве между странами. Список стран по уровням благосостояния представлен в таблице 4.

Таблица 4. Список стран

Кластер	Страны
Высокий	Австралия, Австрия, Бельгия, Канада, Дания, Финляндия, Франция, Германия, Ирландия, Израиль, Италия, Япония, Кувейт, Люксембург, Нидерланды, Новая Зеландия, Норвегия, Сингапур, Испания, Швеция, Швейцария, Великобритания, США
Выше среднего	Аргентина, Беларусь, Бразилия, Болгария, Чили, Коста-Рика, Хорватия, Куба, Кипр, Эстония, Греция, Венгрия, Казахстан, Республика Корея, Латвия, Литва, Малайзия, Мальта, Маврикий, Мексика, Панама, Польша, Португалия, Румыния, Российская Федерация, Саудовская Аравия, Словацкая Республика, Словения, ЮАР, Уругвай
Ниже среднего	Алжир, Армения, Азербайджан, Босния и Герцеговина, Китай, Колумбия, Эквадор, Арабская Республика Египет, Сальвадор, Грузия, Гватемала, Индия, Индонезия, Исламская Республика Иран, Ирак, Кыргызская Республика, Молдова, Монголия, Марокко, Мьянма, Северная Македония, Пакистан, Парагвай, Перу, Филиппины, Шри-Ланка, Таиланд, Тунис, Украина, Узбекистан

Корреляции между GDP и RD в подгруппах для уровней благосостояния Н, УМ и LM составили 0,1478, 0,2649 и -0,0785 соответственно. Эти значения представляют собой значительное снижение по сравнению с общей корреляцией 0,6682 по всему набору данных. Это сокращение предполагает, что разделение данных на более однородные группы частично смягчило проблему мультиколлинеарности между GDP и RD.

Блочная диаграмма переменных по трем уровням благосостояния представлена на Рисунке 1. На графике представлена медиана, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки. Расстояния между различными частями блочной диаграммы позволяют определить степень разброса (дисперсии) и асимметрии данных.

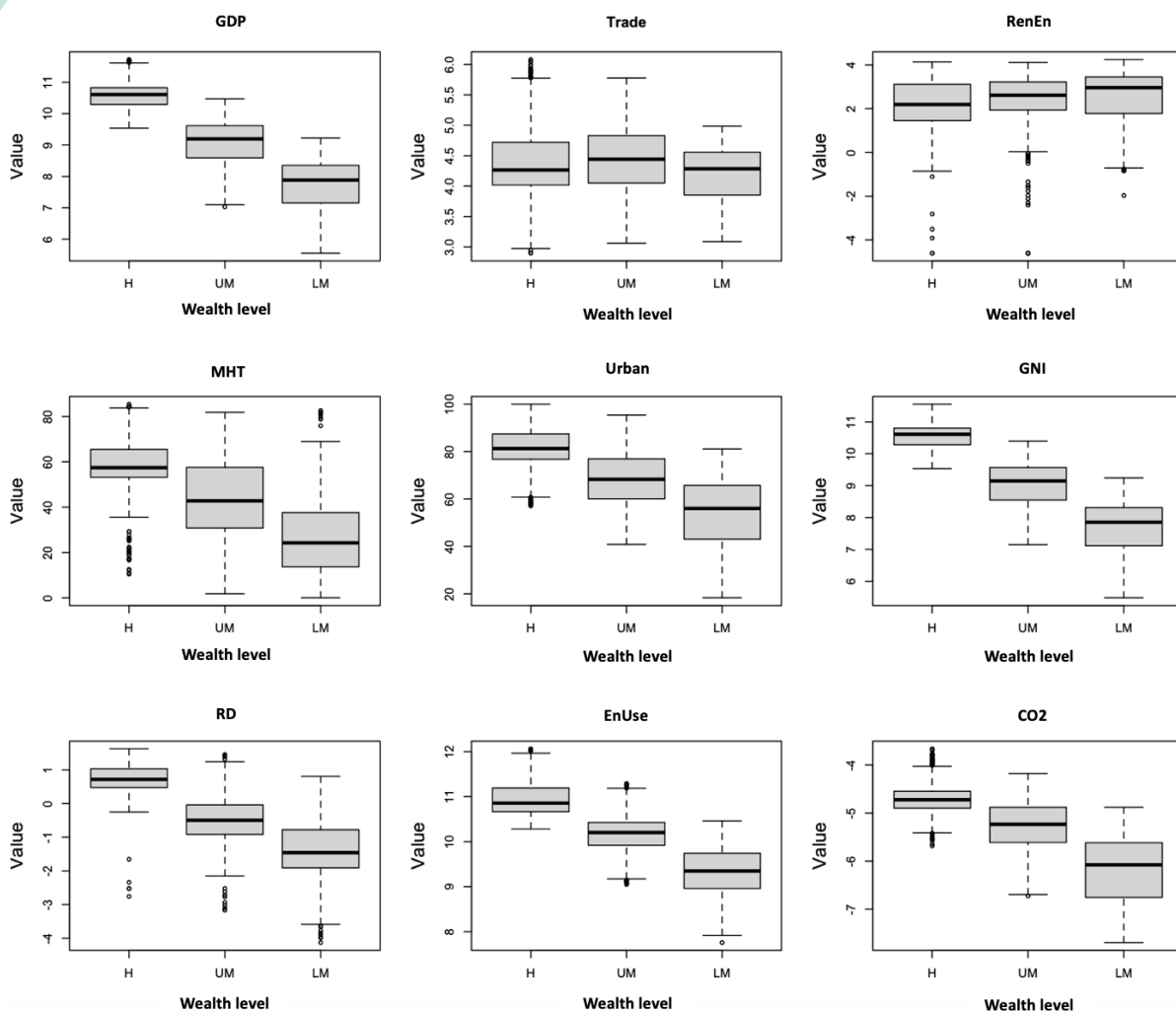


Рисунок 1. Блочная диаграмма переменных по трем уровням благосостояния

2.3 Описание модели

Общее уравнение, описывающее взаимосвязь между независимыми и выходной переменной, выглядит следующим образом:

$$CO2 = \beta_0 + \beta_1 GDP + \beta_2 RD + \beta_3 GDP * RD + \beta_4 RD^2 + \beta_5 GDP^2 + \beta_6 Trade + \beta_7 RenEn + \beta_8 MHT + \beta_9 Urban + \beta_{10} EnUse + \varepsilon. \quad (1)$$

Показатели $\beta_0, \dots, \beta_{10}$, используемые в уравнении (1), являются параметрами оцениваемой модели. В уравнение включены квадратичные члены GDP^2 и RD^2 , чтобы учесть возможную нелинейность и немонотонность. Кроме того, здесь также присутствует слагаемое ($\beta_3 GDP * RD$), отражающее взаимодействие между GDP и RD. Это слагаемое помогает оценить, зависит ли влияние технологических инноваций на выбросы CO2 от уровня GDP или наоборот. Последнее даст возможность

провести более детальный анализ и выявить любые синергетические или антагонистические эффекты влияния между R&D и ВВП на выбросы CO₂.

Мы предполагаем, что богатство и экономический рост страны могут влиять на взаимосвязь между расходами на исследования и выбросами CO₂. Однако заметная корреляция между GDP и RD создает проблему в оценке вклада каждой ковариаты в результат. Кроме того, мультиколлинеарность, если она присутствует, может скрыть разделение между основными эффектами и эффектами взаимодействия. Поэтому создание однородных групп на основе одной ковариаты может уменьшить мультиколлинеарность внутри каждой подгруппы. Эта стратегия способствует более четкой интерпретации взаимосвязи между оставшейся ковариатой и зависимой переменной.

В статье предлагается основанный на данных подход для классификации стран по уровням благосостояния. Мы отдали предпочтение ВНД, а не ВВП, в соответствии с традицией, установленной Всемирным банком для классификации стран по уровням доходов. Стоит отметить, что логарифм ВНД и логарифм ВВП демонстрируют сильную корреляцию (коэффициент корреляции $> 0,99$), что делает их методологически взаимозаменяемыми.

Чтобы добиться такой категоризации, используем статистический смешанный анализ плотности, который позволяет объединить страны в три отдельные группы, что будет подробно описано в разделе 4.2. Предполагается, что этот подход обеспечивает более эффективные средства классификации стран по уточненным категориям, расширяя наши возможности исследовать взаимосвязь между этими переменными.

Для ответа на вопрос, дают ли усилия по созданию более однородных групп и проведению анализа данных внутри каждой группы какие-либо значимые результаты, были рассмотрены три модели: общая модель (раздел 3.1), модели, подобранные отдельно для каждого уровня благосостояния (раздел 3.3) и гибридная модель (раздел 3.4). В общей модели (модель 1) все данные анализируются вместе. Для каждого уровня благосостояния подбираются отдельные модели (Модель 2). Гибридная модель (Модель 3) учитывает эффекты взаимодействия с уровнем благосостояния. Предлагается два вида гибридных моделей: полная и сокращенная. В полной версии все коэффициенты специфичны для каждого уровня благосостояния, тогда как в сокращенной версии некоторые коэффициенты являются общими для всех уровней благосостояния, а другие специфичны для каждого отдельного уровня.

3 Методика и результаты

3.1 Общая модель (Модель 1)

Первая модель использует весь набор данных и называется общей моделью. В рамках панельной регрессии выбрана двусторонняя модель с фиксированными эффектами на основе результатов проведенных тестов. Тест Хаусмана дал значение $p \approx 0,0$, что указывает на заметную разницу между моделями с фиксированными эффектами и моделями со случайными

эффектами. Результативное значение F-теста для двусторонних эффектов имеет p -значение $\approx 0,0$, что указывает на значительное несоответствие эффектов переменных в различных группах или периодах времени. F-тест используется для определения того, значительно ли включение фиксированных во времени эффектов улучшает соответствие модели и дает представление о наличии изменяющейся во времени ненаблюдаемой неоднородности. Тест Песарана CD, который оценивает перекрестную зависимость в панелях, показал p -значение 0,1279, что указывает на отсутствие существенной перекрестной зависимости в данных. Наконец, был проведен тест Бройша-Пагана, который дал значение $p \approx 0,0$, что свидетельствует о гетероскедастичности данных. Этот тест используется для проверки того, нарушается ли предположение о постоянной дисперсии. Для решения проблемы гетероскедастичности мы использовали метод HC3 (Heteroscedasticity Consistent Covariance), который корректирует гетероскедастичность в регрессионных моделях. Он учитывает корреляционную структуру остатков, что приводит к более эффективным оценкам ковариационной матрицы.

Результаты модели 1 без коррекции и с коррекцией HC3 представлены в таблице 3. Включение поправки HC3 на гетероскедастичность показало, что ковариаты MHT и Urban потеряли значимость на уровне 0,05. Эти результаты показывают, что связь между переменной MHT и выбросами CO₂, а также Urban может не быть статистически значимой в модели, если принять во внимание влияние гетероскедастичности.

Table 3: Модель 1

Variable	Model 1 без коррекции			Model 1 с HC3 коррекцией		
	Estimate		Std, Error	Estimate		Std, Error
GDP	0.3459	***	0.0475	0.3459	**	0.1176
RD	0.2854	***	0.0533	0.2854	**	0.1095
RD ²	0.0061		0.0039	0.0061		0.0076
GDP ²	-0.0155	***	0.0029	-0.0155	*	0.0064
Trade	0.1032	***	0.0173	0.1032	**	0.0376
RenEn	-0.1409	***	0.0068	-0.1409	***	0.0216
MHT	-0.0012	***	0.0003	-0.0012		0.0008
Urban	0.0044	***	0.0011	0.0044		0.0027
EnUse	0.6082	***	0.0213	0.6082	***	0.0773
GDP*RD	-0.0296	***	0.0055	-0.0296	*	0.0119

* уровень значимости 0.05

** уровень значимости 0.01

***уровень значимости 0.001

Существует статистически значимая линейная зависимость между R&D и выбросами CO₂. Кроме того, при учете других факторов мы наблюдаем статистически значимую нелинейную и немонотонную связь между ВВП и выбросами CO₂. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями в этой области (Cheng et al., 2021; Chen & Lee, 2020; Petrović & Lobanov, 2020;

Avenyo & Tregenna, 2022). Значительный положительный коэффициент между RD и CO₂ указывает на положительную связь между расходами на исследования и выбросами CO₂. Однако уровни значимости коэффициентов взаимодействия (между RD и GDP) показывают, что связь между RD и выбросами CO₂ не является постоянной на разных уровнях экономического развития. В частности, анализируя связь между RD и выбросами CO₂, мы наблюдаем, что по мере роста ВВП страны негативное влияние исследований и разработок на выбросы CO₂ становится менее выраженным, существует даже возможность изменения знака коэффициента с положительного на отрицательный.

Отрицательные коэффициенты означают, что более высокие расходы на R&D снижают влияние экономического развития на уровень загрязнения при условии, что все остальные факторы остаются неизменными. При рассмотрении совместной зависимости ВВП и R&D ситуация становится более запутанной. Представляется, что относительно высокие значения как ВВП, так и R&D связаны с охраной окружающей среды. Однако понимание специфического взаимодействия между этими переменными требует более тщательного изучения в группах с более однородным доходом. Этот подход может помочь исследовать сложную динамику между GDP и RD, влияющими на уровень загрязнения.

Результаты модели 1 показывают, что существует статистически значимая связь между торговлей и выбросами CO₂. Аналогичным образом, исследование Petrović & Lobanov (2020) показало, что более высокий уровень торговли связан с усилением давления на окружающую среду. Причин такого вывода может быть несколько. Торговля привела к усилению давления на окружающую среду, поскольку иностранные товары могут быть более высокого качества, чем местные, поэтому конкуренция делает фирмы более ориентированными на качество, чем на эффективное использование ресурсов. Таким образом, продукция более высокого качества часто потребляет больше энергии и ресурсов и выделяет больше CO₂. Более того, рост внешней торговли часто означает увеличение количества транспортных услуг, что также увеличивает выбросы CO₂.

Положительная взаимосвязь между потреблением энергии и выбросами CO₂ хорошо представлена в литературе (Chen & Lee, 2020). Этот вывод подчеркивает необходимость устойчивых энергетических практик и эффективного управления ресурсами для смягчения воздействия на окружающую среду. С другой стороны, значительная отрицательная связь между потреблением возобновляемой энергии и выбросами CO₂ предполагает, что увеличение использования возобновляемой энергии связано с сокращением выбросов CO₂. Этот вывод согласуется с результатами проведенных ранее исследований (Akram et al., 2020; Sharif et al., 2019; Cheng et al., 2019, Zhang et al., 2017) и демонстрирует, что технологический прогресс помогает сократить выбросы CO₂ за счет повышения энергоэффективности.

Незначительные эффекты наблюдаются с такими переменными, как MNT и Urban. Важно отметить, что незначительные эффекты не обязательно подразумевают отсутствие эффекта, а скорее указывают на то, что эти факторы не существенно дифференцируют уровни выбросов CO₂, когда принимаются во внимание другие факторы. Это говорит о том, что другие факторы, включенные в модель, которые показали значительную связь с выбросами CO₂, играют более заметную роль в объяснении изменений в уровнях загрязнения. Незначительность может быть обусловлена влиянием гетероскедастичности, которая влияет на оценку связи.

Кроме того, быстрый процесс урбанизации связан с более высоким потреблением энергии и увеличением уровня загрязнения. Таким образом, хотя эти конкретные переменные не могут существенно различать уровни выбросов CO₂ в этой конкретной модели, важно анализировать их потенциальное влияние в различных контекстах и с альтернативными спецификациями модели. Стоит подчеркнуть, что и МНТ, и Urban потеряли свою значимость в Модели 1 после применения поправок НСЗ. Однако оба они вновь обрели значимость в моделях, которые мы рассмотрим в следующих разделах.

3.2 Раздельные модели по уровню благосостояния (Модель 2)

При использовании отдельных моделей для каждого уровня благосостояния возможно лучше уловить нюансы и сложности этих отношений. Этот подход позволяет провести более углубленный анализ того, как различные факторы влияют на выбросы CO₂ в конкретных группах благосостояния. Результаты F-теста, теста Хаусмана, стьюдентизированного теста Бреуша-Пагана и тест Песарана на кросс-секционную зависимость представлены в таблице 5. Целесообразность использования фиксированных эффектов в этих моделях оценивалась с помощью теста Хаусмана. Значения p , полученные с помощью теста Хаусмана для всех трех уровней дохода, составили $\approx 0,0$. Кроме того, наличие гетероскедастичности было проверено с помощью теста Бреуша-Пагана. Полученные значения p для теста Бреуша-Пагана для уровней доходов составили $\approx 0,0$. Эти значения p служат убедительным доказательством против нулевой гипотезы гомоскедастичности.

Таблица 5. Результаты испытаний

Test Name	p-value		
	H	UM	LM
F-тест	$< 2.2 \times 10^{-16}$	0.0002939	0.01572
тест Хаусмана	$< 2.2 \times 10^{-16}$	1.327×10^{-8}	$< 2.2 \times 10^{-16}$
тест Бреуша-Пагана	$< 2.2 \times 10^{-16}$	$< 2.2 \times 10^{-16}$	$< 2.2 \times 10^{-16}$
тест Песарана CD	0.05376	0.1634	0.3302

Оценки вместе с соответствующими исправленными стандартными ошибками представлены в таблице 6. После поправки на гетероскедастичность с использованием метода НСЗ значимость некоторых коэффициентов изменилась: для уровня высоких доходов коэффициенты для МНТ и торговли потеряли значимость на уровне 0,05. Для уровня доходов выше среднего коэффициенты для квадратичного члена для RD и торговли также потеряли значение на уровне 0,05, как и RD и взаимодействие между RD и GDP для уровня благосостояния ниже среднего. Однако для всех остальных коэффициентов, хотя значения p и снизились (что указывает на повышение значимости), уровень значимости 0,05 остался неизменным.

Таблица 6. Модель 2, HC3 коррекция

Variable	H		UM		LM	
	Estimate	Std. Error	Estimate	Std. Error	Estimate	Std. Error
GDP	0.1937	0.7203	-0.0635	0.2324	0.7324 ***	0.2075
RD	1.1399*	0.528	0.4911*	0.1973	0.2059	0.1398
RD ²	0.0067	0.0356	0.0184	0.0201	-0.0027	0.0104
GDP ²	-0.0052	0.0335	0.0073	0.014	-0.0402 **	0.015
Trade	0.1299	0.1107	0.0596	0.0517	0.1123 *	0.0491
RenEn	-0.0931 ***	0.0246	-0.1828 ***	0.024	-0.162 ***	0.0279
MHT	0.0029	0.0022	-0.0027 **	0.001	-0.0009	0.0017
Urban	0.0114**	0.0036	0.0002	0.0039	0.0003	0.0051
EnUse	0.5452 *	0.2337	0.4658 ***	0.1059	0.699 ***	0.1081
GDP*RD	-0.1057*	0.0508	-0.0477 *	0.0227	-0.0252	0.0173

* уровень значимости 0.05

** уровень значимости 0.01

***уровень значимости 0.001

Все переменные, за исключением RD², значимы как минимум для одного уровня благосостояния. Переменными, значимыми для всех уровней благосостояния, являются GDP, RenEn и EnUse. Важно отметить, что GDP для уровней H и UM имеет значение только через взаимодействие с RD. Кроме того, RD не имеет существенного значения для уровня благосостояния LM. Показатель Urban имеет статистическую значимость только для H, MHT важен только для UM, а Trade важна только для LM.

MHT и Urban уже упоминались в литературе как значимые факторы (Avenyo & Tregenna, 2022, Wang et al., 2019). Более высокая доля добавленной стоимости средне- и высокотехнологичных отраслей промышленности часто может иметь отрицательную связь с загрязнением окружающей среды из-за внедрения более чистых и более экологически устойчивых технологий и практик в этих отраслях. Секторы высоких технологий, как правило, отдают приоритет инновациям и эффективности, что приводит к снижению потребления ресурсов и выбросов. Кроме того, они часто инвестируют в передовые технологии контроля загрязнения и подчиняются строгим экологическим нормам. В результате эти отрасли могут способствовать снижению уровня загрязнения, что делает их ключевыми факторами устойчивого экономического роста и защиты окружающей среды (Avenyo & Tregenna, 2022).

Существенную положительную связь между Urban и уровнем CO₂ можно объяснить несколькими факторами. По мере роста урбанизации часто наблюдается более высокая концентрация промышленной и производственной деятельности в городских районах, что приводит к увеличению выбросов загрязняющих веществ (Wang et al., 2019). Кроме того, в городских районах, как правило, наблюдается более высокое потребление энергии и потребность в транспорте, что еще больше способствует повышению уровня загрязнения. Плотность

населения в городских центрах также может привести к увеличению образования отходов и неадекватным методам управления отходами, что усугубляет загрязнение окружающей среды. В совокупности эти факторы способствуют наблюдаемой положительной связи между урбанизацией и загрязнением окружающей среды.

Основные выводы из этих моделей относительно нашего исследовательского интереса к инновациям, которые мы не смогли получить при использовании единой объединенной модели, заключаются в следующем. При рассмотрении всех других ковариат в модели переменная RD оказывается незначительной для уровня благосостояния ниже среднего (LM). Квадратичные зависимости, представляющие эффекты GDP и RD, значительно попарно различаются между всеми уровнями благосостояния. Средний процент добавленной стоимости в сфере высоких технологий значительно отрицателен, но только для уровня благосостояния UM.

Более того, оценки следующих коэффициентов существенно отличаются от их аналогов в Модели 1 в том смысле, что они выходят за пределы 95-процентного доверительного интервала: GDP для уровня благосостояния LM, RD для уровня H, GDP2 для уровня LM, Urban для уровня H, MHT для уровня UM и GDP*RD для уровня H. Все эти результаты указывают на то, что без учета групп благосостояния мы имеем предвзятые оценки коэффициентов, особенно тех, которые мы используем в наших рассуждениях о влиянии инноваций.

3.3 Гибридные модели (Модель 3)

Альтернативой набору отдельных моделей является единая совместная модель с эффектами взаимодействия. В этом подходе для некоторых или всех ковариат вводятся дополнительные условия взаимодействия с уровнем благосостояния. Мы называем эту модель взаимодействия гибридной моделью, поскольку она сочетает в себе элементы как общей, так и отдельных моделей. В общей модели мы предполагаем, что дисперсия является совместной для всех стран, независимо от уровня их благосостояния. Однако в отдельной модели коэффициентам разрешено варьироваться в зависимости от разных уровней благосостояния. Когда вводятся эффекты взаимодействия, сохраняется общее предположение о дисперсии из объединенной модели, но фиксируются различия в коэффициентах в зависимости от уровня благосостояния, как и в отдельных моделях. Временные эффекты остаются общими для всех стран, независимо от уровня их благосостояния. Таким образом, по сравнению с общей моделью, гибридная модель может обеспечить лучшее соответствие. Более того, по сравнению с использованием отдельных моделей для каждого уровня благосостояния, гибридная модель должна привести к уменьшению стандартных ошибок для коэффициентов. Это связано с тем, что используется больший набор данных для оценки стандартных ошибок, и оказывается меньше параметров для общей оценки по сравнению с суммой параметров в отдельных моделях.

Однако самая большая привлекательность гибридных моделей заключается в их способности иметь как общие коэффициенты, так и некоторые уникальные для каждого уровня эффектов, используемых во взаимодействии. Не все коэффициенты, рассмотренные в исследовании, имеют уникальную связь с откликом внутри определенной однородной группы; некоторые могут быть общими. Если на самом деле зависимость является

общей для всех уровней благосостояния, то при сохранении общих коэффициентов уменьшается количество параметров, что приводит к увеличению степеней свободы и потенциально к уменьшению стандартных ошибок для коэффициентов. Такие гибридные модели предлагают большую гибкость и возможность выбора модели, поскольку можно рассмотреть несколько альтернативных моделей с различными комбинациями общих и конкретных коэффициентов.

Для анализа предлагаются две модели: полная и сокращенная. Полная модель с включает взаимодействия со всеми ковариатами, тогда как сокращенная модель использует некоторые индексы без взаимодействий, в результате чего отношения распределяются между всеми уровнями благосостояния. Сокращенная модель предполагает, что переменные RenEn, EnUse и Trade демонстрируют одинаковые отношения на всех уровнях благосостояния. Такое решение было основано на значительном перекрытии доверительных интервалов для этих коэффициентов в отдельных моделях для каждого уровня благосостояния.

3.4.1 Полная гибридная модель

В Таблице 8 представлена полная Модель 3, которая включает все переменные, включая их взаимодействие с категориальными показателями уровня благосостояния. Эта модель объединяет все доступные данные и учитывает уровни благосостояния как взаимодействие со всеми ковариатами. Подобно моделям 1 и 2, обнаружены существенные доказательства в поддержку использования двусторонней модели с фиксированными эффектами с коррекцией гетероскедастичности, с р-значениями, соответствующими ранее проведенным тестам.

Таблица 8. Сравнение полной модели 3 (с поправкой HC3) и модели 2 (с поправкой HC3)

Variable	H		UM				LM		
	Model 3								
	full	Model 2	Model 3 full		Model 2		Model 3 full		Model 2
GDP	0.3238	0.1937	-0.0843		-0.0635		0.5197	**	0.7324 ***
RD	1.3106 *	1.1399 *	0.4680 **		0.4911 *		0.1625		0.2059
RD ²	0.0037	0.0067	0.0176		0.0184		-0.0147		-0.0027
GDP ²	-0.0126	0.0106	0.0177		0.0073		-0.0269		-0.0402 **
Trade	0.1441	0.1299	0.0997 *		0.0596		0.0557		0.1123 *
-									
RenEn	0.1082 ***	-0.0931 ***	-0.1856 ***		-0.1828 ***		-0.1652 ***		-0.162 ***
MHT	0.0022	0.0029	-0.0026 **		-0.0027 ***		-0.0004		-0.0009
Urban	0.0083 **	0.0114 **	0.0030		0.0002		0.0026		0.0003
EnUse	0.6631 **	0.5452 *	0.4798 ***		0.4658 ***		0.7351 ***		0.699 ***

GDP*RD -0.1248* -0.1057 * -0.0450 * -0.0477 * -0.0260 -0.0252

* уровень значимости 0.05

** уровень значимости 0.01

***уровень значимости 0.001

Модель 2 и Модель 3 предоставляют оценки коэффициентов для каждого уровня благосостояния индивидуально. Однако в случае Модели 3 все данные объединяются для оценки фиксированных эффектов времени и дисперсии ошибки до коррекции НСЗ. Такое объединение данных приводит к увеличению степеней свободы, что, в свою очередь, должно привести к меньшим оценкам стандартной ошибки для параметров. Однако в представленном случае неоднородность данных и последующая коррекция неоднородности привели к очень похожим стандартным ошибкам для параметров.

Модель 3 не дает более значимых коэффициентов по сравнению с Моделью 2; вместо этого она меняет группу, для которой один коэффициент является значимым, в то время как другой теряет свою значимость, что присутствовало в Модели 2. Примечательно, что коэффициент для Trade теперь значим для уровня «UM», но не для «LM». Кроме того, коэффициент RD² для уровня «LM» теряет свою значимость. Эту потерю значимости уровня 0,05 можно объяснить случайностью, поскольку Модель 3 имеет меньшую стандартную ошибку для этого коэффициента по сравнению с Моделью 2. Однако Модель 2 имеет большее значение оценки параметра, что делает ее значимой.

3.4.2 Сокращенная гибридная модель

Сокращенная модель 3 (таблица 9) предполагает, что переменные RenEn, EnUse и Trade демонстрируют одинаковую взаимосвязь на всех уровнях благосостояния. Такое решение было основано на значительном перекрытии доверительных интервалов для этих коэффициентов в отдельных моделях для каждого уровня благосостояния. И сокращенная, и полная версии модели 3 демонстрируют согласие друг с другом, поскольку они имеют схожие коэффициенты для переменных, которые входят в результате взаимодействий в сокращенной версии модели 3. Хотя стандартная ошибка для коэффициента в сокращенной модели не изменилась значительно по сравнению с полной моделью, сам коэффициент был оценен как меньший по абсолютной величине в сокращенной модели. Все коэффициенты, общие для всех уровней благосостояния в приведенной модели, оказываются значимыми.

Table 9. Сокращенная модель 3 с коррекцией HC3

Variable	H	UM	LM
GDP	-0.0280	0.0677	0.4746 **
RD	1.7665 **	0.3648 *	0.2138
GDP ²	0.0006	0.0006	-0.0235
RD ²	0.0090	0.0149	-0.0079
Urban	0.0121 **	0.0026	0.0045
GDP*RD	-0.1640 **	-0.0350 *	-0.0282
MHT	0.0026	-0.0017 **	-0.0006
Common variables			
RenEn	-0.1549 ***		
EnUse	0.6180 ***		
Trade	0.0956 *		

* уровень значимости 0.05

** уровень значимости 0.01

***уровень значимости 0.001

Хотя сокращенная Модель 3 не выявила каких-либо новых взаимосвязей, рассмотрение сокращенного гибридного подхода в аналогичных условиях является релевантным. Сокращенные модели предлагают уменьшение степеней свободы, и если увеличение остаточной суммы квадратов является умеренным, существует потенциал для открытия новых значимых связей с уменьшением стандартных ошибок. Хотя это сокращение не привело к новым взаимосвязям в нашем исследовании, оно остается важным фактором для будущих исследований. Переменные, помещенные в общую категорию, следует выбирать тщательно. Необходимо иметь убедительные доказательства того, что взаимосвязь между этими переменными и зависимой переменной не меняется с уровнем благосостояния. В противном случае это может привести к смещению оценок других ковариат, что, в свою очередь, может привести к потере значимости.

3.5 Обсуждение

В проведенном панельном регрессионном анализе было обнаружено, что все включенные индексы оставались значимыми даже после поправки на гетероскедастичность с использованием консервативного метода HC3. Хотя не ставилась цель оценки конкретных значений коэффициентов регрессии, знаки этих коэффициентов соответствовали ожиданиям и существующей литературе.

Новизной проведенного исследования по моделированию стало введение нелинейной, немонотонной зависимости между GDP, расходами на R&D и уровнем эмиссии CO₂, а также их взаимодействием. Примечательно, что введенный терм взаимодействия показал значительно отрицательный коэффициент, что подтверждает предположения, высказанные в литературе. Более того, дальнейший анализ выявил тонкую взаимосвязь между

переменными GDP, RD и CO₂. В странах с доходом ниже среднего, характеризующихся относительно низким уровнем благосостояния, расходы на RD оказывают ограниченное влияние на уровень загрязнения. Однако в странах с доходом выше среднего и высоким уровнем дохода расходы на RD показали существенный эффект. По мере роста GDP положительное влияние R&D на загрязнение уменьшалось, пока не достигло переломного момента, после которого влияние изменилось на противоположное, о чем свидетельствует отрицательный коэффициент переменной взаимодействия (GDP*RD).

Чтобы улучшить анализ, было предложено два инновационных методологических элемента. Во-первых, был применен подход, основанный разделении стран на более однородные группы на основе валового национального дохода. Этот подход позволил получить более сбалансированные группы по уровню дохода по сравнению с традиционной классификацией Всемирного банка. Во-вторых, мы предложили гибридную модель, которая объединила элементы общей модели данных и отдельных моделей, адаптированных для каждой однородной группы.

Предложенная категоризация на основе данных привела к уменьшению неоднородности и решению потенциальных проблем мультиколлинеарности. Корреляция между GDP и RD значительно снизилась внутри каждой группы благосостояния по сравнению с общим набором данных. Использование отдельных групп в гибридной модели привело к более значимым ассоциациям по сравнению с одной общей моделью, продемонстрировав практическое применение и потенциальное снижение стандартных ошибок.

Важно подчеркнуть, что основная задача исследования заключалась не в определении оптимальных моделей для объяснения изменчивости выбросов CO₂ в разных странах, а в стремлении выявить влияние расходов на R&D, выступающих в качестве показателя технологических инноваций с учетом других сопутствующих показателей.

Исследование выявило взаимовлияние, но не установило причинно-следственную связь. Дальнейшие исследования, такие как подходы с использованием инструментальных переменных, могут помочь определить причинно-следственные связи. Кроме того, будущие исследования могут основываться на временном анализе, который позволит изучить, как взаимосвязи между R&D, GDP и CO₂ развивались с течением времени и выявить потенциальные тенденции. Кроме того, для повышения надежности результатов будущие исследования могут включать проверки устойчивости с использованием альтернативных статистических методов и моделей.

4 Выводы

Проведенное в настоящей статье исследование позволило выявить наличие сложной взаимосвязи между инновациями, экономическим развитием и экологической устойчивостью. Для анализа данных использовались гибридные модели в панельном регрессионном анализе. Исследователям рекомендуется использовать эти модели для выявления более тонких связей, особенно при работе с разнообразными наборами данных с потенциальными проблемами мультиколлинеарности.

Значение расходов на R&D как показателя инноваций в решении экологических проблем невозможно переоценить. Выявленная значимая нелинейная взаимосвязь между R&D, ВВП, их взаимодействием (GDP*RD) и

уровнями эмиссии CO₂ подчеркивает сложность решения экологических проблем в контексте макроэкономики. Политика, которая одновременно способствует как R&D, так и экономическому росту, может способствовать более устойчивому развитию, при котором экономический рост сопровождается более эффективным и чистым использованием ресурсов, что приводит к снижению выбросов CO₂.

Богатые страны должны продолжать лидировать в развитии зеленых технологий защиты окружающей среды, укреплять сотрудничество для достижения скоординированных действий в области охраны окружающей среды. Страны со средним уровнем достатка должны способствовать переходу к инновационной и циркулярной экономике, основанной на повторном использовании ресурсов и сокращению потребления энергии. Экологически чистые технологические инновации также должны развиваться в рамках обмена и сотрудничества со странами с высоким уровнем дохода, поскольку технологические прорывы в некоторых странах, как ожидается, будут стимулировать зеленое развитие.

В то же время в процессе глобализации необходимо помочь развивающимся странам внедрить технологии защиты окружающей среды и сократить глобальные выбросы CO₂, потому что экологические проблемы в менее развитых странах неизбежно окажут негативное влияние на страны с высоким уровнем богатства в будущем.

Важно признать, что все эти важные взаимосвязи предполагают, что другие факторы остаются неизменными или находятся под контролем. Будущие исследования могли быть направлены на изучение таких смягчающих эффектов, как политическое вмешательство, технологические достижения и динамика развития конкретных секторов, чтобы получить более глубокое понимание основных механизмов, движущих этими отношениями. Однако важно отметить, что интерпретация эффекта взаимодействия должна быть осторожной и специфичной для контекста используемой регрессионной модели и набора данных.

5 Литература

- Ahmed, A., Uddin, G. S., & Sohag, K. (2016). Biomass energy, technological progress and the environmental Kuznets curve: Evidence from selected European countries. *Biomass and Bioenergy*, 90, 202-208.
- Akram, R., Chen, F., Khalid, F., Ye, Z., & Majeed, M. T. (2020). Heterogeneous effects of energy efficiency and renewable energy on carbon emissions: Evidence from developing countries. *Journal of cleaner production*, 247, 119122.
- Avenyo, E. K., & Tregenna, F. (2022). Greening manufacturing: Technology intensity and carbon dioxide emissions in developing countries. *Applied energy*, 324, 119726.
- Chen, Y., & Lee, C. C. (2020). Does technological innovation reduce CO₂ emissions? Cross-country evidence. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121550.
- Cheng, C., Ren, X., Dong, K., Dong, X., & Wang, Z. (2021). How does technological innovation mitigate CO₂ emissions in OECD countries? Heterogeneous analysis using panel quantile regression. *Journal of Environmental Management*, 280, 111818.
- Cheng, C., Ren, X., Wang, Z., 2019. The impact of renewable energy and innovation on carbon emissions: an empirical analysis for OECD countries. *Energy Procedia* 158, 3506e3512. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.919>.
- Churchill, S. A., Inekwe, J., Smyth, R., & Zhang, X. (2019). R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870–2014. *Energy Economics*, 80, 30-37.
- Dinda, S., 2004. Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecol. Econ.* 49, 431e455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>.
- Gonenc, H., & Poleska, A. (2022). Multinationals, research and development, and carbon emissions: international evidence. *Climate Policy*, 1-16.
- Grossman, G.M., Krueger, A.B., 1995. Economic growth and the environment. *Q. J.Econ.* 110 (2), 353e377. <https://doi.org/10.2307/2118443>.
- Hashmi, R., & Alam, K. (2019). Dynamic relationship among environmental regulation, innovation, CO₂ emissions, population, and economic growth in OECD countries: A panel investigation. *Journal of cleaner production*, 231, 1100-1109.
- He, J., Richard, P., & Yang, M. (2020). The driving forces of CO₂ emissions from transport in China: A STIRPAT approach. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119182.
- Petrović, P., & Lobanov, M. M. (2020). The impact of R&D expenditures on CO₂ emissions: evidence from sixteen OECD countries. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119187.
- Oslo Manual (2018). OECD/Eurostat. Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, OECD Publishing, Paris/Eurostat, Luxembourg, <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>.
- Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. *Journal of political Economy*, 98(5, Part 2), S71-S102.
- Scrucca L., Fop M., Murphy T. B. and Raftery A. E. (2016) mclust 5: clustering, classification and density estimation using Gaussian finite mixture models, *The R Journal*, 8/1, pp. 205-233. <https://journal.r-project.org/archive/2016/RJ-2016-021/RJ-2016-021.pdf>.

Shahbaz, M., Sinha, A., 2018. Environmental Kuznets curve for CO₂ emission: a literature survey. Munich Personal RePEc Archive Paper No. 86281. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/86281/1/MPRA_paper_86281.pdf. accessed 8 July 2018.

Sharif, A., Raza, S. A., Ozturk, I., & Afshan, S. (2019). The dynamic relationship of renewable and nonrenewable energy consumption with carbon emission: a global study with the application of heterogeneous panel estimations. *Renewable energy*, 133, 685-691.

York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46(3), 351-365. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5).

Wang, S., Zeng, J., Liu, X., 2019. Examining the multiple impacts of technological progress on CO₂ emissions in China: a panel quantile regression approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 103, 140–150.

Zhang, W., Liu, L., & Wang, Q. (2017). Driving forces of energy-related CO₂ emissions in China: An index decomposition analysis. *Energy Policy*, 104, 446-454. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.036>.