



Списки содержания доступны в ScienceDirect

# Экономика энергетики

домашняя страница журнала:



## Как страны Большой семерки прокладывают путь к нулевым выбросам через энергоэффективную экосистему?

Li Zheng<sup>a</sup>, Ling Yuan<sup>a</sup>, Zeeshan Khan<sup>b</sup>, Ramez Abubakr Badeeb<sup>c</sup>, Leilei Zhang<sup>d,e,\*</sup><sup>a</sup> Школа бизнеса, Хунаньский университет, Чанша 410082, Китай<sup>b</sup> Факультет бизнеса, Университет Куртин Малайзия, Мири, Малайзия<sup>c</sup> Ноттингемская школа бизнеса, факультет искусств и социальных наук, Ноттингемский университет, кампус Малайзии, Малайзия<sup>d</sup> Школа бизнеса, Университет Чжэнчжоу, Чжэнчжоу 450052, Китай<sup>e</sup> Школа политики и государственного управления, Университет Чжэнчжоу, Чжэнчжоу 450052, Китай

### А Р Т И К Л И Я В Ф О

#### Ключевые слова:

Парниковый газ, связанный с  
энергетикой  
Энергоэффективность  
Экономический рост  
Цифровизация  
Экологические  
инновации

### А Б С Т Р А К Т

Учитывая актуальность наиболее острых вопросов по всему миру, настало время принять меры по восстановлению экологических проблем, таких как глобальное потепление и изменение климата. В связи с несоответствиями и пробелами в существующей литературе, данное исследование направлено на изучение роли энергоэффективности в выбросах парниковых газов, связанных с энергетикой. С развитием технологических инноваций возрастает значение цифровизации и технологических инноваций, связанных с охраной окружающей среды. Исходя из экономического значения стран Группы семи (G7), в данном исследовании рассматривается связь этих переменных в экономиках упомянутой группы на протяжении 1990-2020 годов. Используя передовые панельные эконометрические подходы, исследование показало, что преобладают неоднородность наклона, зависимость от сечения и существование долгосрочной равновесной связи. В связи с нелинейными свойствами данных, в исследовании используется непараметрический метод (метод моментной квантильной регрессии). Результаты свидетельствуют о прогрессивной роли энергоэффективности, цифровизации и нововведений, связанных с экологией, на экологическую устойчивость. Это существенные факторы устойчивости, поскольку они значительно снижают выбросы парниковых газов, связанные с энергетикой. Напротив, экономический рост является значительным фактором выбросов парниковых газов, связанных с энергетикой. Полученные результаты устойчивы, а также изучена их причинно-следственная связь. Данное исследование предлагает увеличить инвестиции и стимулировать энергоэффективность, цифровизацию и технологические инновации, связанные с охраной окружающей среды, в экономиках стран G7, чтобы проложить путь к нулевым выбросам.

### 1. Введение

Рост глобализации значительно усилил экономическую экспансию, исключительно в развитых странах мира. Быстро развивающаяся глобальная экономика привела к огромному потреблению энергии и невозобновляемых ресурсов, что привело к увеличению выбросов, связанных с энергией, во всем мире (Zhu et al., 2022). Изменение климата и деградация окружающей среды стали важнейшими проблемами, которые привлекли внимание всего мира к исследованиям (Zhao et al., 2022a). Кроме того, неблагоприятное влияние деградации окружающей среды на климат и взаимодействие человека с населением, в котором энергия является основным источником энергии для производства и потребления, повысило уровень выбросов, что побудило страны и международные организации выступить за коллективное глобальное решение (Polloni-Silva et al., 2021; JinRu and Qamruzzaman, 2022). Поэтому в настоящем исследовании основное внимание уделяется

оценке факторов, определяющих выбросы, связанные с энергетикой, с учетом цифровизации. Политика этих стран и действия, направленные на создание низкоуглеродной экономики, важны на международном уровне (Climate Transparency, 2018). Особая причина заключается в том, что экологический масштаб G7, технологический прогресс и лидерство, а также их международные коалиции играют особую роль в политических протоколах и эффективных стратегиях для обеспечения устойчивости мира (Khan et al., 2020).

G7 - это межправительственная организация развитых экономически развитых стран, занимающая заметное место в глобальной социально-экономической и экологической политике. На рис. 1 показан относительный анализ G7 в отношении энергоэффективности. Италия занимает первое место среди этих семи развитых стран, а Великобритания и Германия занимают 2<sup>nd</sup> и 3<sup>rd</sup> места соответственно. Несмотря на этот факт, в целом, это были самые энергоэффективные экономики со значительными улучшениями в энергетической политике. На рис. 2 представлен

---

\* Автор переписки по адресу: No.100, Science Road, Чжэнчжоу, Хэнань 450002, Китай.

Адреса электронной почты: [lizzheng@hnu.edu.cn](mailto:lizzheng@hnu.edu.cn) (Л. Чжэн), [zeeshankhan@postgraduate.curtin.edu.my](mailto:zeeshankhan@postgraduate.curtin.edu.my) (З. Хан), [zll@zzu.edu.cn](mailto:zll@zzu.edu.cn) (Л. Чжан).

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106428>

Получено 9 июня 2022 г.; Получено в исправленном виде 28 октября 2022 г.; Принято 18 ноября 2022 г.

Доступно онлайн 28 ноября 2022 года

0140-9883/© 2022 Elsevier B.V. Все права защищены.

инновации стран G7. Видно, что цифровизация достигла своего пика во всех развитых экономиках, однако совершенствование технологий, связанных с экологией, все еще необходимо, поскольку инновации в области экологических технологий имеют большое значение для достижения климатических целей. Экономики G7 играют важную роль в реализации климатических целей, поскольку на них приходится почти 60% мирового богатства и почти 50% ВВП (рис. 4), а также практически огромный вклад в выбросы, связанные с энергетикой (рис. 3) в глобальном масштабе.

В существующей литературе несколько факторов существенно влияют на выбросы углерода; однако выбросы, связанные с энергетикой, также имеют существенную взаимосвязь с экономическими и экологическими факторами, которые и призвано определить настоящее исследование. Таким образом, исследование направлено на решение следующих задач. Во-первых, в исследовании рассматривается влияние цифровизации на выбросы, связанные с энергетикой. Во-вторых, анализируется связь между энергоэффективностью, технологиями, связанными с окружающей средой, и выбросами, связанными с энергией. В-третьих, оценивается роль экономического роста на выбросы, связанные с энергетикой. Для достижения этих целей в исследовании используются показатели GHGENER - выбросы, связанные с энергией, DEINOV - развитие технологий, связанных с окружающей средой, DIGIT - цифровизация, ENEREF - энергоэффективность и ВВП. GHGENER, DEINOV и DIGIT получены из ОЭСР, а ВВП и ENEREF - из Всемирного банка. Данные по этим переменным охватывают период с 1990 по 2020 год для стран "Группы семи". Авторы использовали инновационные эконометрические подходы для изучения долгосрочных ассоциаций и причинно-следственных связей между исследуемыми факторами. Полное описание методологии представлено в разделе 3 рукописи.

Исходя из целей исследования, мотивация исследования заключается в изучении влияния энергоэффективности, цифровизации и природоохранных технологий на выбросы парниковых газов для достижения нулевого уровня выбросов через энергоэффективную среду в странах G7. Страны G7 являются мировыми лидерами, которые оказывают существенное влияние на глобальную экономику. Их более активное использование ископаемых видов энергии и развитие привели к увеличению вредных выбросов. В связи с этим исследование имеет важное экологическое и природоохранное значение. Новые выводы, сделанные для стран G7, подчеркивают необходимость продвижения цифровой экономики для создания экологически чистой среды, которая обеспечит энергоэффективность и кон-сервацию. Кроме того, стимулирование энергоэффективности, цифровизация и совершенствование экологических технологий способствуют улучшению качества окружающей среды, что подтверждается результатами оценки. Таким образом, результаты исследования дали новые результаты для обеспечения устойчивой окружающей среды, особенно в странах G7.

Исследование вносит значительный вклад в прагматическую литературу следующим образом. Основным вкладом исследования является новаторское исследование в оценке роли цифровизации помимо энергоэффективности в экономиках стран G7. Ранее JinRu и

Qamruzzaman (2022) исследовал роль энергоэффективности и природоохранных технологий с институциональным качеством с новыми результатами. Однако в настоящем исследовании рассматривается влияние цифровизации наряду с энергоэффективностью и природоохранными технологиями на экосистемы с нулевыми выбросами в странах G7, что является значительным новым распределением. Литература по цифровизации немногочисленна, но несколько исследований (Ma et al., 2022; Puskarskij et al., 2022) недавно тщательно изучили роль цифровизации в других экономиках, игнорируя G7. Поэтому в данном исследовании эмпирически изучается роль цифровизации и энергоэффективности на выбросы парниковых газов и теоретически расширяется дискуссия о цифровизации для улучшения экологической ситуации. Внедрение цифровой экономики повышает энергосбережение и способствует декарбонизации промышленной экономики, что важно с точки зрения охраны окружающей среды (Zhao et al., 2022b). Кроме того, рост цифровой экономики заставил исследователей, ученых и экологов обратить на это внимание. Во-вторых, в исследовании используются эконометрические подходы для изучения экономик стран G7 с обновленными данными с самым длительным периодом с 1990 по 2020 год на предмет нулевых выбросов за счет энергоэффективных цифровых систем. В исследовании используются MMQ-регрессии (поскольку ненормальная информация оценивается эффективно) и бустреп-квантильные регрессии для робастности (поскольку это непараметрические регрессии, которые оцениваются путем повторной выборки исходной выборки и последующего определения значений для каждого квантиля для эффективных оценок), а также впервые проводится анализ каузальности для связи цифровизации, энергоэффективности и экологических технологий с выбросами, связанными с энергией, в странах G7 одновременно. Таким образом, настоящее исследование является важным и новым вкладом в эмпирическую литературу.

После вызывающего введения, остальная часть рукописи организована следующим образом. Раздел 2 представляет собой обзор соответствующей литературы для анализа исследования. В разделе 3 представлены данные, модель и методология исследования. В разделе 4 кратко изложены результаты и их экономическая интерпретация. И, наконец, раздел 5 посвящен выводам и политическим последствиям.

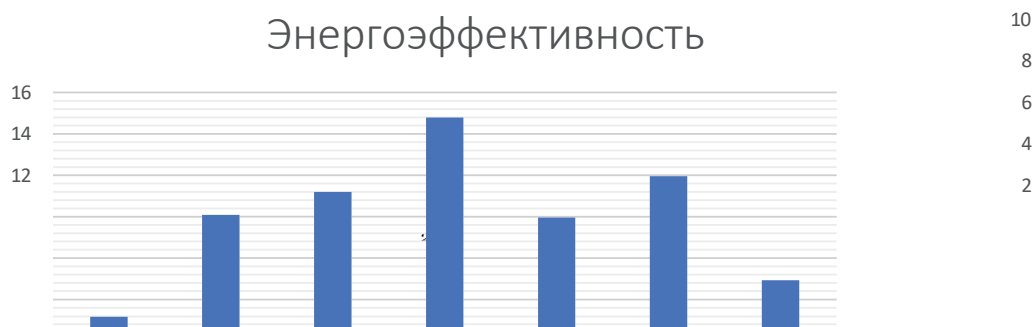
## 2. Обзор литературы

В данном сегменте рукописи рассматриваются эмпирические данные, связанные с изучаемыми факторами, их взаимосвязи и аспекты, проливающие свет на оценку критического анализа.

### 2.1. Влияние экономического роста на выбросы, связанные с энергетикой

Эффект развязки наблюдается при оценке экономического роста и экологических проблем. В преобладающей литературе, посвященной взаимосвязи экономического роста и выбросов, имеется множество исследований, подтверждающих, что экономическая

## Энергоэффективность



Канада Франция Германия Италия Япония США  
Королевство

Соединен  
ные  
Штаты

**Рис. 1.** Энергоэффективность.

экономический рост оказывает существенное влияние на увеличение выбросов углекислого газа. Wang и Zhao (2015) проверили значительное влияние между экономическим ростом и выбросами углерода. Однако влияние в развивающихся регионах было больше, чем в других. Ванг и др. (2017а) исследовали эффект развязки в Китае. В исследовании использовался метод индекса Log Mean Divisia, и эмпирические результаты показали, что выбросы, связанные с энергией (GHGENER), и экономический рост существенно влияют на них. Поскольку энергия существенно нивелирует влияние экономического роста на выбросы (Hamilton and Turton, 2002). Для тщательного изучения детерминант выбросов, связанных с энергией, применяется идентичность STIRPAT и IPAT. Поэтому Ванг и др. (2013) использовали расширенную версию STIRPAT и IPAT для коэффициентов выбросов GHGENER. Результаты показали, что экономический рост вносит основной вклад в выбросы ПГДВ. Позднее в другом исследовании было установлено, что ВВП вносит значительный вклад в выбросы ПГДВ (Wang et al., 2017b). Недавно Цин и др. (2022) рассмотрели экономику стран БРИКС на предмет роста и выбросов.

с 2000 по 2019 год. В исследовании применялись ММР-регрессии, которые показали значительное влияние между ВВП и выбросами парниковых газов. Yang et al. (2021) проанализировали роль ВВП на выбросы, связанные с энергетикой, в Китае. Прагматичные выводы показали, что ВВП и выбросы парниковых газов коррелируют друг с другом. Но затем вновь было высказано предположение, что инновации в области энергоэффективности способствуют снижению выбросов ПГДВ. Совершенствование технологий в области энергоэффективности и сокращение ископаемых видов энергии приводит к существенному снижению выбросов парниковых газов в стране. В новом исследовании на примере штатов Бразилии Поллони-Сильва и др. (2021) изучили взаимосвязь роста и выбросов, используя модель STIRPAT. Эмпирический анализ показал, что ВВП оказывает заметное влияние на выбросы парниковых газов. Кроме того, следующая группа литературы также подтвердила положительное влияние ВВП и выбросов парниковых газов в различных экономиках (Raihan and Tuspekova, 2022; Raihan et al., 2022; Raihan and Tuspekova, 2022a; Su et al., 2020; Wiedenhofer et al., 2020; Fang et al., 2019; Lin and Raza, 2019; Dong et al., 2019). Для анализа причинно-следственных связей (Esso и Keho, 2016; Khan et al., 2022a) в своих выводах показали причинно-следственные ассоциации.

## 2.2. Взаимосвязь между экологическими инновациями, энергоэффективностью, цифровизацией и выбросами, связанными с энергетикой

Технологии, связанные с окружающей средой, оказывают значительное влияние на ограничение выбросов углерода (Zheng et al., 2022). Hussain и др. (2022) исследовали влияние экологически связанных технологий (DEINOV) наряду с наличием возобновляемых источников энергии на снижение выбросов парниковых газов на примере экономик Е7 в период с 1990 по



Рис. 3. Парниковые газы от деятельности, связанной с энергетикой.

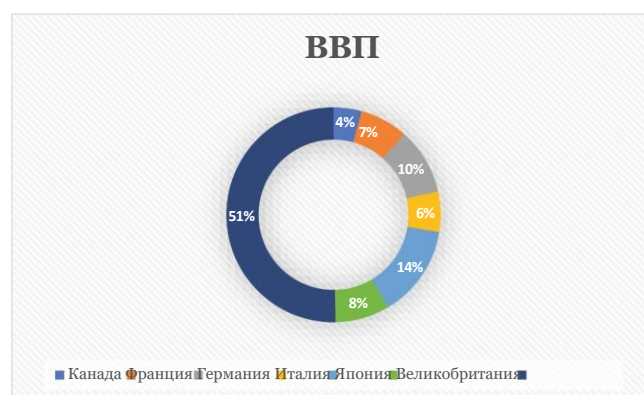
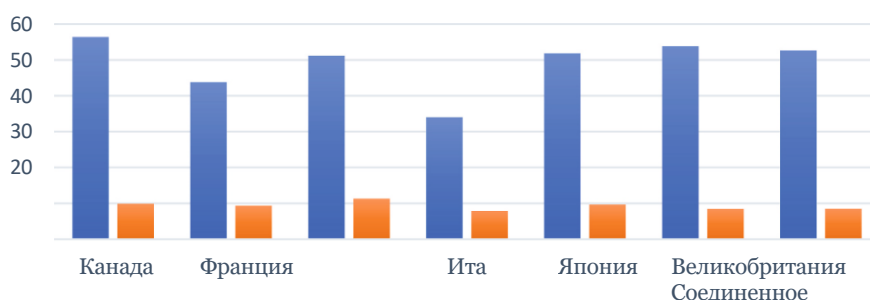


Рис. 4. Средний ВВП экономик стран "Большой семерки".

2016. Полученные результаты свидетельствуют о том, что DEINOV играет решающую роль в повышении качества окружающей среды. Хассан и др. (2022) изучили связь между технологиями, связанными с охраной окружающей среды, и выбросами, связанными с энергетикой, и выявили значительную взаимосвязь в сокращении выбросов парниковых газов. DEINOV помогают в поддержании устойчивой окружающей среды путем снижения уровня загрязнения и повышения качества окружающей среды (Hussain and Dogan, 2021). Аналогичным образом, Ghazouani и др. (2021); Khan и др. (2022) подчеркнули, что технологии, связанные с охраной окружающей среды, существенно помогают повысить

## Сравнение цифровизации и инноваций



**Рис. 2.** Цифровизация и инновации.

качество окружающей среды за счет снижения загрязнения в экономике Канады и Европы. В другом недавнем исследовании, [Paramati et al. \(2022\)](#) проанализировали экономику стран ОЭСР с 1990 по 2014 год. Эмпирические результаты показали, что технологии, связанные с экологией, стимулируют энергоэффективность в стране, что способствует смягчению ухудшения состояния окружающей среды путем ограничения выбросов.

Известно, что энергоэффективность оказывает негативное влияние на контроль выбросов. [Qing et al. \(2022\)](#) обнаружили смягчающую роль энергоэффективности в выбросах парниковых газов в странах БРИКС. Квантильные регрессии (ММ) показали значительную взаимосвязь во всех квантилях, что свидетельствует о снижении уровня выбросов за счет энергоэффективности. В случае развивающихся стран, структурные изменения увеличивают уровень загрязнения в стране с 1990 по 2016 год. Поэтому энергоэффективность крайне важна для ограничения выбросов парниковых газов в этих странах ([Mirza et al., 2022](#)). В другом исследовании с использованием ARDL-подхода в Китае [Лей и др. \(Lei et al., 2022\)](#) отметили, что положительные изменения в энергоэффективности стабильно снижают выбросы ПГ, что указывает на отрицательное влияние между энергоэффективностью и выбросами ПГ. Аналогичным образом, [Хассан и др. \(2022\)](#) оценили роль энергоэффективности в снижении выбросов ПГ в странах с высокой экономикой ОЭСР. Аналогичные негативные ассоциации были обнаружены в судостроении ([Vakili et al., 2022](#)). В сравнительном исследовании развивающихся и развитых экономик [Махapatра и Ирфан \(Mahapatra and Irfan, 2021\)](#) определили асимметричные эффекты между связью энергетики и выбросов. Положительный сюрприз энергоэффективности снижает выбросы, в то время как отрицательный шок увеличивает выбросы парниковых газов в долгосрочной перспективе. В рамках причинно-следственного анализа [Akdag и Yildirim \(2020\)](#) выявили значительную причинно-следственную связь между энергоэффективностью и выбросами парниковых газов.

Влияние цифровой экономики зависит от уровня цифровизации в каждой стране. Эмпирические результаты [Dong et al. \(2022\)](#) показывают, что цифровизация снижает интенсивность выбросов, но уровень выбросов на душу населения имеет тенденцию к увеличению. В обширной литературе по экологии исследования, посвященные взаимосвязи цифровизации и выбросов, встречаются довольно редко. Однако следующие исследования подробно рассматривают негативную взаимосвязь между цифровизацией и выбросами парниковых газов. Недавно [Ма и др. \(2022\)](#) оценили влияние цифровизации на выбросы парниковых газов в энергетике на примере Китая с 2006 по 2017 год. Эмпирические результаты показали, что рассматриваемые переменные имеют долгосрочные связи, что свидетельствует о том, что цифровизация значительно сокращает выбросы энергии. Цифровизация позволяет использовать чистую энергию и способствует повышению энергоэффективности, что ведет к достижению целей устойчивого развития ([Hellemans et al., 2022; Çelik et al., 2022](#)). Аналогичным образом, [Пускарский и др. \(2022\)](#) исследовали, что цифровизация повышает энергоэффективность, что дает значительные перспективы, которые помогают достичь целей углеродной нейтральности. В инновационном исследовании [Zhu et al. \(2022\)](#) подчеркнули улучшение цифровой экономики с точки зрения улучшения экологии. Результаты показали, что цифровизация оказывает сдерживающее влияние на выбросы парниковых газов. [Вэнь и др. \(2021\)](#) также отметили, что цифровизация в промышленном секторе ограничивает крупномасштабное производство, которое приводит к выбросам вредных веществ, и стимулирует инновацию продукции, повышая качество окружающей среды. В случае экономик стран БРИКС, [Чен \(2022\)](#) исследовал негативное влияние цифровизации в

промышленном секторе.



позволяет потребителям приобретать экологически опасные товары, такие как автомобили, микроволновые печи, выхлопные газы и другие товары, интенсивно загрязняющие окружающую среду (He et al., 2019; Wu and Zhao, 2018; Ma et al., 2013). Более конкретно, более высокий экономический рост может увеличить выбросы ПГ за счет использования невозобновляемых энергоресурсов. Другими словами, более активное использование традиционных ископаемых видов топлива может привести к запуску промышленного сектора, что еще больше увеличит циркуляцию доходов и стимулирует рост доходов на душу населения. Однако более высокий уровень дохода на душу населения одновременно повышает уровень сбережений и инвестиций в промышленном секторе, что еще больше увеличивает спрос на энергию. Следовательно, сжигание большего количества ископаемого топлива, как это видно на примере США и Китая (самых крупных импортеров энергии и источников загрязнения в мире), может привести к увеличению выбросов парниковых газов и вызвать проблему изменения климата и глобального потепления. Исходя из обсуждения, в данном исследовании предполагается положительное влияние ВВП на ПГП-ЧВП, представленное как:  $\delta_1 = \frac{GHGENER_{it}}{GDP_{it}} > 0$ .

С появлением технологий каждый регион стремится умножить свои рост, используя минимум ресурсов. Аналогичным образом, с ростом экологических проблем, таких как изменение климата и глобальное потепление, экономики стали известны разрушения, вызванные экстенсивным использованием энергоемких продуктов и услуг. В связи с этим ученые и политики заставляют развивать энергоэффективность, цифровизацию и экологические инновации посредством технологического прогресса (Shahzad et al., 2021; Zhao et al., 2022c). Помимо экономических выгод от этих показателей, они могут играть важную роль в обеспечении устойчивости окружающей среды за счет прямого снижения уровня выбросов и других загрязнений. Цифровизация и выбросы парниковых газов со значительными долгосрочными показателями ассоциации.

### 3. Теоретическая основа и методология

#### 3.1. Теоретическая основа и построение модели

В данном разделе рассматривается теоретическое представление о том, как экономический рост (ВВП), энергоэффективность (ENEREF), цифровизация (DIGIT) и развитие инноваций, связанных с окружающей средой (DEINOV), влияют на выбросы парниковых газов, связанных с энергетикой (GHGENER). Доступность поощряет деятельность и промышленное загрязнение, что приводит к увеличению выбросов углекислого газа и может усугубить опасность изменения климата (Liu et al., 2021; Cheng et al., 2019). Вследствие увеличения производства парниковых газов экономический рост также

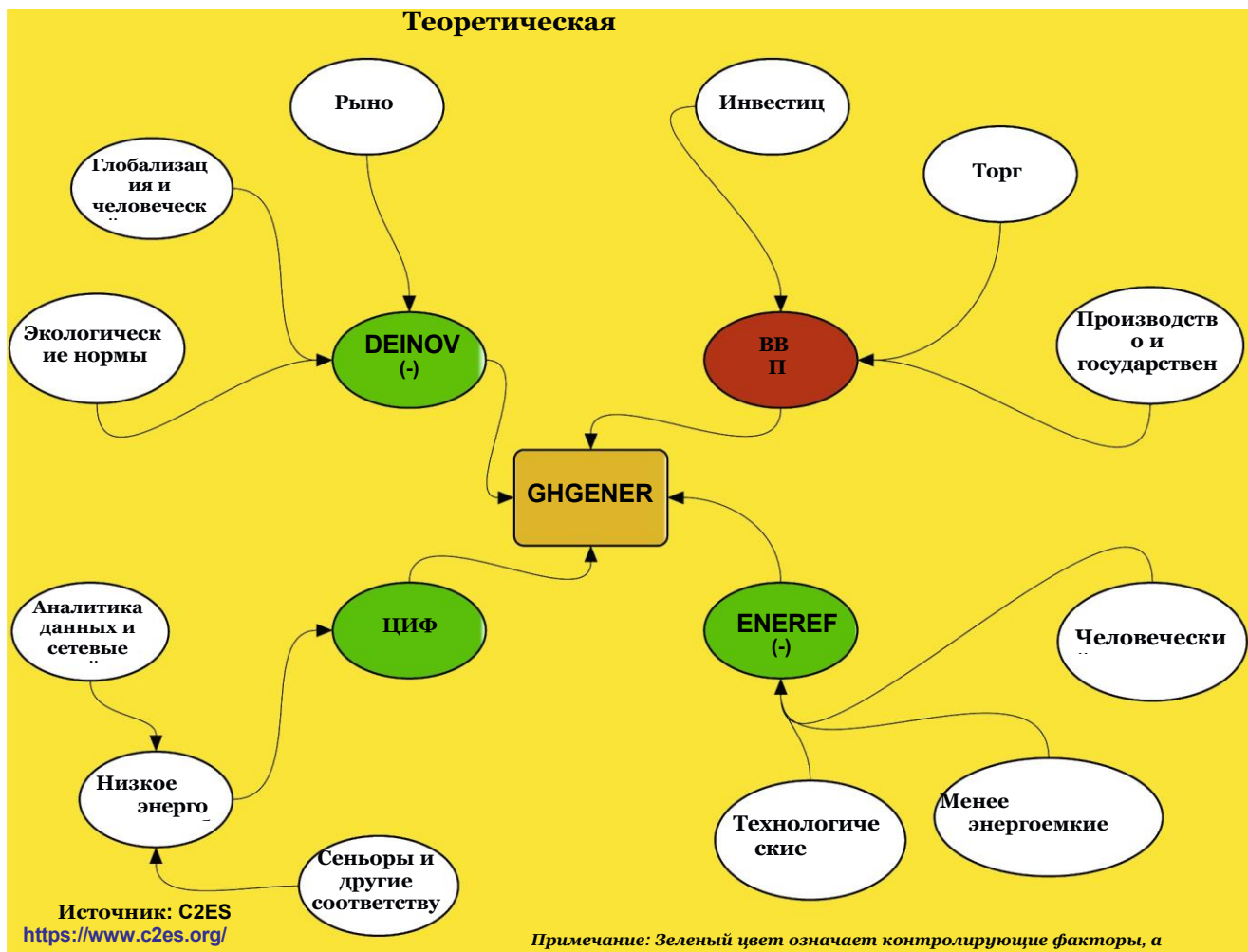
(Lei et al., 2022; Li et al., 2021; Khan et al., 2020). Как правило, электростанции используют ископаемое топливо, такое как уголь и природный газ. Сжигание ископаемого топлива приводит к выбросу парниковых газов, таких как двуокись углерода, что способствует изменению климата. Тем не менее, энергоэффективность имеет ряд экологических преимуществ. Она значительно снижает выбросы парниковых газов непосредственно при сжигании или потреблении ископаемого топлива и косвенно при производстве электроэнергии. Исходя из вышеприведенного обсуждения, в данном исследовании предполагается, что ENEREF может снизить выбросы парниковых газов, заданные как:  $\delta_2 = \frac{GHGENER_{it}}{ENEREF_{it}} < 0$ . В настоящее время цифровые технологии используются для решения более серьезных проблем, таких как устойчивость окружающей среды. Аналитика данных, датчики, сетевые устройства и другие цифровые технологии изменяют использование и потребление энергии во всей экономике. Кроме того, эти технологии предоставляют новые возможности для улучшения использования энергии и сокращения выбросов парниковых газов, связанных с энергетикой. Такое негативное влияние цифровизации очевидно в недавней литературе (см., например, Wen et al., 2021; Ramos-Meza et al., 2021), которое можно выразить как  $\delta_3 = \frac{GHGENER_{it}}{DIGIT_{it}} < 0$ . Развитие инноваций, связанных с экологией, требует изменения корпоративных систем и процедур, повышения производительности, снижения выбросов ПГ и уменьшения затрат на ресурсы. Кроме того, они устраняют опасные производственные ресурсы, улучшают производственный процесс и смягчают негативные последствия выпуска продукции. Примерами существующих инноваций, связанных с экологией, являются рекуперация энергии из твердых отходов, возобновляемые источники энергии, утилизация отходов для повторного использования материалов, экопродукты, производство удобрений из сточных вод, а также различные технологии. (Эрингит и Özürcü, 2015). Литература обширна в отношении доказательств прогрессивной роли DEINOV в экологической устойчивости (Amin et al., 2022; Puertas and Marti, 2021). В этих исследованиях утверждается, что DEINOV значительно снижает уровень выбросов парниковых газов в стране, что заставляет в данном исследовании предположить:  $\delta_4 = \frac{GHGENER_{it}}{DEINOV_{it}} < 0$ . Для справки, пожалуйста, см. рис. 5 для графического представления теоретической основы.

Основываясь на теоретических представлениях и литературе, данное исследование направлено на изучение взаимосвязи ВВП, ENEREF, DIGIT и DEINOV с GHGENER. Следуя исследованиям Khan et al. (2021) и Lei et al. (2022), в данном исследовании разработана следующая модель для эмпирического анализа:

$$GHGENER_{it} = f(GDP_{it}, ENEREF_{it}, DIGIT_{it}, DEINOV_{it})$$

Для наглядности читателей и эмпирических оценок, приведенная выше модель





**Рис. 5.** Теоретическая схема соединения через блок-схему.

может быть преобразована в регрессионную модель, представленную в виде:

$$GHGENER_{it} = \gamma_0 + \delta_1 GDP_{it} + \delta_2 ENEREF_{it} + \delta_3 DIGIT_{it} + \delta_4 DEINOV_{it} + e_{it} \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  отражает перехват модели,  $\delta^s$  -  $s$ -наклоны переменных,  $\epsilon_i$  - случайную ошибку модели, а подстрочные индексы  $i$  и  $t$  указывают на кросс-секции (в данном случае G7) и временные ряды (1990-2020), соответственно. Данные по этим переменным получены из различных надежных источников, к которым относятся ОЭСР<sup>1</sup> и Всемирный банк.<sup>2</sup> Тем не менее, существует несколько развитых и развивающихся экономик. Тем не менее, G7 является неформальным блоком высокоразвитых индустриальных экономик, который стремится к тому, чтобы пересечься с горящими проблемами в мире и сыграть роль катализатора. Деградация окружающей среды и изменение климата были самыми обсуждаемыми вопросами в течение последних нескольких (в частности, трех) десятилетий. Поэтому очень важно изучить эти экономики, которые могут предпринять серьезные действия против этих острых вопросов и вести мир вперед.

### 3.2. Стратегия оценки

В данном исследовании изучается описательная статистика для исследуемых переменных для обеспечения всестороннего обзора панельных данных. В частности, описательная аналитика охватывает статистику среднего, медианы и диапазона, последний содержит самые низкие и самые высокие свойства данных. В данном исследовании также изучается стандартное отклонение переменной, демонстрирующее волатильность временной переменной путем демонстрации отклонения данных от среднего значения. Кроме того, для анализа распределительных свойств данных используются две метрики нормальности. В частности, для проверки соответствия распределения переменной критериям нормальности используются показатели перекоса и куртозиса. Несмотря на то, что Skewness и Kurtosis предоставляют достоверную информацию о дисперсии переменной. Однако при таком подходе вопрос нормальности рассматривается более подробно. В данном исследовании использовалось предположение о нормальности [Jarque and Bera \(1987\)](#), которое оценивает перекося и избыточный куртозис и принимает их значение равным нулю, следовательно, подтверждая нулевую гипотезу о существовании нормального распределения в данном наборе данных. Ниже приведено математическое выражение Джарка-Бера для статистики нормальности:

$$JB = N \left( \frac{1}{6} S^2 + \frac{(K/3)^2}{4} \right) \quad (2)$$

<sup>1</sup> Данные по GHGENER, DIGIT [Лица, использующие Интернет (% населения)] и DEINOV (% всех технологий) получены из ОЭСР (2022).

веб-сайт. Доступно по адресу: <https://stats.oecd.org/>.

<sup>2</sup> Данные по ВВП (постоянные доллары США 2015 года) и ENEREF [ВВП на единицу энергопотребления (постоянные 2017 года по ППС \$ за кг нефтяного эквивалента)] из Индикаторов мирового развития Всемирного банка (2022), доступны по адресу: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators#>.

Поскольку данное исследование фокусируется на панельных данных, соответственно, целесообразно использовать методы панельных данных. Первым этапом данного панельного исследования является оценка неоднородности наклона и зависимости от сечения выбранных панельных данных. В некоторых областях страны-панелисты могут

имеют как сходства, так и различия. Однако схожие характеристики стран могут привести к неточным прогнозам в эконометрических исследованиях, особенно в панельных оценках (Wei et al., 2022). Соответственно, важно оценить, имеют ли экономики стран G7 схожие или различные характеристики. В данном случае тест однородности коэффициентов наклона Песарана и Ямагаты (2008) был использован для проверки коэффициентов, которые были сопоставимы с нулевой гипотезой: коэффициенты наклона однородны. Основные формулы для вышеупомянутой спецификации следующие:

$$\Delta_{SCH} = (N)^{1/2} (2k)^{-1/2} \left( \frac{1}{N} S' - K \right) \left( \frac{2K(T - K - 1)}{T + 1} \right)^{-1/2} \left( \frac{1}{N} S' - 2K \right) \quad (3)$$

$$\Delta_{ACX} = (N)^{1/2} \left( \frac{1}{N} S' - 2K \right) \quad (4)$$

где  $\Delta_{SCH}$  отражает однородность коэффициента наклона, а  $\Delta_{ACX}$  сим-.

определяет однородность коэффициента наклона после модификации или корректировки.

В современных условиях глобализации рынка различные факторы могут усилить зависимость страны от остального мира, так что изменение какого-либо параметра в одном регионе может иметь последствия для другой экономики или региона. Однако игнорирование межсекционной зависимости может привести к ошибочным и вводящим в заблуждение выводам (Wei et al., 2022). Поэтому мы использовали тест Песарана (2004) на межсекционную зависимость, чтобы оценить межсекционную зависимость по странам G7. Ниже приводится математическое представление ранее описанного теста, в котором в качестве нулевой гипотезы принимаются независимые кросс-секции:

$$CDTest = \frac{\sqrt{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1+i}^N T_{ik}}{N(N-1)} \quad (5)$$

В связи с общими проблемами панельных данных, т.е. зависимостью от сечения и неоднородностью коэффициентов наклона, для обхода этих проблем используется соответствующий метод оценки единичного корня. В данном исследовании использовался кросс-секционный тест IPS (т.е. CIPS), разработанный Песараном (2007), который является значительно более надежным по сравнению с существующими методами оценки единичного корня, такими как Дикки-Фуллер, дополненный Дикки-Фуллер, Левин, Лин, Чу и т.д. Песаран (2006) первоначально разработал факторную модель для анализа необъяснимых межсекционных средних на предмет межсекционной зависимости. Используя те же методики, Песаран (2007) сумел объединить средние и первые дифференцированные лаги кросс-секционных показателей в линейное выражение дополненного Дики-Фуллера. Эта методология позволила выявить межсекционную зависимость независимо от дисбаланса в панель (T > N или N > T). Используя следующее уравнение, мы можем рассчитать статистические данные CIPS:

$$CIPS = N^{-1} \sum_{i=1}^N \bar{CADF}_i \quad (6)$$

В некоторых случаях тест Pesaran (2007) предполагает постоянство единичного корня в панельном временном ряду.

Учитывая, что все соответствующие факторы являются стационарными, это позволяет

определение долгосрочных равновесных отношений между переменных исследования. Соответственно, к оценкам диагностических тестов,

основные требования для расчета долгосрочных эластичностей, а также обладает характеристиками долгосрочной коинтеграции; следовательно, можно рассчитать долгосрочные эластичности. В дальнейшем в данном исследовании учитывается несимметричное распределение данных, что влечет за собой использование новой стратегии метода квантильной регрессии моментов (MMQR). Хотя существует несколько эконометрических подходов, которые могут определить долгосрочные коэффициенты, такие как панельный полностью модифицированный обыкновенный квадрат Лира, динамический обыкновенный квадрат Лира, обобщенный метод моментов и другие. Однако эти методы ограничены с точки зрения учета нелинейности, что может дать неточные оценки.

Koenker и Bassett Jr (1978) описали метод квантильной регрессии для оценки зависимости среднего и условной дисперсии для проблемы нелинейности. Мачадо и Сильва (2019)

метод MMQR для оценки дисперсии квантильных оценок, основанных на последней методике (Sarkodie and Strezov, 2018). В качестве примера можно привести модифицированное выражение для условной дисперсии масштаба местоположения  $Q_y(\tau | R)$  выглядит следующим образом:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta R_{it} + (\gamma_i + \rho Z_{it}) \mu_{it} \quad (7)$$

В предварительном выражении вероятностное представление  $p(\gamma_i + \rho Z_{it} > 0)$  равно единице, тогда как  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\rho$  представляют собой параметры, которые в данном исследовании предпочитают предвидеть. Подстрочный индекс "i" обозначает фиксированный эффект

обусловленные характеристиками  $\alpha_i$  и  $\gamma_i$ , которые будут ограничены значениями  $i = 1, 2, \dots, n$ . Здесь отличительный признак  $R$ , обозначенный  $Z$ , является  $k$ -вектором, а изменчивость обозначается вектором "1".

$$Z_1 = Z_i(R), i = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

Из уравнения следует, что  $R_{it}$  распределяется идентично. и независимо для общего фиксированного  $i$  и времени ( $t$ ), которое само по себе ортогонально как  $t$ , так и  $i$  (Machado and Silva, 2019). внешние компоненты и резервы являются устойчивыми. Исходя из предыдущего объяснения, исследовательская модель, рассмотренная и представленная ранее, может быть модифицирована следующим образом:

$$Q_y(\tau | R_{it}) = (\alpha_i + \gamma_i q(\tau)) + \beta R_{it} + \rho Z_{it} q(\tau) \quad (9)$$

В рамках адаптированного исследования набор независимых переменных, который включает ВВП, ENEREF, DIGIT и DEINOV, был расширен  $R_{it}$ . Каждая из упомянутых переменных преобразуется в натуральный логарифм, что делает их безразмерными, и представляет их расчетные результаты в процентах. Кроме того,  $R_{it}$  представляет собой квантильное распространение предикторных переменных, как подразумевается в  $Y_{it}$ , и в данном исследовании он представляет собой GHGENER, который также зависит от квантильного распределения.

позицию. Более того, выражение  $-\alpha_i(\tau) \equiv \alpha_i + \gamma_i q(\tau)$  отражает скалярный элемент, который производит фиксированный эффект квантилей  $\tau$  на  $i$ . Однако,

эти квантили не оказывают никакого влияния на перехват. Еще несколько результатов подвержены изменениям в силу структурной независимости спецификации. Наконец,  $q(\tau)$  символизирует  $\tau$  - квантиль выборки, которая  $Q^{0.25}$ ,  $Q^{0.50}$ ,  $Q^{0.75}$ , и  $Q^{0.90}$  в данном исследовании. Поэтому формула квантилей, используемая в данном исследовании, выглядит следующим образом:

$$\min_q \sum_i \sum_t \theta_{\tau} (R_{it} - (\gamma_i + \rho Z_{it}) q) \quad (10)$$

указывают на неоднородность коэффициентов наклона и подтверждают кросс-секционную зависимость. Поэтому в данном исследовании используется адекватный эмпирический метод, учитывающий вышеупомянутые препятствия. В частности, применяется метод коррекции ошибок Вестерлунда (2007). Этот тест предполагает, что компонент коррекции ошибок имеет значение ноль - что рассматривается как нулевое предсказание подхода, основанного на недорассмотрении. Эта оценка особенно эффективна, поскольку она учитывает как средние групповые статистики,  $\bar{y}_i$ , и  $G_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i$ , и т.е.  $G_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i$ .

панельные статистики  $\hat{\alpha}_i$ , и  $P_a = T \cdot \alpha$ .  
т.е.  $P = \alpha$

где  $\theta_r(A) = (\tau - 1) AI(A \leq 0) + TAI(A \leq 0)$  обозначает призыв для тестирования.

Тем не менее, метод MMQR обеспечивает точные прогнозы в определенном месте и масштабе путем отображения значений квантилей. Однако данное исследование сосредоточено на определении надежности модели. Следовательно, в данном исследовании использовался метод Bootstrap Quantile Regression (BSQR). Подход BSQR представляет собой промежуточный метод для анализ доверительных интервалов и значимости статистических данных. Сайт

Преимущество этих ограничений в том, что они повторно дискретизируют информацию, чтобы получить количественную информацию, избегая при этом ограничения асимптотически нормального распределения выборки (Efron and Tibshirani, 1994). Чтобы быть более точно, BSQR использует алгоритмические возможности для

выборочное распределение оцениваемой модели. Кроме того, эта методология обеспечивает более эффективные методы оценки и эмпирические результаты (Efron and Tibshirani, 1994).

Помимо долгосрочной оценки и ее робастности, целью данной статьи является анализ причинно-следственной связи между GHGENER и регрессорами, поскольку предыдущие методы оценки не смогли показать причинно-следственную связь между исследуемыми переменными. В данной работе используется панельный тест причинности Грейнджера, разработанный Думитреску и Хурлиным (2012), который более эффективно преодолевает вышеупомянутые проблемы с панельными данными, включая зависимость от сечения и неоднородность наклона.

4. Результаты и обсуждения

В этом разделе подробно рассматриваются результаты, оцененные с помощью методики, изложенной в разделе 3 рукописи. Статистика предварительной оценки, долгосрочная оценка, регрессионная проверка и анализ причинности интерпретируются в хронологическом порядке следующим образом.

4.1. Предварительная оценочная диагностика

Начнем с описательной статистики диагностики в таблице 1. Средние и медианные значения всех исследуемых переменных практически близки друг к другу, демонстрируя точку равновесия данных. Положительные знаки среднего и медианного значений свидетельствуют о положительном росте исследуемых переменных с течением времени. Стандартные отклонения переменных иллюстрируют волатильность информации и то, насколько сильно они отклоняются от своего среднего положения. Их статистические значения иллюстрируют разброс данных. Числовые значения перекоса и эксцесса показывают симметричность и пикообразность распределения. Однако ENEREF, DIGIT и DEINOV имеют отрицательный перекос, а GHGENER и ВВП - положительный перекос, как указано в таблице ниже. Бера-Жарка показывает ненормальность распределения, а статистики вероятности показывают значимые результаты.

4.2. Гетерогенность и кросс-секционная зависимость

Далее, после анализа успешной дескриптивной диагностики, к переменным применяются тесты Slope Heterogeneity и Cross-Sectional dependence. При анализе кросс-секционных или панельных данных разнообразные базовые аспекты оказывают социальное, финансовое или техническое влияние на изучаемые факторы. Поэтому перед началом процесса оценки применяются тесты на неоднородность наклона и межсекционную зависимость. В таблице 2 ниже представлены результаты теста на неоднородность наклона. Статистические значения теста коэффициентов наклона являются значимыми при 1% уровне значимости, тем самым отвергая нулевую гипотезу об однородности. Полученные результаты свидетельствуют о существовании неоднородности среди переменных, что приводит к анализу кросс-секционной зависимости переменных.

Все результаты, полученные на основе кросс-секционных зависимостей, являются статистически значимыми на 1% уровне значимости. Звездочки на ко-эффектах в Таблице 3 показывают, что нулевая гипотеза об отсутствии взаимозависимости отвергается, указывая на то, что все переменные взаимосвязаны.

Таблица 1  
Диагностические тесты и статистика нормальности.

Таблица 2  
Неоднородность склонов.

Испытание на однородность/неоднородность коэффициента наклона	
Тест	Статистика
$\Delta$	20.984***
$\Delta$ Скорректированный	22.913***

Примечание: Уровень значимости обозначен \*\*\* для 1%, \*\* для 5% и \* для 10%.

Таблица 3  
Межсекционная зависимость.

Тестирование зависимости между секциями	
GHGENER	ВВП
9.803***	23.455***
ЦИФРА	ENEREF
25.323***	23.523***
DEINOV	
23.606***	

Примечание: Уровень значимости обозначен \*\*\* для 1%, \*\* для 5% и \* для 10%.

и зависимы в поперечном разрезе. Общий вывод теста заключается в том, что все переменные GHGENER, GDP, ENEREF, DIGIT и DEINOV являются зависимыми в странах G7.

4.3. Анализ единичного корня и тесты на коинтеграцию

Теперь проводится анализ единичного корня с использованием теста CIPS Песарана (2007). Результаты стационарности представлены в Таблице 4. GHGENER и ВВП показали значимость при первой разнице, в то время как ENEREF, DIGIT и DEINOV статистически значимы на уровне с 1%-ным уровнем значимости. Кроме того, отрицательные значения коэффициентов указывают на более сильное существование единичного корня. Значимость результатов отвергла нулевую гипотезу об отсутствии стационарности и позволила исследовать долгосрочную связь переменных.

Все переменные в корневом анализе обладают свойством стационарности, что заставляет нас оценить коинтеграционный анализ. Для этого в исследовании используется тест коинтеграции Вестерлунда ECM. Результаты теста в таблице 5 показывают, что нулевая гипотеза об отсутствии коинтеграции верна. Значимые р-значения показывают наличие долгосрочных ассоциаций между переменными, указывая на то, что ENEREF, DEINOV, GDP и DIGIT коинтегрированы.

Таблица 4  
Тестирование единичного корня.

Песаран (2007) CIPS			
Переменная	I(0)	I(1)	Уровень интеграции
GHGENER	-2.516	-5.415***	I(1)
ВВП	-1.904	-4.196***	I(1)
ЭНЕРЕФ	-3.102***	-	I(0)
ЦИФРА	-3.037**	-	I(0)
DEINOV	-3.857***	-	I(0)

Примечание: Уровень значимости обозначен \*\*\* для 1%, \*\* для 5% и \* для 10%.

<i>L. Zheng и др.</i>	GHGENER	ВВП	ENEREF	ЦИФРА	Экономика энергетики (2002)
Средний	5.912288	12.47180	0.973963	1.287627	0.947816
Медиана	5.766892	12.40003	0.980833	1.779596	0.972203
Максимальный	6.799496	13.30048	1.218133	1.984527	1.187239
Минимум	5.481925	11.97023	0.625786	-1.755857	0.674861
Станд. Dev.	0.385423	0.328406	0.156941	0.922636	0.134223
Коэффициент перегиба	1.317023	1.095849	-0.521112	-1.514445	-0.278807
Куртозис	3.589488	3.554970	2.463774	4.206636	1.929501
Jarque-Bera	65.87479	46.21675	12.42115	96.11426	13.17283
Вероятность	0.000000	0.000000	0.002008	0.000000	0.001379



Таблица 5  
Тестирование на коинтеграцию.

Тест коинтеграции Вестерлунда ЕСМ			
Переменная	Значение	Z-значение	p-value
G <sub>t</sub>	-2.661	-1.756	0.040**
G <sub>a</sub>	-8.758	0.417	0.662
P <sub>t</sub>	-6.529	-1.778	0.038**
P <sub>a</sub>	-7.630	-0.548	0.292

Примечание: Уровень значимости обозначен \*\*\* для 1%, \*\* для 5% и \* для 10%.

с выбросами парниковых газов в странах G7.

4.4. Метод моментов квантильной регрессии

Ненормальность информации указывает на применение метода квантильных регрессий моментов для исследования детерминантов выбросов, связанных с энергетикой. Основные результаты представлены в таблице 6 рукописи со следующими возможными интерпретациями переменных. Во-первых, экономический рост показывает значительную связь с выбросами парниковых газов во всех квантилях с положительной зависимостью. Рост экономической активности в экономике увеличивает производство, что значительно увеличивает вредные выбросы, связанные с энергией и углеродом, негативно влияющие на окружающую среду. Вывод о переменной согласуется с данными (Qing et al., 2022; Raihan et al., 2022; Raihan and Tuspekova, 2022a; Polloni-Silva et al., 2021; Su et al., 2020; Wiedenhofer et al., 2020; Fang et al., 2019). То есть рост ВВП существенно повышает уровень выбросов. Во-вторых, энергоэффективность отрицательно связана с выбросами, связанными с энергетикой (GHGENER), поскольку коэффициенты во всех квантилях имеют отрицательный знак, что указывает на обратную связь между ENEREF и GHGENER. Результат переменной согласуется с (Qing et al., 2022; Mirza et al., 2022; Lei et al., 2022). Это утверждает, что повышение энергоэффективности способствует энергосбережению, что значительно снижает выбросы (GHGENER) в экономиках стран G7. В-третьих, коэффициент "развитие технологий, связанных с охраной окружающей среды" значим в первом квантиле, как указано в таблице 6, что свидетельствует о том, что DEINOV имеет последовательную связь с выбросами парниковых газов. Однако знаки коэффициентов отрицательны во всех квантилях, что свидетельствует о том, что увеличение DEINOV способствует снижению выбросов парниковых газов в G7. Это согласуется с результатами (Hussain et al., 2022; Hassan et al., 2022). В-четвертых, роль цифровизации также показала значительную связь с выбросами парниковых газов в странах G7. Результаты показывают, что рост цифровизации снижает уровень выбросов парниковых газов в результате существования отрицательной связи между DIGIT и GHGENER. Результат согласуется с данными (Ma et al., 2022; Dong et al., 2022; Chen, 2022). Это говорит о том, что развитие цифровой экономики повышает эффективность использования энергии и снижает выбросы парниковых газов в стране, способствуя созданию чистой и устойчивой окружающей среды. Графическая тенденция между ENEREF, DEINOV, ВВП и DIGIT и выбросами парниковых газов показана на рис. 6 данного раздела, представляющего исследование.

Таблица 6  
Первичные результаты - MMQR.

Переменная	Местонахождение	Масштаб	Квантили			
			Q0.25	Q0.50	Q0.75	Q0.90
ВВП	1.058*** [0.013]	-0.051*** [0.009]	1.076*** [0.020]	1.034*** [0.012]	1.006*** [0.010]	0.990*** [0.011]

переменных во всех квантилях (MMQR).

4.5. Проверка надежности - BSQR

Робастность модели анализируется с помощью Bootstrap Quantile regressions (BSQR) в таблице 7. Статистика тестов показывает, что примененная модель надежна и предсказывает значимые и эффективные результаты. Значимые результаты представлены в таблице, особенно в Q (0,75) и Q (0,90). Однако знаки коэффициентов показали положительные, но сиг-нально значимые результаты. Графическое представление коэффициентов всех переменных (во всех квантилях) показано на рис. 7 данного раздела.

4.6. Анализ причинно-следственных связей

В исследовании используется анализ панельной причинности Думитреску-Хурлина для изучения причинно-следственной связи между зависимой и независимой переменными на предмет того, какая переменная влияет на кого. Пары переменных ВВП = / GHGENER, GHGENER = / GDP; ENEREF = / GHGENER, GHGENER = / ENEREF; и DEINOV = / GHGENER, GHGENER = / DEINOV показали двустороннюю причинно-следственную связь друг с другом с 1% и 10% уровнями сиг-нальности, в то время как DIGIT = / GHGENER и GHGENER = / DIGIT не показали значительной причинно-следственной связи между ними. Результаты показывают, что экономический рост и выбросы парниковых газов, энергоэффективность и выбросы парниковых газов, развитие экологически чистых технологий и выбросы парниковых газов обуславливают друг друга, что статистически проиллюстрировано в таблице 8.

Что касается общей интерпретации результатов анализа причинности, то результаты статистики вероятности согласуются с результатами следующих исследований (Esso and Keho, 2016; Akdag and Yildirim., 2020; Khan et al., 2022a). Однако причинно-следственная связь между DEINOV и DIGIT с GHENER является новой в прагматическом корпусе знаний, и полученные результаты вносят вклад в преобладающую литературу.

4.7. Обсуждение эмпирики

Выше были приведены расчетные результаты, полученные в результате применения эконометрических подходов. Пошаговое обсуждение полученных результатов показывает, что переменные экономического роста (ВВП), энергоэффективности (ENEREF), развития экологически связанных технологий (DEINOV) и цифровизации (DIGIT) имеют долгосрочную и значимую связь с выбросами, связанными с энергией (GHGENER) в странах G7. В дальнейшем регрессионный анализ показал, что увеличение экономического роста вследствие роста производственной деятельности приводит к увеличению выбросов, связанных с энергией, в стране. Кроме того, технологии, связанные с охраной окружающей среды, энергоэффективность и цифровизация оказались значительными факторами, способствующими контролю и ограничению выбросов. Цифровая экономика повышает энергоэффективность, что способствует экологической устойчивости. Цифровизация также повышает роль прогресса в экологических технологиях, что существенно ограничивает выбросы энергии.



<i>L. Zhelezov</i>	-0.818*** [0.043]	0.111*** [0.031]	-0.857*** [0.060]	-0.765*** [0.038]	-0.791*** [0.034]	Экономика энергетики (2023) 9.670*** [0.037]
DEINOV	-0.106* [0.062]	0.046 [0.044]	-0.122* [0.074]	-0.085 [0.052]	-0.059 [0.050]	-0.045 [0.054]
ИИФРА	-0.022** [0.009]	0.002 [0.007]	-0.022** [0.011]	-0.023*** [0.008]	-0.024*** [0.007]	-0.024*** [0.008]
Константа	-6.359*** [0.190]	-0.553*** [0.136]	-6.554*** [0.265]	-6.098*** [0.166]	-5.791*** [0.151]	-5.622*** [0.163]

Здесь GHGENER - зависимая переменная. Примечание: Уровень значимости обозначен \*\*\* для 1%, \*\* для 5% и \* для 10%.

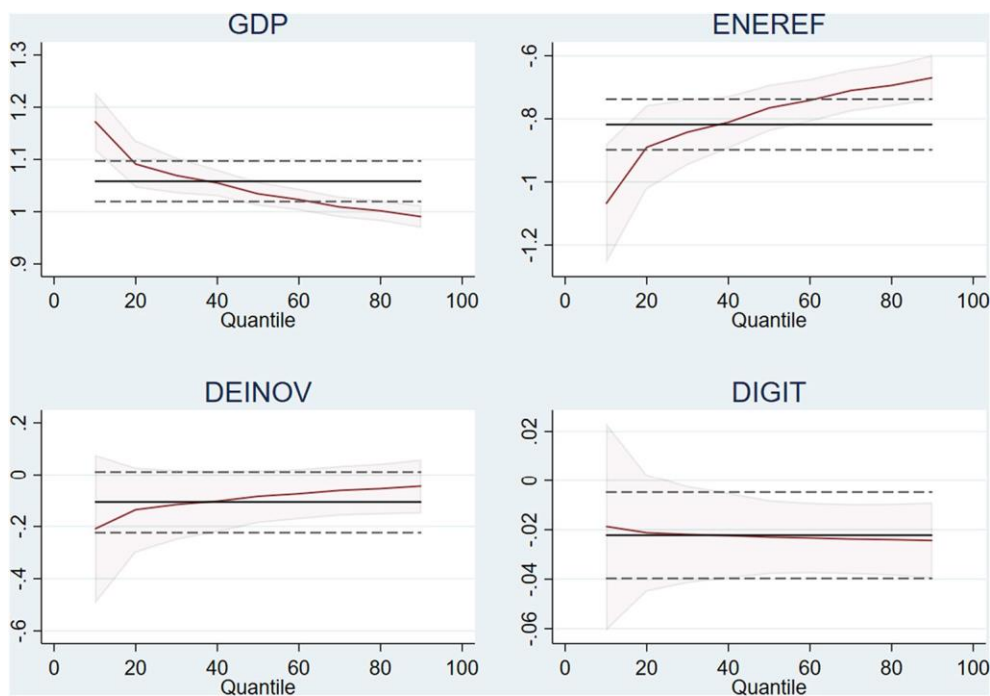


Рис. 6. Графическое изображение коэффициентов - MMQR.

Таблица 7

Результаты оценки устойчивости - BSQR.

Переменная	Квантили			
	Q0 <sub>.25</sub>	Q0 <sub>.50</sub>	Q0 <sub>.75</sub>	Q0 <sub>.90</sub>
ВВП	1.084***	1.044***	1.006***	0.999***
ENEREF	0.917***	0.800***	0.729***	0.732***
DEINOV	0.131	0.100	0.095**	0.056***
ЦИФРА	0.015	0.015	0.017***	0.031***
Постоянная	6.600***	6.191***	5.740***	5.653***

Здесь GHGENER - зависимая переменная. Примечание: Уровень значимости обозначен \*\*\* для 1%, \*\* для 5% и \* для 10%.

Результаты регрессии согласуются с выводами следующих разделов литературы (Mirza et al., 2022; Lei et al., 2022; Hussain et al., 2022; Hassan et al., 2022; Ma et al., 2022; Dong et al., 2022; Chen, 2022; Qing et al., 2022; Raihan et al., 2022; Raihan and Tuspekova, 2022a; Polloni-Silva et al., 2021; Su et al., 2020; Wiedenhof et al., 2020; Fang et al., 2019). Аналогично, анализ причинно-следственной связи согласуется с (Esso and Keho, 2016; Akdag and Yildirim., 2020; Khan et al., 2022a). В целом, связь между цифровизацией, экологическими технологиями, энергоэффективностью и выбросами, связанными с энергетикой, является новым результатом для экономик G7. Общие результаты имеют важное экономическое и экологическое значение. Поэтому прагматичная политика с учетом этих выводов может быть структурирована для улучшения глобальных экономических и экологических показателей стран. Продвижение интегрированной цифровой экономики и инноваций, касающихся экологически чистых методов энергоэффективности и чистой и зеленой экономики, является ресурсом для ограничения выбросов, связанных с энергией. Растущее потребление энергии привело к выбросам, связанным с энергетикой, которые ухудшают окружающую среду и влияют на качество жизни. Страны Большой семерки известны как мировые лидеры; их действия в отношении климата оказывают прямое и косвенное влияние на соседние государства. Более того, развивающиеся экономики страдают от последствий действий развитых стран. Их растущее

невозобновляемое потребление энергии и практические действия влияют на глобальную экономику. Поэтому для поддержания экономики и окружающей среды на национальном и международном уровнях необходимы правильные и эффективные стратегии.

В заключение следует отметить, что в данном исследовании рассматривается взаимосвязь между цифровизацией, экономическим ростом, развитием природоохраных технологий и энергоэффективностью на выбросы, связанные с энергопотреблением. Полученные результаты являются новыми с точки зрения одновременной оценки вышеупомянутых переменных в странах G7. Хотя эти факторы были подробно изучены, цифровизация осталась без внимания. Поэтому в настоящем исследовании предполагается выяснить, являются ли цифровизация и энергоэффективность обязательными для достижения нулевого уровня выбросов через эффективную экосистему. Исследование тщательно изучило детерминанты выбросов парниковых газов в странах G7 с помощью инновационных эконометрических методов. Совершенствование цифровой экономики способствует технологическим инновациям, сокращению бедности и повышению уровня жизни, а также снижению автомобильных и энергетических выбросов. С другой стороны, как следует из полученных результатов, энергоэффективность, экономический рост и экологические технологии являются существенными факторами контроля выбросов для улучшения состояния окружающей среды. Полученные результаты в какой-то мере согласуются с несколькими преобладающими исследованиями. В целом, связь между цифровизацией, экологическими технологиями, энергоэффективностью и выбросами, связанными с энергетикой, дает новые результаты в случае экономик стран G7. Наше исследование показало, что цифровизация, энергоэффективность и инновации привели к ограничению выбросов, связанных с энергопотреблением. Это крайне важно для качества окружающей среды и является важным источником устойчивого экономического развития и прогресса.

Исходя из результатов исследования, ниже приведены некоторые соответствующие политические последствия, которые могут преобразовать экологическую экономику. Технологическое развитие имеет большое значение для окружающей среды и улучшения промышленных секторов. В результате экономическая устойчивость резко возрастет. Экологически чистые инновации уменьшают вредные выбросы и улучшают глубокую интеграцию сообществ в глобальную экономику. Правительства должны поощрять и фокусироваться на эффективном использовании ресурсов для инновационного развития. Кроме того, необходимо одобрить совершенствование и развитие цифровой экономики с точки зрения охраны окружающей среды. В частности, это касается поощрения умных технологий наряду с энергоэффективными услугами для улучшения благосостояния. Кроме того, будет активизирован искусственный интеллект для защиты биоразнообразия и климата наряду с эффективным использованием ресурсов. Это может изменить мир

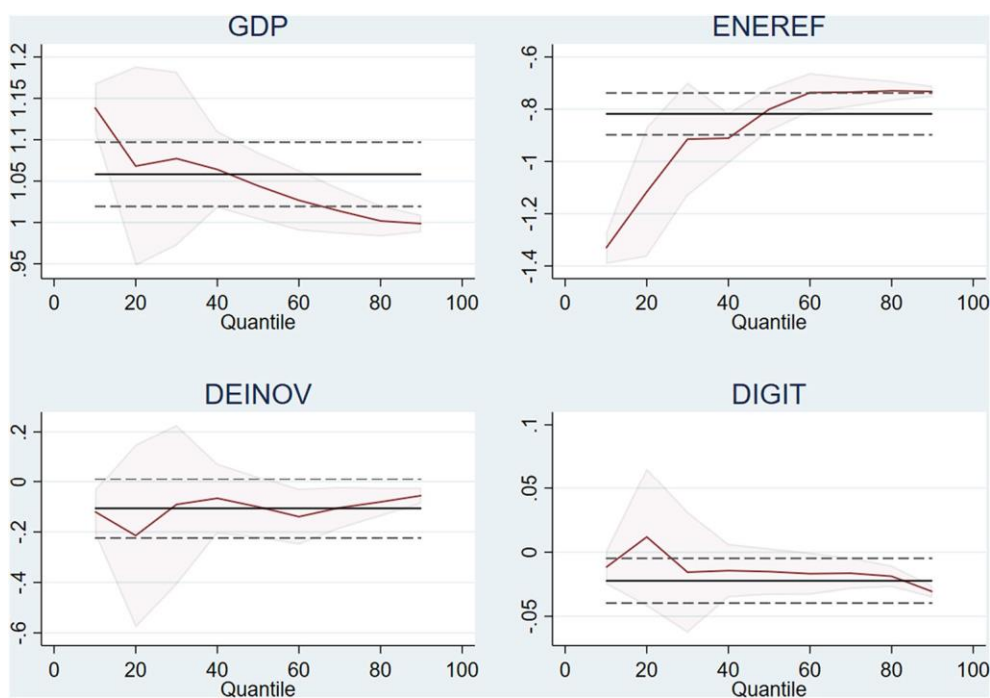


Рис. 7. Графическое изображение коэффициентов - BSQR.

Таблица 8

Тест на причинно-следственную связь.

Панельная причинность Думитреску-Хурлина			
Но значение	WaldStats	Zstats	p -
ВВП ≠ GHGENER	5.40457***	7.04581	2.E-12
ВВП ≠ ENEREF	2.18915*	1.80708	
ВВП ≠ DEINOV	0.0707		
ЭНЕРГИЯ ≠ GHGENER	3.37736***	3.74297	0.0002
GHGENER ≠ ENEREF	3.91651***	4.621394	.E-06
ЦИФРА ≠ GHGENER	1.71600	1.03620	0.3001
GHGENER ≠ DIGIT	1.29483	0.35001	0.7263
ДЕЙНОВ ≠ GHGENER	5.66669***	7.47286	8.E-14
GHGENER ≠ DEINOV	3.71621***	4.295052	.E-05

Примечание: Уровень значимости обозначен \*\*\* для 1%, \*\* для 5% и \* для 10%.

благодаря изобретательности и инновациям. Кроме того, развитые страны должны сократить рост невозобновляемого потребления энергии и практики, поскольку они также влияют на глобальную экономику, особенно на развивающиеся и уязвимые страны, которые сталкиваются с наводнениями и сквозняками из-за серьезных побочных эффектов климата. Следовательно, для обеспечения устойчивости экономики и окружающей среды на внутреннем и международном уровнях необходимы соответствующие и хорошо организованные стратегии.

### 5.1. Ограничения

Ограничением исследования является то, что исследование ограничено с т р а н а м и Большой семерки. Аналогичный анализ может быть повторен в других экономиках для сравнительного анализа. В будущих целях можно исследовать включение других новых и инновационных переменных, которые прямо или косвенно влияют на выбросы, связанные с энергетикой.

### Заявление авторов

**Ли Чжэн:** Оригинальная идея; Написание статьи.

**Линг Юань:** Рецензирование документов; Пересмотр.

**Зеешан Хан:** Анализ и методология.

**Рамез Абубакр Бадиб:** общее рецензирование статьи; улучшение черновика; исправление грамматических ошибок.

**Лейлей Чжан:** Наблюдение; общее рецензирование статьи; техническая поддержка.

## Финансирование

Эта работа была поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (грант № 71673082) и ключевым проектом Комитета по обзору общественных наук провинции Хунань (грант № XSP20ZDI023).

## Приложение А. Дополнительные данные

Дополнительные данные к этой статье можно найти в Интернете по адресу <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106428>.

## Ссылки

- Акдаг, С., Йылдырым, Х., 2020. На пути к устойчивому подходу к смягчению влияния энергоэффективности на выбросы парниковых газов в европейских странах. *Heliyon* 6 (3) e03396.
- Амин, М., Чжоу, С., Сафи, А., 2022. Связь между выбросами углерода на основе потребления, торговли, экологическими инновациями и производительностью энергии: эмпирические данные по странам N-11. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (26), 39239-39248.
- Челик, Д., Мераль, М.Е., Васим, М., 2022. Исследование и анализ эффективных подходов, возможностей, узких мест и будущих потенциальных возможностей для цифровизации энергетических систем и целей устойчивого развития. *Electr. Power Syst. Res.* 211, 108251.
- Чен, Л., 2022. Как выбросы CO<sub>2</sub> реагируют на изменения в размере правительства и уровне цифровизации? Данные по странам БРИКС. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (1), 457-467.
- Cheng, F., He, Q.P., Zhao, J., 2019. Новый подход к мониторингу процессов на основе вариационного рекуррентного автоэнкодера. *Comput. Chem. Eng.* 129, 106515.
- Climate Transparency, 2018. <https://www.climate-transparency.org/g7-countries-performance-in-the-transition-towards-a-low-carbon-economy>.
- Dong, F., Li, J., Wang, Y., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., 2019. Драйверы показателя развязки между экономическим ростом и CO<sub>2</sub>, связанным с энергетикой, в Китае: пересмотр с точки зрения разложения и пространственно-временной неоднородности. *Sci. Total Environ.* 685, 631-658.
- Донг, Ф., Ху, М., Гао, Й., Лю, Й., Жу, Ж., Пан, Й., 2022. Как цифровая экономика влияет на выбросы углекислого газа? Данные по 60 странам мира. *Sci. Total Environ.* 852, 158401.
- Думитреску, Е.И., Херлин, К., 2012. Тестирование на некаузальность по Грассеру в гетерогенных панелях. *Экон. Model.* 29 (4), 1450-1460.
- Эфрон, Б., Тибширани, Р.Дж., 1994. *An Introduction to the Bootstrap*. CRC Press.
- Egyigit, N., Özcüre, G., 2015. Эко-инновации как стратегия современной эпохи компаний в развивающихся странах: сравнение между Турцией и Европейским союзом. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 195, 1216-1225.

- Эссо, Л.Дж., Кехо, Й., 2016. Потребление энергии, экономический рост и выбросы углерода: доказательства коинтеграции и причинно-следственной связи на примере отдельных африканских стран. *Energy* 114, 492-497.
- Fang, K., Tang, Y., Zhang, Q., Song, J., Wen, Q., Sun, H., Ji, C., Xu, A., 2019. Достигнет ли Китай пика выбросов углерода, связанных с энергетикой, к 2030 году? Уроки 30 китайских провинций. *Appl. Energy* 255, 113852.
- Газуани, А., Джебли, М.Б., Шахзад, У., 2021. Влияние экологических налогов и технологий на выбросы парниковых газов: контекстуальные данные по ведущим европейским странам-эмитентам. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (18), 22758-22767.
- Гамильтон, К., Туртон, Х., 2002. Детерминанты роста выбросов в странах ОЭСР. *Энергетическая политика* 30 (1), 63-71.
- Хассан, Т., Сонг, Х., Хан, И., Кириккалели, Д., 2022. Энергоэффективность - источник низкоуглеродных источников энергии? Данные по 16 странам ОЭСР с высоким уровнем дохода. *Energy* 243, 123063.
- He, T., Zhang, Z., Zhang, H., Zhang, Z., Xie, J., Li, M., 2019. Мешок трюков для классификации изображений с помощью конволюционных нейронных сетей. In: Труды конференции IEEE/CVF по компьютерному зрению и распознаванию образов, стр. 558-567.
- Хеллеманс, И., Портер Дж. А., Дирикер, Д., 2022. Использование цифровых технологий для устойчивого развития: Понимание того, как взаимодействие на цифровых платформах, ориентированных на устойчивое развитие, управляет напряженностью и парадоксами. *Bus. Strateg. Environ.* 31 (2), 668-683.
- Хусейн, М., Доган, Э., 2021. Роль институционального качества и технологий, связанных с окружающей средой, в деградации окружающей среды для стран БРИКС. *J. Clean. Prod.* 304, 127059.
- Хусейн, М., Мир, Г.М., Усман, М., Йе, К., Мансур, С., 2022. Анализ роли технологий, связанных с окружающей средой, и выбросов углерода в странах с развивающейся экономикой: шаг к устойчивому развитию. *Environ. Technol.* 43 (3), 367-375.
- Jarque, C.M., Bera, A.K., 1987. Тест на нормальность наблюдений и остатков регрессии. In: *International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique*, pp. 163-172.
- JinRu, L., Qamruzzaman, M., 2022. Взаимосвязь между экологическими инновациями, энергоэффективностью и экологической устойчивостью в странах G7: какова роль институционального качества? *Front. Environ. Sci.* 594.
- Хан, З., Али, М., Джинью, Л., Шахбаз, М., Сикун, Й., 2020. Выбросы углерода на основе потребления и взаимосвязь торговли: данные по девяти странам-экспортерам нефти. *Energy Econ.* 89, 104806.
- Хан, З., Али, С., Донг, К., Ли, Р.Й.М., 2021. Как фискальная децентрализация влияет на выбросы CO<sub>2</sub>? Роль институтов и человеческого капитала. *Energy Econ.* 94, 105060.
- Хан, М.К., Бабар, С.Ф., Орьяни, Б., Дагар, В., Рехман, А., Закари, А., Хан, М.О., 2022. Роль финансового развития, технологий, связанных с окружающей средой, научных исследований и разработок, энергоемкости, истощения природных ресурсов и температуры в устойчивом развитии окружающей среды в Канаде. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (1), 622-638.
- Хан, М.Б., Салим, Х., Шаббир, М.С., Хуобай, Х., 2022a. Влияние глобализации, энергопотребления и экономического роста на выбросы углекислого газа в странах Южной Азии. *Energy Environ.* 33 (1), 107-134.
- Koenker, R., Bassett Jr., G., 1978. Персессионные квантили. *Econometrica: J. Econ. Soc.* 33-50.
- Lei, W., Xie, Y., Hafeez, M., Ullah, S., 2022. Оценка динамической связи между энергоэффективностью, потреблением возобновляемой энергии и выбросами CO<sub>2</sub> в Китае. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (13), 19540-19552.
- Li, X., Liu, J., Ni, P., 2021. Влияние цифровой экономики на выбросы CO<sub>2</sub>: теоретический и эмпирический анализ. *Sustainability* 13 (13), 7267.
- Лин, Б., Раза, М.Я., 2019. Анализ выбросов CO<sub>2</sub>, связанных с энергетикой, в Пакистане. *J. Clean. Prod.* 219, 981-993.
- Liu, J., Sun, S., Han, Y., Meng, J., Chen, Y., Yu, H., Zhang, X., Ma, F., 2021. Лигнинные отходы как со-субстрат при обеспечивании азокрасителей *Ganoderma lucidum*. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 122, 85-92.
- Ma, Y., Shi, H., Ma, H., Wang, M., 2013. Динамический мониторинг процесса с использованием адаптивного локального коэффициента выброса. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 127, 89-101.
- Ma, Q., Tariq, M., Mahmood, H., Khan, Z., 2022. Взаимосвязь между цифровой экономикой и выбросами углекислого газа в Китае: сдерживающая роль инвестиций в исследования и разработки. *Technol. Soc.* 68, 101910.
- Мачадо, Ж.А., Сильва, Ж.С., 2019. Квантили через моменты. *J. Econ.* 213 (1), 145-173.
- Махапатра, Б., Ирфан, М., 2021. Асимметричное воздействие энергоэффективности на выбросы углерода: сравнительный анализ между развитыми и развивающимися экономиками. *Energy* 227, 120485.
- Мирза, Ф.М., Синха, А., Хан, Дж.Р., Калугина, О.А., Зафар, М.В., 2022. Влияние энергоэффективности на выбросы CO<sub>2</sub>: эмпирические данные из развивающихся стран. *Gondwana Res.* 106, 64-77.
- Парамати, С.Р., Шахзад, У., Доган, Б., 2022. Роль экологических технологий для спроса на энергию и энергоэффективности: данные по странам ОЭСР. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 153, 111735.
- Песаран, М.Х., 2004. Общие диагностические тесты для межсекционной зависимости в панелях. *Эмпири. Econ.* 60, 13-50.
- Песаран, М.Х., 2006. Оценка и выводы в больших гетерогенных панелях с многофакторной структурой ошибок. *Econometrica* 74 (4), 967-1012.
- Песаран, М.Х., 2007. Простой панельный тест на единичный корень при наличии зависимости от сечения. *J. Appl. Econ.* 22 (2), 265-312.
- Песаран, М.Х., Ямагата, Т., 2008. Тестирование однородности наклона в больших панелях. *J. Econ.* 142 (1), 50-93.
- Polloni-Silva, E., Silveira, N., Ferraz, D., de Mello, D.S., Morales, H.F., 2021. Движущие силы выбросов CO<sub>2</sub>, связанных с энергетикой, в Бразилии: региональное применение модели STIRPAT. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (37), 51745-51762.

- L. Zheng, и др., 2022. Эко-инновации и детерминанты выбросов парниковых газов в странах ОЭСР. J. Clean. Prod. 319, 128739.
- Пускарский, К., Люфтагер, Р., Хоффнер, Ж., Хааструп, П., Кутендран, С., Муди, Ж., 2022, март. Применение цифровых технологий для понимания энергоэффективности и ее продвижения к целям сокращения выбросов углерода. In: Международная конференция и выставка по бурению IADC/SPE. OnePetro.
- Цин, Л., Алвахед Дагестани, А., Шинвари, Р., Чун, Д., 2022. Новые методы исследования для оценки возобновляемых источников энергии и связанных с энергетикой парниковых газов: данные по экономикам стран БРИКС. Econ. Res. Ekonomiska Istra`zivanja 1-17.
- Райхан, А., Туспекова, А., 2022. На пути к устойчивой окружающей среде: взаимосвязь между экономическим ростом, использованием возобновляемых источников энергии, площадью лесов и выбросами углерода в Малайзии. Ресурс. Conserv. Recycl. Adv. 15, 200096.
- Райхан, А., Туспекова, А., 2022a. Роль экономического роста, возобновляемых источников энергии и технологических инноваций для достижения экологической устойчивости в Казахстане. Curr. Res. Environ. Sustain. 4, 100165.
- Райхан, А., Бегум, Р.А., Саид, М.Н.М., Перейра, Ж.Ж., 2022. Взаимосвязь между экономическим ростом, использованием возобновляемых источников энергии, технологическими инновациями и выбросами углерода в целях достижения Парижского соглашения в Малайзии. Environ. Syst. Decisions 1-22.
- Рамос-Меза, К.С., Жанбаев, Р., Билал, Х., Султан, М., Пекергин, З.Б., Арслан, Х.М., 2021. Имеет ли цифровизация значение для "зеленых" предпочтений в связи с волатильностью выпуска и качеством окружающей среды? Environ. Sci. Pollut. Res. 28 (47), 66957-66967.
- Саркоди, С.А., Стрезов, В., 2018. Эмпирическое исследование экологической кривой Кузнецца и гипотезы кривой экологической устойчивости для Австралии, Китая, Ганы и США. J. Clean. Prod. 201, 98-110.
- Шахзад, У., Радулеску, М., Рахим, С., Исик, К., Юсаф, З., Ионеску, С.А., 2021. Способствуют ли инструменты политики и технологии, связанные с окружающей средой, производству возобновляемой энергии? Изучение контекстуальных данных из развитых экономик. Energies 14 (3), 690.
- Su, K., Wei, D.Z., Lin, W.X., 2020. Влияющие факторы и пространственные модели выбросов углерода, связанных с энергетикой, в масштабах города в провинции Фуцзянь, юго-восточный Китай. J. Clean. Prod. 244, 118840.
- Vakili, S., O`lger, A.L., Scho`nborn, A., Ballini, F., Hoang, A.T., 2022. Энергетические чистые и зеленые рамки для судостроительного сообщества на пути к нулевым выбросам: стратегический анализ от концепции до конкретного примера. Int. J. Energy Res. 46 (14), 20624-20649.
- Wang, Y., Zhao, T., 2015. Воздействие выбросов CO<sub>2</sub>, связанных с энергетикой: данные по слаборазвитым, развивающимся и высокоразвитым регионам Китая. Ecol. Indic. 50, 186-195.
- Wang, P., Wu, W., Zhu, B., Wei, Y., 2013. Изучение факторов влияния выбросов CO<sub>2</sub>, связанных с энергетикой, с помощью модели STIRPAT в провинции Гуандун, Китай. Appl. Энергия 106, 65-71.
- Ван, В., Ли, М., Чжан, М., 2017a. Исследование изменений показателя развязки между выбросами CO<sub>2</sub>, связанными с энергетикой, и ВВП в Китае. Energy 128, 11-18.
- Wang, C., Wang, F., Zhang, X., Yang, Y., Su, Y., Ye, Y., Zhang, H., 2017b. Изучение движущих факторов выбросов углерода, связанных с энергетикой, с помощью расширенной модели STIRPAT на основе идентичности IPAT в Синьцзяне. Renew. Sust. Energ. Rev. 67, 51-61.
- Вэй, Дж., Рахим, С., Ванг, С., 2022. Роль деградации окружающей среды, качества институтов и государственных расходов на здравоохранение для здоровья человека: данные по семи странам с формирующейся экономикой. Front. Public Health 10, 870767.
- Вэнь, Х., Ли, К.К., Сонг, З., 2021. Цифровизация и окружающая среда: как ИКТ влияют на экологические показатели предприятия? Environ. Sci. Pollut. Res. 28 (39), 54826-54841.
- Вестерлунд, Дж., 2007. Тестирование на коррекцию ошибок в панельных данных. Oxf. Bull. Econ. Stat. 69 (6), 709-748.
- Wiedenhofer, D., Vir`ag, D., Kalt, G., Plank, B., Streeck, J., Pichler, M., Mayer, A., Краусманн, Ф., Броквей, П., Шаффарцик, А., Фишман, Т., 2020. Систематический обзор данных о развязке ВВП, использования ресурсов и выбросов ПГ, часть I: библиометрическое и концептуальное картирование. Environ. Res. Lett. 15 (6), 063002.
- Wu, H., Zhao, J., 2018. Диагностика неисправностей химических процессов на основе модели глубокой конволюционной нейронной сети. Comput. Chem. Eng. 115, 185-197.
- Yang, H., Li, X., Ma, L., Li, Z., 2021. Использование системной динамики для анализа ключевых факторов, влияющих на выбросы CO<sub>2</sub> в Китае, связанные с энергетикой, и сценариев сокращения выбросов. J. Clean. Prod. 320, 128811.
- Zhao, X., Ma, X., Chen, B., Shang, Y., Song, M., 2022a. Вызовы на пути к углеродной нейтральности в Китае: Стратегии и контрмеры. Ресурс. Conserv. Recy. 176, 105959.
- Zhao, X., Nakonieczny, J., Jabeen, F., Shahzad, U., Jia, W., 2022b. Вызывают ли "зеленые" инновации "зеленую" совокупную факторную производительность? Новые выводы на основе данных китайского городского уровня. Technol. Прогнозирование. Soc. Chang. 185, 122021.
- Zhao, X., Shang, Y., Ma, X., Xia, P., Shahzad, U., 2022c. Ведет ли торговля квотами на выбросы углекислого газа к инновациям в области "зеленых" технологий: Последние данные по китайским компаниям в ресурсо-ориентированных отраслях. IEEE T. Eng. Manage. 1-18.
- Zheng, L., Abbasi R, K, Salem, S, Irfan, M, Akarado, R, Iy, V, K, 2022. Как технологические инновации и качество институтов влияют на отраслевое энергопотребление в Пакистане? Свежие политические идеи на основе нового эконометрического подхода. Technol. Forecast. Soc. Chang. 183, 121900.
- Zhu, Z., Liu, B., Yu, Z., Cao, J., 2022. Влияние цифровой экономики на выбросы углекислого газа: данные по Китаю. Int. J. Environ. Res. Public Health 19 (15), 9450.