

# Трансформация управления инновационным развитием для решения проблем декарбонизации и роста энергоэффективности

Александр Мельник <sup>a</sup>

Профессор, amelnik21@gmail.com

Ирина Наумова <sup>b</sup>

Профессор, naoumova@hartford.edu

Кирилл Ермолаев <sup>a</sup>

Доцент, ermolaev.kirill.a@gmail.com

<sup>a</sup> ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

<sup>b</sup> Университет Хартфорда (University of Hartford), 200 Bloomfield Ave., West Hartford, CT, 06110 USA

## Аннотация

Исследование направлено на формирование возможных подходов к решению проблем декарбонизации с позиции их рассмотрения в системе приоритетов инновационной модернизации российской экономики в условиях появления новых вызовов и угроз развития мирового сообщества. При проведении исследования была выдвинута гипотеза о наличии двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация». Для ее подтверждения были построены эконометрические модели, позволившие учесть неизмеримые индивидуальные различия объектов и доказать наличие исследуемых эффектов. В качестве исходной информации были использованы панельные данные по 83 российским регионам за 2016–2020 гг. Обоснована необходимость учета выявленных эффектов при разработке концептуальных основ адаптации процессов управления инновационным развитием для повышения энергоэффективности

и достижения целей декарбонизации российской экономики в рамках единого контура управления. Особое внимание уделено анализу отражения проблем повышения энергоэффективности и достижения целей декарбонизации в программах инновационного развития российских регионов. Разработаны концептуальные требования для проведения адаптации в триаде рассмотренных процессов. Полученные результаты расширяют научные представления о возможных подходах к достижению целей устойчивого развития национальных экономик и могут быть использованы странами с разным уровнем научно-технологического потенциала и с разной степенью обеспеченности энергетическими ресурсами при решении прикладных задач энергетического перехода для создания механизмов их реализации, включая различные аспекты проведения декарбонизации экономики и достижения углеродной нейтральности.

**Ключевые слова:** инновационное развитие; повышение энергоэффективности; декарбонизация; двойные эффекты взаимного влияния; адаптация процессов управления

**Цитирование:** Melnik A., Naoumova I., Ermolaev K. (2023) Adapting Innovation Development Management Processes to Improve Energy Efficiency and Achieve Decarbonization Goals. *Foresight and STI Governance*, 17(1), 51–66. DOI: 10.17323/2500-2597.2023.1.51.66

# Adapting Innovation Development Management Processes to Improve Energy Efficiency and Achieve Decarbonization Goals

**Alexander Melnik**<sup>a</sup>

Professor, amelnik21@gmail.com

**Irina Naoumova**<sup>b</sup>

Professor, naoumova@hartford.edu

**Kirill Ermolaev**<sup>a</sup>

Associate Professor, ermolaev.kirill.a@gmail.com

<sup>a</sup>Kazan Federal University, Kremlyovskaya str., 18, Kazan 420008, Respublika Tatarstan, Russian Federation

<sup>b</sup>University of Hartford, 200 Bloomfield Ave., West Hartford, CT, 06110 USA

## Abstract

The study focuses on problems of decarbonization as a systemic priority for innovative changes in the national economy in times of new global challenges. The research hypothesis confirms dual effects within the triad of innovation – energy efficiency – decarbonization, when every item is affected by two others. We used econometric models to test them on the data from 83 Russian regions from 2016 to 2020. The revealed effects are critical for developing a conceptual framework for adjusting managerial goals to focus on energy efficiency and decarbonization

in Russian economy. The paper contains suggestions for Russian regions for incorporating the triad approach in their plans for energy efficiency and decarbonization. This paper adds value to understanding of relationships within the triad. It also has practical value for practitioners aiming at improving the sustainability of national economies. Importantly, our findings could be used by countries of different levels of economic development and with different combinations of energy sources in achieving goals in decarbonization or carbon neutrality for their economies.

**Keywords:** innovative development; improving energy efficiency; decarbonization; dual influence effects; managing energy system transition

**Citation:** Melnik A., Naoumova I., Ermolaev K. (2023) Adapting Innovation Development Management Processes to Improve Energy Efficiency and Achieve Decarbonization Goals. *Foresight and STI Governance*, 17(1), 51–66. DOI: 10.17323/2500-2597.2023.1.51.66

Ощутимый рост внимания мирового сообщества к решению проблем «зеленой» климатической повестки определяет новый мировой тренд в направлении декарбонизации национальных экономик. Разрушительные последствия изменения климата становятся настолько очевидными, в том числе и в Российской Федерации, что отрицать их не представляется возможным (Порфирьев и др., 2021). Более того, вопрос изменения климата стоит для нашей страны острее, чем в среднем для планеты (Жигалов и др., 2018). Наметившийся тренд на декарбонизацию лежит в русле парадигмы устойчивого развития, объединяющей глобальные цели по решению экологических, социально-экономических и научно-технологических задач, очерчивая контур перспектив глобального экономического развития (Bohra et al., 2022; Hernan et al., 2022; Ye et al., 2022).

Несмотря на интернациональный характер исследуемой проблемы, при определении собственного отношения к климатической повестке и прогнозировании масштаба потенциальных изменений в экономике необходимо исходить, прежде всего, из собственных национальных интересов (Gatto et al., 2021; Levenda et al., 2021; Порфирьев, 2021). При этом следует учитывать всю степень неопределенности процессов, обострившихся на фоне изменения геополитических условий. Многие ранее провозглашенные и, казалось бы, незыблемые приоритеты развития мировой экономики, например, полный отказ в краткосрочной перспективе от использования каменного угля или же замены традиционных топлив альтернативными источниками энергии, постепенно дезавуируются<sup>1</sup>.

Отрицание серьезных вызовов при принятии стратегических решений о будущем России в складывающихся условиях чревато непредсказуемыми и необратимыми последствиями для национальной безопасности (Пахомова и др., 2021). Уровень потенциальных угроз резко возрос в связи с предпринимаемыми попытками использования зеленой повестки в качестве нового инструмента экономического и политического давления, способного привести к серьезным проблемам в различных отраслях и сферах деятельности (Крюков и др., 2021; Макаров и др., 2021). Все это обуславливает необходимость оперативного решения широкого круга новых задач, связанных с декарбонизацией мировой экономики как ключевого условия достижения углеродной нейтральности (Башмаков, 2020).

На фоне имеющихся разногласий о методах решения сложившихся проблем большинство исследователей признают особую роль инновационных подходов к повышению энергоэффективности в интересах декарбонизации. Однако механизмы их реализации до настоящего времени остаются практически не разработанными, а возможные эффекты взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация» — недоизученными.

## Обзор литературы

Проблемы внедрения энергоэффективных инноваций обсуждаются применительно к различным уровням национальных экономик с особым акцентом на оценке влияния разных факторов, включая динамику цен на топливно-энергетические ресурсы (Brutschin et al., 2016), экспортно-импортную ориентацию экономики (Urpelainen, 2011), возможности трансфера передовых технологий (Wan et al., 2015), объемы иностранных инвестиций и т. д. Значительное внимание уделяется поддержке инноваций в сфере повышения энергоэффективности, в том числе через механизмы государственного стимулирования инновационной деятельности в области энергетических технологий (Winkler et al., 2011; Fri et al., 2014). При всем многообразии существующих подходов, направленных на решение проблемы повышения энергоэффективности на основе инноваций, исследователи из различных стран сходятся в важности ее решения для развития экономики (Patterson, 1996; Bobylev et al., 2015; Costantini et al., 2017).

Серьезный импульс получили исследования, ориентированные на обеспечение устойчивости энергетических систем с опорой на такие, в частности, инновационные решения, как интеллектуальные сети, умные устройства (Huutinen et al., 2015) и т. д. Соответствующие усилия стимулировали развитие современных технологий сбора, обработки и анализа информации, необходимой для принятия управленческих решений (Luong, 2015), улучшения работы энергетической инфраструктуры (Thoire, 2015), выработки стратегий повышения энергоэффективности на основе новых возможностей (Liu et al., 2016; Ruiz-Fuensanta, 2016). К настоящему времени продолжает преобладать подход, оценивающий повышение энергоэффективности национальных экономик с точки зрения снижения потребления энергетических ресурсов при производстве продукции и оказании услуг и рассматривающий это в качестве важнейшего направления для решения текущих задач развития (Bolson et al., 2021; Panait et al., 2022; Wu et al., 2021). Влияние энергосбережения и повышения энергоэффективности на достижение стратегических целей развития зачастую не принимается в расчет (Zakari et al., 2022).

Для исследований в сфере повышения энергоэффективности национальных экономик характерен взгляд на инновации как на важнейший фактор и необходимое условие таких изменений (Newell et al., 1999; Popp, 2002; Urpelainen, 2011). Предприятия, которые проводят активную политику в сфере инноваций, демонстрируют более высокий уровень энергоэффективности и внедрения наилучших доступных технологий (Song et al., 2015; Sohag et al., 2015). Примерами масштабных технологических проектов в рассматриваемой сфере служат международная программа «Energy Star» (Boyd et al., 2008; Qiu et al., 2019) и китайская программа «Тор

<sup>1</sup> <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/04/26/919731-globalnaya-energetika-vozvraschaetsya-k-ugolnoi-generatsii>, дата обращения 25.08.2022.

Табл. 1. Основные направления исследований по решению проблем декарбонизации

Направление	Литература
Возможности достижения конкурентных преимуществ за счет внедрения экологически чистых технологий	(Kuhn et al., 2022; Lenox, 2021; Wang et al., 2022)
Исследования связи между производством и потреблением энергии, с одной стороны, и эмиссией углеродных соединений — с другой	(Dalla Longa et al., 2022; Natali et al., 2021; Pandey et al., 2022)
Повышение энергетической эффективности как ключевое направление декарбонизации национальных экономик	(Mier et al., 2020; Obrist et al., 2022; Пахомова и др., 2021)
Оценка корреляции между инвестициями в возобновляемые источники энергии и эмиссией CO <sub>2</sub>	(Acheampong et al., 2019; Ikram et al., 2020; Mehmood et al., 2022)
Влияние государственного стимулирования процессов декарбонизации на показатели экономического развития	(Al Mamun et al., 2022; Rissman et al., 2020; Stephenson et al., 2021)
Управление деятельностью компаний в условиях введения «углеродного налога»	(Dixit et al., 2022; Domon et al., 2022; Reaños et al., 2022)
Рикошетный эффект ( <i>rebound effect</i> ) энергоэффективности	(Chen et al., 2021; Baležentis et al., 2021; Berner et al., 2022)

Источник: составлено авторами.

100–1000–10 000 Enterprises Program» (Lewis, 2011; Zhao et al., 2016; Qi et al., 2020). Все это позволяет заключить, что повышение энергоэффективности на базе широкого внедрения инноваций остается ключевым приоритетом развития национальных экономик.

В связи с обострением климатической повестки в последние годы особую актуальность приобрели вопросы декарбонизации (табл. 1). Снижение экологической нагрузки от производственной деятельности отнюдь не противоречит цели повышения ее эффективности, а, напротив, выступает важным стимулом развития (Dell’Anna, 2021; Koval et al., 2021; Sarkar et al., 2021).

Несмотря на различия сложившихся к настоящему времени подходов ко многим основополагающим проблемам энергетического перехода (Gatto, 2022; Shahbaz et al., 2022; Vompard et al., 2022), большинство специалистов сходятся во мнении о решающем вкладе повышения энергоэффективности в достижение углеродной нейтральности (Zeka et al., 2020; Nam et al., 2021; Khan et al., 2022). При этом их позиция нередко сводится к констатации существенного вклада роста энергоэффективности в решение климатических проблем без раскрытия механизмов управления при решении задач декарбонизации с позиции выявления взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация».

Обзор текущего состояния исследуемой проблемы показывает, что, несмотря на то внимание, которое в научном сообществе уделяют различным аспектам зеленой повестки, до сих пор не сложился консенсус по поводу возможных путей адаптации сложившихся механизмов государственного управления для преодоления современных глобальных вызовов и угроз.

## Методология

В методологическом отношении работа базируется на результатах ранее выполненного нами исследования (Melnik et al., 2021). В нем на примере различных регионов России было, во-первых, доказано наличие эффекта взаимного влияния процессов повышения энергоэффективности и инновационного развития; во-вторых, показан его базовый характер, во многом опре-

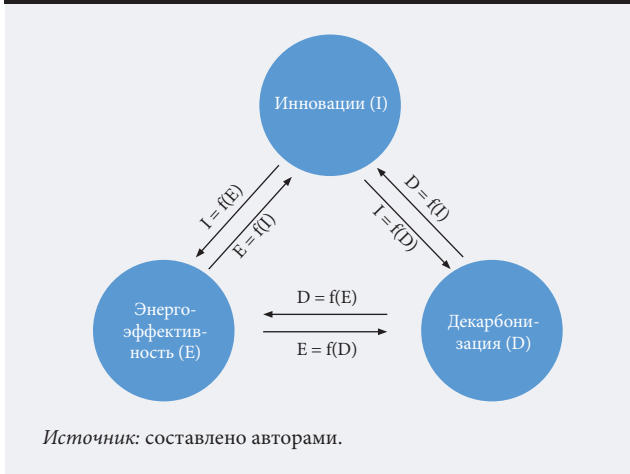
деляющий дополнительные положительные эффекты в различных отраслях и сферах деятельности; в-третьих, на основе экспериментальной апробации выдвинутого предположения проведена оценка одного из таких эффектов, подтвердившая потенциал наращивания объемов экспорта в российских регионах по мере роста энергоэффективности.

Дальнейшее развитие ранее разработанной методологии нацелено на ее адаптацию к решению проблем декарбонизации. При проведении исследования была выдвинута гипотеза о наличии двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация». Для ее подтверждения предложено разделение исследования на два этапа. На первом постулировано существование самой триады для последующего рассмотрения возникающих в ней эффектов. Значение данного этапа обусловлено тем, чтобы не допустить произвольного включения в состав триады любых других интуитивно очевидных параметров без достаточных оснований ожидать наличия парных взаимосвязей между ее элементами. Для достижения поставленных целей и доказательства указанных эффектов применены парные прямые и парные обратные модели.

В сравнении с предыдущими предлагаемый подход исходит из более широкого представления о характере парных взаимосвязей между рассматриваемыми процессами. Это позволяет оценивать эффекты не только прямого парного влияния, например, инноваций в цепочках зависимостей «инновации → энергоэффективность» и «инновации → декарбонизация», но и обратного парного влияния «энергоэффективность → инновации» и «декарбонизация → инновации» (рис. 1). Данное утверждение справедливо и применительно к описанию эффектов прямого и обратного парного влияния в цепочках зависимости «энергоэффективность → декарбонизация». Моделируя влияние факторного признака на результирующий, можно оценивать эффекты парного прямого и обратного влияния в исследуемых зависимостях, представленные в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \text{а) парное прямое и обратное влияние в соотношении «декарбонизация — инновации»} \\
 & D = f(I); \quad I = f(D), \quad (1)
 \end{aligned}$$

Рис. 1. Проявление эффектов парного влияния в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация»



б) парное прямое и обратное влияние в соотношении «декарбонизация — энергоэффективность»:

$$D = f(E); E = f(D), \quad (2)$$

в) парное прямое и обратное влияние в соотношении «инновации — энергоэффективность»:

$$I = f(E); E = f(I), \quad (3)$$

где  $I$  — показатели, принятые для оценки уровня инновационного развития;  $E$  — показатели, принятые для оценки энергетической эффективности;  $D$  — показатели, принятые для оценки уровня вредных выбросов.

На втором этапе после обоснования состава триады применен эконометрический подход к доказательству выдвинутой гипотезы о наличии двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация». Для этого использована система взаимосвязанных уравнений, описывающая взаимовлияние в рассматриваемой триаде.

Обоснованность применяемого подхода подтверждается тем, что каждый из представленных компонентов триады «инновации — энергоэффективность — декарбонизация», как следует из зависимостей (1) — (3), оказывается под влиянием двух параметров, что предполагает наличие сложных взаимосвязей между рассматриваемыми процессами: например, одновременное влияние на декарбонизацию инноваций и энергоэффективности, на энергоэффективность — инноваций и декарбонизации, а на инновации — энергоэффективности и декарбонизации. Тогда наряду с прямым влиянием (например, инноваций на решение проблем декарбонизации) сказывается еще и косвенное влияние повышения энергоэффективности в результате реализации энергоэффективных инноваций. В этом случае для проверки выдвинутой гипотезы предполагаемые зависимости в триаде могут быть представлены в виде системы взаимосвязанных (одновременных) уравнений:

$$\begin{cases} D = f_D(I, E) + \varepsilon \\ E = f_E(I, D) + \varepsilon \\ I = f_I(E, D) + \varepsilon \end{cases}, \quad (4)$$

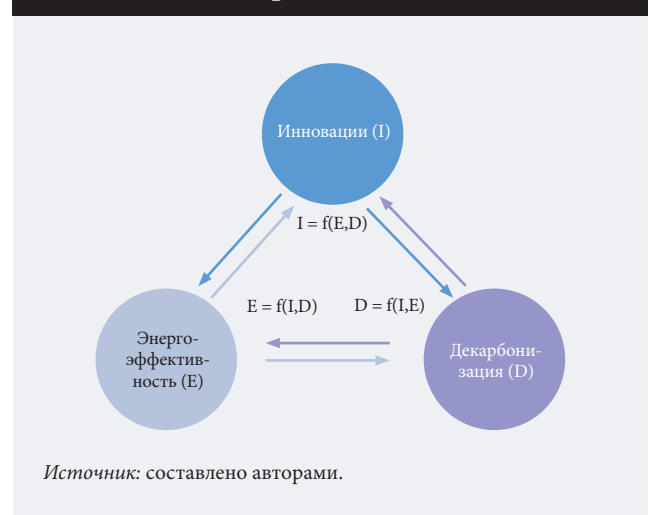
где  $f$  — функции, связывающие показатели триады с набором экзогенных факторов;  $\varepsilon$  — случайная ошибка.

При этом все три показателя —  $D$ ,  $E$ ,  $I$  — являются эндогенными, а уравнения системы (4) в процессе решения будут дополнены экзогенными переменными для обеспечения разрешимости системы. Для решения сформированной системы одновременных уравнений применен двухшаговый метод наименьших квадратов (2МНК).

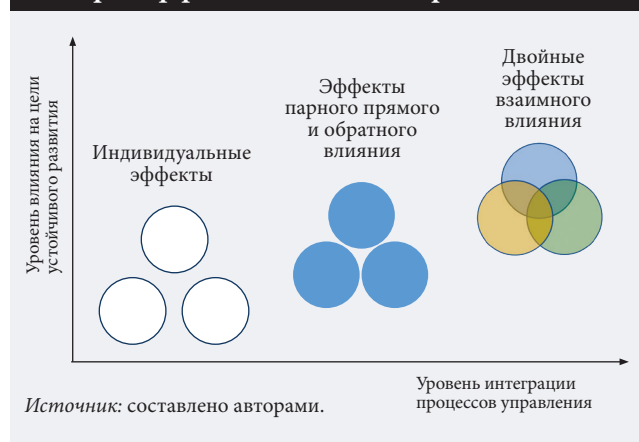
Для целей моделирования эффекты одновременного влияния двух факторов на третий, выступающий в рассматриваемой триаде в качестве результативного, будут называться двойными эффектами взаимного влияния. Отправной точкой в дальнейших рассуждениях выступает гипотеза о том, что каждый из двух факторов оказывает как прямое, так и косвенное влияние на результативный через изменение другого фактора (рис. 2). При проведении конкретного исследования целевая модель будет выбрана в зависимости от того, какой компонент триады рассматривается в качестве результативного, а какие в качестве факторных. Так, в контексте декарбонизации оценка прямого влияния инноваций на достижение этой цели сопряжена с необходимостью учета еще и косвенного их воздействия через повышение энергоэффективности.

Предложенная методология может быть включена в комплекс принимаемых решений, направленных на декарбонизацию российской экономики для целей глобального устойчивого развития (рис. 3).

Рис. 2. Проявление двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация»



**Рис. 3. Проявление эффектов взаимного влияния в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация»**



### Эффекты взаимодействия в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация»

#### Эффекты парного прямого и обратного влияния

В рамках избранной методологии на первом этапе были проведены экспериментальные расчеты, направленные на выявление эффектов парных взаимосвязей в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация». В их основу легли панельные данные по 83 регионам России за 2016–2020 гг. Для оценки эффективности инновационной деятельности по стадиям жизненного цикла, включая исследования и разработки (ИиР), внедрение инноваций, коммерциализацию и масштабирование полученных результатов, применялись открытые статистические данные Федеральной службы государственной статистики России (Росстата)<sup>2</sup>. На первой стадии жизненного цикла инновационная активность определялась на базе таких индикаторов, как численность вовлеченного в ИиР персонала, внутренние затраты на эти цели и специальные расходы на экологические инновации. Усилия предприятий региона на стадии внедрения оценивались с точки зрения доли организаций, осуществлявших технологические, организационные и маркетинговые инновации в отчетном году, в общем числе обследованных организаций, а также числа передовых производственных технологий по субъектам РФ. Наконец, на стадии коммерциализации и масштабирования результативность рассчитывалась через объем отгруженных инновационных товаров, работ, услуг и их доли в общем объеме отгруженных товаров, работ и услуг.

Источником информации для оценки энергоэффективности региона также служили данные Росста-

та. Энергоэффективность по региону рассчитывалась через отношение валового регионального продукта<sup>3</sup> (ВРП) (в постоянных ценах 2016 г.) к потреблению электроэнергии в регионе<sup>4</sup>.

Показатели для оценки выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду на региональном уровне определялись исходя из данных Росстата и Федеральной службы по надзору в сфере природопользования<sup>5</sup>. Ключевым выступает показатель выбросов в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников загрязняющих веществ, включая диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода, летучие органические соединения, аммиак и др., во многом определяющие целевые ориентиры по декарбонизации. Под стационарным источником понимается неподвижной технологический агрегат (установка, устройство, аппарат и т. п.), выделяющий в ходе эксплуатации загрязняющие атмосферу вещества, а под передвижными — прежде всего, автомобильный и железнодорожный транспорт. В отсутствие альтернативных и равнозначных статистических данных выбросы загрязняющих веществ наилучшим образом отвечают контексту нашего исследования. Так, некоторые авторы отмечают, что снижение выбросов парниковых газов напрямую коррелирует со снижением концентрации других загрязняющих веществ в атмосфере (Rauner et al., 2020; Бобылев и др., 2022).

Ряд использованных в экспериментальных расчетах показателей могут быть введены в модели в качестве контрольных или инструментальных переменных в процессе выполнения второго этапа работ. К ним, в частности, относятся ВРП (Баев и др., 2013; Френкель и др., 2013; Сафиуллин, 2021), потребление электроэнергии (Соловьева, Дзюба, 2016), объем отгруженных товаров собственного производства (Стрижакова, 2019), электровооруженность труда (Якунин, 2017) и др. Описание всех включенных в расчеты переменных представлено в табл. 2.

Для достижения целей первого этапа исследования были применены модели со случайными (*random effect model*, RE) и фиксированными эффектами (*fixed effect model*, FE), которые позволяют учитывать неизмеримые индивидуальные различия объектов (Hsiao et al., 2010). Эти отличия интерпретируются как подлежащий исключению лишний параметр. Применение таких моделей позволяет подтвердить непосредственную связь между рассматриваемыми параметрами. Для повышения достоверности моделей приняты в расчет лаги ключевых переменных и ненаблюдаемые временные эффекты. В самой модели для нивелирования автокорреляции объясняющих переменных использованы робастные стандартные ошибки. Для тестирования спецификации модели служит тест Хаусмана при сравнении моделей с фиксированными и со случайными эффектами, а также тест Бройша-Пагана при сравнении модели со слу-

<sup>2</sup> <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>, дата обращения 25.08.2022.

<sup>3</sup> <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts>, дата обращения 25.08.2022.

<sup>4</sup> [https://rosstat.gov.ru/regional\\_statistics](https://rosstat.gov.ru/regional_statistics), дата обращения 25.08.2022.

<sup>5</sup> <https://rosstat.gov.ru/folder/11194>, дата обращения 25.08.2022.

Табл. 2. Показатели для проведения расчетов

Показатель	Обозначение	Единица измерения
Энергоэффективность	E_L_eef	руб./кВт*ч
Выбросы загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных и передвижных источников	D_L_vibros	тыс.т.
Численность персонала, занятого в ИиР	I_L_pers	чел.
Внутренние затраты на ИиР по субъектам РФ	I_L_cost	руб.
Специальные затраты, связанные с экологическими инновациями	I_L_ecocost	руб.
Разработанные передовые производственные технологии по субъектам РФ	I_L_mantech	единиц
Уровень инновационной активности организаций по субъектам РФ среди всех организаций	I_L_innactiv	%
Объем отгруженных инновационных товаров, работ и услуг	I_L_inproduct	руб.
Удельный вес инновационных товаров, работ и услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ и услуг	I_L_vesproduct	%
Отгружено товаров собственного производства	L_product	млн руб.
Электровооруженность труда	L_electro	кВт*ч
ВРП	L_vrp	тыс. руб.
Потребление электроэнергии	L_electropotr	млн кВт*ч
Доля инвестиций, направленных на реконструкцию и модернизацию, в общем объеме инвестиций в основной капитал	L_invest	%
Доля инвестиций в машины, оборудование, транспортные средства в общем объеме инвестиций в основной капитал, направленных на реконструкцию и модернизацию	L_investm	%
Индекс производительности труда по субъектам РФ	L_trud	% к пред. году
Реальные денежные доходы населения	L_dohod	% к пред. году

Источник: составлено авторами.

чайными эффектами и линейной модели (Greene, 2003). Результаты моделирования представлены в табл. 3, а интерпретация проведенных экспериментальных расчетов — в табл. 4.

Результаты, полученные на первом этапе исследования, на примере развития российских регионов позволили обосновать существование самой триады «инновации — энергоэффективность — декарбонизация» для последующего изучения возникающих в ней двойных эффектов взаимного влияния.

#### Двойные эффекты взаимного влияния

В соответствии с избранной методологией на втором этапе исследования были проведены экспериментальные расчеты для анализа двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация» с применением панельных данных по 83 регионам России за 2016–2020 гг. По итогам анализа матрицы корреляции показателей, представленных в табл. 2, построенная система взаимосвязанных уравнений (4) примет следующий вид:

$$\begin{cases} D\_L\_vibros = E\_L\_eef + I\_L\_inproduct + L\_vrp + I\_L\_pers + I\_L\_cost + I\_L\_mantech + \varepsilon_1 \\ E\_L\_eef = D\_L\_vibros + I\_L\_inproduct + L\_vrp + I\_L\_pers + I\_L\_cost + I\_L\_mantech + \varepsilon_2 \\ I\_L\_inproduct = D\_L\_vibros + E\_L\_eef + L\_vrp + I\_L\_pers + I\_L\_cost + I\_L\_mantech + \varepsilon_3 \end{cases}, \quad (16)$$

Эндогенные переменные, принятые для оценки уровня инновационного развития, энергетической эффективности и уровня вредных выбросов, опреде-

лены, соответственно, как D\_L\_vibros, E\_L\_eef и I\_L\_inproduct, а выбранные контрольные переменные — как ВРП L\_vrp, численность персонала, занятого в ИиР I\_L\_pers, внутренние затраты на ИиР I\_L\_cost, разработанные передовые производственные технологии I\_L\_mantech. Инструментальными переменными выступают следующие показатели: отгружено товаров собственного производства L\_product, отгружено товаров собственного производства за предыдущий период L\_product(t-1), потребление электроэнергии L\_electropotr, потребление электроэнергии за предыдущий период L\_electropotr(t-1), ВРП за предыдущий период L\_vrp(t-1), электровооруженность труда L\_electro, специальные затраты, связанные с экологическими инновациями за позапрошлый период L\_ecocost(t-2), уровень инновационной активности за позапрошлый период L\_innactiv(t-2).

Представленная система одновременных уравнений является сверхидентифицируемой, поэтому для оценки ее параметров может быть применен 2МНК. Ниже представлены итоги этой оценки при исключении переменных, которые не оказывают существенного влияния на результирующую:

$$\begin{cases} D\_L\_vibros = -5.832 - 0.947 * E\_L\_eef - 0.144 * I\_L\_inproduct + 1.144 * L\_vrp + \varepsilon_1 \\ E\_L\_eef = -5.442 - 0.995 * D\_L\_vibros - 0.15 * I\_L\_inproduct + 1.156 * L\_vrp + \varepsilon_2 \\ I\_L\_inproduct = -31.305 - 4.265 * D\_L\_vibros - 4.251 * E\_L\_eef + 5.45 * L\_vrp + \varepsilon_3 \end{cases}, \quad (17)$$

Согласно t-критерию Стьюдента, при заданных переменных порог статистической значимости состав-

Табл. 3. Результаты моделирования для расчета эффектов парных взаимосвязей в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация»

№ модели	Зависимая переменная	Метод	Независимые переменные	Коэффициент	Стандартная ошибка	P-значение	R-квadrat	Тест Хаусмана	Тест Бройша-Пагана
(5)	D_L_vibros	FE	Const	-5.175	2.914	0.079*	0.989	0.159	0.057
			E_L_eef	0.387	0.231	0.098*			
			L_trud	0.503	0.242	0.041**			
			L_vibros_1	0.8	0.19	6.28e-05***			
			Dt_2	0.349	0.054	7.43e-09***			
			Dt_3	0.352	0.054	7.05e-09***			
		RE	Dt_4	0.139	0.044	0.002***			
			E_L_eef	-0.053	0.022	0.016**			
			L_trud	0.381	0.231	0.099*			
			L_vibros_1	1.011	0.03	3.03e-243***			
			Dt_2	0.319	0.037	2.55e-017***			
			Dt_3	0.307	0.032	1.11e-020***			
(6)	E_L_eef	FE	Dt_4	0.085	0.013	2.62e-010***	0.995	6.49e-028	0.978
			Const	15.612	1.553	4.56e-016***			
			D_L_vibros	-0.057	0.010	7.162e-07***			
		RE	L_electropotr	-0.71	0.072	1.65e-015***			
			E_L_eef_1	0.191	0.107	0.077*			
			D_L_vibros	-0.014	0.008	0.099*			
		МНК	L_electropotr	0.014	0.007	0.065*			
			E_L_eef_1	0.986	0.008	0***			
			D_L_vibros	-0.011	0.006	0.092*			
			L_electropotr	0.013	0.006	0.028**			
(7)	I_L_ecocost	FE	E_L_eef_1	0.992	0.006	1.99e-102***	0.986		
			Const	63.154	29.2676	0.0338**			
(8)	I_L_mantech	RE	E_L_eef	-5.381	2.653	0.0457**	0.85	0.712	5.62e-057
			Const	-2.452	3.018	0.4165			
(9)	E_L_eef	FE	E_L_eef	0.469	0.275	0.0879*	0.99	0.003	1.77e-109
			Const	10.518	0.106	8.81e-089***			
			I_L_inproduct	0.06	0.012	6.42e-06***			
			I_L_vesproduct	-0.06	0.013	3.73e-05***			
(10)	D_L_vibros	FE	I_L_ecocost	-0.002	0.0009	0.02**	0.965	1.19e-021	3.94e-019
			Const	9.227	0.984	1.063e-014***			
			I_L_inproduct	-0.442	0.112	0.0001***			
			I_L_vesproduct	0.441	0.106	7.580e-005***			
(11)	I_L_pers	FE	I_L_ecocost_2	0.022	0.009	0.02**	0.995	1.13e-007	2.17e-171
			Const	7.02	0.143	2.11e-062***			
(12)	I_L_cost	FE	D_L_vibros	0.109	0.026	0.0001***	0.99	1.06e-013	5.8e-159
			Const	8.426	0.236	1.17e-051***			
(13)	I_L_mantech	FE	D_L_vibros	-0.129	0.043	0.0042***	0.857	0.001	1.85e-044
			Const	4.617	0.959	9.49e-06***			
(14)	I_L_innactiv	RE	D_L_vibros	-0.292	0.167	0.0859*	0.69	0.877	4.39e-068
			Const	1.342	0.233	8.64e-09***			
(15)	I_L_inproduct	FE	D_L_vibros	0.152	0.04	0.0002***	0.93	3.21e-016	2.62e-095
			Const	12.133	0.947	1.93e-021***			
<p>Примечание: ***p &lt; 0.01, **p &lt; 0.5, *p &lt; 0.1. Подробно расписаны модели (5) и (6), а в моделях (7) – (12) представлены оценки коэффициентов в соответствии с результатами тестов Хаусмана и Бройша-Пагана.</p> <p>Источник: составлено авторами.</p>									

ляет 1%. Кроме того, модель является адекватной при уровне значимости 1% по F-критерию Фишера. Требования к инструментам, применяемым при построении множественной регрессии, состоят, во-первых, в экзогенности, т. е. они не должны коррелировать со случайными ошибками модели, и, во-вторых, в релевантности, т. е. они должны коррелировать с эндогенными регрессорами. Удовлетворяющие обоим требованиям инструменты признаются валидными, и применение двухшагового МНК обеспечит состоятельность полученных оценок коэффициентов.

При проведении расчетов были проверены требования к выбранным инструментальным переменным и обоснована их валидность (табл. 5). Для оценки релевантности были определены расчетные значения соответствующей F-статистики, полученные при проверке гипотезы о существенном вкладе применяемых инструментов в объяснение изменений эндогенной переменной. На практике чаще всего пользуются следующим правилом: инструменты признаются релевантными, если расчетное значение тестовой F-статистики для проверки данной гипотезы превышает 10 (Stock



Табл. 4. Интерпретация проведенных экспериментальных расчетов по оценке эффектов парных взаимосвязей в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация»

Номер модели	Уравнение регрессии	Интерпретация
<b>«Энергоэффективность – декарбонизация» <math>D = f(E), E = f(D)</math></b>		
(5)	Прямая зависимость: $D\_L\_vibros = -1.51 - 0.0528 * E\_L\_eef - 0.00216 * L\_L\_product + 0.381 * L\_trud + 0.319 * dt\_2 + 0.307 * dt\_3 + 0.0845 * dt\_4 + 1.01 * D\_L\_vibros\_1$	Повышение энергоэффективности способствует снижению выбросов.
(6)	Обратная зависимость: $E\_L\_eef = 0.0421 - 0.0116 * D\_L\_vibros + 0.0134 * L\_electropotr + 0.992 * E\_L\_eef\_1$	Увеличение выбросов происходит при снижении энергоэффективности.
<b>«Энергоэффективность – инновации» <math>I = f(E), E = f(I)</math></b>		
(7)	Прямые зависимости: $I\_L\_ecocost = 63.2 - 5.38 * E\_L\_eef$	При повышении энергоэффективности требуется меньше инвестиций в экологические инновации. Повышение энергоэффективности служит стимулом для развития инновационных технологий.
(8)	$I\_L\_mantech = -2.45 + 0.470 * E\_L\_eef$	
(9)	Обратная зависимость: $E\_L\_eef = 10.5 + 0.06 * I\_L\_inproduct - 0.06 * I\_L\_vesproduct - 0.002 * I\_L\_ecocost$	Активизация инновационной деятельности на всех стадиях жизненного цикла способствует повышению энергоэффективности.
<b>«Инновации – декарбонизация» <math>D = f(I), I = f(D)</math></b>		
(10)	Прямая зависимость: $D\_L\_vibros = 9.23 - 0.442 * I\_L\_inproduct + 0.441 * I\_L\_vesproduct + 0.0220 * I\_L\_ecocost\_2$	Активизация инновационной деятельности на различных стадиях жизненного цикла отражается на снижении выбросов загрязняющих веществ. При этом затраты на экологические инновации оказывают отложенный на два года эффект на снижение выбросов.
(11)	Обратные зависимости: $I\_L\_pers = 7.03 + 0.109 * D\_L\_vibros$	Увеличение выбросов загрязняющих веществ оказывает статистически значимое влияние на активизацию инновационной деятельности на различных стадиях ее жизненного цикла и влечет за собой увеличение персонала, занятого в ИиР, свидетельствует о снижении затрат на инновации, уменьшении числа инновационных технологий и объема инновационной продукции.
(12)	$I\_L\_cost = 8.43 - 0.129 * D\_L\_vibros$	
(13)	$I\_L\_mantech = 4.62 - 0.293 * D\_L\_vibros$	
(14)	$I\_L\_innactiv = 1.28 + 0.164 * D\_L\_vibros$	
(15)	$I\_L\_inproduct = 12.1 - 0.538 * D\_L\_vibros$	

Источник: составлено авторами.

Табл. 5. Тесты на валидность инструментов и применение 2МНК для системы взаимосвязанных уравнений (17)

Уравнение в системе (17), зависимая переменная	F статистика	P значение (F)	Тест Саргана, P-значение	Тест Хаусмана, p-значение
D_L_vibros	123.243	5.55e-46	0.069	4.013e-006
E_L_eef	14.638	1.09e-08	0.058	0
I_L_inproduct	20.252	1.46e-11	0.019	3.701e-017

Источник: составлено авторами.

Табл. 6. Доверительный интервал для ключевых переменных системы взаимосвязанных уравнений (17)

Уравнение в системе (17), зависимая переменная	Переменная	Коэффициент	95%-й доверительный интервал	
D_L_vibros	I_L_inproduct	-0.143	-0.251	-0.036
	E_L_eef	-0.947	-1.279	-0.614
E_L_eef	I_L_inproduct	-0.150	-0.246	-0.054
	D_L_vibros	-0.995	-1.328	-0.661
I_L_inproduct	I_eef	-4.251	-6.298	-2.204
	I_vibros	-4.265	-6.477	-2.052

Источник: составлено авторами.

et al., 2002). Как показали расчеты, проведенные в соответствии с указанным принципом, все применяемые инструменты являются релевантными.

Для проверки экзогенности инструментов был проведен тест Саргана (*Sargan test* или *the overidentifying restrictions test*), что возможно только в случае, когда число применяемых инструментов превышает число эндогенных регрессоров. Нулевая гипотеза теста состоит в том, что все эти инструменты являются экзогенными, а альтернативная — что хотя бы один из них эндогенен. При уровне значимости в 1% все применяемые в расчетах инструменты являются экзогенными. Дополнительно проведенный тест Хаусмана позволяет принять решение о целесообразности использования 2МНК или о возможности ограничиться обычным МНК. Подтвержденная валидность применяемых инструментов выступает необходимым условием для проведения данного теста. Его нулевая гипотеза состоит в том, что МНК-оценки коэффициентов модели состоятельны. Если она не отвергается, для оценки коэффициентов пригоден обычный МНК, результаты которого будут валидными. Опровержение нулевой гипотезы покажет несостоятельность МНК-оценки и предпочтительность 2МНК. По результатам проведенных тестов гипотеза была отвергнута, подтвердив правомерность использования 2МНК. Для оценки эластичности показателей в системе взаимосвязанных уравнений был построен 95%-й доверительный интервал (17).

Доверительные интервалы всех переменных не содержат нулевого значения, что подтверждает влияние

**Табл. 7. Интерпретация проведенных экспериментальных расчетов по исследованию двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация»**

Анализируемый аспект	Уравнение в системе (17)	Интерпретация
Декарбонизация $D = f(I, E)$	$D\_L\_vibros = -5.832 - 0.947 * E\_L\_eef - 0.144 * I\_L\_inproduct + 1.144 * L\_vvp + \epsilon_1$	Повышение энергоэффективности и наращивание объема инновационных товаров, работ и услуг одновременно оказывают влияние на снижение выбросов.
Энерго-эффективность $E = f(I, D)$	$E\_L\_eef = -5.442 - 0.995 * D\_L\_vibros - 0.15 * I\_L\_inproduct + 1.156 * L\_vvp + \epsilon_2$	Рост выбросов и увеличение объема инновационной продукции одновременно оказывают влияние на изменение энергоэффективности. Увеличение выбросов свидетельствует о снижении энергоэффективности. Аналогичный эффект оказывает и увеличение объема инновационной продукции.
Инновации $I = f(E, D)$	$I\_L\_inproduct = -31.305 - 4.265 * D\_L\_vibros - 4.251 * E\_L\_eef + 5.45 * L\_vvp + \epsilon_3$	Повышение энергоэффективности и увеличение выбросов одновременно оказывают влияние на изменение инновационной активности. Снижение энергоэффективности свидетельствует о повышении инновационной активности. Аналогичный эффект оказывает и снижение выбросов.

Источник: составлено авторами.

соответствующих показателей на объясняющую переменную, которое по ряду переменных является эластичным. Интерпретация результатов экспериментальных расчетов представлена в табл. 7.

Оценка качества расчетов была проведена на примере первого уравнения в системе (17), которое отражает двойные эффекты влияния инновационного развития и повышения энергоэффективности на достижение целей декарбонизации. На графике наблюдаемых и расчетных значений переменной  $D\_L\_vibros$  (рис. 4) можно визуально увидеть, что статистика (обозначена символом «+» красного цвета) и данные, полученные по построенным моделям (обозначены символом «x» синего цвета), находятся достаточно близко, что отражает высокий прогнозный потенциал полученного уравнения регрессии. Отклонения расчетных значений от фактических по некоторым уравнениям могут быть вызваны как ошибками в исходных данных, так и не учтенными в модели факторами. Не отрицая статистической надежности полученных эмпирических уравнений регрессии, все это обуславливает необходимость продолжения исследований.

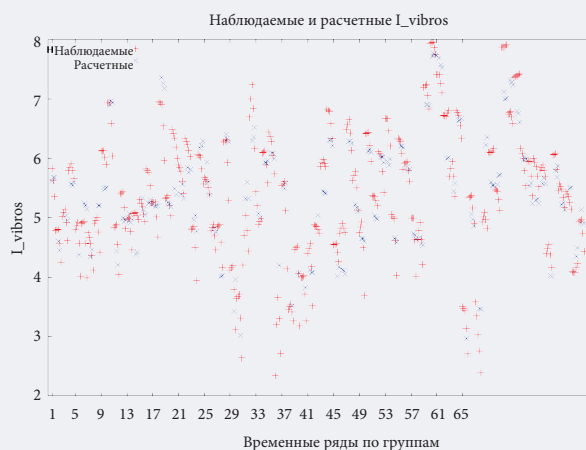
Рассчитанные далее частные коэффициенты эластичности  $\epsilon$  показывают, на сколько процентов изменится зависимая переменная при изменении соответствующего фактора на 1% (Florens, 2007). В частности, как свидетельствует сопоставление, первое уравнение в системе (17), описывающей двойные эффекты взаимного влияния в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация», имеет на 1.85% более высокий коэффициент эластичности по показателю энергоэффективности, чем модель взаимного влияния (5) (табл. 8). То есть при изменении энергоэффективности на 1% в модели (17), описывающей двойные эффекты, выбросы снизятся на 1.96%, а в модели взаимного влияния (5) – только на 0.109%. Аналогичное соотношение эффектов во втором уравнении системы (17) и в модели (9) по показателю инновационной деятельности, а в третьем уравнении системы (17) и в модели (15) – по показателю выбросов. Полученные данные указывают на тот факт, что по силе своего влияния двойные эффекты в рассмотренной триаде превышают парные эф-

фекты взаимного влияния, что имеет особое значение при выборе инвестиционных стратегий в рамках реализации системы мер по декарбонизации.

Полученные на материале российских регионов результаты подтверждают выдвинутую гипотезу о наличии двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации – энергоэффективность – декарбонизация».

Дальнейшее применение предложенной методологии имеет большой потенциал по решению прикладных задач, обеспечивающих достижение целевых ориентиров декарбонизации, а также широкого круга исследовательских вопросов. Речь идет о прогнозировании различных факторов, в частности, суммарных выбросов парниковых газов (или, отдельно, диоксида серы, оксидов азота, углерода и т. д.) и отдачи от инноваций, направленных на декарбонизацию, построении динамических моделей для индикаторов инновационной деятельности по реализации целей устойчивого развития экономики на различных уровнях управле-

**Рис. 4. График наблюдаемых и расчетных значений переменной  $D\_L\_vibros$  по исследуемым панельным данным**



Источник: составлено авторами.

**Табл. 8. Оценка силы влияния факторов на зависимую переменную по разработанным моделям**

Номер модели	Зависимая переменная	Фактор	Частный коэффициент эластичности Э
(5)	D_L_vibros	E_L_eef	-0.109
(6)	E_L_eef	D_L_vibros	-0.011
(7)	I_L_ecocost	E_L_eef	-15.686
(8)	I_L_mantech	E_L_eef	1.764
(9)	E_L_eef	I_L_ecocost	-0.0006
		I_L_inproduct	0.05
		I_L_vesproduct	-0.005
(10)	D_L_vibros	I_L_ecocost	0.015
		I_L_inproduct	-0.765
		I_L_vesproduct	0.082
(11)	I_L_pers	D_L_vibros	0.076
(12)	I_L_cost	D_L_vibros	-0.089
(13)	I_L_mantech	D_L_vibros	-0.531
(14)	I_L_innactiv	D_L_vibros	0.405
(15)	I_L_inproduct	D_L_vibros	-0.31
(17)	D_L_vibros	E_L_eef	-1.96
		I_L_inproduct	-0.249
	E_L_eef	I_L_inproduct	-0.272
		D_L_vibros	-0.48
	I_L_inproduct	D_L_vibros	-1.234
		E_L_eef	-2.348

Источник: составлено авторами.

ния. Перспективным представляется решение аналитических задач стратегического развития, совмещающих исследовательское прогнозирование достижимости целевых ориентиров декарбонизации экономики при разных сценариях научно-технологического развития с нормативным прогнозированием и проектированием необходимых условий такого развития.

Перечень рассматриваемых задач может быть расширен или адаптирован под конкретные уровни управления, их приоритеты и различные временные периоды.

### **Отражение задач повышения энергоэффективности и декарбонизации в программах инновационного развития российских регионов**

Выявленные двойные эффекты взаимного влияния рассматриваемых процессов легли в основу дальнейших исследований. При изучении проблем повышения энергоэффективности, достижения целей декарбонизации и их отражения в опубликованных программах инновационного развития 83 российских регионов были определены следующие направления анализа:

1. Наличие в таких программах мер, направленных на повышение энергоэффективности и декарбонизацию.
2. Наличие в перечне ключевых показателей программ результатов реализации мер по повышению энергоэффективности и декарбонизации.

3. Оценка вклада реализованных мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности и декарбонизацию, в целевые показатели инновационного развития регионов.

4. Оценка принципов распределения ответственности за результаты инновационной деятельности и мер по повышению энергоэффективности и декарбонизации на региональном уровне управления.

Проведенный анализ позволил прийти к следующим выводам. Во-первых, реализуемые в разных регионах России модели управления инновационным развитием в значительной мере воспроизводят структуру и особенности модели управления, принятой на федеральном уровне.

Во-вторых, повышению энергоэффективности во всех российских регионах в настоящее время уделяется значительное внимание. Практически все они относят это направление к приоритетным в своих программах инновационного развития, а соответствующие индикаторы выступают в них в числе ключевых. Вместе с тем, решение проблемы декарбонизации на региональном уровне управления находится в зачаточном состоянии, и с показателями в этой сфере оценки инновационного развития пока напрямую не увязываются. Активизацию по данному направлению следует, по всей видимости, ожидать лишь после преодоления ряда методологических ограничений на федеральном уровне.

В-третьих, сформулированная в программных документах регионов деятельность по повышению энергоэффективности хотя и объявляется приоритетной, в действительности, как правило, не связана с решением важнейших задач инновационного развития, т.е., по-видимому, не считается критичной со стратегической точки зрения. Декарбонизация до последнего времени также не входила в круг приоритетов.

В-четвертых, в инновационных программах и отчетных документах об их реализации не отражено, с одной стороны, влияние результатов соответствующих усилий на индикаторы энергоэффективности и декарбонизации, а с другой — обратное влияние последних на результаты инновационного развития регионов. Существующая правовая основа не позволяет вести оценку и мониторинг выявленных двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация».

В-пятых, во всех российских регионах, равно как и на федеральном уровне, организационные системы управления инновационной деятельностью, энергоэффективностью и декарбонизацией функционируют независимо друг от друга. За реализацию этих направлений отвечают различные подразделения региональных органов власти, которые формируют самостоятельные программные документы и целевые индикаторы развития, регламентируют процедуры планирования, имплементации и мониторинга их исполнения, определяют методы и формы административной, финансово-экономической и правовой поддержки принимаемых решений и, в конечном счете, автономно отчитываются за результаты. Одновременное управление указанными

процессами на различных уровнях порождает несогласованность, которая может негативно сказаться на достижении поставленных целей.

В-шестых, до настоящего времени в российском правовом поле не урегулирован широкий круг вопросов, связанных с инновационной деятельностью, направленной на повышение энергоэффективности и декарбонизацию экономики. По-прежнему не сформированы гибкие механизмы регулирования инновационной деятельности в условиях стремительного перехода энергетики к новому технологическому укладу и декарбонизации.

Отражение процессов повышения энергоэффективности и особенно декарбонизации в программах инновационного развития российских регионов и на федеральном уровне, как правило, носит довольно формальный характер. При этом достижение данных целей остается за пределами круга стратегических приоритетов и не определяет вектор инновационной деятельности в России. На всех уровнях управления по-прежнему преобладает упрощенный взгляд на задачи повышения энергоэффективности и декарбонизации в системе социально-экономического развития. Как правило, они рассматриваются с тактических позиций, упуская из виду не только стратегические вопросы модернизации экономики, но и глобальную повестку устойчивого развития за счет реализации политики углеродной нейтральности.

Таким образом, при разработке программных документов развития российской экономики на различных уровнях управления эффекты взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация» не рассматриваются. Активизация усилий в рамках зеленой повестки требует учета этих эффектов при формировании инновационной политики для повышения энергоэффективности и решения проблем декарбонизации.

### **Концептуальные основания управления инновационным развитием для повышения энергоэффективности и декарбонизации российской экономики**

Адаптация сложившейся системы управления исследуемыми процессами с учетом выявленных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация» предполагает соблюдение следующих концептуальных требований.

Во-первых, при формировании политики в рассматриваемой сфере следует исходить из провозглашенной на уровне ООН общемировой климатической повестки в русле парадигмы устойчивого развития. Россия не может оставаться в стороне от этих процессов, будучи крупнейшим государством в мире по размерам своей территории, объему поставляемых на мировой рынок топливно-энергетических ресурсов, масштабу производства продукции черной металлургии, химической, нефтехимической и других отраслей, эмиссии в атмосферу парниковых газов промышленного и природного происхождения и по ряду других показателей.

Во-вторых, при проработке концептуальных основ реализуемой политики и прогнозировании возможной глубины ожидаемых изменений необходимо ориентироваться на национальные интересы и стратегические цели. Их источниками служат официально закрепленные приоритеты государственной политики, исторически сложившаяся структура производства, конкурентные преимущества на мировом рынке товаров и услуг, достигнутый уровень технологического развития, а также наличие материальных, финансовых, трудовых и иных ресурсов для реализации энергетического перехода.

В-третьих, требуется единый подход к адаптации механизма управления инновационным развитием для повышения энергоэффективности и декарбонизации экономики на федеральном и региональном уровнях. Речь идет о формировании согласованной системы целевых показателей на единой методологической платформе.

В-четвертых, адаптация административного механизма должна предусматривать, прежде всего, интеграцию процессов управления энергоэффективностью и декарбонизацией в систему инновационной и научно-технологической политики для получения синергетического эффекта. Такая адаптация должна способствовать, с одной стороны, стратегическому росту энергетического сектора, с другой — достижению целей декарбонизации в рамках перехода российской экономики на инновационный путь.

Выполнение указанных концептуальных требований предполагает комплекс мер по гармонизации федерального и регионального законодательства в сферах инновационного развития, повышения энергоэффективности и декарбонизации; согласование соответствующих целевых показателей и их декомпозицию по уровням управления; реализацию системного подхода на принципах проектного и кластерного развития; формирование системы мониторинга проблем инновационного развития, повышения энергоэффективности и декарбонизации в рамках единого контура управления с распределением зон ответственности, прав и полномочий на каждом уровне. Ключевую роль играет цифровая трансформация государственного управления, консолидирующая потоки информации в рамках системы документооборота с применением технологий больших данных, реинжиниринга и оптимизации контроля, регулирования, принятия решений и т. д. (рис. 5).

Предлагаемая интеграция процессов повышения энергоэффективности и достижения целей декарбонизации с управлением инновационной деятельностью обеспечит координацию указанных трех автономных направлений в рамках единого контура, охватывающего различные уровни регулирования. Гармонизация законодательства в этих трех сферах позволит оптимизировать инструменты их государственной поддержки. Реализация описанного подхода к адаптации организационного механизма придаст приоритетный статус рассматриваемым процессам в условиях формирования новых вызовов и угроз.

Рис. 5. Основные направления адаптации механизма управления инновационным развитием, повышения энергоэффективности и декарбонизации



## Заключение

В последние годы практически все страны уделяют особое внимание различным аспектам декарбонизации, ставшей мейнстримом глобальной зеленой повестки. Множество исследований посвящены выбору подходов к преодолению новых экологических вызовов в рамках различных сценариев. При всех расхождениях практически все они придают особое значение инновациям как инструменту повышения энергоэффективности в интересах декарбонизации. Однако конкретные механизмы их реализации остаются недостаточно разработанными. Чтобы заполнить эту лауну, в предпринятом нами исследовании был впервые реализован комплексный подход к решению проблем декарбонизации с позиции выявления двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация».

Фокус на повышении энергоэффективности на базе инноваций как способе достичь цели декарбонизации обусловлен тем, что первая выступает одним из ключевых параметров большинства современных технологических процессов и характеристикой различных видов выпускаемой продукции. Концентрация усилий на дальнейшем повышении энергоэффективности создаст технологическую основу для развития базовых производств, способных придать импульс экономике в целом. С точки зрения декарбонизации энергоэффективность может стать катализатором создания технологических решений, охватывающих производственные цепочки от добычи сырья до конечного потребления в различных отраслях. В свою очередь это позволит интенсифицировать инновационные процессы в масштабах всей национальной экономики.

Результаты проведенного исследования подтверждают выдвинутую гипотезу о наличии двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация». Для этого на материале 83 российских регионов были проведены экспериментальные расчеты и получены статистически значимые результаты.

Теоретическая значимость полученных результатов состоит в подтверждении наличия двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации — энергоэффективность — декарбонизация» и обосновании необходимости учитывать их при разработке концептуальных основ адаптации управления инновационным развитием к задачам повышения энергоэффективности и достижения декарбонизации в рамках единого контура управления. Предложенная методология может быть применена при комплексном принятии решений по декарбонизации экономики в интересах глобального устойчивого развития при безусловном приоритете целей национального развития в условиях санкционного давления. Результаты исследования расширяют научные представления о возможных подходах к достижению указанных целей.

Важнейшими направлениями дальнейшего изучения могут стать оценка потенциала разработки и промышленного использования критически важных отечественных технологий для достижения целей декарбонизации в условиях ограниченного доступа к передовым зарубежным технологиям. Продуктивным направлением анализа выступает научно-методологическое обоснование стратегических инвестиций в обеспечение устойчивого развития экономики в контексте проблемы декарбонизации. Целесообразна также разработка

механизма адаптационной настройки индикаторов научно-технологического развития под указанные цели с сохранением высоких темпов роста российской экономики.

Предложенная методология, которая была апробирована на материале отечественной экономики, может быть востребована странами с разным уровнем научно-

технологического развития и степенью обеспеченности ресурсами при решении прикладных задач энергетического перехода и создания механизмов их реализации, включая различные аспекты декарбонизации.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-18-00171 (<https://rscf.ru/project/22-18-00171/>).*

## Библиография

- Баев И.А., Соловьева И.А., Дзюба А.П. (2013) Региональные резервы энергоэффективности. *Экономика региона*, (3), 180–189. <http://dx.doi.org/10.17059/2013-3-16>
- Башмаков И.А. (2020) Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики. *Вопросы экономики*, (7), 51–74. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2020-7-51-74>
- Бобылев С.Н., Соловьева С.В., Астапкович М. (2022) Качество воздуха как приоритет для новой экономики. *Мир новой экономики*, 16(2), 76–88. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2022-16-2-76-88>
- Жигалов В.М., Подкорытова О.А., Пахомова Н.В., Малова А.С. (2018) Взаимосвязь энергетической и климатической политики: экономико-математическое обоснование рекомендаций для регулятора. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, (3), 345–368. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2018.301>
- Крюков В.А., Миляев Д.В., Савельева А.Д., Душенин Д.И. (2021) Вызовы и ответы экономики Республики Татарстан на процессы декарбонизации. *Георесурсы*, 23(3), 17–23. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.3>
- Макаров И.А., Музыченко Е.Э. (2021) О возможностях запуска регионального пилотного проекта по развитию низкоуглеродной экономики в Республике Татарстан. *Георесурсы*, 23(3), 24–31. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.4%С2%A0>
- Пахомова Н.В., Рихтер К.К., Автончук Г.А., Малышков Г.Б. (2021) Трансформация глобальных экологических рисков в экономические риски российских предприятий и управление их минимизацией. *Проблемы современной экономики*, (1), 159–166.
- Положенцева Ю.С., Клевцова М.Г., Вертакова Ю.В. (2014) Макроэкономические условия формирования инновационной среды региона. *Управленческое консультирование*, (10), 60–67.
- Порфирьев Б.Н. (2021) О «зеленом» векторе стратегии социально экономического развития России. *Научные труды Вольного экономического общества России*, 227(1), 128–136. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2021-227-1-128-136>
- Порфирьев Б.Н., Шилов А.А., Колпаков А.Ю. (2021) Комплексный подход к стратегии низкоуглеродного социально-экономического развития России. *Георесурсы*, 23(3), 3–7. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.1>
- Сафиуллин Р.Г. (2021) Типология регионов России по степени зависимости от процесса глобальной декарбонизации экономики. *Успехи современного естествознания*, (11), 126–131. <https://doi.org/10.17513/use.37723>
- Соловьева И.А., Дзюба А.П. (2016) Управление затратами на энергопотребление промышленных предприятий в условиях инновационного развития. *Производственный менеджмент: теория, методология, практика*, (5), 144–150.
- Стрижакова Е.Н., Стрижаков Д.В. (2019) Развитие инновационной экономики: проблемы и возможности. *Вестник Евразийской науки*, 11(1), 41.
- Френкель А.А., Волкова Н.Н., Романюк Е.И. (2013) Взаимосвязь инновационного индекса и динамики ВРП. *Экономические науки*, (103), 55–61.
- Якунин А.В. (2017). Факторы роста производительности труда на основе применения инноваций в машиностроении. *Проблемы совершенствования организации производства и управления промышленными предприятиями: Межвузовский сборник научных трудов*, (2), 245–248.
- Acheampong A.O., Adams S., Boateng E. (2019) Do globalization and renewable energy contribute to carbon emissions mitigation in Sub-Saharan Africa? *Science of the Total Environment*, 677, 436–446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.353>
- Al-Mamun M., Boubaker S., Nguyen D.K. (2022) Green finance and decarbonization: Evidence from around the world. *Finance Research Letters*, 46, 102807. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2022.102807>
- Baležentis T., Butkus M., Štreimikienė D., Shen Z. (2021) Exploring the limits for increasing energy efficiency in the residential sector of the European Union: Insights from the rebound effect. *Energy Policy*, 149, 112063. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112063>
- Berner A., Bruns S., Moneta A., Stern D.I. (2022) Do energy efficiency improvements reduce energy use? Empirical evidence on the economy-wide rebound effect in Europe and the United States. *Energy Economics*, 110, 105939. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105939>
- Bobylev S.N., Kudryavtseva O.V., Yakovleva Ye.Yu. (2015) Regional Priorities of Green Economy. *Economy of Region*, (2), 148–159. <https://doi.org/10.17059/2015-2-12>
- Bohra S.S., Anvari-Moghaddam A. (2022) A comprehensive review on applications of multicriteria decision-making methods in power and energy systems. *International Journal of Energy Research*, 46(4), 4088–4118. <https://doi.org/10.1002/er.7517>
- Bolson N., Yutkin M., Patzek T. (2021) Energy efficiency and sustainability assessment for methane harvesting from Lake Kivu. *Energy*, 225, 120215. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120215>
- Bompard E., Ciocia A., Grosso D., Huang T., Spertino F., Jafari M., Botterud A. (2022) Assessing the role of fluctuating renewables in energy transition: Methodologies and tools. *Applied Energy*, 314, 118968. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118968>
- Boyd G., Dutrow E., Tunnessen W. (2008) The evolution of the ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. *Journal of Cleaner Production*, 16(6), 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.02.024>

- Brutschin E., Fleig A. (2016) Innovation in the energy sector – The role of fossil fuels and developing economies. *Energy Policy*, 97, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.041>
- Chen Z., Song P., Wang B. (2021) Carbon emissions trading scheme, energy efficiency and rebound effect—Evidence from China's provincial data. *Energy Policy*, 157, 112507. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112507>
- Costantini V., Crespi F., Palma A. (2017) Characterizing the policy mix and its impact on eco-innovation: A patent analysis of energy-efficient technologies. *Research Policy*, 46(4), 799–819. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.02.004>
- Dalla Longa F., Fragkos P., Nogueira L.P., Van der Zwaan B. (2022) System-level effects of increased energy efficiency in global low-carbon scenarios: A model comparison. *Computers & Industrial Engineering*, 167, 108029. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108029>
- Dell'Anna F. (2021) Green jobs and energy efficiency as strategies for economic growth and the reduction of environmental impacts. *Energy Policy*, 149, 112031. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112031>
- Dixit A., Kumar P., Jakhar S.K. (2022) Effectiveness of carbon tax and congestion cost in improving the airline industry greening level and welfare: A case of two competing airlines. *Journal of Air Transport Management*, 100, 102182. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102182>
- Domon S., Hirota M., Kono T., Managi S., Matsuki Y. (2022) The long-run effects of congestion tolls, carbon tax, and land use regulations on urban CO2 emissions. *Regional Science and Urban Economics*, 92, 103750. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2021.103750>
- Florens J.P., Marimoutou V., Péguin-Feissolle A. (2007) *Econometric modeling and inference*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Fri R.W., Savitz M.L. (2014) Rethinking energy innovation and social science. *Energy Research & Social Science*, 1, 183–187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2014.03.010>
- Gatto A., Drago C. (2021) When renewable energy, empowerment, and entrepreneurship connect: Measuring energy policy effectiveness in 230 countries. *Energy Research & Social Science*, 78, 101977. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101977>
- Gatto A. (2022) The energy futures we want: A research and policy agenda for energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 89, 102639. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102639>
- Greene W. H. (2003) *Econometric analysis*, New Delhi: Pearson Education India.
- Hernan G., Dubel A., Caselle J., Kushner D.J., Miller R.J., Reed D.C., Sprague J.L., Rassweiler A. (2022) Measuring the efficiency of alternative biodiversity monitoring sampling strategies. *Frontiers in Marine Science*, 126. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.820790>
- Hsiao C., Pesaran M., Lahiri K., Lee L.F. (2010) *Analysis of panels and limited dependent variable models*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Hyytinen K., Toivonen M. (2015) Future energy services: Empowering local communities and citizens. *Foresight*, 17(4), 349–364. <https://doi.org/10.1108/FS-08-2013-0035>
- Ikram M., Zhang Q., Sroufe R., Shah S.Z.A. (2020) Towards a sustainable environment: The nexus between ISO 14001, renewable energy consumption, access to electricity, agriculture and CO2 emissions in SAARC countries. *Sustainable Production and Consumption*, 22, 218–230. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.03.011>
- Khan I., Zakari A., Zhang J., Dagar V., Singh S. (2022) A study of trilemma energy balance, clean energy transitions, and economic expansion in the midst of environmental sustainability: New insights from three trilemma leadership. *Energy*, 248, 123619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123619>
- Koval V., Mikhno I., Udovychenko I., Gordiichuk Y., Kalina I. (2021) Sustainable natural resource management to ensure strategic environmental development. *TEM J*, 10(3), 1022–1030. <https://doi.org/10.18421/TEM103-03>
- Kuhn T., Möhring N., Töpel A., Jakob F., Britz W., Bröring S., Pichad A., Schwaneberg U., Rennings M. (2022) Using a bio-economic farm model to evaluate the economic potential and pesticide load reduction of the greenRelease technology. *Agricultural Systems*, 201, 103454. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103454>
- Lenox M., Duff R. (2021) *The Decarbonization Imperative: Transforming the Global Economy by 2050*, Stanford, CA: Stanford University Press.
- Levenda A.M., Behrsin I., Disano F. (2021) Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies. *Energy Research & Social Science*, 71, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101837>
- Lewis J. (2011) *Energy and climate goals of China's 12th five-year plan*, Arlington, VA: Center for Climate and Energy Solutions.
- Liu J., Wang L., Qiu M., Zhu J. (2016) Promotion potentiality and optimal strategies analysis of provincial energy efficiency in China. *Sustainability*, 8(8), 741. <https://doi.org/10.3390/su8080741>
- Luong N.D. (2015) A critical review on energy efficiency and conservation policies and programs in Vietnam. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 623–634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.161>
- Mehmood U. (2022) Renewable energy and foreign direct investment: Does the governance matter for CO2 emissions? Application of CS-ARDL. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 19816–19822. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17222-x>
- Melnik A., Naoumova I., Ermolaev K., Katrichis J. (2021) Driving Innovation through Energy Efficiency: A Russian Regional Analysis. *Sustainability*, 13(9), 4810. <https://doi.org/10.3390/su13094810>
- Mier M., Weissbart C. (2020) Power markets in transition: Decarbonization, energy efficiency, and short-term demand response. *Energy Economics*, 86, 104644. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104644>
- Nam E., Jin T. (2021) Mitigating carbon emissions by energy transition, energy efficiency, and electrification: Difference between regulation indicators and empirical data. *Journal of Cleaner Production*, 300, 126962. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126962>
- Natali S.M., Holdren J.P., Rogers B.M., Treharne R., Duffy P.B., Pomerance R., MacDonald E. (2021) Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(21), e2100163118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2100163118>
- Newell R.G., Jaffe A.B., Stavins R.N. (1999) The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change. *The Quarterly Journal of Economics*, 114(3), 941–975. <https://www.jstor.org/stable/2586888>
- Obrist M.D., Kannan R., Schmidt T.J., Kober T. (2022) Long-term energy efficiency and decarbonization trajectories for the Swiss pulp and paper industry. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 101937. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101937>

- Panait M., Apostu S.A., Vasile V., Vasile R. (2022) Is energy efficiency a robust driver for the new normal development model? A Granger causality analysis. *Energy Policy*, 169, 113162. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113162>
- Pandey N., De Coninck H., Sagar A.D. (2022) Beyond technology transfer: Innovation cooperation to advance sustainable development in developing countries. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 11(2), e422. <https://doi.org/10.1002/wene.422>
- Patterson M.G. (1996) What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- Popp D. (2002) Induced innovation and energy prices. *American Economic Review*, 92(1), 160–180. <https://www.jstor.org/stable/3083326>
- Qi Y., Zhao X., Stern N. (2020) Climate policy in China: An overview. In: *Standing up for a Sustainable World* (eds. C. Henry, J. Rockström, N. Stern), Cheltenham: Edward Elgar Publishing, pp. 76–102
- Qiu Y., Kahn M.E. (2019) Impact of voluntary green certification on building energy performance. *Energy Economics*, 80, 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.01.035>
- Rauner S., Hilaire J., Klein D., Strefler J., Luderer G. (2020) Air quality co-benefits of ratcheting up the NDCs. *Climatic Change*, 163(3), 1481–1500. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02699-1>
- Reaños M.A.T., Lynch M.Á. (2022) Measuring carbon tax incidence using a fully flexible demand system. Vertical and horizontal effects using Irish data. *Energy Policy*, 160, 112682. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112682>
- Rissman J., Bataille C., Masanet E., Aden N., Morrow W.R., Zhou N., Elliott N., Dell R., Heeren N., Huckestein B., Cresko J., Miller S.A., Roy S., Fennell P., Cremmins B., Koch Blank T., Hone D., Williams E.D., de la Rue du Can S., Sisson B., Williams M., Katzenberger J., Burtraw D., Sethi G., Ping H., Danielson D., Lu H., Lorber T., Dinkel J., Helseth J. (2020) Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 266, 114848. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>
- Ruiz-Fuentsanta M.J. (2016) The region matters: A comparative analysis of regional energy efficiency in Spain. *Energy*, 101, 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>
- Sarkar O., Katakojwala R., Mohan S.V. (2021) Low carbon hydrogen production from a waste-based biorefinery system and environmental sustainability assessment. *Green Chemistry*, 23(1), 561–574. <https://doi.org/10.1039/D0GC03063E>
- Shahbaz M., Wang J., Dong K., Zhao J. (2022) The impact of digital economy on energy transition across the globe: The mediating role of government governance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112620>
- Sohag K., Begum R.A., Abdullah S.M.S., Jaafar M. (2015) Dynamics of energy use, technological innovation, economic growth and trade openness in Malaysia. *Energy*, 90, 1497–1507. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.101>
- Song C., Oh W. (2015) Determinants of innovation in energy intensive industry and implications for energy policy. *Energy Policy*, 81, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.022>
- Stephenson J.R., Sovacool B.K., Inderberg T.H.J. (2021) Energy cultures and national decarbonisation pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110592. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110592>
- Stock J.H., Wright J.H., Yogo M. (2002) A survey of weak instruments and weak identification in GMM. *Journal of Business & Economic Statistics* 20, 518–529. <https://doi.org/10.1198/073500102288618658>
- Thoyre A. (2015) Energy efficiency as a resource in state portfolio standards: Lessons for more expansive policies. *Energy Policy*, 86, 625–634. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.015>
- Urpelainen J. (2011) Export orientation and domestic electricity generation: Effects on energy efficiency innovation in select sectors. *Energy Policy*, 39(9), 5638–5646. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.028>
- Wan J., Baylis K., Mulder P. (2015) Trade-facilitated technology spillovers in energy productivity convergence processes across EU countries. *Energy Economics*, 48, 253–264. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.12.014>
- Wang N., Zhang S.J., Wang W. (2022) Impact of Environmental Innovation Strategy on Green Competitiveness: Evidence from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), 5879. <https://doi.org/10.3390/ijerph19105879>
- Winkler H., Simões A.F., La Rovere E.L., Alam M., Rahman A., Mwakasonda S. (2011) Access and affordability of electricity in developing countries. *World Development*, 39(6), 1037–1050. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.02.021>
- Wu H., Hao Y., Ren S., Yang X., Xie G. (2021) Does internet development improve green total factor energy efficiency? Evidence from China. *Energy Policy*, 153, 112247. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112247>
- Ye T., Xiang X., Ge X., Yang K. (2022) Research on green finance and green development based eco-efficiency and spatial econometric analysis. *Sustainability*, 14(5), 2825. <https://doi.org/10.3390/su14052825>
- Zakari A., Khan I., Tan D., Alvarado R., Dagar V. (2022) Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs). *Energy*, 239, 122365. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122365>
- Zeka A., Leonardi G., Lauriola P. (2020) Climate change and ecological public health: An integrated framework. In: *Cost-Benefit Analysis of Environmental Health Interventions* (ed. C. Guerriero), Amsterdam: Elsevier, pp. 185–227.
- Zhao X., Wu L. (2016) Interpreting the evolution of the energy-saving target allocation system in China (2006–13): A view of policy learning. *World Development*, 82, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.01.014>