



Экономика устойчивого развития

Научная статья

УДК 330.15, 330.43, 620.9

DOI: <https://doi.org/10.17308/econ.2025.4/13356>

JEL: C33; D82; P18; Q42

Механизмы борьбы с выбросами углерода энергетической отраслью: межстрановой анализ

С. В. Кузнецова¹, А. Ю. Филатов²

¹ Высшая школа экономики, Покровский бульвар, 11, 109028, Москва, Российская Федерация

² Дальневосточный федеральный университет, Аякс, 10, о. Русский, 690922, Владивосток, Российская Федерация

Предмет. Поведение крупнейших энергетических компаний мира в контексте сокращения выбросов CO₂ и перехода к возобновляемым источникам энергии.

Цель. Исследование воздействия макроэкономических факторов и внедряемых механизмов экологической политики на поведение крупнейших энергетических компаний в процессе перехода от угля, нефти и газа к возобновляемым источникам энергии. Оценка происходящего при этом сокращения выбросов углерода.

Методология. Для проверки гипотез применен эконометрический анализ данных с использованием моделей сквозной регрессии и регрессии с фиксированными эффектами. Для уточнения межстрановых зависимостей использована кластеризация. Ставки налога и цены разрешений сопоставлены с социальной стоимостью углерода.

Результаты. На основе серии эконометрических моделей показано, что выбросы нелинейно связаны с экономическим ростом. Углеродный налог и система торговли выбросами оказываются эффективными в целях перехода энергетики на возобновляемую. Однако показано, что более простой в реализации механизм углеродного налога значительно уступает системе торговли выбросами. Особенно ярко это наблюдается на данных последних лет в странах с высоким уровнем развития, а также на уровне корпораций, в основном относящихся к развитым странам.

Выводы. Полученные результаты будут полезны правительствам, энергетическим компаниям, инвесторам, экологическим организациям, научному сообществу и широкой общественности, поскольку они предоставляют ценную информацию для принятия решений в области устойчивого развития.

Ключевые слова: углеродный рынок, энергетика, возобновляемые источники энергии, прикладная эконометрика, экономические механизмы.

Для цитирования: Кузнецова, С. В., & Филатов, А. Ю. (2025). Механизмы борьбы с выбросами углерода энергетической отраслью: межстрановой анализ. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление*, (4), 34–51. DOI: <https://doi.org/10.17308/econ.2025.4/13356>



Sustainable Development Analysis

Original article

UDC 330.15, 330.43, 620.9

DOI: <https://doi.org/10.17308/econ.2025.4/13356>

JEL: C33; D82; P18; Q42

Carbon emissions reducing mechanisms in the energy industry: a cross-country analysis

S. V. Kuznetsova¹, A. Yu. Filatov²

¹ Higher School of Economics, 11 Pokrovsky Boulevard, 109028, Moscow, Russian Federation

² Far Eastern Federal University, 10 Ajax, Russian Island, 690922, Vladivostok, Russian Federation

Subject. The behavior of the world's largest energy companies in the context of reducing CO₂ emissions and transitioning to renewable energy sources.

Objective. To investigate the impact of macroeconomic factors and implemented environmental policy mechanisms on the behavior of the largest energy companies during the transition from coal, oil, and gas to renewable energy sources. To assess the accompanying reduction in carbon emissions.

Methodology. The study was conducted using econometric tools, specifically pooled and fixed effects regressions. Clustering was used to refine cross-country regression relationships. Carbon tax rates and allowance prices in emissions trading systems across various countries were compared with the social cost of carbon.

Results. On the base of a series of econometric models, it has been shown that CO₂ emissions are significantly associated with economic growth, and this relationship is nonlinear. Both economic mechanisms – the carbon tax and the emissions trading system – prove effective in facilitating the transition of the energy sector to renewable sources. However, based on the obtained quantitative estimates, the simpler for implementation carbon tax mechanism is significantly less effective than the emissions trading system. This difference is especially pronounced in recent years' data from highly developed countries, as well as at the corporate level, mostly relating to companies from developed countries.

Conclusions. The results of the study are valuable to governments, energy companies, investors, environmental organizations, the academic community, and the general public, as they provide important information for decision-making in the fields of sustainable development.

Key words: carbon market, energy industry, renewable energy, applied econometrics, mechanism design.

For citation: Kuznetsova, S. V., & Filatov, A. Yu. (2025). Carbon Emissions Reducing Mechanisms In The Energy Industry: A Cross-Country Analysis. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and Management*, (4), 34–51. DOI: <https://doi.org/10.17308/econ.2025.4/13356>

Введение

С древних времен энергия играла жизненно важную роль в деятельности человека, определяя уровень его благосостояния, и на данном этапе она остается ключевым фактором развития современной цивилизации. Сегодня человечество находится в начале четвертого энергоперехода (Газман, 2022b), однако потребление источников прошлых периодов продолжает быть высоким (Бессель и др., 2022). В потреблении первичной энергии в мире нефть занимает 31,57 %, уголь – 26,73 %, природный газ – 23,49 %. На долю же относительно чистых источников – атомную и гидроэнергетику, а также возобновляемые источники энергии – приходится всего 4,00, 6,73 и 7,48 % по данным на 2022 г. (Безруких, 2024). Динамика происходящих изменений представлена на рис. 1.

Если рассматривать исключительно электроэнергетику, то на тот же год доля угля в генерации составила 35,37 %, нефтепродуктов (в первую очередь природного газа) – 25,25 %, АЭС – 9,18 %, ГЭС – 14,86 % и возобновляемых источников энергии – 15,34 %. И проблема заключается далеко не только в истощении

ископаемых источников энергии, а в создаваемых при этом экологических проблемах. За последние 200 лет объем выбросов CO₂ мировым энергетическим сектором возрос более чем в 1000 раз, достигнув в 2023 г. отметки в 37,8 млрд т¹ (рис. 2).

Такая тенденция увеличения количества парниковых газов в атмосфере напрямую влияет на климат, в том числе среднюю температуру Земли, что приводит к развитию серьезных заболеваний (Panwar et al., 2011). По прогнозам Всемирной организации здравоохранения с 2030 по 2050 г., среднегодовое количество избыточных смертей, произошедших по причине глобального потепления, достигнет 250 тыс. человек с тенденцией к дальнейшему увеличению. А к концу столетия вследствие повышения температуры на 3,5 °C число преждевременных смертей составит 74 млн человек (Bressler, 2021). И этих жертв можно избежать только с помощью перехода к углеродной нейтральности.

Дополнительной проблемой, вызванной парниковым эффектом, являются повышение

¹ URL: <https://ourworldindata.org/>

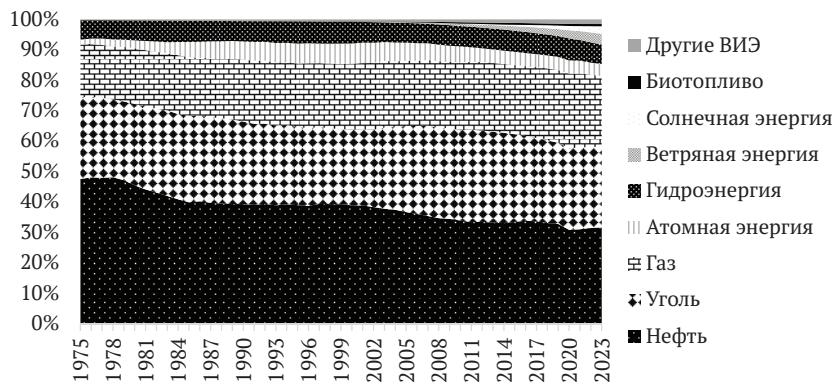


Рис. 1. Потребление первичной энергии в мире по видам источников, %
[построено авторами на основе данных <https://ourworldindata.org/>]

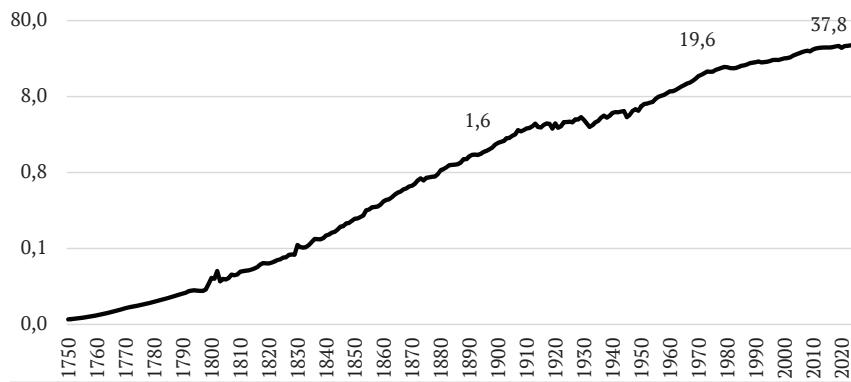


Рис. 2. Годовые выбросы CO₂ мировым энергетическим сектором, млрд т
[построено авторами на основе данных <https://ourworldindata.org/>]

уровня мирового океана, грозящее затоплением прибрежных территорий и целых островных государств, и учащение случаев природных катаклизмов. Так, экстремальная жара и засухи стали причинами лесных пожаров в Калифорнии в 2025 г., ущерб от которых составил по различным оценкам от 95 до 164 млрд долл.²

Говоря о нашей стране, можно вспомнить атмосферные аномалии, которые в 2019 г. стали причиной затопления 103 населенных пунктов Иркутской области и нанесли ущерб в 31 млрд руб.³, или наводнение 2024 г. в Оренбургской области, ущерб от которого превысил 21 млрд руб.⁴ По данным Банка России, в 2023 г. количество природных катаклизмов в России увеличилось на 22 %, что привело к эвакуации целых поселений из-за наводнений, перебоев с электроснабжением и разрушения домов⁵.

Пессимистические прогнозы смертности и масштабы ущерба от стихийных бедствий свидетельствуют о критической важности принятия мер по сокращению выбросов углерода. Однако, несмотря на все усилия международных организаций и правительств отдельных стран в сфере зеленой энергетики, их оказывается недостаточно, чтобы преодолеть тенденцию к устойчивому росту объемов выбросов. Сложившаяся ситуация подтверждает важность анализа существующих мер экологической политики и выявления путей повышения их эффективности.

² URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2025-02-04/la-wildfire-losses-are-seen-as-high-as-164-billion-ucla-says>

³ URL: <https://www.interfax.ru/russia/668144>

⁴ URL: <https://www.forbes.ru/society/509852-minstrost-ocenil-userb-ot-navodneniya-v-orenburgskoj-oblasti-v-21-mlrd-rublej>

⁵ URL: https://www.cbr.ru/finstab/Climate_risks/

Эмпирические данные по динамике выбросов углерода

С целью предотвращения глобальной экологической катастрофы, вызванной парниковыми газами, в 2015 г. было заключено Парижское соглашение, которое сейчас насчитывает 195 стран-участниц. В том же году были сформулированы 17 целей устойчивого развития, призванного не наносить ущерб будущим поколениям. Одной из таких целей стала борьба с изменением климата.

Следует отметить, что в ряде стран, в первую очередь европейских, рост выбросов CO₂ энергетическим сектором прекратился еще в 1970–1980-х гг., а с 2005 г. (некоторые причины этого озвучим ниже) началось устойчивое сокращение выбросов. Это привело к тому, что к настоящему моменту объемы эмиссии CO₂ в Великобритании вдвое ниже, чем полвека назад, во Франции и Германии – ниже на 70 %, а в целом по Европе составляют 72 % от уровня 1975 г. В США эти же тенденции проявились чуть слабее, поэтому до 2005 г. наблюдался полуторакратный рост выбросов парниковых газов, однако за последующие 20 лет произошло снижение до 110 % от уровня 1975 г.

В то же время в развивающихся странах объем выбросов углерода энергетическим сектором увеличился многократно. Даже в умеренно растущей Африке увеличение составило 4,7 раза. Ну а в Китае и Индии с их бурным экономическим ростом эмиссия CO₂ увеличилась соответственно в 11 и 14 раз. Этому способствовало как массовое строительство новых угольных электростанций, так и стремительная урбанизация, сопровождающаяся значительным ростом населения. Динамика процессов в разных странах представлена на рис. 3.

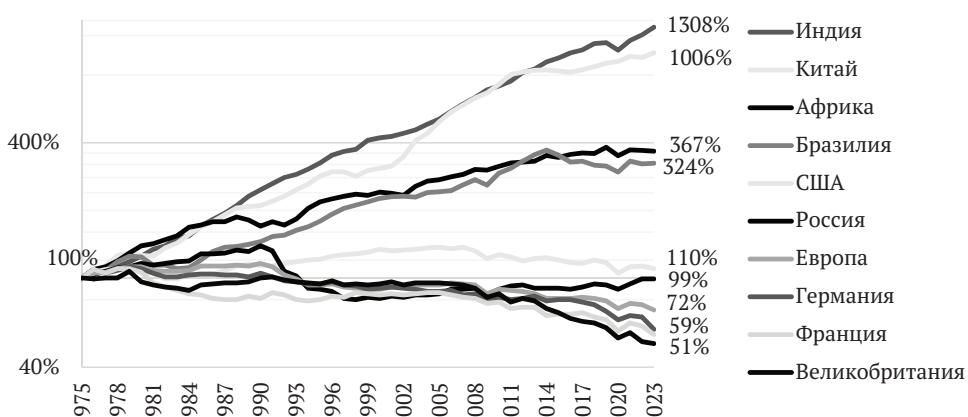


Рис. 3. Изменение годовых выбросов CO₂ энергетическим сектором по странам в сравнении с 1975 г., %
[построено авторами на основе данных <https://ourworldindata.org>]

Справедливости ради следует сказать, что отношение объема выбросов к ВВП уменьшается в большинстве стран мира. Однако в некоторых из них, например в странах Евросоюза, США, а с 2010-х гг. и в Китае, это уменьшение весьма значительно (в частности, Китай в последнее десятилетие вводит огромное количество ветровых и солнечных электростанций, обеспечивающих более половины мирового роста мощностей в данном сегменте). А в других, например в Индии, Бразилии и России, носит умеренный характер, что демонстрирует рис. 4.

Различие между странами неслучайно. Чувство социальной ответственности и понимание того, что проблема выбросов является важнейшей для всего человечества, – конечно, мощные мотиваторы для добровольного сокращения выбросов CO_2 крупнейшими энергетическими корпорациями (Lu & Li, 2024). Но когда речь идет о многомиллиардных прибылях, этого может оказаться недостаточно, чтобы масштабы сокращения оказались заметными на мировом уровне. Необходимо подкрепление в виде имплементируемых государством экономических механизмов, изменяющих стимулы компаний (Popp et al., 2010), однако такие механизмы внедрены далеко не везде. Рассмотрим их более детально.

Экономические механизмы экологической политики

Существует множество механизмов борьбы с выбросами углерода, как директивно-запретительных, так и экономических. Среди наиболее часто изучаемых в контексте энергетической отрасли можно назвать таргумые стандарты эффективности выбросов, требования по доле рынка для возобновляемых источников энергии, субсидии на производство энергии на основе возобновляемых источников и субсидии на НИОКР в области возобновляемых источников. В то же время их эффективность подвергается серьезному сомнению (Fischer & Newell, 2005). В частности, низкая эффективность последнего механизма, особенно в плане массового внедрения созданных технологий, демонстрируется в работе (Popp, 2006).

Напротив, одним из наиболее эффективных средств в борьбе с парниковыми газами считается углеродный налог, который, по сути, «привязывает» выбросы CO_2 к деньгам

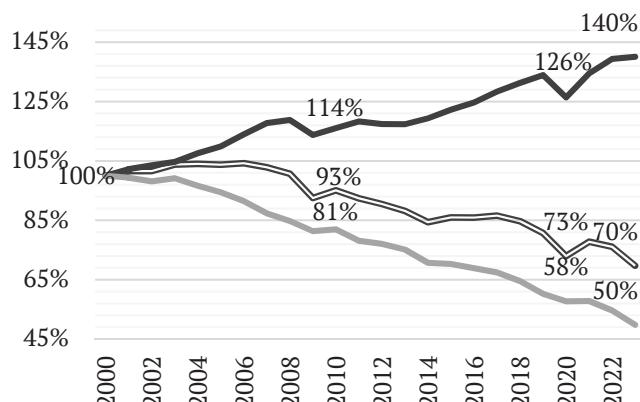
(Popp et al., 2010). Такой подход исключает выбросы из категории «внешних» эффектов предприятий и включает их непосредственно в производственную функцию «загрязнителей», вынуждая их сокращать выбросы (Степанов, 2019). В настоящее время углеродный налог ввели 39 государств (рис. 5), первыми из которых стали Польша (1990), Финляндия (1990), Швеция (1991), Норвегия (1991) и Дания (1992). Пунктирная штриховка Канады означает, что он введен на территории только части провинций.

В то же время размер углеродного налога очень сильно варьируется – от 0,76 долл. за 1 т выбросов в Украине до 167,17 долл. в Уругвае. Это означает, что ситуация далеко не бинарная (есть в стране налог или он отсутствует): в ряде стран он является чисто символическим подтверждением того, что государство обращает внимание на данную проблему, в некоторых же – приводит к резкому удорожанию энергии и даже может явиться причиной ослабления конкурентоспособности производителей широкого круга отраслей (Ekins & Barker, 2001).

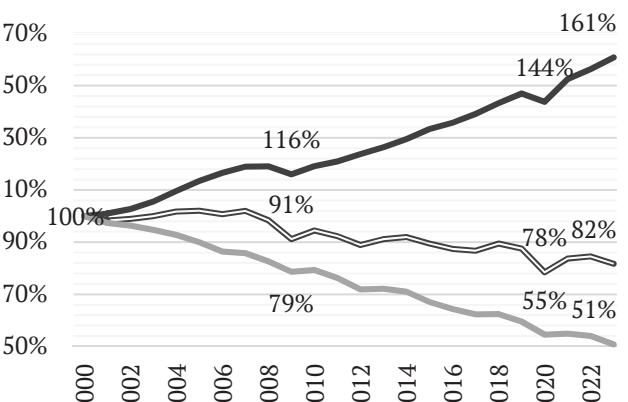
Более современным механизмом является система торговли выбросами ETS (рис. 6). Впервые она была создана в Евросоюзе в 2005 г., тогда в нее вошли 15 стран. В настоящее время число стран-участниц достигло 31: все страны ЕС, Великобритания и присоединившиеся к ETS в 2007 г. Норвегия, Исландия и Лихтенштейн. Существуют и другие системы торговли выбросами, в частности созданные в 2007 и 2013 гг. соответственно Канадская и Калифорнийская. Свою систему торговли выбросами запустил Китай. Сейчас она охватывает восемь отраслей – электроэнергетику, химическую и нефтехимическую промышленность, производство стройматериалов, чугуна и стали, цветных металлов, а также целлюлозно-бумажную промышленность и авиацию. Однако планируется ее значительное расширение.

Суть ETS заключается в ограничении общего объема выбросов путем распределения разрешений среди «предприятий-загрязнителей» на аукционах (Степанов, 2019). В отличие от налогов, разрешения с одной стороны устанавливают четкие лимиты и способствуют достижению конкретных экологических целей, а с другой – предоставляют фирмам большую гибкость благодаря возможности продать или купить разрешения (Ekins & Barker, 2001).

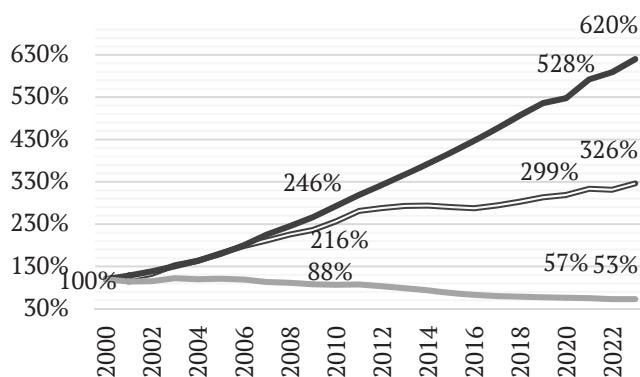
Европейский союз (27)



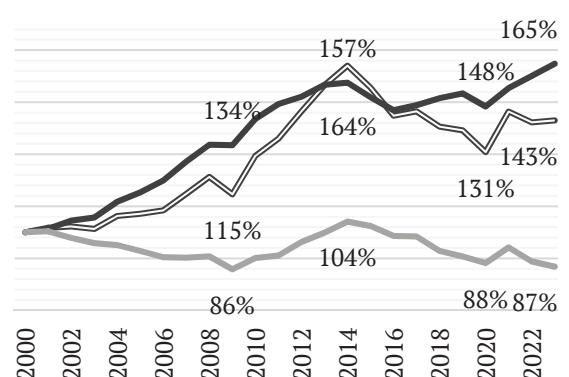
США



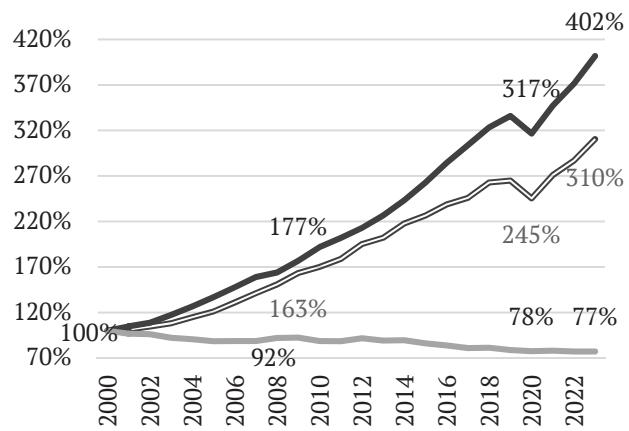
Китай



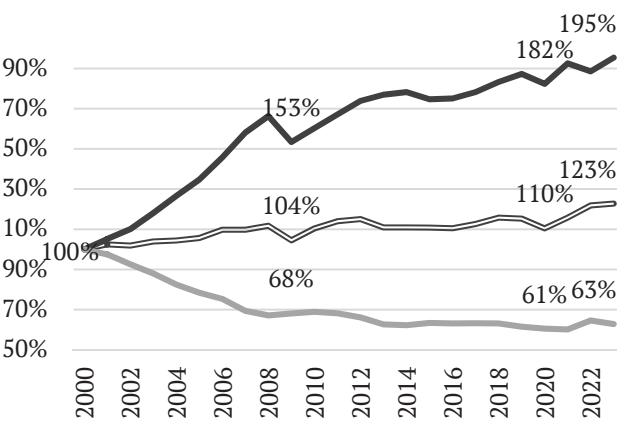
Бразилия



Индия



Россия



— ВВП — Годовые выбросы CO₂ — Изменение отношения выбросов CO₂ к ВВП

Рис. 4. Изменение годовых выбросов CO₂ энергетическим сектором и динамика ВВП по странам в сравнении с 2000 г., % [построено авторами на основе данных <https://ourworldindata.org>]



Рис. 5. Страны, использующие механизм углеродного налога в 2024 г.

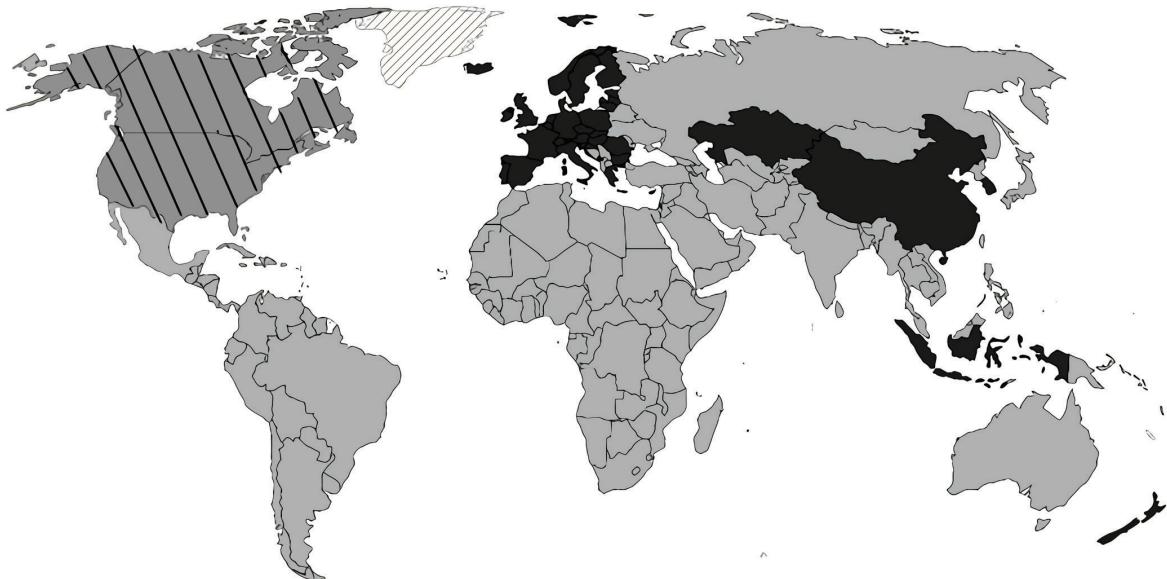


Рис. 6. Страны – участницы системы торговли выбросами в 2024 г.
[построено авторами на основе данных <https://ourworldindata.org>]

Однако недостатком системы ETS является ее уязвимость перед рисками колебаний цен на разрешения и спекуляций со стороны участников. Поэтому она редко применяется в развивающихся странах. Также она часто приходит на смену налогу на стабилизировавшихся рынках.

В настоящее время системы торговли выбросами оказались более популярным инструментом экологической политики. После подключения к этой системе Китая в 2021 г. они покрывают 17,8 % мировых выбросов, в то время как углеродные налоги – только 5,2 %, что показано на рис. 7.

Столь широкое распространение систем торговли выбросами можно объяснить тем, что установление четких, заранее заданных лимитов способствует достижению конкретных экологических целей, в то время как углеродный налог не дает гарантий в отношении снижения выбросов. Также формирование цены разрешения под воздействием спроса и предложения со стороны участников рынка способствует установлению ее именно на текущем рыночном уровне, что намного гибче обладающего значительной инерцией государственного варьирования налоговых ставок (Пахнин, 2020). Дополнительным

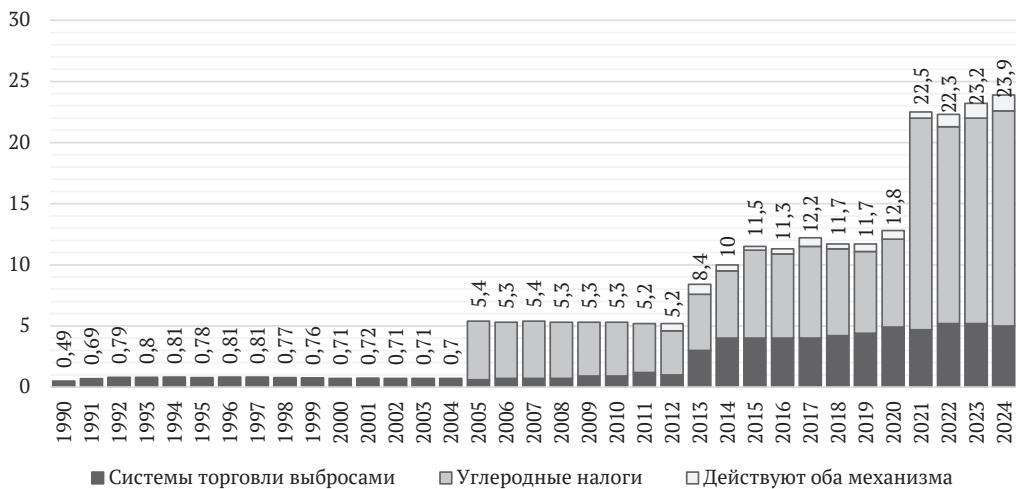


Рис. 7. Доля мировых выбросов CO₂, покрываемых системами торговли выбросами или углеродным налогом по годам, % [построено авторами на основе данных <https://worldbank.org>]

плюсом систем торговли выбросами является межстрановая интеграция их участников.

Дизайн исследования

Наше эмпирическое исследование направлено на изучение ключевых факторов, влияющих на динамику выбросов CO₂, с использованием двух взаимодополняющих подходов: анализа на уровне стран и на уровне компаний. Сконцентрируемся на нескольких моментах.

Во-первых, проанализируем влияние экономического роста на объемы выбросов. Особенno актуальным этот вопрос является в связи с высокой вероятностью бурного роста экономики в некоторых развивающихся странах Азии и Африки, которые могут, пусть и с некоторыми отклонениями и задержкой на несколько десятилетий, повторить траектории Китая и Индии. В частности, на широкой выборке стран мы проверим озвученную в литературе гипотезу о том, что зависимость между объемом душевого ВВП и выбросами является нелинейной, выявим, насколько быстро, по мере экономического роста, происходит отход от пропорционального увеличения объема выбросов, а также количественно оценим среднемировую динамику.

Вторым аспектом, на который мы обратим внимание в исследовании, будет сокращение эмиссии углерода под влиянием перехода на возобновляемые источники энергии, включая энергию Солнца и ветра. В связи с определенными сомнениями на фактических данных проверим гипотезу о том, что переход на

любые виды «зеленой» энергетики снижает выбросы, но при этом соответствующие количественные оценки для них существенно различаются.

Наконец, главный вопрос, изучаемый в данной статье, – это эффективность двух наиболее популярных экономических механизмов: углеродного налога и системы торговли разрешениями на выбросы. Каждый из них предполагает плату за наносимый выбросами вред, возникший вследствие ухудшающейся экологической ситуации. Тем самым оба механизма создают стимулы к снижению выбросов. Однако в литературе развернулась дискуссия по поводу того, какой из механизмов лучше.

В ранних работах исследователи называли наиболее эффективным механизмом углеродный налог (Parry, 1998). К этой же точке зрения склонялся и Нобелевский лауреат по экономике Nordhaus (2017). В то же время в исследованиях последних лет часто озвучивается противоположный тезис. В целом каждый из механизмов при наличии значительных достоинств обладает и существенными недостатками. Как отмечается в статье Т. Н. Голововой и др. (2024), углеродный налог может оказывать чрезмерное давление на бизнес и замедлять экономический рост, а система торговли выбросами создает риски сохранения высокого уровня загрязнения, поскольку крупные компании могут приобретать дополнительные разрешения вместо реального снижения выбросов. Соответственно, важной задачей является эконометрическая проверка озвученных гипотез.

Для проверки на макроэкономическом уровне сформируем панель данных по 180 странам за период с 1990 по 2021 г. Информацию о показателях экономического развития возьмем из базы данных Всемирного банка, а сведения о генерации электроэнергии ВИЭ, размере углеродного налога и цене разрешения на выбросы – из базы данных Our World in Data. Выборка обладает широким времененным горизонтом и пространственным охватом, что позволит получить точные оценки искомых параметров. Панель включает всех участников систем торговли выбросами, а также все страны, использующие углеродный налог с начала его применения. Для оценки будем использовать модель сквозной регрессии на несбалансированной панели данных (5292 наблюдения).

Для более детального анализа факторов, влияющих на динамику выбросов углерода в разных странах, также проведем кластерное разбиение данных по двум критериям: временному интервалу и уровню доходов. Временная кластеризация позволит нам проследить, как изменились оценки и значимость рассматриваемых факторов в динамике, а группировка по уровню дохода даст возможность оценить различия в эффективности механизмов экологической политики в странах с разным уровнем развития.

В дополнение проведем исследование поведения компаний в процессе декарбонизации на корпоративных данных. Сформируем выборку данных по 30 ведущим энергетическим компаниям из разных стран за период с 2016 по 2023 г. Данные об объемах выбросов и структуре генерации электроэнергии получим из годовых отчетов устойчивого развития компаний. Информацию о применяемых

механизмах углеродного ценообразования соберем с портала Всемирного банка State and Trends of Carbon Pricing Dashboard.

В контексте анализа механизмов экологической политики важным аспектом стал учет страны базирования компании, а также города, где расположена ее штаб-квартира, что позволило корректно идентифицировать соответствующие ставки углеродных налогов и цен на разрешения в системах торговли выбросами на уровне страны, штата и провинции.

Межстрановая модель

Оценим с помощью эконометрических моделей на данных с 1990 по 2021 г. динамику выбросов по странам, а также эффективность двух рассмотренных механизмов. При построении регрессий отдадим предпочтение модели сквозной регрессии ввиду использования несбалансированных панелей, а также из-за того, что для нашего исследования важнее учесть межстрановые различия, чем различия внутри одной страны. Результаты моделирования с учетом ошибок Дрисколла-Края, позволяющих учесть автокорреляцию и гетероскедастичность остатков, отражены в табл. 1.

Представленная модель демонстрирует, что выбросы CO₂ положительно, причем нелинейно, связаны с уровнем экономического развития. Начальный экономический рост в развивающихся странах, связанный с индустриализацией, сопровождается резким увеличением выбросов, однако при дальнейшем увеличении душевого ВВП до уровня развитых стран темпы роста выбросов сокращаются благодаря технологическому прогрессу и экологической политике, хотя положительная связь сохраняется. Заметим, что

Зависимость душевых выбросов CO₂ по 180 странам за 1990–2021 гг.

Таблица 1

Переменная	Ед. изм.	Обознач.	Оценка	Ст. ошибка
ВВП на душу населения	тыс. долл.	GDP_per	361,12***	8,16
ВВП на душу в квадрате	тыс. долл.	GDP_per ²	-1,54***	0,15
Душ. генер. солн. и ветр. энергии	кВт·ч/чел.	SW	-2,55***	0,27
Тренд	период	T	-53,51***	4,10
Размер налога с лагом 2 года	долл./т	TAX_lag2	-141,13***	13,00
Цена разрешения с лагом 2 года	долл./т	ETS_lag2	-254,53***	38,87

Источник: расчеты авторов.

Прим. Оценки параметров, значимые на уровнях 10, 5 и 1 %, отмечены символами *, ** и *** соответственно.

это сокращение добавляется к исходящему временному тренду, свидетельствующему о мировой тенденции снижения выбросов. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследования Wen (2021).

Сильно значимыми факторами снижения выбросов углерода является переход страны на солнечную и ветровую энергетику, а также внедрение обоих экономических механизмов. При этом эффективность системы торговли выбросами в некотором смысле (сравниваем значения коэффициентов 254,33 и 141,13) оказывается почти вдвое выше.

Также следует отметить, что эффект от введения углеродного налога и системы торговли разрешениями проявляется не сразу, а с временной задержкой, связанной с необходимостью крупных инвестиций и постепенным внедрением новых технологий. При сравнении безлаговой модели, а также моделей с лагом 1–3 года было выявлено, что наилучшей из них является модель с двухлетним лагом между внедрением механизма (или изменением соответствующих ставок и цен) и снижением эмиссии углерода. Именно такая модель демонстрирует максимальную величину объясняющей способности, выраженную через значение коэффициента детерминации R², а также наилучшее значение критериев AIC и BIC.

Кластерный анализ

Для более глубокого понимания факторов, влияющих на динамику выбросов углерода в разных странах, проведем кластерный ана-

лиз. Для начала рассмотрим три различающиеся между собой периода. Первый из них (1990–2004) относится ко времени, когда стали вводиться первые углеродные налоги, но механизм торговли разрешениями на выбросы еще не был имплементирован на практике. Второй период (2005–2014) характеризуется появлением систем торговли выбросами, первая из которых была запущена в Европе (EU ETS) в 2005 г. Третий кластер (2015–2021) охватывает период, когда оба инструмента экологической политики стали широко применяться на энергетическом рынке, а экологическая повестка вышла на первый план, что сопровождалось подписанием многочисленных международных соглашений. Построим модели для каждого из периодов (табл. 2).

Расчеты, с одной стороны, подтвердили, что внедрение обоих механизмов значимо снижает выбросы углерода, но при этом влияние оказывается разным. Сильное влияние углеродного налога в первом периоде в дальнейшем сокращается более чем в 1,5 раза после введения в ряде стран (иногда в дополнение к налогу) более продвинутого механизма – системы торговли выбросами. При этом эффективность ETS продолжает увеличиваться и с 2015 г. оказывается выше эффективности налога более чем втрое.

Проверим также, что воздействие механизмов экологической политики на объем выбросов может различаться в странах с разным уровнем доходов. Для проведения анализа по уровню дохода разделим страны на три кластера, основываясь на данных Всемирного

Таблица 2
Результаты моделирования для кластеризации во времени

Переменная	Кластер 1 (1990–2004)	Кластер 2 (2005–2014)	Кластер 3 (2015–2021)
ВВП на душу населения	314,56*** (8,29)	357,91*** (6,30)	354,84*** (8,91)
ВВП на душу в квадрате	-0,53*** (0,14)	-1,55*** (0,14)	-1,84*** (0,10)
Душевая генерация солн. и ветр. энергии	-6,12*** (0,49)	-2,21*** (0,55)	-1,85*** (0,21)
Тренд	-70,37*** (6,69)	-52,00*** (14,16)	64,86*** (9,78)
Размер налога с лагом 2 года	-206,46*** (6,11)	-129,76*** (6,46)	-104,93*** (6,93)
Цена разрешения с лагом 2 года		-226,12*** (41,24)	-348,33*** (74,96)

Источник: расчеты авторов.

Прим. Оценки параметров, значимые на уровнях 10, 5 и 1 %, отмечены символами *, ** и *** соответственно.

банка об уровнях дохода стран в 1990 г. В первый кластер вошли 116 стран с уровнем дохода ниже среднего (отметим, что только 4 из них внедрили механизм углеродного налога и 7 – механизм торговли выбросам). Второй кластер включает 27 стран со средним уровнем дохода. К третьему кластеру относятся 34 страны, относящиеся к богатым. Результаты расчетов сведем в табл. 3.

Модели показали, что в бедных странах ни один из механизмов не смог привести к существенному сокращению выбросов. В странах со средним и высоким доходом оба механизма оказывают значимое отрицательное воздействие на объем выбросов. При этом система торговли выбросами оказывается более эффективной, чем налог, причем разница увеличивается по мере роста богатства страны.

Анализ на уровне компаний

Для более детального анализа воздействия представленных механизмов на выбросы в развитых странах спустимся на уровень крупнейших корпораций энергетического сектора. Выборка представляет собой сбалансированную панель из 30 ведущих компаний из разных стран за период с 2016 по 2023 г., которая включает данные об объеме выбросов CO₂, генерации электроэнергии за счет различных источников, размере налога и цене разрешения, действующих для рассматриваемых компаний. В табл. 4 представлены названия вошедших в выборку компаний с учетом мест их базирования для опреде-

ления ставок налогов и цен разрешений на выбросы.

На основе этих данных построим модель с фиксированными эффектами. Результаты моделирования представим в табл. 5.

Уравнение модели показало высокую значимость большинства регрессоров. Таким образом, использование возобновляемых источников энергии подтвердило свою важность в процессе перехода к низкоуглеродному развитию и декарбонизации. Участие компаний в системах торговли выбросами также оказывает сильное влияние на снижение выбросов. В то же время налоговый инструмент оказался незначимым. Это может быть объяснено несколькими причинами.

Во-первых, углеродный налог создает постоянную фиксированную нагрузку, которую компании могут воспринимать как дополнительные расходы, а не как стимул к изменениям. В то же время системы торговли разрешениями, формирующие цену углерода с помощью рыночного механизма спроса и предложения, предоставляют мощные экономические стимулы для быстрого реагирования и адаптации, что делает их более эффективными. Во-вторых, в отличие от анализа стран, исследование компаний охватило более поздний промежуток времени (2016–2023), к которому ведущие компании начали самостоятельно осознавать необходимость сокращения выбросов и развития возобновляемой энергетики независимо от обременения углеродным налогом.

Таблица 3

Результаты моделирования для кластеризации по уровню дохода

Переменная	Кластер 1 (низкий доход)	Кластер 2 (средний доход)	Кластер 3 (высокий доход)
ВВП на душу населения	289,23*** (9,20)	517,43*** (28,22)	389,60*** (105,50)
ВВП на душу в квадрате	-0,93* (0,30)	-3,31*** (0,20)	-1,30 (0,66)
Душевая генерация солн. и ветр. энергии	-2,71* (0,56)	-4,80*** (0,47)	-0,85** (0,29)
Тренд	-30,66*** (3,21)	-13,65 (9,99)	-190,03*** (22,30)
Размер налога с лагом 2 года	-10,59 (291,91)	-264,38*** (49,59)	-146,69*** (17,62)
Цена разрешения с лагом 2 года	2,34 (21,78)	-310,00*** (54,48)	-314,15*** (51,81)

Источник: расчеты авторов.

Прим. Оценки параметров, значимые на уровнях 10, 5 и 1%, отмечены символами *, ** и *** соответственно.

Таблица 4
Ведущие мировые энергетические компании

№	Компания	Страна	Штаб-квартира
1	Enel	Италия	Рим
2	Orsted	Дания	Фредерисия
3	SSE	Великобритания	Перт
4	Edison	Италия	Милан
5	Verbund AG	Австрия	Вена
6	Eni	Италия	Рим
7	CEZ	Чехия	Прага
8	Endesa	Испания	Мадрид
9	Enel Chile	Чили	Сантьяго
10	RWE	Германия	Эссен
11	China Shenhua Energy	Китай	Пекин
12	Southern Company energy	США, штат Джорджия	Атланта
13	Lukoil	Россия	Москва
14	Ameren EEI	США, штат Миссури	Сент-Луис
15	Terna	Италия	Рим
16	Iberdrola	Испания	Бильбао
17	Eletrobras	Бразилия	Рио-де-Жанейро
18	Tauron	Польша	Катовице
19	NextEra Energy	США, штат Флорида	Джуно-Бич
20	EDF	Франция	Париж
21	AES	США, штат Вирджиния	Арлингтон
22	Engie	Франция	Дефанс
23	Naturgy Energy Group	Испания	Барселона
24	PPL	США, штат Пенсильвания	Аллентаун
25	Fortis	Канада	Сент-Джонс
26	CMS Energy	США, штат Мичиган	Джексон
27	EDP Group	Португалия	Лиссабон
28	TXNM Energy	США, штат Нью-Мексико	Альбукерке
29	Capital Power	Канада	Эдмонтон
30	AGL Energy	Австралия	Сидней

Таблица 5
Зависимость душевых выбросов CO_2 по 30 компаниям за 2016–2023 гг.

Переменная	Ед. изм.	Обозначение	Оценка	Ст. ошибка
Ген. эл. за счет угля	ГВт·ч	Coal	793,20***	28,78
Ген. эл. за счет нефти и газа	ГВт·ч	OGT	215,16***	42,74
Ген. эл. за счет атомной энергии	ГВт·ч	Nuclear	81,87***	22,46
Ген. эл. за счет гидроэнергетики	ГВт·ч	Hydro	-175,74**	62,01
Ген. эл. за счет энергии ветра	ГВт·ч	Wind	-222,69	121,44
Ген. эл. за счет энергии Солнца	ГВт·ч	Solar	77,76	250,44
Ген. эл. за счет биомассы	ГВт·ч	Biomass	-2189,60***	620,57
Ген. эл. за счет геотермал. энергии	ГВт·ч	Geo	-9735,27**	3474,94
Размер налога на выбросы	долл./т	Tax	-9739,54	39 419,76
Цена разрешения в ETS	долл./т	ETS	-8112,19**	3113,73

Источник: расчеты авторов.

Прим. Оценки параметров, значимые на уровнях 10, 5 и 1%, отмечены символами *, ** и *** соответственно.

Социально-экономическая оценка выбросов CO₂

Всё большее количество стран внедряют механизмы экологической политики, и, как показало исследование, это значимо корректирует стимулы компаний, в том числе энергетического сектора, в пользу применения более чистых источников энергии, что замедляет масштабы распространения парникового эффекта. При этом далеко не во всех странах ставки углеродного налога и сформировавшаяся цена разрешения в системах торговли выбросами сопоставимы с реальными потерями общества.

Нобелевский лауреат по экономике 2018 г. Nordhaus (2017) предложил рассматривать изменение климата как глобальную отрицательную экстерналию, возникающую вследствие выбросов CO₂. Для исправления ситуации должны вводиться налоги Пигу, увеличивающие частные затраты производителей до уровня общественных издержек, методика расчета которых также была приведена в работе. Важно отметить, что в отличие от директивных ограничительных мер экономические механизмы работают более гибко, не запрещая вредные производства, но делая их менее выгодными по сравнению с использующими более чистые технологии.

По оценкам Nordhaus, экологический ущерб от выбросов дополнительной тонны углерода в 2010 г. составлял 31 долл. Также, по оценкам Nordhaus, эту сумму, названную социальной стоимостью углерода SCC, необходимо увеличивать на 3 % в год, что означает ее рост до 101 долл. к 2050 г. В 2024 г. она составила 46,89 долл. за тонну. Сравним ее со ставками углеродного налога по странам (рис. 8).

Можно заметить, что в 2024 г. в 24 из 36 стран, использующих механизм углеродного налога, соответствующие ставки были ниже, и часто существенно ниже, чем социальная стоимость углерода. В некоторых случаях институциональная среда не позволяет вводить налоги, полностью покрывающие потери от загрязнения окружающей среды, в частности, из-за очень вероятного в этом случае уклонения от уплаты налога. В то же время символические ставки, не покрывающие и 10 % наносимого ущерба, вряд ли в состоянии полноценно повлиять на сокращение выбросов. При этом в отдельных странах, в первую

очередь в северной Европе, Швейцарии и Уругвае, ставки, значительно превышающие социальную стоимость углерода, работают на опережение. Государство здесь пытается переломить ситуацию, переориентировав энергетику на возобновляемые источники даже ценой некоторой потери эффективности.

Похожая неоднородная картина наблюдается и при использовании альтернативного механизма – системы торговли выбросами (рис. 9).

Отметим, что несмотря на относительно небольшое количество систем торговли выбросами, где цена разрешения превзошла социальную стоимость углерода, они покрывают существенную долю рынка. Действительно, в эту группу входят федеральная канадская и единая общеевропейская системы торговли выбросами, а также самостоятельные системы Швейцарии, Германии и Австрии. А если добавить сюда сопоставимые по ценам системы Великобритании, Новой Зеландии, Японии и США (Калифорния), практическая важность использования данного механизма становится еще более очевидной.

Отдельно можно отметить Китай. Да, в настоящее время уровень цен на разрешения там оказывается значительно ниже европейского (впрочем, по паритету покупательной способности это различие значительно сокращается). Однако Китай начал внедрять экономические механизмы борьбы с выбросами даже в пилотном режиме только в 2013–2016 гг., а полноценно системы торговли выбросами заработали с 2021 г. И тем не менее наблюдаемый невооруженным взглядом существенный перелом тенденции по динамике выбросов в крупнейшей, в том числе по выбросам, экономике мира (см. рис. 3) не может не давать повод для оптимизма.

В качестве некоторого развития инструментария, позволяющего анализировать последствия замещения грязных источников энергии (в первую очередь угля) чистыми, можно предложить методологию В. Д. Газмана (2022а). Она не только учитывает непосредственный вклад в экологию, связанный с сокращением эмиссии углерода, но и пытается оценить снижение вреда, нанесенного здоровью людей, а также спасенные в результате перехода на возобновляемые

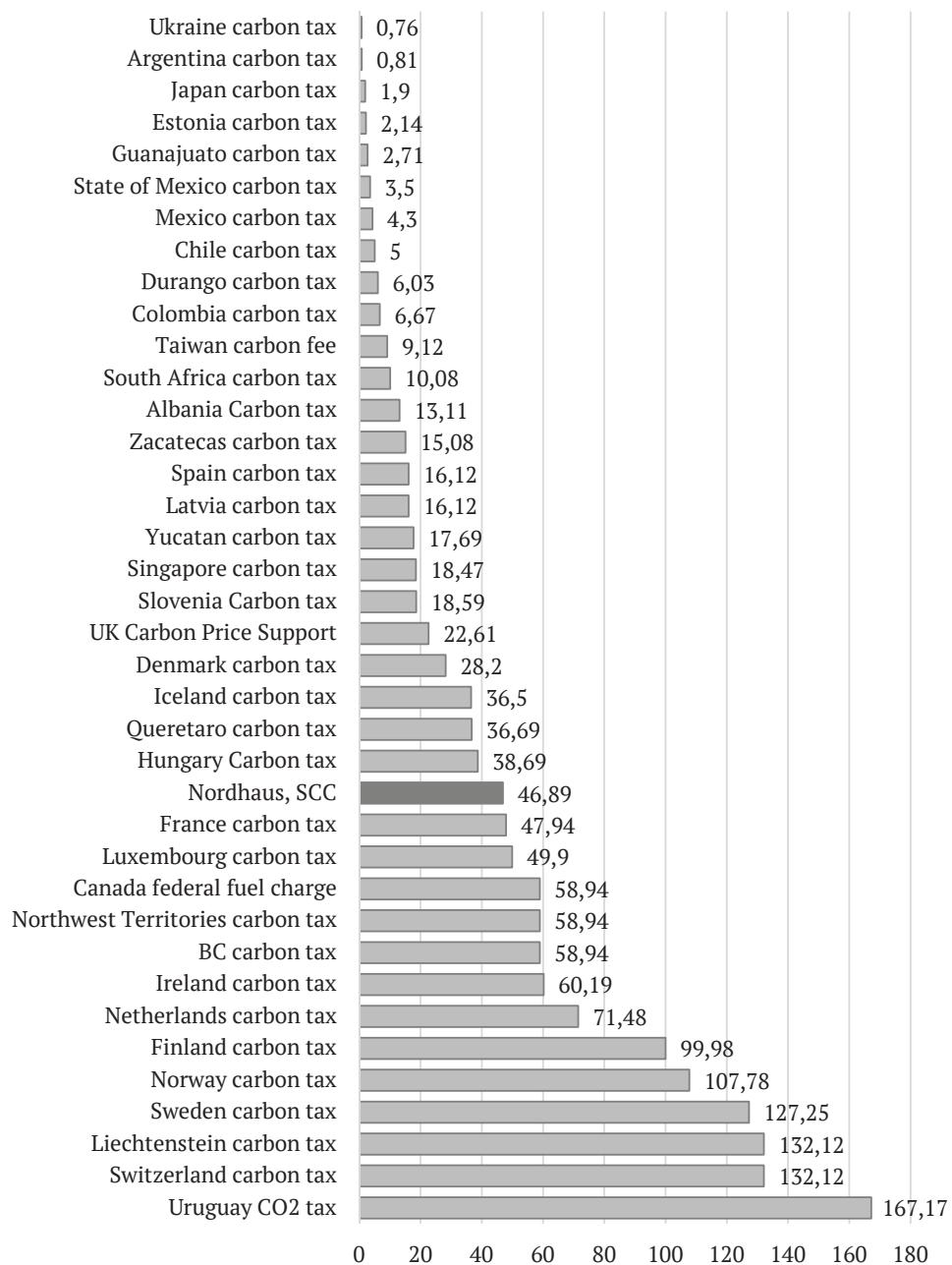


Рис. 8. Ставка углеродного налога по странам в 2024 г., долл. США, и ее сравнение с социальной стоимостью углерода SCC [построено авторами на основе данных <https://worldbank.org>]

источники энергии жизни, переводя их также в экономическую шкалу.

Проведем расчеты для 15 компаний нашей выборки, использующих уголь в качестве основного источника генерации энергии. Результаты моделирования представим в табл. 6.

Расчеты показали, как переход к возобновляемым источникам энергии влияет на здоровье населения и экономию ресурсов. В частности, мы видим, что только четыре крупнейшие энергетические компании (EDP, Orsted, Enel и RWE) своим переходом

с угля на возобновляемые источники энергии смогли спасти почти 40 тыс. жизней, а суммарный общественный эффект превысил 250 млрд долл.

Заключение

В представленной работе на основе как агрегированных данных по 180 странам за последние 30 с лишним лет, так и данных корпоративной статистики показана эффективность использования экономических механизмов в целях перехода электроэ

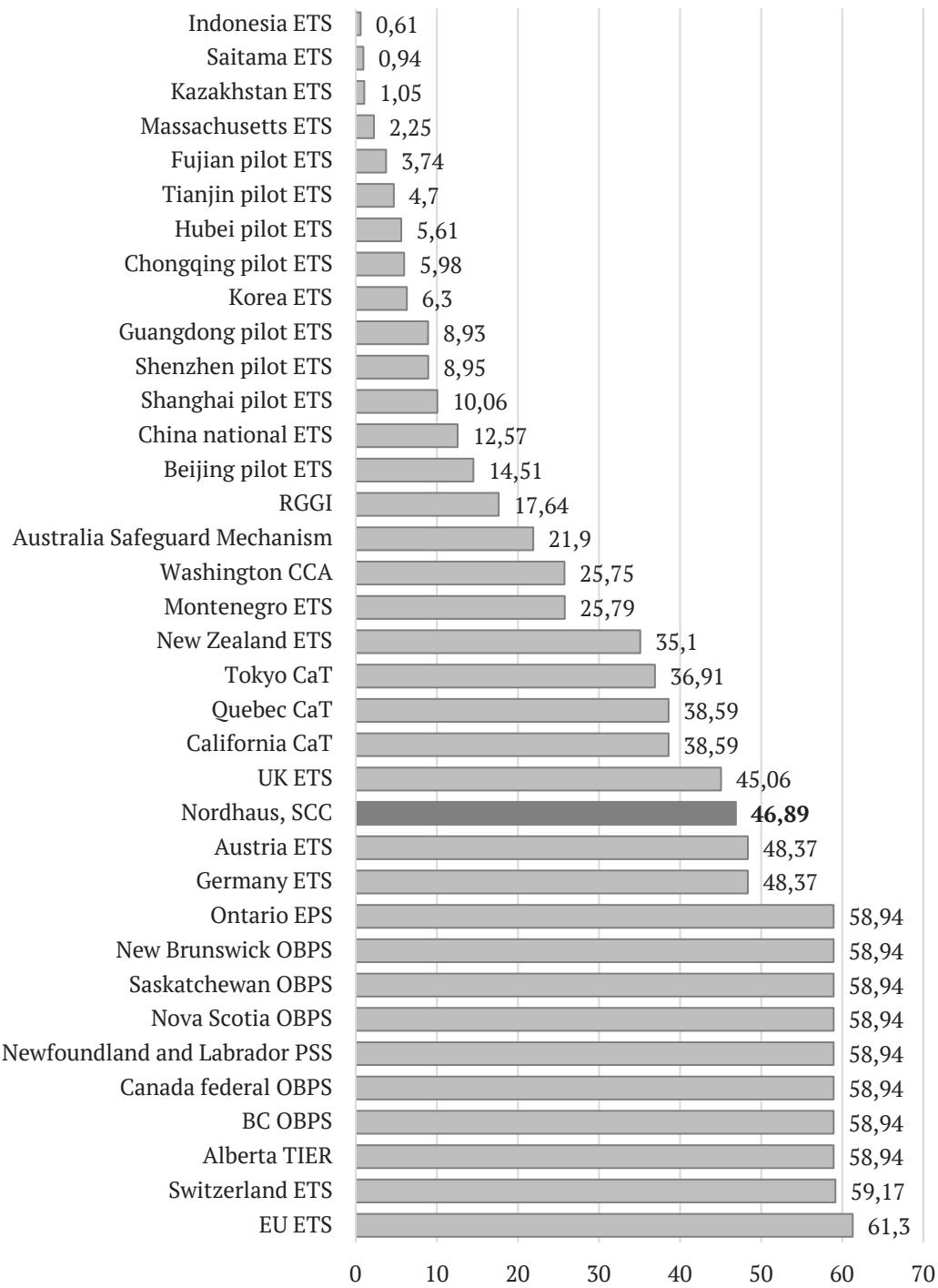


Рис. 9. Цена разрешения в ETS по странам в 2024 г., долл. США, и ее сравнение с социальной стоимостью углерода SCC [построено авторами на основе данных <https://worldbank.org>]

нергетики на возобновляемые источники и борьбы с выбросами углерода. При этом продемонстрировано, что с определенного уровня развития экономики более сложный механизм системы торговли выбросами становится более эффективным.

Конечно, нужно понимать, что декарбонизация приводит к значительному росту

затрат энергетических компаний. Описанные экономические механизмы, могут частично корректировать стимулы в пользу использования таких технологий. В то же время в современном мире всё большую значимость обретают репутационные механизмы, в рамках которых компании сами стремятся к сокращению выбросов и развитию зеле-

Таблица 6

Экономия, достигнутая за счет замещения угля
возобновляемыми источниками энергии по компаниям за 2016–2023 гг.

Компания	Сбереженные жизни, чел.	Стоимость поддержания здоровья, млрд долл.	Вклад в экологию, млрд долл.	Суммарный общественный эффект, млрд долл.
EDP Group	13 874	6,162	21,171	88,96
Orsted	9747	4,562	15,790	65,98
Enel	8556	3,829	13,757	55,88
RWE	7239	3,389	4,817	42,10
Southern Comp. Energy	3329	1,497	5,378	21,85
AES	2897	1,320	4,741	19,26
AGL Energy	2841	1,292	4,640	18,88
NextEra Energy	1736	0,764	2,746	11,15
Capital Power	1373	0,615	2,209	8,97
TXNM Energy	930	0,421	1,514	6,15
CEZ	886	0,387	1,390	5,64
Ameren EEI	768	0,361	1,298	5,27
Eletrobras	571	0,254	0,913	3,71
CMS Energy	525	0,240	0,861	3,50
Enel Chile	494	0,222	0,761	3,21

Источник: расчеты авторов по методологии В.Д. Газмана (2022а).

ных технологий для поддержания своей конкурентоспособности. На репутационных эффектах в значительной степени строится добровольный рынок углерода, даже в странах, где экономические механизмы слабы или не используются вовсю.

Часто, особенно в последние годы, в качестве ориентира используются ESG-рейтинги. Конечно, такие рейтинги зачастую являются необъективными, не всегда хорошо согласуются друг с другом (Abhayawansa & Tyagi, 2021) и могут не учитывать все зна-

чимые особенности, в том числе в контексте перехода на возобновляемую энергетику (Kotsantonis & Serafeim, 2019). В то же время именно комплексный подход, сочетающий экономические стимулы, репутационные механизмы (ориентирующиеся как раз на такие индексы) и инициативы самих компаний, позволит ускорить переход к низкоуглеродной экономике и минимизировать негативное воздействие выбросов на окружающую среду.

Авторский вклад

Авторы внесли равный вклад в работу, представленную в статье.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2023-0016.

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Funding

The study was funded by the Ministry of Science and High Education of the Russian Federation, project number FZNS-2023-0016.

Conflict of Interest

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Библиографический список

1. Безруких, П. П. (2024). Доля энергоносителей в энергетике. *Энергия: экономика, техника, экология*, 472(4), 30–35. [Bezrukikh, P. P. (2024). Share of energy carriers in the energy sector. *Energy: economics, technology, ecology*, 472(4), 30–35. (In Russian).] DOI: 10.7868/S0233361924040049
2. Бессель, В. В., Кучеров, В. Г., Лопатин, А. С., & Мингалеева, Р. Д. (2022). *Возобновляемая энергетика в системе мирового энергообеспечения. ESG-трансформация как вектор устойчивого развития*. Москва: Аспект пресс. [Bessel, V. V., Kucharov, V. G., Lopatin, A. S., & Mingaleeva, R. D. (2022). *Renewable energy in the global energy supply system. ESG transformation as a vector of sustainable development*. Moscow: Aspect Press. (In Russian).]
3. Газман, В. Д. (2022а). Потенциал возобновляемой энергетики. Москва: НИУ ВШЭ. [Gazman, V. D. (2022). *The Potential of Renewable Energy*. Moscow: HSE University. (In Russian).] DOI: 10.17323/978-5-7598-2573-9
4. Газман, В. Д. (2022б). Экономическая оценка выбросов CO₂ в экологическом разделе ESG. *Экономический журнал Высшей школы экономики*, 26(4), 579–597. [Gazman, V. D. (2022). Economic assessment of CO₂ emissions in the environmental section of ESG. *HSE Economic Journal*, 26(4), 579–597. (In Russian).] DOI: 10.17323/1813-8691-2022-26-4-579-597
5. Гоголева, Т. Н., Костылева, В. И., Канапухин, П. А., Никитина, Л. М., & Щепина, И. Н. (2024). Инструменты экологического регулирования и экономический рост. *Вестник ВГУ: Экономика и управление*, (1), 3–15. [Gogoleva, T. N., Kostyleva, V. I., Kanapukhin, P. A., Nikitina, L. M., & Shchepina, I. N. (2024). Environmental regulation tools and economic growth. *Proceeding of Voronezh State University. Series: Economics and Management*, (1), 3–15. (In Russian).] DOI: 10.17308/econ.2024.1/11831
6. Пахнин, М. А. (2020). Экономика изменения климата: Нобелевская премия 2018 г. Уильяма Нордхайса. *Финансы и бизнес*, 16(1), 5–22. [Pakhnin, M. A. (2020). The Economics of Climate Change: William Nordhaus's 2018 Nobel Prize. *Finance and Business*, 16(1), 5–22. (In Russian).] DOI: 10.31085/1814-4802-2020-16-1-5-22
7. Степанов, И. А. (2019). Налоги в энергетике и их роль в сокращении выбросов парниковых газов. *Экономический журнал Высшей школы экономики*, 23(2), 290–313. [Stepanov, I. A. (2019). Taxes in the energy sector and their role in reducing greenhouse gas emissions. *HSE Economic Journal*, 23(2), 290–313. (In Russian).] DOI: 10.17323/1813-8691-2019-23-2-290-313
8. Abhayawansa, S., & Tyagi, S. (2021). Sustainable investing: The black box of environmental, social, and governance (ESG) ratings. *The Journal of Wealth Management*, 24(1), 49–54. DOI: 10.3905/jwm.2021.1.130
9. Bressler, R. (2021). The mortality cost of carbon. *Nature Communications*, 12(4467), 1–12.
10. Ekins, P., & Barker, T. (2001). Carbon taxes and carbon emissions trading. *Journal of Economic Surveys*, 15(3), 325–376.
11. Fischer, C., & Newell, R. (2005). *Environmental and technology policies for climate change and renewable energy*. Resources for the Future. Discussion Papers, 10789. DOI: 10.22004/ag.econ.10789
12. Kotsantonis, S., & Serafeim, G. (2019). Four things no one will tell you about ESG data. *Journal of Applied Corporate Finance*, 31(2), 50–58.
13. Loftus, P., Cohen, A., Long, J., & Jenkins, J. (2015). A critical review of global decarbonization scenarios: what do they tell us about feasibility? *Climate Change*, 6(1), 93–112.
14. Lu, J., & Li, H. (2024). The impact of ESG ratings on low carbon investment: Evidence from renewable energy companies. *Renewable Energy*, 223, 119984.
15. Nordhaus, W. (2017). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7), 1518–1523.
16. Panwar, N., Kaushik, S., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513–1524.
17. Parry, I. (1998). Pollution regulation and the efficiency gains from technological innovation. *Journal of Regulatory Economics*, 14(3), 229–254.
18. Popp, D. (2006). R&D subsidies and climate policy: is there a “free lunch”? *Climatic Change*, 77(3), 311–341.
19. Popp, D., Newell, R., & Jaffe, A. (2010). Energy, the environment, and technological change. *Handbook of the Economics of Innovation*, (2), 873–937.
20. Wen, J. (2021). Does globalization matter for environmental degradation? Nexus among energy consumption, economic growth, and carbon dioxide emission. *Energy policy*, 153, 112230.

Филатов Александр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

E-mail: filatov.aiu@dvfu.ru
ORCID ID: 0000-0002-0380-5598

Кузнецова Софья Васильевна, магистрант, Высшая школа экономики, Москва, Российская Федерация

E-mail: kuznetcova.sva@dvfu.ru
ORCID ID: 0009-0006-2086-1758

Alexander Yu. Filatov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

E-mail: filatov.aiu@dvfu.ru
ORCID ID: 0000-0002-0380-5598

Sofya V. Kuznetsova, M. A., Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation

E-mail: kuznetcova.sva@dvfu.ru
ORCID ID: 0009-0006-2086-1758

Получена 25.10.2025

Получена в доработанном виде 17.11.2025

Одобрена 25.11.2025

Received 25.10.2025

Revisited 17.11.2025

Accepted 25.11.2025