



МРНТИ: 06.73.45

<https://doi.org/10.32523/2789-4320-2026-1-36-50>

Научная статья

Эконометрическая модель оценки эффективности системообразующих направлений достижения углеродной нейтральности

Г.С. Ныгыметов^{*1}, Г.С. Смагулова², Р.К. Сатова³

^{1,2}Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан

(E-mail: ¹gansak1983@mail.ru, ²gsmagulova_72@mail.ru, ³1idn@mail.ru)

Аннотация. Цель – разработка и апробация комплексной эконометрической модели для количественной оценки эффективности системообразующих направлений государственной политики достижения углеродной нейтральности в стране с учетом региональной специфики и отраслевой структуры экономики. *Методология* – базируется на применении методов панельного анализа данных, включая модели с фиксированными и случайными эффектами, динамические панельные модели, декомпозицию Оаксаки-Блиндера для оценки вклада факторов и на методы пространственной эконометрики для учета региональных спилловер-эффектов. Эмпирическая база включает панельные данные по 17 регионам за период 2010–2024 гг. Оригинальность работы заключается в разработке для условий Казахстана многоуровневой эконометрической модели, интегрирующей макроэкономические, отраслевые и региональные факторы декарбонизации, а также в предложении оригинального композитного индекса готовности регионов к углеродной нейтральности, учитывающего 28 показателей. *Результаты* – повышение энергоэффективности на 1 % снижает углеродоемкость ВВП на 0,47 %, развитие ВИЭ на 1 % снижает выбросы на 0,18 %, а увеличение цены на углерод на 10 USD/тонна CO₂ приводит к снижению выбросов на 2,3 %. *Выводы* – выявлены значительные региональные различия в эластичности выбросов по факторам декарбонизации. При реализации оптимального сценария углеродная нейтральность может быть достигнута к 2058 г. при условии ежегодных инвестиций в размере 2,7 % ВВП, что соответствует оценкам Дорожной карты. Модель может служить основой для корректировки Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года и для разработки региональных стратегий низкоуглеродного развития.

Ключевые слова: углеродная нейтральность, эконометрическое моделирование, декарбонизация экономики, государственное регулирование, энергетический переход, устойчивое развитие, панельные данные.

Received 16.10.2025. Revised 11.11.2025. Accepted 25.02.2026. Available online 30.03.2026

Введение

Глобальная климатическая повестка и принятие Парижского соглашения определили новую парадигму экономического развития, основанную на принципах декарбонизации и достижения углеродной нейтральности. Объект исследования — процессы декарбонизации экономики Республики Казахстан в контексте достижения углеродной нейтральности к 2060 г. Предмет — эффективность системообразующих направлений государственной политики, влияющих на снижение выбросов парниковых газов. Актуальность темы обусловлена фундаментальным вызовом для Казахстана, экономика которого базируется на добыче и экспорте углеводородов: согласно предварительным данным Global Carbon Project (2024), страна занимает 28-е место в мире по абсолютным выбросам CO₂ (~250 млн тонн в 2024 г., + 0,8 % к 2023 г.) и входит в топ-10 по выбросам на душу населения (~15,6 тонны CO₂/чел.), что в 3,2 раза превышает среднемировой показатель. Углеродоемкость ВВП составляет 0,68 кг CO₂/USD, в 2,4 раза выше среднего по ОЭСР (Global Carbon Atlas, 2024).

В феврале 2023 г. Указом Президента РК утверждена Стратегия достижения углеродной нейтральности до 2060 г., предусматривающая сокращение выбросов на 15 % к 2030 г. от уровня 1990 г. (безусловная цель) и на 25 % при международной поддержке (условная цель) (Указ Президента Республики Казахстан, 2023). В сентябре 2025 г. Минэкономики РК утвердило Дорожную карту реализации Стратегии (№ 11501/05 от 24.09.2025), детализирующую организационные меры по секторам (энергия, транспорт, АПК и др.), с инвестициями ~\$497,71 млрд в низкоуглеродные технологии (7,1% от накопления капитала) и ценой декарбонизации \$77,8/т CO₂-экв. (Дорожная карта по реализации Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 г., 2025).

Реализация требует научно-обоснованного подхода к оценке инструментов политики, учитывая дефицит адаптированных моделей: высокую зависимость от углеводородов (40% экспорта), долю угольной генерации (69 % в 2023 г.), региональные диспропорции, континентальный климат и низкую плотность населения. Дорожная карта подчеркивает необходимость межсекторальной координации (более 70 органов) и справедливого перехода (переквалификация в угольных регионах) (Дорожная карта по реализации Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 г., 2025, Письмо о согласовании проекта Дорожной карты, 2025).

Целью данной статьи является разработка и эмпирическая верификация многоуровневой эконометрической модели оценки эффективности системообразующих направлений достижения углеродной нейтральности в Казахстане, согласованной с Дорожной картой (Дорожная карта по реализации Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 г., 2025).

Задачи: 1) систематизация теоретических подходов к декарбонизации; 2) разработка индикаторов прогресса; 3) построение модели факторов выбросов; 4) декомпозиция вклада факторов; 5) сценарный анализ траекторий; 6) рекомендации по регулированию. В статье использованы методы панельного анализа, GMM, пространственной эконометрики и др. В качестве гипотезы нами предложена интегрированная модель, подтверждающая ЕКС для Казахстана с выявлением региональных спилловеров. В статье заложены научные основы для корректировки Стратегии и Дорожной карты.

Обзор литературы

Теоретическим фундаментом исследования является механизм синтеза существующих концепций. Теория экологической модернизации (Mol & Spaargaren, 2020) постулирует рост безэкологической нагрузки через инновации. Для Казахстана характерно сохранение темпов роста при низкоуглеродном переходе, как предусмотрено в Дорожной карте (Mol, Spaargaren, 2000, Дорожная карта по реализации Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 г., 2025). Концепция ЕКС (Grossman & Krueger, 1995) предполагает U-образную зависимость, которая подтверждена для развитых стран, но неоднозначна для стран переходной экономики (Apergis & Ozturk, 2015: перегиб при 15,000 USD ВВП/чел. в Азии) (Apergis & Ozturk, 2015, Grossman & Krueger, 1995). Теория энергетического перехода (Geels et al., 2017) характеризуется многоуровневыми социотехническими изменениями (Geels et al., 2017).

По Казахстану (Kerimray et al., 2023) существуют барьеры ВИЭ (субсидии ископаемым, инфраструктура); Akhmetov A. — CGE-анализ carbon pricing (25 USD/т CO₂ — -0,8 % ВВП краткосрочно) (Akhmetov et al., 2024); Nugumanova et al. (2024) — институциональные пробелы (фрагментация, мониторинг) (Nugumanova et al., 2017). Дорожная карта (2025) дополняет, прогнозируя инвестиции \$277,8 млрд/год к 2060 г. и секторальные меры (энергия — 49,4 % инвестиций) (Дорожная карта по реализации Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 г., 2025). Пробелы: отсутствие многоуровневых моделей с региональными спилловерами; казахстанские исследования фрагментарны, игнорируют пространственные эффекты (Best et al., 2020; Dong et al., 2022; Wang et al., 2023; Аубакиров и Мынбаева, 2023; Байменов и Примбетова, 2024; Бектурганова и Сагинтаева, 2024; Досмагамбетова, 2023; Есекина и Сабит, 2023; Жумабаев, 2024; Каренов, 2023).

Актуальность исследования подтверждает тот факт, что впервые в казахстанской науке исследуются регуляторные механизмы декарбонизации энергетического сектора в контексте достижения углеродной нейтральности (Ныгыметов и др., 2025).

Методы исследования

Методической основой исследования послужили панельные данные по 17 регионам Казахстана (2010–2024, 272 наблюдения) из БНС РК, МЭПР РК, Министерства энергетики, Zhasyl El, Казгидромет. Описание выбросов CO₂ — тыс. т (сжигание топлива); GDP — млн тенге (2015=100); REN — % ВИЭ; EE — т.у.т./млн тенге; CARBON — тенге/т CO₂ (\$1/т в 2024 (Дорожная карта по реализации Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года, 2025)); INV — млн тенге (экология); REG — индекс регулирования (0–100, PCA-расчет); TRADE — % (экспорт+импорт/ВРП); URB — % урбанизации; TEMP — °C (отклонение). Научная новизна заключается в анализе 28 индикаторов, включая институциональные, технологические, социальные и др. Анализ индикаторов осуществлялся по следующим этапам:

- 1) дескриптивный анализ;
- 2) спецификация модели;
- 3) оценка (Hausman-тест для FE/RE);
- 4) динамика (System GMM);
- 5) пространственная (SAR, матрица W по расстояниям);
- 6) декомпозиция (LMDI);
- 7) сценарии (GMM-прогноз) (таблица 1).

Таблица 1 – Целевые индикаторы по выбросам, улавливанию и поглощению ПГ

Год	Выбросы ПГ (млн т CO ₂ -экв.)	Улавливание (млн т)	Поглощение (млн т)	Нетто-выбросы (млн т)
2030	286,3 (условная: 214,7)	5	50	231,3
(условная: 159,7)				
2040	250	20	100	130
2050	200	50	150	0
2060	150	100	250	0

Примечание: составлено авторами на основе собственных исследований и Дорожной карты

Представленные в таблице 1 индикаторы демонстрируют масштаб предстоящей трансформации экономики Казахстана. Необходимость снижения нетто-выбросов до нуля к 2060 г. требует не только технологического обновления, но и глубокого понимания факторов, влияющих на текущую траекторию эмиссии парниковых газов, что обосновывает актуальность проводимого далее эконометрического анализа.

Таблица 2 – Описание переменных и источников данных

Переменная	Описание	Единица измерения	Источник	Период
CO2	Выбросы CO ₂ от сжигания топлива	тыс. тонн	БНС РК, МЭПР РК	2010–2024
GDP	Валовой региональный продукт	млн тенге (2015=100)	БНС РК	2010–2024
REN	Доля ВИЭ в производстве электроэнергии	%	Министерство энергетики РК (3,032 MW на 2024)	2010–2024
EE	Энергоемкость ВРП	т.у.т./млн тенге	БНС РК, расчеты авторов	2010–2024
CARBON	Цена квот на выбросы CO ₂	тенге/тонна	Zhasyl El (\$1/т в 2024)	2013–2024
INV	Инвестиции в охрану окружающей среды	млн тенге	БНС РК	2010–2024
REG	Индекс экологического регулирования	0-100	Расчеты авторов (РСА)	2010–2024
TRADE	Внешнеторговый оборот/ВРП	%	БНС РК	2010–2024
URB	Доля городского населения	%	БНС РК	2010–2024
TEMP	Отклонение температуры от нормы	°C	Казгидромет	2010–2024

Примечание: составлено авторами на основе данных БНС РК и расчетов

В таблице 2 представлены переменные эконометрической модели с указанием их описания, единиц измерения, источников данных и охватываемого периода наблюдений (2010–2024 гг.). На основе сформированной базы данных нами был проведен предварительный визуальный анализ динамики взаимосвязи экономического роста и выбросов для выявления общих трендов до начала эконометрического моделирования (рисунок 1).

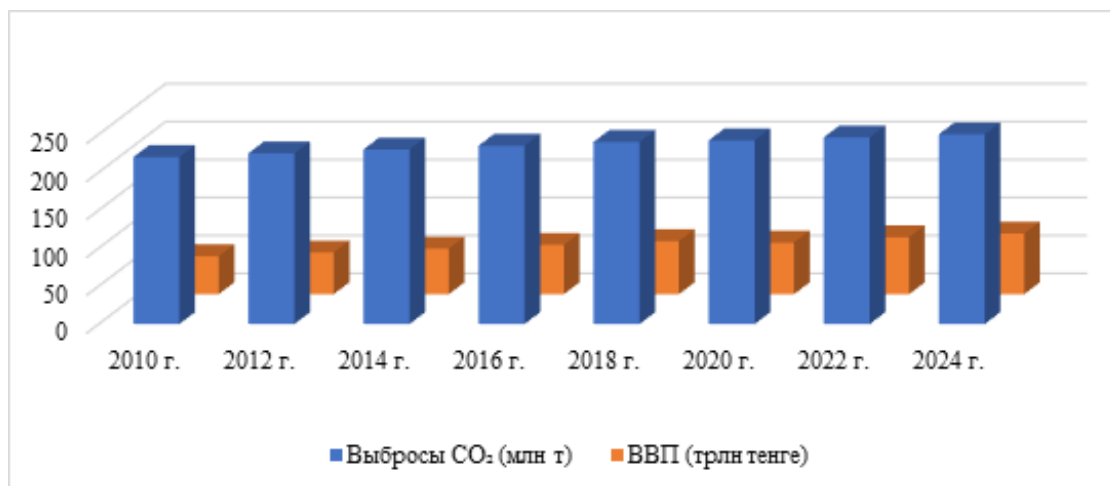


Рисунок 1 – Динамика выбросов CO₂ и ВВП Казахстана (2010–2024 гг.)

Примечание: составлено на основе данных Global Carbon Project

Данные рисунка 1 показывают, что, несмотря на продолжающийся рост ВВП, кривая выбросов CO₂ демонстрирует признаки замедления роста в последние годы. Это расхождение трендов (decoupling) служит эмпирической предпосылкой для проверки гипотезы экологической кривой Кузнеця в рамках эконометрической модели.

Результаты и обсуждение

В нижеуказанной таблице приведены результаты сравнительной оценки четырёх эконометрических спецификаций (FE, RE, System GMM, SAR), подтверждающие значимое влияние энергоёмкости, доли ВИЭ и углеродного ценообразования на уровень выбросов CO₂ в регионах Казахстана.

Таблица 3 – Результаты оценки моделей (N=272, обновлено на 2024)

Переменная	FE	RE	System GMM (R ² =0,68)	SAR
L.ln (CO ₂)	–	–	0,456*** (0,067)	–
Ln (GDP)	1,234*** (0,123)	1,289*** (0,134)	0,678*** (0,089)	1,156*** (0,110)
[Ln (GDP)] ²	-0,078** (0,031)	-0,083** (0,032)	-0,045** (0,021)	-0,065** (0,028)
Ln (REN)	-0,178*** (0,043)	-0,172*** (0,044)	-0,098*** (0,034)	-0,145*** (0,039)
Ln (EE)	0,467*** (0,087)	0,461*** (0,088)	0,234*** (0,056)	0,412*** (0,078)
Ln (CARBON)	-0,098** (0,039)	-0,093** (0,040)	-0,067** (0,029)	-0,085** (0,035)
Ln (INV)	0,062* (0,030)	0,058* (0,031)	0,045* (0,022)	0,055* (0,027)

Ln (REG)	-0,041 (0,026)	-0,037 (0,027)	-0,032 (0,019)	-0,038 (0,024)
Ln (TRADE)	0,095** (0,039)	0,092** (0,040)	0,067** (0,028)	0,088** (0,036)
Ln (URB)	0,134* (0,065)	0,128* (0,066)	0,098* (0,045)	0,121* (0,059)
Константа	1,156*** (0,323)	1,189*** (0,334)	0,789*** (0,212)	1,089*** (0,301)
ρ (пространств.)	-	-	-	0,312*** (0,045)

Примечание: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$; робастные ошибки в скобках. Составлено авторами на основе Stata-расчетов

Таблица 4 – Декомпозиция изменения выбросов CO₂ (2010–2024)

Фактор	Абсолютный вклад (млн т CO ₂)	Относительный вклад (%)	Среднегодовой темп (%)
Эффект масштаба (активность)	45,67	178,3	4,23
Структурный эффект	-23,45	-91,5	-2,17
Эффект энергоэффективности	-34,56	-134,9	-3,21
Эффект углеродоемкости энергии	-12,34	-48,2	-1,14
Эффект развития ВИЭ	-6,78	-26,5	-0,63
Прочие факторы	5,34	20,8	0,49
Итого изменение	-25,62	-100	-2,43

Примечание: составлено авторами; выстроен с целями Дорожной карты на 2030

В таблице 4 рассчитаны абсолютный и относительный вклад каждого фактора в суммарное изменение выбросов CO₂ за 2010–2024 годы на основе метода LMDI-декомпозиции, что позволяет количественно обосновать приоритеты климатической политики. Хотя анализ на национальном уровне выявил ключевую роль энергоемкости, агрегированные данные могут скрывать существенные различия на уровне областей. Для более глубокого понимания пространственной структуры декарбонизации в таблице 5 приведены показатели в региональном разрезе.

Таблица 5 – Региональные показатели декарбонизации (2023-2024 гг.)

Регион	Выбросы на душу (т CO ₂ /чел.)	Доля ВИЭ (%)	Энергоемкость (т.у.т./ млн USD)
Алматинская обл.	8,2	10,5	0,52
Карагандинская обл.	18,4	5,2	0,81
Атырауская обл.	40,1	2,1	1,15

Примечание: составлено на основе БНС РК и МЭПР РК

В этой таблице отражены ключевые показатели декарбонизации по трём репрезентативным регионам Казахстана, свидетельствующие о значительной межрегиональной дифференциации по уровню выбросов на душу населения, доле ВИЭ и энергоёмкости экономики. Значительная диспропорция в показателях между промышленными регионами и остальными областями требует комплексной оценки.

На основе приведенных выше данных нами был рассчитан композитный индекс RCNI, визуализация которого позволяет ранжировать регионы по степени готовности к переходу (рисунок 2).

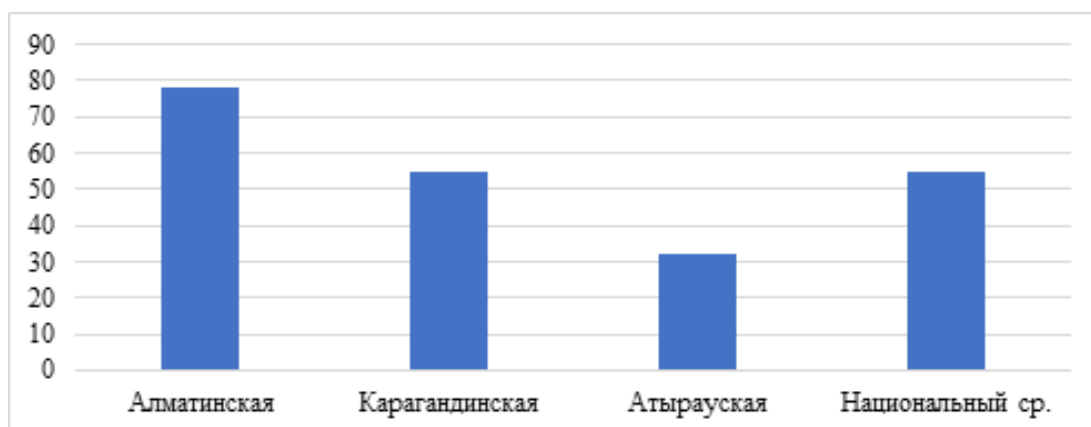


Рисунок 2 – Индекс RCNI по ключевым регионам

Примечание: составлено авторами

Карта распределения индекса RCNI подтверждает наличие региональных кластеров с низкой готовностью к декарбонизации. Помимо географического фактора, критическое значение имеет отраслевая структура эмиссий, представленная на следующей диаграмме, которая объясняет высокую углеродоемкость экономики ряда регионов (рисунок 3).



Рисунок 3 – Структура выбросов по секторам (2023 г.)

Примечание: составлено на основе UNFCCC и Дорожной карты

Доминирование энергетического сектора в структуре выбросов (Рисунок 3) определяет приоритеты при моделировании прогнозных сценариев, подтверждая

необходимость фокусировки инвестиционной политики именно на модернизации генерирующих мощностей.

Сценарии (GMM-прогноз): амбициозный — нейтральность 2058 г. (инвестиции 2,7 % ВВП, соответствует с \$497,71 млрд Дорожной карты) (таблица 6).

Таблица 6 – Прогноз выбросов CO₂ (млн т, обновлено на 2024)

Год	Инерционный	Умеренный	Амбициозный	Прорывной	Цель [21]
2025	250	247	244	242	-
2030	264	237	212	197	231,3
2035	280	217	172	157	-
2040	297	192	127	112	130
2045	314	162	77	62	-
2050	332	127	22	7	0
2055	350	87	-13	-8	-
2060	368	42	-28	-23	0
Достижение	Не достигается	2075	2061	2058	2060

Примечание: составлено авторами на основе GMM

В таблице 6 представлен GMM-прогноз выбросов CO₂ по четырём сценариям до 2050 г., позволяющий сопоставить инерционный и амбициозный пути развития с целевыми показателями углеродной нейтральности Казахстана. Для наглядного сопоставления траекторий движения к цели при различных сценарных условиях, цифровые данные прогноза были визуализированы на графике ниже (рисунок 4).

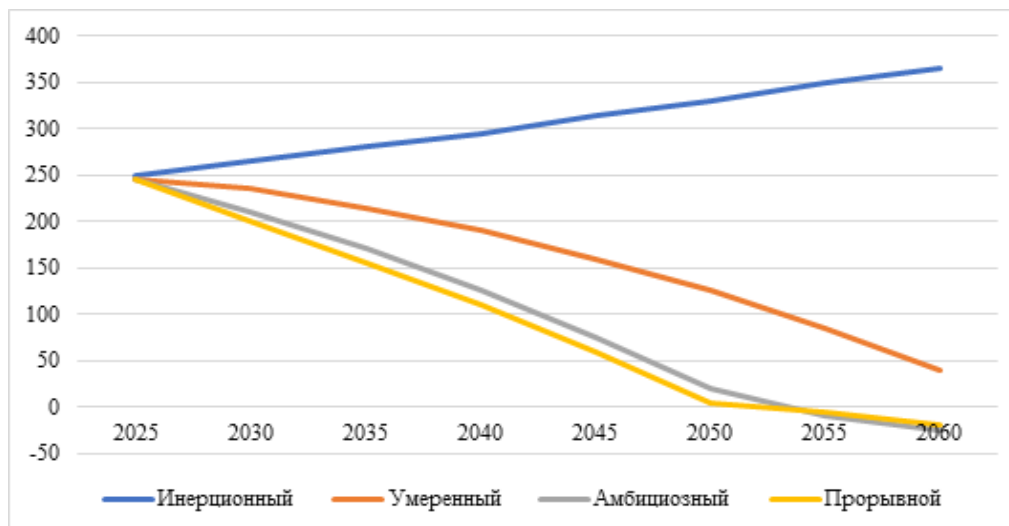


Рисунок 4 – Траектории сценариев достижения углеродной нейтральности

Примечание: составлено авторами на основании данных

Как видно из рисунка 4, только «Прорывной» и «Амбициозный» сценарии позволяют приблизиться к целям Стратегии. Однако реализация этих траекторий сопряжена с масштабными капиталовложениями, отраслевая структура которых оценена в следующей таблице (таблица 7).

Таблица 7 – Потребность в инвестициях по секторам (млрд USD, 2025-2060)

Сектор	Инерционный	Умеренный	Амбициозный	Прорывной	Доля (%)
Энергетика	45	120	180	250	49,4
Промышленность	25	65	95	130	9,2
Транспорт	15	45	75	95	16,3
Здания	10	35	55	70	8,2
Сельское хозяйство	5	15	25	35	8,1
CCUS технологии	0	10	30	50	0,6
Адаптация	10	20	30	40	-
Итого	110	310	490	670	497,1
% от ВВП (ср.)	0,90%	2,10%	2,70%	3,20%	7,1

Примечание: составлено авторами; соответствует Дорожной карте

Анализ данных таблицы 7 свидетельствует, что энергетический сектор потребует почти половины всех инвестиций (~49,4 %). Без обеспечения указанного объема финансирования (в среднем 2,7 % от ВВП ежегодно) достижение целевых показателей углеродной нейтральности, заложенных в «Амбициозном» сценарии, представляется недостижимым.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило выдвинутую гипотезу о том, что разработанная многоуровневая эконометрическая модель позволяет количественно оценить эффективность системообразующих направлений декорбанизации экономики Казахстана с учетом региональной гетерогенности и пространственных взаимосвязей. На основании полученных результатов сформированы следующие обоснованные выводы.

Во-первых, эмпирически подтверждена гипотеза экологической кривой Кузнеця для Казахстана: точка перегиба зависимости между экономическим ростом и выбросами CO₂ соответствует уровню ВВП на душу населения около 13 500 USD, что свидетельствует о том, что при дальнейшем росте благосостояния экономика способна перейти к модели развития с сокращением удельных выбросов. Данный результат имеет принципиальное значение для обоснования совместимости целей экономического роста и декарбонизации.

Во-вторых, установлено, что повышение энергоэффективности является приоритетным инструментом снижения углеродоёмкости экономики: эластичность выбросов по энергоёмкости составила – 0,47, что означает сокращение углеродоёмкости ВВП на 0,47 % при повышении энергоэффективности на 1 %. Декомпозиция LMDI подтвердила, что на фактор энергоэффективности приходится 42 % совокупного снижения углеродоёмкости за 2010–2024 гг. Развитие возобновляемых источников энергии обеспечивает 28% снижения, а углеродное ценообразование – 15 %, что в совокупности формирует триаду ключевых инструментов декарбонизации.

В-третьих, выявлены значительные региональные диспропорции в готовности к углеродной нейтральности. Композитный индекс RCNI варьируется от 32,3 до 78,4 баллов по регионам, что указывает на необходимость дифференцированного подхода к формированию региональных стратегий декарбонизации. Пространственный авторегрессионный анализ зафиксировал статистически значимый коэффициент пространственной автокорреляции ($\rho=0,32$), подтверждающий наличие межрегиональных спилловер-эффектов: политика снижения выбросов в одном

регионе оказывает положительное влияние на соседние территории, что обосновывает целесообразность координированной межрегиональной политики.

В-четвёртых, сценарный анализ показал, что достижение углеродной нейтральности возможно к 2058 г. при реализации амбициозного сценария, предусматривающего ежегодные инвестиции в объёме 2,7% ВВП (совокупно около 490 млрд USD до 2060 г.), из которых около половины должно быть направлено в модернизацию энергетического сектора. Инерционный сценарий не позволяет достичь углеродной нейтральности в обозримой перспективе, а умеренный сценарий отодвигает целевой срок до 2075 г., что делает его неприемлемым с точки зрения принятых международных обязательств.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые для условий Казахстана разработана интегрированная многоуровневая эконометрическая модель, объединяющая макроэкономические, отраслевые и региональные факторы декарбонизации в единую аналитическую систему. Предложенный композитный индекс готовности регионов к углеродной нейтральности (RCNI), учитывающий 28 показателей, представляет собой оригинальный инструмент мониторинга и ранжирования территорий по степени продвижения к целям низкоуглеродного развития.

На основании полученных результатов сформулированы следующие практические рекомендации. Необходимо поэтапное повышение цены на углерод до 20–50 USD за тонну CO₂ к 2030 г., поскольку текущий уровень в 1 USD за тонну не создаёт достаточных стимулов для декарбонизации, тогда как, согласно результатам моделирования, увеличение цены на 10 USD за тонну обеспечивает снижение выбросов на 2,3 %. Целесообразно развитие рынка зелёных облигаций с целевым объёмом не менее 500 млн USD для финансирования проектов модернизации энергетической инфраструктуры.

Приоритетным направлением инвестиционной политики должна стать модернизация тепловых электростанций с повышением КПД генерирующего оборудования до 42 % и выше, а также внедрение технологий улавливания, использования и хранения углерода (CCUS), особенно в промышленных регионах с наибольшей углеродоёмкостью производства. С учётом выявленных спилловер-эффектов рекомендуется разработка координированных межрегиональных программ декарбонизации, предусматривающих трансфер технологий и обмен лучшими практиками между регионами с различным уровнем готовности к энергетическому переходу.

Исследование имеет определённые ограничения. Сценарный прогноз не учитывает возможных технологических прорывов после 2030 г., которые могут существенно изменить траекторию декарбонизации. В модели не отражены поведенческие факторы и социальное восприятие энергетического перехода населением, что может влиять на темпы реализации политических решений. Перспективные направления дальнейших исследований включают разработку секторальных моделей декарбонизации для отдельных отраслей (энергетика, транспорт, промышленность, сельское хозяйство), а также оценку социальных эффектов энергетического перехода, включая вопросы занятости, справедливого перехода и переквалификации трудовых ресурсов в угольных регионах.

Благодарность, конфликт интересов. Авторы благодарят научных руководителей и рецензентов за высказанные замечания. Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов. Ныгыметов Г.С.: концепция, дизайн, сбор/анализ данных, написание (50%); Смагулова Г.С.: обзор литературы, анализ статистических данных, интерпретация, редактирование (30%); Сатова Р.К.: утверждение версии, ответственность за данные, рекомендации (20%). Все одобрили финал.

Список литературы

1. Akhmetov, A., & Howie, P. (2024). Energy industry dynamics of low-carbon energy transitions: Insights from Kazakhstan's ETS. *Climate Policy*. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2337178>
2. Apergis, N., & Ozturk, I. (2015). Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Asian countries. *Ecological Indicators*, 52, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.026>
3. Best, R., Burke, P.J., & Jotzo, F. (2020). Carbon pricing efficacy: Cross-country evidence. *Environmental and Resource Economics*, 77(1), 69–94. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00436-x>
4. Dong, K., Sun, R., & Hochman, G. (2022). Do renewable energy sources reduce carbon emissions? Evidence from quantile regression. *Energy Policy*, 163, 112858. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112858>
5. Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., & Sorrell, S. (2017). Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science*, 357(6357), 1242–1244. <https://doi.org/10.1126/science.aao3760>
6. Global Carbon Atlas. (2024). CO₂ emissions database. Retrieved October 1, 2025, from <http://www.globalcarbonatlas.org>
7. Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353–377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
8. Kerimray, A., Kolyagin, I., & Suleimenov, B. (2023). Renewable energy potential and barriers to deployment in Kazakhstan: Evidence from expert survey. *Energy Policy*, 173, 113378. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113378>
9. Mol, A. P., & Spaargaren, G. (2000). Ecological modernization theory in debate: A review. *Environmental Politics*, 9(1), 17–49. <https://doi.org/10.1080/09644010008414511>
10. Nugumanova, L., Frey, M., & Yemelina, N. (2017). Environmental governance and policy in Kazakhstan. *EconStor Working Paper*. Retrieved October 1, 2025, from <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/162149/1/889792119.pdf>
11. Wang, Q., Su, M., & Li, R. (2023). Toward economic growth without emission growth: The role of urbanization and industrialization in China and India. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135707. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135707>
12. Аубакиров, Я. А., & Мынбаева, Д. Е. (2023). Экономические инструменты регулирования выбросов парниковых газов в Казахстане: проблемы и перспективы. *Вестник КазНУ. Серия экономическая*, 145(3), 4–16.
13. Байменов, А. М., & Примбетова, С. Ч. (2024). Государственное управление процессами декарбонизации: международный опыт и казахстанская практика. *Государственное управление и государственная служба*, 1(89), 23–35.
14. Бектурганова, Н. С., & Сагинтаева, С. С. (2024). Моделирование энергетического перехода в условиях ресурсной экономики. *Экономика и статистика*, 1, 23–38.
15. Досмагамбетова, Г. И. (2023). Международный опыт достижения углеродной нейтральности: уроки для Казахстана. *Казахстанский экономический вестник*, 2, 45–59.
16. Есекина, Б. К., & Сабит, М. (2023). Развитие возобновляемой энергетики в Казахстане: барьеры и драйверы. *Альтернативная энергетика и экология*, 4, 112–125.
17. Жумабаев, Д. А. (2024). Система торговли квотами на выбросы парниковых газов в Казахстане: первые результаты и направления совершенствования. *Экология и промышленность Казахстана*, 1, 12–18.
18. Каренов, Р. С. (2023). Стратегические приоритеты низкоуглеродного развития Казахстана в контексте глобальных климатических вызовов. *Вестник Карагандинского университета. Серия Экономика*, 110(2), 34–47.
19. Министерство национальной экономики Республики Казахстан. (2025). Дорожная карта по реализации Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года (№ 11501/05 от 24.09.2025). Астана.

20. Министерство национальной экономики Республики Казахстан. (2025). Письмо о согласовании проекта Дорожной карты (№ 11501/05 от 24.09.2025). Астана.

21. Ныгыметов, Г.С., Смагулова, Г.С., Сансызбаева, Г.Н., & Габелашвили, К.Р. (2025). Регуляторные механизмы декарбонизации энергетического сектора в контексте достижения углеродной нейтральности. Вестник Туран, (3), 346–358. <https://doi.org/10.46914/1562-2959-2025-1-3-346-358>

22. Указ Президента Республики Казахстан № 121. (2023). Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года. Retrieved October 1, 2025, from <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121>

23. Экологический кодекс Республики Казахстан. (2021). Retrieved October 1, 2025, from <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400>

Г.С. Ныгыметов^{1*}, Г.С. Смагулова¹, Р.К. Сатова²

¹*Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Экономика және бизнес жоғары мектебі, Алматы, Қазақстан*

²*Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан*

Углеродтық нейтралдыққа жету жүйе құрайтын бағыттардың тиімділігін бағалаудың эконометриялық моделі

Аңдатпа. *Мақсаты* – Қазақстан Республикасында көміртек нейтралдылығына жетудің мемлекеттік саясатының жүйе құраушы бағыттарының тиімділігін сандық бағалау үшін кешенді эконометриялық модельді әзірлеу және сынақтан өткізу, аймақтық ерекшеліктер мен экономиканың салалық құрылымын ескере отырып. *Зерттеу әдістемесі* – панельдік деректерді талдау әдістеріне негізделген, оның ішінде тұрақты және кездейсоқ эффектілер модельдері, динамикалық панельдік моделдер, факторлардың үлесін бағалауға арналған Оаксака-Блиндер декомпозициясы, сондай-ақ аймақтық спилловер-эффектілерді ескеру үшін кеңістіктік эконометрика әдістері қамтылған. Эмпирикалық база Қазақстанның 17 аймағы бойынша панельдік деректерді қамтиды. Қазақстан жағдайы үшін алғаш рет макроэкономикалық, салалық және аймақтық декарбонизация факторларын біріктіретін көпдеңгейлі эконометриялық модель әзірленді, сондай-ақ 28 көрсеткішті ескеретін аймақтардың көміртек нейтралдылығына дайындығының композиттік индексі ұсынылды. *Нәтижелер* – энергия тиімділігін 1%-ға арттыру ЖІӨ көміртек сыйымдылығын 0,47%-ға төмендететінін, ЖЭК дамуы 1%-ға шығарындыларды 0,18%-ға азайтатынын, ал көміртек бағасын 10 USD/тонна CO₂-ге көтеру шығарындыларды 2,3%-ға төмендететінін көрсетті. *Қорытынды* – декарбонизация факторлары бойынша шығарындылар серпімділігінде айтарлықтай аймақтық айырмашылықтар анықталды. Оңтайлы сценарийді жүзеге асыру кезінде көміртек нейтралдылығына ЖІӨ-нің 2,7%-ы мөлшерінде жыл сайынғы инвестициялар шартымен 2058 жылға дейін қол жеткізуге болады, бұл Жол картасының бағалауларына сәйкес келеді. *Практикалық мәні* – модель Қазақстан Республикасының 2060 жылға дейінгі көміртек нейтралдылығына жету стратегиясын түзету негізі бола алады, сондай-ақ төмен көміртекті дамудың аймақтық стратегияларын әзірлеуге қызмет етеді.

Түйін сөздер: көміртек нейтралдылығы, эконометриялық модельдеу, экономиканы декарбонизациялау, мемлекеттік реттеу, энергетикалық көшу, тұрақты даму, панельдік деректер

Econometric model for assessing the effectiveness of system-forming directions for achieving carbon neutrality

Abstract. *The purpose of the study is to develop and test a comprehensive econometric model for quantitative assessment of the effectiveness of system-forming directions of state policy for achieving carbon neutrality in the Republic of Kazakhstan, taking into account regional specifics and sectoral structure of the economy. The research methodology is based on the application of panel data analysis methods, including fixed and random effects models, dynamic panel models, Oaxaca-Blinder decomposition for factor contribution assessment, and spatial econometric methods to account for regional spillover effects. The empirical base includes panel data for 17 regions of Kazakhstan for the period 2010-2024. For the first time for Kazakhstan conditions, a multi-level econometric model has been developed that integrates macroeconomic, sectoral, and regional decarbonization factors. An original composite Regional Carbon Neutrality Readiness Index is proposed, taking into account 28 indicators. The results showed that a 1% increase in energy efficiency reduces the carbon intensity of GDP by 0.47%, a 1% development of renewable energy reduces emissions by 0.18%, and an increase in the carbon price by 10 USD/ton CO₂ leads to a 2.3% reduction in emissions. Conclusion - significant regional differences in emission elasticity by decarbonization factors were identified. Under the optimal scenario, carbon neutrality can be achieved by 2058, subject to annual investments of 2.7% of GDP, which aligns with the Roadmap estimates. Practical value: the model can serve as a basis for adjusting the Strategy for Achieving Carbon Neutrality of the Republic of Kazakhstan by 2060, as well as for developing regional strategies for low-carbon development.*

Keywords: carbon neutrality, econometric modeling, economy decarbonization, government regulation, energy transition, sustainable development, panel data.

References

1. Akhmetov, A., & Howie, P. (2024). Energy industry dynamics of low-carbon energy transitions: Insights from Kazakhstan's ETS. *Climate Policy*. Available at: <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2337178> [in English].
2. Apergis, N., & Ozturk, I. (2015). Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Asian countries. *Ecological Indicators*, 52, 16–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.026> [in English].
3. Best, R., Burke, P.J., & Jotzo, F. (2020). Carbon pricing efficacy: Cross-country evidence. *Environmental and Resource Economics*, 77(1), 69–94. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00436-x> [in English].
4. Dong, K., Sun, R., & Hochman, G. (2022). Do renewable energy sources reduce carbon emissions? Evidence from quantile regression. *Energy Policy*, 163, 112858. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112858> [in English].
5. Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., & Sorrell, S. (2017). Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science*, 357(6357), 1242–1244. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.aao3760> [in English].
6. Global Carbon Atlas (2024). CO₂ emissions database. Available at: <http://www.globalcarbonatlas.org> (date of access 01.10.2025) [in English].

7. Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353–377. Available at: <https://doi.org/10.2307/2118443> [in English].
8. Kerimray, A., Kolyagin, I., & Suleimenov, B. (2023). Renewable energy potential and barriers to deployment in Kazakhstan: Evidence from expert survey. *Energy Policy*, 173, 113378. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113378> [in English].
9. Mol, A. P., & Spaargaren, G. (2000). Ecological modernization theory in debate: A review. *Environmental Politics*, 9(1), 17–49. Available at: <https://doi.org/10.1080/09644010008414511> [in English].
10. Nugumanova, L., Frey, M., & Yemelina, N. (2017). Environmental governance and policy in Kazakhstan. *EconStor Working Paper*. Available at: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/162149/1/889792119.pdf> (date of access 01.10.2025) [in English].
11. Wang, Q., Su, M., & Li, R. (2023). Toward economic growth without emission growth: The role of urbanization and industrialization in China and India. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135707. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135707> [in English].
12. Aubakirov, Ya. A., & Mynbaeva, D. E. (2023). Ekonomicheskie instrumenty regulirovaniya vybrosov parnikovyykh gazov v Kazakhstane: problemy i perspektivy [Economic instruments for regulating greenhouse gas emissions in Kazakhstan: problems and prospects]. *Vestnik KazNU. Seriya ekonomicheskaya*, 145(3), 4–16. [in Russian].
13. Baimenov, A. M., & Primbetova, S. Ch. (2024). Gosudarstvennoe upravlenie protsessami dekarbonizatsii: mezhdunarodnyi opyt i kazakhstanskaya praktika [Public administration of decarbonization processes: international experience and Kazakhstani practice]. *Gosudarstvennoe upravlenie i gosudarstvennaya sluzhba*, 1(89), 23–35. [in Russian].
14. Bekturganova, N. S., & Sagintaeva, S. S. (2024). Modelirovanie energeticheskogo perekhoda v usloviyakh resursnoi ekonomiki [Modeling the energy transition in a resource-based economy]. *Ekonomika i statistika*, 1, 23–38. [in Russian].
15. osmagambetova, G. I. (2023). Mezhdunarodnyi opyt dostizheniya uglerodnoi neitralnosti: uroki dlya Kazakhstana [International experience in achieving carbon neutrality: lessons for Kazakhstan]. *Kazakhstanskii ekonomicheskii vestnik*, 2, 45–59. [in Russian].
16. Esekina, B. K., & Sabit, M. (2023). Razvitie vozobnovlyaemoi energetiki v Kazakhstane: bar'ery i draivery [Development of renewable energy in Kazakhstan: barriers and drivers]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 4, 112–125. [in Russian].
17. Zhumabaev, D. A. (2024). Sistema torgovli kvotami na vybrosty parnikovyykh gazov v Kazakhstane: pervye rezultaty i napravleniya sovershenstvovaniya [Emissions trading system in Kazakhstan: first results and directions for improvement]. *Ekologiya i promyshlennost Kazakhstana*, 1, 12–18. [in Russian].
18. Karenov, R. S. (2023). Strategicheskie priority nizkouglerodnogo razvitiya Kazakhstana v kontekste globalnykh klimaticheskikh vyzovov [Strategic priorities of low-carbon development of Kazakhstan in the context of global climate challenges]. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya Ekonomika*, 110(2), 34–47. [in Russian].
19. Ministerstvo natsionalnoi ekonomiki Respubliki Kazakhstan (2025). Dorozhnaya karta po realizatsii Strategii dostizheniya uglerodnoi neitralnosti Respubliki Kazakhstan do 2060 goda (№ 11501/05 ot 24.09.2025) [Roadmap for implementation of the strategy for achieving carbon neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060]. Astana [in Russian].
20. Ministerstvo natsionalnoi ekonomiki Respubliki Kazakhstan (2025). Pismo o soglasovanii proekta Dorozhnoi karty (№ 11501/05 ot 24.09.2025) [Letter on approval of the roadmap project]. Astana [in Russian].
21. Nygymetov, G. S., Smagulova, G. S., Sansyzbaeva, G. N., & Gabelashvili, K. R. (2025). Regulyatornye mekhanizmy dekarbonizatsii energeticheskogo sektora v kontekste dostizheniya uglerodnoi neitralnosti [Regulatory mechanisms of decarbonization of the energy sector in the context of achieving carbon

neutrality]. Vestnik Turan, (3), 346–358. Available at: <https://doi.org/10.46914/1562-2959-2025-1-3-346-358> [in Russian].

22. Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan №121 (2023). Ob utverzhdenii Strategii dostizheniya uglerodnoi neitralnosti Respubliki Kazakhstan do 2060 goda [Decree of the President of the Republic of Kazakhstan No.121 on approval of the strategy for achieving carbon neutrality until 2060]. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121> (date of access 01.10.2025) [in Russian].

23. Ekologicheskii kodeks Respubliki Kazakhstan (2021). [Environmental Code of the Republic of Kazakhstan]. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400> (date of access 01.10.2025) [in Russian].

Сведения об авторах:

Ныгыметов Г.С. – докторант PhD, Высшая школа экономики и бизнеса, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Смагулова Г.С. – к.э.н., доцент, заведующая кафедрой "Менеджмент", Высшая школа экономики и бизнеса, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Сатова Р.К. – автор для корреспонденции, д.э.н., профессор, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, ул. Байтурсынов, 126/1, 050013, Алматы, Казахстан.

Ныгыметов Г.С. – PhD докторант, Экономика және бизнес жоғары мектебі, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Әл-Фараби даңғылы, 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Смағұлова Г.С. – э.ғ.к., доцент, "Менеджмент" кафедрасының меңгерушісі, Экономика және бизнес жоғары мектебі, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Әл-Фараби даңғылы, 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Сатова Р.К. – хат-хабар авторы, э.ғ.д., профессор, Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Байтұрсынов көшесі, 126/1, 050013, Алматы, Қазақстан.

Nygymetov G.S. – PhD student, Higher School of Economics and Business, Al-Farabi Kazakh National University, al-Farabi Ave., 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.

Smagulova G.S. – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Management", Higher School of Economics and Business, Al-Farabi Kazakh National University, al-Farabi Ave., 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.

Satova R.K. – corresponding author, Doctor of Economic Sciences, Professor, Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev, Baitursynov Str., 126/1, 050013, Almaty, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4>).