

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-1-71-84>

УДК 620.91

Исследование аналитической модели контрмер активизации «зеленого» экономического развития низкоуглеродной энергетики предприятий

Сяньпэн Ван¹⁾, докт. экон. наук, проф. М. К. Жудро²⁾

¹⁾Международный институт управления и предпринимательства (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье разработана аналитическая модель оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий, базирующаяся на низкоуглеродной энергетике. Выявлены проблемы глобального изменения климата, исследование которых аргументирует приоритетное развитие и использование низкоуглеродной энергии для сокращения выбросов углерода и стимулирования «зеленого» экономического роста. В работе разработана методика оценки потенциала «зеленого» развития различных отраслей промышленности, основанная на методе энтропийного веса и модели Уивера–Томаса. Предлагаемая модель протестирована на статистических данных потенциала «зеленого» развития различных отраслей промышленности провинции Хэйлунцзян (КНР). Во-первых, исследование показало, что основными источниками выбросов углекислого газа в Хэйлунцзяне являются горнодобывающая, обрабатывающая, строительная, энергетическая отрасли промышленности, а выбросы углекислого газа демонстрируют постоянную тенденцию роста из-за долгосрочной зависимости от угля и нефти. Во-вторых, установлено, что выбросы углерода имеют тенденцию роста из-за большого удельного веса в использовании угля и нефти в энергетике. В-третьих, индустрия автомобилей и специализированного оборудования была определена как ведущая «зеленая» отрасль провинции. В-четвертых, исследование свидетельствует, что повышение энергоэффективности промышленности, продвижение высоких технологий утилизации углерода и развитие возобновляемых источников энергии являются ключевыми драйверами сокращения компаниями выбросов углерода. Изложенное выше позволяет констатировать, что предлагаемая аналитическая модель исследований эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий создает теоретическую основу для разработки правительством и предприятиями эффективных стратегий «зеленого» развития и инструментов баланса между экономическим ростом и экологической их ответственностью.

Ключевые слова: низкий уровень углерода, энергетическая структура, бизнес-экономика, стратегия, аналитическая модель, оценка эффективности контрмер, экономический рост, экологическая ответственность

Для цитирования: Ван, Сяньпэн. Исследование аналитической модели контрмер активизации «зеленого» экономического развития низкоуглеродной энергетики предприятий / Сяньпэн Ван, М. К. Жудро // *Наука и техника*. 2026. Т. 25, № 1. С. 71–84. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-1-71-84>

Research on a Countermeasure Model for Green Economic Development of Enterprises from the Perspective of Low-Carbon Energy

Xianpeng Wang¹⁾, M. K. Zhudro²⁾

¹⁾International Institute of Management and Business (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article has developed an analytical model for assessing the effectiveness of countermeasures for promoting green economic development of enterprises based on low-carbon energy. The challenges of global climate change have been identified, and their study argues for the priority development and use of low-carbon energy to reduce carbon emissions and stimulate green economic growth. The paper develops a methodology for assessing the potential for green development in various industries, based on the entropy weight method and the Weaver-Thomas model. The proposed model was tested

Адрес для переписки

Жудро Михаил Кириллович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-06
eut_atf@bntu.by

Address for correspondence

Zhudro Mihail K.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-06
eut_atf@bntu.by

using statistical data on the potential for green development in various industries in Heilongjiang Province, China. Firstly, the study has found that the main sources of carbon dioxide emissions in Heilongjiang are mining, manufacturing, construction, and energy industries, and carbon dioxide emissions show a constant upward trend due to the long-term dependence on coal and oil. Secondly, it has been established that carbon emissions tend to increase due to the high proportion of coal and oil in the energy sector. Thirdly, the automotive and specialized equipment industry has been identified as the leading green industry in the province. Fourthly, the study shows that improving industrial energy efficiency, promoting high-carbon utilization technologies, and developing renewable energy sources are key drivers for companies to reduce their carbon emissions. Based on the above, it can be stated that the proposed analytical model for studying the effectiveness of countermeasures to promote green economic development at enterprises provides a theoretical basis for the government and enterprises to develop effective green development strategies and tools to balance economic growth with environmental responsibility.

Keywords: low carbon, energy structure, business economics, strategy, analytical model, assessment of the effectiveness of countermeasures, economic growth, environmental responsibility

For citation: Wang Xianpeng, Zhudro M. K. (2026) Research on a Countermeasure Model for Green Economic Development of Enterprises from the Perspective of Low-Carbon Energy. *Science and Technique*. 25 (1), 71–84. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-1-71-84> (in Russian)

Введение

Выполненная аналитическая, экспертная и экспериментальная оценка фундаментальных инструментов исследований современных социально-экономических проблем развития высокотехнологичной индустриализации принесла человеческому обществу, с одной стороны, значительные экономические выгоды. С другой стороны, она выявила ряд проблем, таких как загрязнение атмосферы, воды и почвы, выбросы углекислого газа, которые генерируют глобальный парниковый эффект и повышение уровня моря [1–3]. Поэтому, поскольку глобальное изменение климата становится все более острой социально-технологической проблемой цивилизации, разработка и применение контрмер низкоуглеродной энергетики являются важной стратегической целью правительств и предприятий по всему миру [4]. Актуальность изложенной проблемы обусловлена, во-первых, доминированием в настоящее время технологий энергетики, базирующихся на использовании традиционных ископаемых видов топлива (таких как уголь, нефть и природный газ), которые генерируют большое количество углекислого газа, что является одной из основных причин глобального потепления. Во-вторых, исследование, разработка и внедрение высокотехнологичных ветроэнергетических установок, солнечных генераторов, гидрогенераторов ведут к нулевому производству углекислого газа и способствуют снижению негативных процессов в биосфере [5, 6]. Обзор научных публикаций, посвященных исследованию

результатов реализации концепции «зеленой» трансформации (перехода к низкоуглеродной энергетике) экосистем, свидетельствует о том, что она является условием успешного решения двойной проблемы бизнеса: 1) устойчивого его развития; 2) позитивного изменения климата. В свою очередь концепция «зеленой» трансформации требует глубоких изменений в обществе, экономике и окружающей среде, стимулируя инновации в области «зеленых» технологий и чистой энергии для достижения «зеленого» экономического роста и скоординированного экономического, социального и экологического развития [7–13]. Эта концепция не только фокусируется на краткосрочных экономических выгодах, но и подчеркивает долгосрочный экологический баланс и устойчивое использование ресурсов. Согласно определению Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), «зеленый» рост означает стимулирование экономического роста и развития, обеспечивая при этом сохранность природных активов и бесперебойное предоставление ими ресурсов и экосистемных услуг, от которых зависит наше благополучие.

Использование изложенной выше концепции в современной институциональной регуляторике мега-, мезо- и микросреды развития бизнеса генерирует необходимость мотивации компаний скорректировать свою традиционную модель энергетического развития и переходить на низкоуглеродный его сценарий для устранения угроз, связанных с изменением климата.

Преследуя экономические выгоды, компании должны иметь методическое обеспечение оценки эффективности развития высоких технологий «зеленого» использования ресурсов с целью достижения сокращения потребления традиционных ресурсов и активизации разработки и внедрения «зеленых» технологий в бизнесе [10–13].

В этих условиях в последние годы все больше стран, включая развитые страны ЕС, такие как Италия, Франция и Германия [14–16], а также развивающиеся страны, такие как Китай [17, 18], начали переходить к экономике с низким уровнем выбросов углерода, корректируя свои стратегии развития и поощряя предприятия к инновациям путем принятия новых моделей экономического развития, ориентированных на цели по снижению выбросов углерода. Потребители все больше обеспокоены экологическим поведением компаний. В этих условиях имидж «зеленого» развития повышает доверие и их лояльность к внедрению компаниями стратегий «зеленого» развития их бизнеса [19]. В современном обществе заинтересованные стороны (такие как инвесторы, сотрудники, клиенты и т. д.) все чаще ожидают, что компании будут фокусироваться на устойчивом развитии. Инвесторы более склонны поддерживать компании, которые отдают приоритет экологическим, социальным и управленческим показателям (ESG). Таким образом, «зеленое» экономическое развитие – это не только выполнение корпоративной социальной ответственности, но и неизбежный выбор для удовлетворения требований заинтересованных сторон.

На основе выполненной экспертной оценки практики реализации существующих методологических инструментов диагностики эффективности и конкурентоспособности «зеленой» энергетики, во-первых, обоснована актуальность разработки аналитической модели оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий, базируясь на предлагаемой системе индексов и методе энтропийного их веса, а также модели Уивера–Томаса в сочетании со статистическими данными для проведения эмпирического исследования ведущих промышленных секторов в провинции Хэйлунцзян в соответствии с требованиями «зеленого» развития.

Во-вторых, реализован научно-методический подход к обоснованию концепции струк-

турно-динамической комбинаторики трех блоков авторских и существующих индексов «зеленого» экономического развития промышленности провинции на основе использования модернизированного метода производственных функций (производственную функцию Кобба–Дугласа), который отличается тем, что базируется на учете не синхронного, а структурно-динамического кросс-взаимодействия переменных бизнеса и позволяет комплексно оценить: 1) технологический прогресс; 2) его эффективность.

Построение системы индексов оценки «зеленого» экономического развития промышленности провинции

Предлагаемая система индексов «зеленого» экономического развития промышленности провинции Хэйлунцзян в период с 2001 по 2012 г., во-первых, является отправной точкой перехода Китая от модели развития с высоким уровнем выбросов углерода к «зеленой» экономике. Во-вторых, согласованность данных и этапность эколого-экономической политики Китая с 2000 по 2012 г. была ключевым этапом от 10-го до 12-го пятилетнего плана, что позволило зафиксировать первоначальный путь низкоуглеродного перехода и структурные изменения в национальной и международной энергетической политике (например, запуск пилотных проектов национального рынка углерода, изменения в политике субсидирования возобновляемых источников энергии и т. д.) и исключение потенциального множества экзогенных факторов после 2012 г., искажающих чистоту и сопоставимость результатов моделирования (пандемия COVID-19, санкционные инструменты протекционистской политики США, экстремальные природные события и др.). В-третьих, М. К. Жудро выявил и доказал уникальное явление в экономике всех без исключения стран: начиная с 2013 г. отсутствует стационарность временных рядов изменений всех макроэкономических параметров национальных экономик и мировой экономики [14]. Используемые в данном исследовании метод энтропийных весов и модель Уивера–Томаса предъявляют высокие требования к стационарности данных. Панельные данные о развитии промышленности провинции Хэйлунцзян за 13 лет (2000–2012 гг.) обеспечили достаточный объем выборки, стационарность временных рядов и аргументиро-

ванность выводов по результатам данного исследования.

Предлагаемая система индексов «зеленого» экономического развития промышленности провинции Хэйлунцзян в период с 2001 по 2012 г. включает оценку сравнительных его преимуществ в пределах как одной отрасли на уровне провинции, так и различных отраслей в пределах города. Она базируется на разработанной концепции структурно-динамической комбинаторики трех блоков существующих и авторских их вариантов, учитывающих сочетание модернизации метода производственных функций и не синхронного, а структурно-динамического кросс-взаимодействия переменных бизнеса.

Первый блок индикаторов роста включает структурно-динамические показатели эффективности деятельности предприятий на рынке (доля стоимости продаж отрасли на рынке среди аналогичных продуктов, доля стоимости отрасли в общем объеме промышленной продукции провинции, доля стоимости отрасли в общем объеме промышленной продукции провинции).

Второй блок индикаторов содержит метрики кросс-взаимодействия переменных конъюнктуры рынка (эластичность спроса и предложения на конкретный отраслевой продукт

в зависимости от изменения доходов, индекс индустриально-технологического прогресса, коэффициенты влияния и чувствительности).

Третий блок индикаторов «зеленого» экономического развития промышленности провинции включает структурно-динамические показатели масштаба промышленного производства, прогрессивности промышленных технологий и индексов потребления энергии на единицу продукции, интенсивности выбросов углерода.

Разработанная концепция структурно-динамической комбинаторики индексов «зеленого» экономического развития промышленности позволяет выполнять оценку кросс-взаимодействия между отраслями, текущее и долгосрочное технологическое и экономическое воздействие промышленности на «зеленое» и общее социально-экономическое развитие региона, учитывая тесную связь между энергией и окружающей средой. Поэтому ключевые индикаторы потребления энергии и интенсивность выбросов углерода используются для оценки уровня «зеленого» развития отрасли [21–23]. Конкретная информация по индикаторам «зеленого» экономического развития предприятий приведена в табл. 1.

Таблица 1

Интерпретация и алгоритмы расчетов значений предлагаемой системы индексов «зеленого» экономического развития предприятий

Interpretation and calculation algorithms for the proposed system of indices for the green economic development of enterprises

Индикатор		Значение	Выражение	Замечания
Сравнительные показатели преимуществ в провинции	Ставка λ_i доли рынка	Представляет собой долю стоимости продаж отрасли i на рынке среди аналогичных продуктов	$\lambda_i = \frac{s_i}{S_i}$	s_i и S_i являются стоимостью продаж i промышленности в городе и провинции соответственно
	Местоположение q Fs_i	Отношение доли i стоимости отрасли в общем объеме промышленной продукции провинции к доле стоимости той же отрасли в общем объеме промышленной продукции провинции	$Fs_i = \frac{y_i / \sum y_i}{Y_i / \sum Y_i}$	y_i , Y_i обозначают валовую стоимость промышленной продукции i промышленности в городе и провинции соответственно
	Капиталопроизводство, преимущество C_{a_i}	Представляет собой отношение объема производства капитала i в отрасли на рынке к объему производства в регионе	$C_{a_i} = \frac{y_i / k_i}{Y_i / K_i}$	k_i , K_i представляют собой основной капитал i промышленности в городе и провинции соответственно
	Эффективность труда как преимущество P_{a_i}	—	$P_{a_i} = \frac{y_i / l_i}{Y_i / L_i}$	l_i , L_i обозначают численность занятых в i промышленности в городе и провинции соответственно

Окончание табл. 1

End of Table 1

Индикатор	Значение	Выражение	Замечания
Промышленная себестоимость прибыли норма CPM_i	Представляет собой отношение прибыли к себестоимости расходов за определенный период	$CPM_i = \frac{P_i}{C_i}$	P_i, C_i представляют собой прибыль и себестоимость расходов i отрасли на рынке соответственно
Производительность труда σ_i	Представляет собой отношение промышленной добавленной стоимости к числу занятых в промышленности i	$\sigma_i = \frac{Z_i}{l_i}$	Z_i представляет собой промышленную добавленную стоимость i промышленности на рынке
Эластичность спроса по доходу ρ_i	Представляет собой реакцию спроса на конкретный отраслевой продукт на изменения в доходе	$\rho_i = \frac{NI_i}{q_i} \frac{\partial q_i}{\partial NI_i}$	NI_i представляет собой национальный доход i промышленности, q_i представляет собой спрос на продукцию i промышленности
Масштаб промышленного производства ξ_i	Представляет собой долю общего объема промышленного производства i промышленности в общем объеме промышленного производства всех отраслей промышленности региона	$\xi_i = \frac{y_i}{\sum Y_i}$	—
Индекс индустриально-технологического прогресса θ_i	Представляет способность i отрасли создавать новую ценность посредством технологических инноваций	$\begin{cases} \theta_i = \frac{y_i}{k_i^{\alpha_i} l_i^{\beta_i}}, \\ \alpha_i = \frac{k_i}{y_i}, \\ \beta_i = 1 - \frac{k_i}{y_i} \end{cases}$	α_i представляет эластичность капитала в i промышленности; β_i представляет эластичность труда в i промышленности
Коэффициент влияния I_j	Представляет собой влияние на производственные потребности других отраслей при добавлении дополнительной единицы конечного продукта в определенный сектор промышленности	$I_i = \frac{n \sum_{i=1}^n d_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}}$	n представляет собой число отраслей промышленности; d_{ij} является элементом в строке i , столбце j матрицы полных коэффициентов потребления отраслей промышленности, который представляет производственный спрос отрасли i , когда промышленность j увеличивает использование конечного продукта на одну единицу
Коэффициент чувствительности H_i	Представляет собой общий объем производства, необходимый для конкретного сектора, когда конечный спрос для каждого сектора увеличивается на одну единицу	$H_i = \frac{n \sum_{i=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}$	b_{ij} представляет собой выпуск продукции, произведенный промышленностью i за счет увеличения конечного спроса на единицу продукции сектора j
Потребление энергии на единицу ey_i	Представляет собой отношение потребления энергии к общему выходному значению в i промышленности	$ey_i = \frac{ec_i}{y_i}$	ce_i представляет собой потребление энергии в промышленности i на рынке
Интенсивность выбросов углерода E_i	Представляет собой отношение общего объема выбросов углекислого газа к общему объему производства i промышленности	$E_i = \frac{ce_i}{y_i}$	ce_i – выбросы углекислого газа в i промышленности на рынке

Сравнительные показатели преимуществ на рынке

Результаты тестирования аналитической модели оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий

Статус разработки аналитической модели оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий. В процессе тестирования предлагаемой аналитической модели оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий промышленность была разделена на три основных ее сектора: горнодобывающая; обрабатывающая; производство и поставка электроэнергии и газа. В качестве информационного объекта исследований использованы статистические данные провинции Хэйлунцзян, расположенной в северо-восточной части Китая и являющейся важными инновационными «воротами» развития «зеленой» энергетики страны. Так, историческая промышленная база, уголь, нефть и природный газ являются основными движущими силами экономического развития провинции Хэйлунцзян. В последние годы экономическое развитие провинции продолжало неуклонно расти со значительным улучшением экономической мощи. Однако по сравнению с другими прибрежными провинциями Хэйлунцзян по-прежнему относится к экономически слабо-развитым регионам (см. рис. 1). Потребление энергии увеличилось с 58,308 млн т у. т. в 2001 г. до 100,417 млн т у. т. в 2012 г., то есть его рост составил 72,22 %. За этот же период региональный ВВП вырос с 339,01 млрд юаней в 2001 г. до 1369,16 млрд юаней в 2012 г., увеличившись на 303,87 %.

Текущее состояние потребления энергии в провинции Хэйлунцзян показывает рис. 2. Из рисунка можно заметить, что объем производства первичного сектора остался стабильным, в то время как валовой объем производства вторичного сектора непрерывно увеличился, достигнув 502,52 млрд юаней, что составляет 48,5 % регионального ВВП. Это указывает на то, что основной движущей силой экономического роста в Хэйлунцзяне является вторичный сектор. Растущая стоимость вторичного сектора способствовала экономическому росту в провинции Хэйлунцзян, но это также привело к устойчивому росту годового потребления энергии – с 58,308 млн т у. т. в 2001 г. до 100,417 млн т у. т. в 2012 г., достигнув пика (100,618 млн т у. т.) в 2011 г.

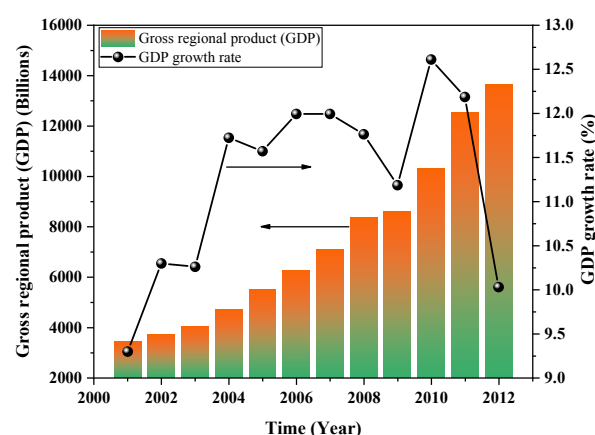


Рис. 1. Тенденции валового регионального продукта провинции Хэйлунцзян с 2001 по 2012 г.

Fig. 1. Gross regional product trends in Heilongjiang Province from 2001 to 2012

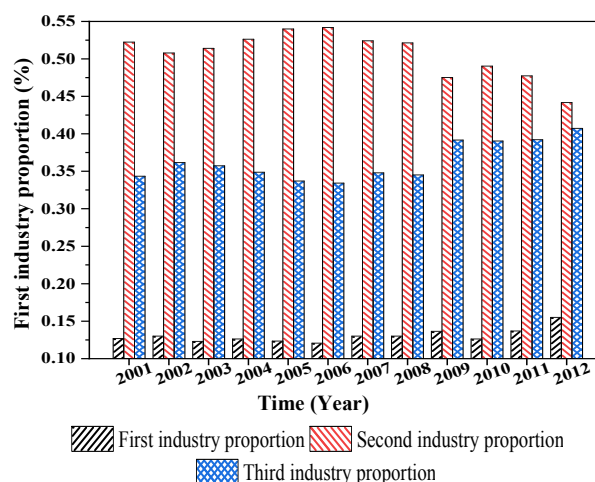


Рис. 2. Изменения в структуре промышленности провинции Хэйлунцзян в период с 2001 по 2012 г.

Fig. 2. Changes in industrial structure of Heilongjiang Province from 2001 to 2012

Три основных источника энергии, потребляемых в Хэйлунцзяне, – это сырой уголь, сырая нефть и природный газ, причем сырой уголь и сырая нефть составляют около 95 % от общего объема. Среди общего объема потребления энергии три основных сектора – промышленность, бытовое потребление, а также транспорт, хранение и почтовые услуги. При этом потребление энергии в 2012 г. достигло 67,965; 16,875 и 9,727 млн т у. т. соответственно.

Статистика выбросов углерода. Согласно статистическим данным, коэффициент выбросов CO_2 для электроэнергии составляет 0,82 т/(МВт · ч), а для теплоты – 0,13 т/(МВт · ч). Коэффициенты выбросов CO_2 для других энергоресурсов приведены в табл. 2 [24].

Таблица 2

Коэффициенты выбросов углерода для различных источников энергии

Carbon emission factors for different energy sources

Источник данных	Коэффициент выбросов углерода сырого угля (т(С)/т)	Коэффициент выбросов углерода сырой нефти (т(С)/т)	Коэффициент выбросов углерода природного газа (т(С)/т)
Управление энергетической информацией США	0,702	0,478	0,389
ОРНЛ	0,720	0,585	0,404
Японский институт экономики энергетики	0,756	0,586	0,449
Проект Национальной комиссии по развитию и реформам по изменению климата	0,726	0,583	0,409
Национальная комиссия по развитию и реформам, Институт энергетических исследований	0,748	0,583	0,444

На основе вышеупомянутых доминирующих отраслей и с использованием методологии, рекомендованной в Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г., оценены выбросы углерода от потребления сырой нефти, сырого угля и природного газа в провинции Хэйлунцзян за 2001–2012 гг. путем расчета и суммирования выбросов от каждого источника энергии. Формула, используемая для оценки выбросов углерода, выглядит следующим образом:

$$C = \sum_{i=1}^n E_i \cdot C_i, \quad (1)$$

где C выбросы углерода, 10^4 т; E_i – потребление вида энергии i (в пересчете на условный угольный эквивалент), т у. т.; C_i – коэффициент выбросов углерода, т/т у. т.; n – количество видов энергии, проанализированных в данном исследовании (сырой уголь, сырая нефть, природный газ).

В качестве стандарта использовались коэффициенты выбросов углерода, предоставленные Институтом энергетических исследований Национальной комиссии по развитию и реформам.

Как показано на рис. 3, потребление ископаемых источников топлива в провинции Хэйлунцзян с 2001 по 2012 г. генерировало масштабирование глобального объема выбросов углерода, который составил 648,7 млн т. При этом важно отметить, что указанное мас-

штабирование объемов выбросов углерода в Хэйлунцзяне начиная с 2011 г. стало стагнировать. Намечившаяся позитивная тенденция в энергетике Хэйлунцзяна является следствием падения объемов использования таких традиционных источников энергии, как сырая нефть и природный газ, в результате структурно-технологических изменений в промышленном секторе экономики исследуемой провинции. С 2001 по 2012 г. выбросы сырого угля составили 467,7 млн т, т. е. 72,1 % от общего объема выбросов в размере 648,7 млн т. Выбросы углерода от сырого угля ежегодно увеличивались с 24,64 млн т в 2001 г. до 51,4 млн т в 2012 г., т. е. на 108,6 %. За тот же период выбросы сырой нефти составили 164,036 млн т, что составляет 25,3 % от общего объема выбросов.

Тенденция роста выбросов углерода на душу населения в провинции Хэйлунцзян с 2001 по 2012 г. аналогична тенденции по всей стране, при этом оба показателя отражают их ежегодный рост (рис. 4). Однако выбросы углерода на душу населения в Хэйлунцзяне выше, чем в среднем по стране. При этом разница между ними незначительна. В последние годы значения исследуемых индикаторов выбросов углерода сближаются, в первую очередь из-за усилий Хэйлунцзяна по повышению энергоэффективности, корректировке своей промышленной структуры и энергичному внедрению низкоуглеродной экономической политики.

В процессе аналитических исследований установлено, что рост удельных выбросов углерода в расчете на одного человека в провинции Хэйлунцзян превышал их страновое аналогичное изменение за исследуемый период на 53,3 %, что составило в 2012 г. в физическом измерении около 1,768 т.

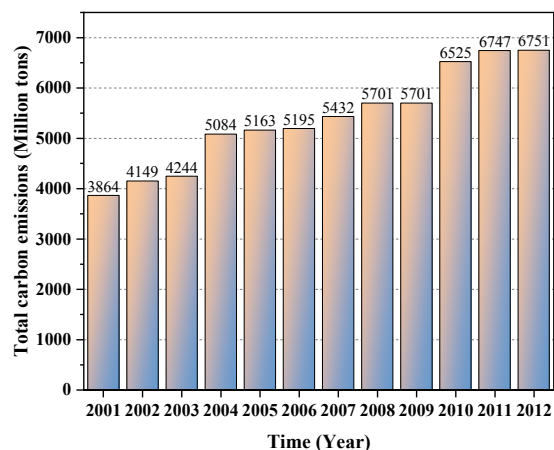


Рис. 3. Общие выбросы углерода в провинции Хэйлунцзян
Fig. 3. Total carbon emissions in Heilongjiang Province

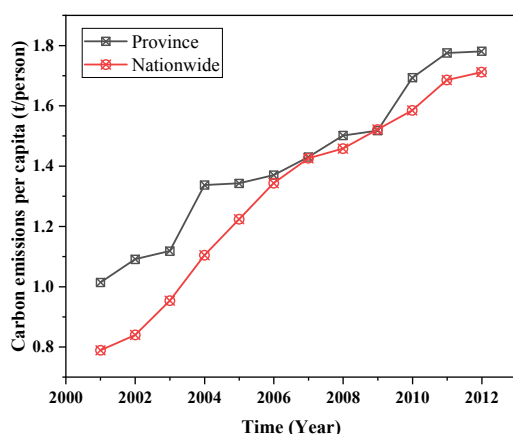


Рис. 4. Сравнение выбросов углерода на душу населения между провинцией Хэйлунцзян и всей страной в 2001–2012 гг.

Fig. 4. Comparison of carbon emissions per capita between Heilongjiang Province and the entire country in 2001–2012

Эмпирическая аналитика индексов модели оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий выполнена на основе метода энтропийного веса и модели Уивера–Томаса.

Для определения веса индикаторов роста «зеленого» экономического развития предприятий использованы субъективные и объективные методы взвешивания. Субъективные мето-

ды взвешивания в первую очередь подразумевают консультации экспертов для определения веса индикаторов, такие как аналитический процесс иерархии (АНР). С другой стороны, метод энтропийного веса, который берет начало от концепции энтропии в термодинамике, относится к объективным методам взвешивания. Этот метод вычисляет энтропийный вес каждого индикатора на основе степени вариации между индикаторами, тем самым повышая объективность и точность взвешивания индикатора после соответствующих корректировок.

При наличии m промышленных образцов и оценочных показателей n формируется x_{ij} исходная матрица данных показателей, где $(x_{ij})_{m \times n}$ представляет собой значение i -й отрасли по s -му индикатору. Чем больше вес значения индикатора x_{ij} , тем больше его вклад в общую оценку [25, 26]. Конкретный процесс расчета выглядит следующим образом. Во-первых, значения каждого показателя стандартизируются и выражаются как

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad 0 < P_{ij} < 1, \quad (2)$$

где p_{ij} представляет собой стандартизированное значение показателя x_{ij} .

Информационная энтропия e_j для j -го показателя определяется по формуле

$$e_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}. \quad (3)$$

Если информационная энтропия индикатора «зеленого» экономического развития предприятий меньше, это указывает на большую степень вариации среди соответствующих значений индикатора, предоставляя больше информации, что подразумевает больший вес. И наоборот, большее значение энтропии указывает на меньший вес. Конкретная формула для расчета веса w_j -го j индикатора

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}. \quad (4)$$

Основной принцип модели Уивера–Томаса заключается в сравнении наблюдаемого распределения с предполагаемым распределением для установления наиболее близкого приближенного распределения. При использовании этой модели значения индикатора зеленого экономического развития предприятий сначала сортируются по величине, а затем вычисляется сумма квадратов разностей между предполагаемыми распределениями для различных отраслей по каждому индикатору для определения наилучшего соответствия. Меньшая сумма квадратов указывает на то, что это предполагаемое распределение ближе к фактическому наблюдаемому распределению [27, 28]. Конкретные шаги расчета следующие. Предполагая, что существуют m промышленных секторы и n показатели, индекс Уивера–Томаса для h -й отрасли (где $h = 1, 2, 3, \dots, m$) и j -го показателя (где $j = 1, 2, 3, \dots, n$) определяется по формуле

$$\begin{cases} WT_{hj} = \sum_{i=1}^m \left(D_i^n - \frac{100x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \right)^2, \\ D_i^h = \begin{cases} \frac{100}{n}, & i \leq h, \\ 0, & i > h. \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Сначала рассчитываются значения WT_{hj} для всех промышленных секторов по j -му индикатору и находится минимальное значение среди них. Соответствующий рейтинг отраслей для этого значения указывает на количество доминирующих отраслей по этому индикатору. Количество случаев появления минимального WT_{hj} индекса равно

$$\tau_j = \{k; WT_{hj} = \min WT_{hj}, k = 1, 2, \dots, m\}. \quad (6)$$

Далее рассчитывается среднее количество доминирующих отраслей, соответствующих каждому показателю, чтобы получить общее количество доминирующих отраслей τ :

$$\tau = \sum_{j=1}^n \frac{\tau_j}{n}. \quad (7)$$

Затем строится комплексная матрица ранжирования R для i -й отрасли относительно j -го индикатора «зеленого» экономического развития предприятий

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & \dots & R_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & \dots & R_{mn} \end{pmatrix} = \{R_{ij}\}_{m \times n}, \quad (8)$$

где R_{ij} представляет собой значение рейтинга i -й отрасли относительно j -го показателя, которое может быть как положительным, так и отрицательным.

Наконец, на основе весов каждого оценочного показателя рассчитывается комплексное значение рейтинга $\bar{R}_i$ для i -й отрасли

$$\bar{R}_i = \sum_{j=1}^n w_j R_{ij}. \quad (9)$$

Потом отрасли выбираются в качестве доминирующих на основе их комплексных рейтинговых значений в порядке убывания, вплоть до τ промышленности.

На основе статистических данных и системы показателей оценки информационная энтропия, вес и количество доминирующих отраслей для 13 показателей оценки «зеленого» экономического развития предприятий показаны в табл. 3. Можно заметить, что информационная энтропия трех показателей – индекса технологического прогресса, интенсивности выбросов углерода и потребления энергии на единицу выходной стоимости – относительно мала, а соответствующие им значения веса выше, чем у других показателей, каждый из которых превышает 0,1. Эти показатели служат важными ориентирами для выбора «зеленых» доминирующих отраслей. Рассчитанное среднее количество доминирующих отраслей τ составляет 23,9. Согласно расчету комплексных рейтинговых значений по формуле (9), тройка лидеров выглядит следующим образом: производство товаров культурного, образовательного, спортивного и развлекательного назначения ($\bar{R}_i = 20,79$); автомобилестроение ($\bar{R}_i = 15,46$); производство специализированного оборудования ($\bar{R}_i = 14,36$).

Таблица 3

Информационная энтропия, вес индикатора и количество ведущих отраслей для каждого индикатора
Information entropy, indicator weight, and number of leading industries for each indicator

Индикатор		Информационная энтропия e_j	Вес индикатора w_j	Количество ведущих отраслей τ_j
Сравнительные показатели преимуществ в провинции	Ставка доли рынка A_1	0,897	0,051	18
	Коэффициент местоположения A_2	0.900	0,050	20
	Преимущество в капиталовложениях A_3	0,907	0,046	31
	Преимущество в эффективности труда A_4	0,964	0,018	30
Сравнительные показатели преимуществ на рынке	Промышленная себестоимость – норма прибыли B_1	0,933	0,033	24
	Производительность труда B_2	0,847	0,076	25
	Эластичность спроса по доходу B_3	0,959	0,020	5
	Преимущество масштаба промышленного производства B_4	0,816	0,091	16
	Индекс технологического прогресса B_5	0,697	0.150	7
	Коэффициент влияния C_1	0,978	0,011	35
	Коэффициент чувствительности C_2	0,920	0,040	30
	Интенсивность выбросов углерода D_1	0,479	0,258	35
	Потребление энергии на единицу D_2	0,686	0,156	35

Тест Дики–Фуллера (ADF). Чтобы избежать возникновения «ложной регрессии», важно оценить стационарность временного ряда индикаторов «зеленого» экономического развития предприятий перед построением модели. Предположим, что временной ряд $\{X_t\} (t=1, 2, \dots)$ состоит из значений, случайно взятых из распределения вероятностей. Временной ряд X_t считается стационарным, если он удовлетворяет следующим условиям:

1) среднее значение $E(X_t) = \mu$ постоянно и не зависит от времени t ;

2) дисперсия $Var = (X_t) = \sigma^2$ постоянна и не зависит от времени t ;

3) ковариация $Cov = (X_t, X_{t+k}) = \gamma_k$ – это константа, зависящая только от временного лага k , а не от времени t .

Случайный временной ряд, удовлетворяющий этим условиям, определяется как стационарный.

В этом исследовании в качестве исследовательских переменных выбраны выбросы углерода (Y) провинции Хэйлунцзян с 2001 по 2012 г., а также ВВП провинции (X_1), общая численность населения (X_2) и общее потребление энергии (X_3). Чтобы устранить гетероскедастичность, переменные преобразуются с использованием натуральных логарифмов с основанием e . Таким образом, $\ln Y$, $\ln X_1$, $\ln X_2$ и $\ln X_3$ представляют собой натуральные логарифмы выбросов углерода, экономического роста, роста населения и потребления энергии соответственно. Метод проверки единичного корня ADF (расширенный Дики–Фуллера) используется для изучения взаимосвязей между Y , X_1 , X_2 и X_3 . Результаты этих тестов представлены в табл. 4.

С помощью теста ADF можно сделать вывод, что $\ln Y$, $\ln X_1$, $\ln X_2$ и $\ln X_3$ являются интегрированными в первом порядке в пределах 5%-го критического диапазона значений.

Таблица 4

Результаты метода ADF

ADF method results

Переменная	(C, T, K)	Статистика ADF	5%-е критическое значение	Результат теста
$\ln Y$	(C, T, 1)	-1,7882	-3,5684	Нестабильный
$\Delta \ln Y$	(0, T, 1)	-3,7296	-3,3210	Стабильный
$\ln X_1$	(0, T, 0)	0,3645	-2,9604	Нестабильный
$\Delta \ln X_1$	(0, 0, 0)	-2,9771	-1,9525	Стабильный
$\ln X_2$	(0, 0, 0)	2,5416	-1,9521	Нестабильный
$\Delta \ln X_2$	(0, 0, 0)	-4,8631	-1,9525	Стабильный
$\ln X_3$	(0, 0, 0)	0,0431	-2,9604	Нестабильный
$\Delta \ln X_3$	(0, 0, 1)	-2,9960	-1,9525	Стабильный

Примечание. «C» относится к термину перехвата, «T» представляет термин временной тенденции, а «K» обозначает порядок отставания. Когда K = 0, это означает, что модель оценивается без пересечения или временного тренда.

Чтобы сосредоточиться на линейной зависимости, $\ln X_3$ исключен и линейный регрессионный анализ выполнен на оставшихся переменных. Извлеченные остатки регрессии показали четкую функциональную связь, выраженную как

$$\ln Y = -391,8775 + 0,1653 \ln X_1 + 48,4182 \ln X_2.$$

Кроме того, остатки оказались стационарными, что предполагает долгосрочную стабильную связь между $\ln Y$, $\ln X_1$ и $\ln X_2$.

Как видно на рис. 5, выбросы углерода в провинции Хэйлунцзян постоянно растут, что указывает на то, что быстрое экономическое развитие является основным фактором, способствующим ежегодному увеличению выбросов углерода на душу населения. Что касается энергетической структуры, из-за долгосрочной зависимости от угля и нефти в ней произошло мало структурно-динамических изменений. И, как следствие, ее вклад в выбросы углерода на душу населения относительно невелик по сравнению с другими факторами. С точки зрения энергоэффективности, до 2005 г. вклад энергоэффективности в выбросы углерода на душу населения показывал небольшие колебания. Однако после 2005 г. наблюдается заметная тенденция к росту вклада энергоэффективности в выбросы углерода на душу населения. Это указывает на то, что после введения политики низкого уровня выбросов углерода улучшения в энергоэффективности сыграли значительную роль в смягчении роста вы-

бросов углерода на душу населения в провинции Хэйлунцзян, сделав энергоэффективность основным фактором сдерживания роста выбросов углерода.

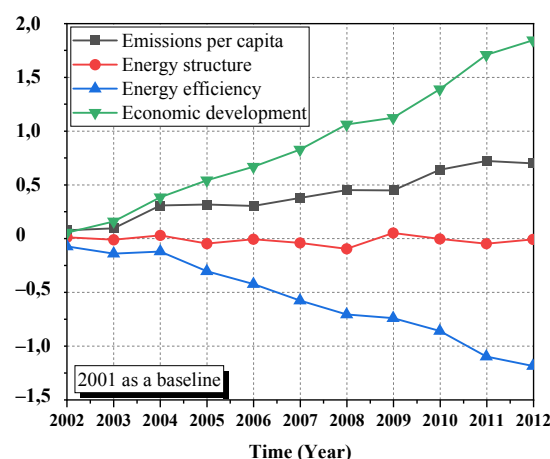


Рис. 5. График тренда значений вклада факторов

Fig. 5. Trend chart of factor contribution values

Стратегии и рекомендации по использованию аналитической модели оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий

Экспертиза результатов тестирования аналитической модели оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий позволяет рекомендовать стратегии развития низкоуглеродной экономики, ориентированные на комплексное вовлечение в бизнес высокотехнологических и институциональных инноваций. Компании

должны внедрять специализированные проекты, адаптированные к их обстоятельствам, для продвижения низкоуглеродной экономики, используя следующие ключевые контрмеры:

(1) активно продвигать технологические инновации, распространять новые технологии энергосбережения и сокращения выбросов, а также оптимизировать технологические процессы;

(2) осуществлять геологическую секвестрацию углекислого газа посредством внедрения технологий улавливания и хранения углерода (CCS) из промышленных производственных выбросов или процессов преобразования энергии, а затем транспортировку его в места, изолирующие его от атмосферы в средне- и долгосрочной перспективе. Эти технологии требуют значительных инвестиций и эксплуатационных расходов, которые не могут быть поддержаны исключительно за счет финансирования предприятий, что требует эффективной частно-государственной поддержки;

(3) развивать возобновляемые источники энергии, используя различные технологические способы, включая более активное освоение природного газа и нетрадиционных ресурсов нефти и газа;

(4) развивать современные технологии преобразования углекислого газа в органические и химические красители, промежуточные или органические химические продукты, тем самым смягчая дефицит энергии;

(5) укреплять международное сотрудничество в области энергосбережения, использования ресурсов и защиты окружающей среды с целью активного привлечения инновационного иностранного капитала, технологий и оборудования, а также содействовать трансферу технологий из развитых стран в Китай.

ВЫВОДЫ

1. Выполненное исследование аналитической модели оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий подчеркивает важность перехода на низкоуглеродные источники энергии, такие как солнечная, ветровая и гидроэнергетика, для сокращения выбросов углерода и содействия долгосрочной экологической устойчивости.

2. Результаты тестирования разработанной надежной системы индексов оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» эко-

номического развития предприятий с использованием метода энтропийного веса и модели Уивера–Томаса предоставляют ценную информацию о потенциале «зеленого» развития различных отраслей промышленности в провинции Хэйлунцзян. Установлено, что, во-первых, горнодобывающий, обрабатывающий и энергетический секторы экосистемы исследуемой провинции Китая являются основными источниками выбросов углерода в основном из-за их зависимости от угля и нефти. Во-вторых, такие отрасли, как автомобилестроение и производство специализированного оборудования, определены как ведущие «зеленые» отрасли в регионе. В-третьих, стратегия повышения энергоэффективности посредством разработки и внедрения технологий утилизации углерода и инвестирования в возобновляемые источники энергии является драйвером сокращения предприятиями своего углеродного следа. В-четвертых, разработанная аналитическая модель оценки эффективности контрмер активизации «зеленого» экономического развития предприятий предоставляет теоретико-методический инструментарий для политиков и менеджеров предприятий в процессе обсуждения «зеленых» экономических стратегий достижения баланса между экономическим ростом и экологической их ответственностью с целью обеспечения долгосрочной устойчивости социально-экономического развития провинции Хэйлунцзян.

ЛИТЕРАТУРА

1. Greenhouse Effect / S. Matemilola, H. A. Alabi // Encyclopedia of Sustainable Management / eds: S. O. Idowu, R. Schmidpeter, N. Capaldi [et al.]. Springer, Cham, 2023. P. 1810–1813. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25984-5_517.
2. Greenhouse Effect // Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/greenhouse-effect>.
3. Bacastow, R. B. The Effect of Temperature Change of the Warm Surface Waters of the Oceans on Atmospheric CO₂. / R. B. Bacastow // Global Biogeochemical Cycles. 1996. Vol. 10, No 2. P. 319–333. <https://doi.org/10.1029/96GB00039>.
4. Investigation on Viability of Solar Panel Covered Carpark Project for Inti International University / C. Y. Tan, A. J. Seyed, H. K. Ng, S. Gan // Inti Journal. 2019. Vol. 219, No 50. URL: <http://eprints.intimal.edu.my/1324>.
5. The Role of Renewable Energy Investment in Tackling Climate Change Concerns: Environmental Policies for Achieving SDG-13 / X. He, S. Khan, I. Ozturk, M. Murshed // Sustainable Development. 2023. Vol. 31, No 3. P. 1888–1901. <https://doi.org/10.1002/sd.2491>.
6. He, J. K. Objectives and Strategies for Energy Revolution in the Context of Tackling Climate Change / J. K. He // Advances in Climate Change Research. 2015. Vol. 6, No 2. P. 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.08.005>.

7. Anbumozhi, V. Unlocking the Potentials of Private Financing for Accelerated Low-Carbon Energy Transition: An Overview / V. Anbumozhi, F. Kimura, K. Kalirajan // *Financing for Low-Carbon Energy Transition*. Springer, Singapore, 2018. P. 1–13. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8582-6_1.
8. Saraji, M. K. Challenges to the Low Carbon Energy Transition: A Systematic Literature Review and Research Agenda / M. K. Saraji, D. Streimikiene // *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 49. P. 101163. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101163>.
9. Kwilinski, A. The Effects of Urbanisation on Green Growth within Sustainable Development Goals / A. Kwilinski, O. Lyulyov, T. Pimonenko // *Land*. 2023. Vol. 12, No 2. P. 511. <https://doi.org/10.3390/land12020511>.
10. Green Development Performance and Its Influencing Factors: A Global Perspective / C. Feng, M. Wang, G. C. Liu, J. B. Huang // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 144. P. 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.005>.
11. Marco-Fondevila, M. CSR and Green Economy: Determinants and Correlation of Firms' Sustainable Development / M. Marco-Fondevila, J. M. Moneva Abadia, S. Scarpellini // *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. 2018. Vol. 25, No 5. P. 756–771. <https://doi.org/10.1002/csr.1492>.
12. Shah, K. U. Aligning Corporate Social Responsibility with Green Economy Development Pathways in Developing Countries / K. U. Shah, S. Arjoon, M. Rambocas // *Sustainable Development*. 2016. Vol. 24, No 4. P. 237–253. <https://doi.org/10.1002/sd.1625>.
13. Cai, L. Natural Resources and Financial Development: Role of Corporate Social Responsibility on Green Economic Growth in Vietnam / L. Cai, T. T. Le // *Resources Policy*. 2023. Vol. 81. P. 103279. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103279>.
14. Research on the Economic Security Application of Energy Economy in a Low-Carbon Sustainable Development Society / J. Li, Y. Liu, R. Shao, M. K. Zhudro // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 497. P. 01007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449701007>.
15. Bosetti, L. Transition toward a Low-Carbon Economy: The Contribution of Italian Listed Utilities / L. Bosetti // *Eurasian Business and Economics Perspectives*. Eurasian Studies in Business and Economics / eds: M. H. Bilgin, H. Danis, E. Demir, A. Zaremba. Springer, Cham, 2022. P. 99–117. (*Eurasian Studies in Business and Economics*; vol 21). https://doi.org/10.1007/978-3-030-94036-2_6.
16. Ravigné, E. Is a Fair Energy Transition Possible? Evidence from the French Low-Carbon Strategy / E. Ravigné, F. Gherzi, F. Nadaud // *Ecological Economics*. 2022. Vol. 196. P. 107397. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107397>.
17. Haas, T. Next Stop Carbon Dioxide Removal? German Climate Policies and the Risky Road to Negative Emission Technologies / T. Haas, D. E. Schoppek // *Zeitschrift für Politikwissenschaft*. 2024. Vol. 34. P. 161–181. <https://doi.org/10.1007/s41358-024-00379-5>.
18. Hu, W. The Role of Fiscal Policies in Supporting a Transition to a Low-Carbon Economy: Evidence from the Chinese Shipping Industry / W. Hu, X. He // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2024. Vol. 179. P. 103940. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103940>.
19. How Can China Achieve the 2030 Carbon Peak Goal – a Crossover Analysis Based on Low-Carbon Economics and Deep Learning / C. Shi, J. Zhi, X. Yao [et al.] // *Energy*. 2023. Vol. 269. P. 126776. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126776>.
20. Mendes, M. Sustainable Development Economy and the Development of Green Economy in the European Union / M. Mendes // *Energy, Sustainability & Society*. 2023. Vol. 13. Art. 32. <https://doi.org/10.1186/s13705-023-00410-7>.
21. 基于Weaver-Thomas 模型的西安市工业绿色发展对策分析 / 闫晓辉, 龚卉, 王宝成, 谢康成 // *生态经济*. 2017. Vol. 33, № 12. P. 72–76. = Analysis of Countermeasures for Industrial Green Development in Xi'an Based on Weaver-Thomas Model / X. Yan, H. Gong, B. C. Wang, K. C. Xie // *Ecological Economy*. 2017. Vol. 33, No 12. P. 72–76.
22. A Comparative Analysis of the Principal Component Analysis and Entropy Weight Methods to Establish the Indexing Measurement / R. M. Wu, Z. Zhang, W. Yan [et al.] // *PloS One*. 2022. Vol. 17, No 1. P. e0262261. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262261>.
23. Unraveling the Nexus between Financial Openness and Environmental Quality: Green Finance as the Catalyst in CEE Countries / A. Dilanchiev, C. Somthawinpongsai, B. Urinov, E. Eyvazov // *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*. 2024. Vol. 26, No 3. Art. 2450011. <https://doi.org/10.1142/s146433322450011x>.
24. Qu, X. The Choice of Leading Industries under Low-Carbon Constraint in Hunan province / X. Qu, R. Xie, C. Liu // *Sixth International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering*. Hangzhou, China: IEEE, 2013. P. 343–347. <https://doi.org/10.1109/BIFE.2013.153>.
25. Mechanical Properties and Environmental Protection Analysis of Non-Metallic Fibers / H. Yu, X. Wang, K. S. Nikolaevich, L. S. Nikolaevich // *2023 9th International Conference on Architectural, Civil and Hydraulic Engineering (ICACHE 2023)*. Atlantis Press, 2023. P. 830–842. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-336-8_94.
26. Feng, Y. Improved Entropy Weighting Model in Water Quality Evaluation / Y. Feng, Y. Fanghui, C. Li // *Water Resources Management*. 2019. Vol. 33. P. 2049–2056. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02227-6>.
27. 黄龙, 谢芬, 杨承, 严浩. 基于 Weaver-Thomas 模型的区域低碳主导产业评价与选择——以低碳试点城市南昌市工业行业为例 // *生态经济*. 2014. Vol. 30, No 10. P. 50–56. = Evaluation and Selection of Regional Low-Carbon Leading Industries Based on Weaver-Thomas Model: The Case of Industrial Industries in Nanchang, a Low-Carbon Pilot City / L. Huang, F. Xie, C. Yang, H. Yan // *Ecological Economy*. 2014. Vol. 30, No 10. P. 50–56.
28. Towards Green Growth. A Summary for Policy Makers, May 2011 / OECD. Paris: OECD Publishing. URL: <https://ca.water-info.net/policybriefs/pdf/oecd6.pdf>.

Поступила 16.10.2025

Подписана в печать 29.12.2025

Опубликована онлайн 30.01.2026

REFERENCE

1. Matemilola S., Alabi H. A. (2023) Greenhouse Effect. Idowu S. O., Schmidpeter R., Capaldi N., Zu L., Del Baldo M., Abreu R. (eds). *Encyclopedia of Sustainable Ma-*

1. nagement. Springer, Cham, 1810–1813. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25984-5_517.
2. Greenhouse Effect. *Britannica*. Available at: <https://www.britannica.com/science/greenhouse-effect>.
3. Bacastow R. B. (1996). The Effect of Temperature Change of the Warm Surface Waters of the Oceans on Atmospheric CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 (2), 319–333. <https://doi.org/10.1029/96GB00039>.
4. Tan C. Y., Seyed A. J., Ng H. K., Gan S. (2019) Investigation on Viability of Solar Panel Covered Carpark Project for Inti International University. *Inti Journal*, 219 (50). Available at: <http://eprints.intimal.edu.my/1324>.
5. He X., Khan S., Ozturk I., Murshed M. (2023) The Role of Renewable Energy Investment in Tackling Climate Change Concerns: Environmental Policies for Achieving SDG-13. *Sustainable Development*, 31 (3), 1888–1901. <https://doi.org/10.1002/sd.2491>.
6. He J. K. (2015) Objectives and Strategies for Energy Revolution in the Context of Tackling Climate Change. *Advances in Climate Change Research*, 6 (2), 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.08.005>.
7. Anbumozhi V., Kimura F., Kalirajan K. (2018) Unlocking the Potentials of Private Financing for Accelerated Low-Carbon Energy Transition: An Overview. Anbumozhi V., Kalirajan K., Kimura F. (eds). *Financing for Low-Carbon Energy Transition*. Springer, Singapore, 1–13. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8582-6_1.
8. Saraji M. K., Streimikiene D. (2023) Challenges to the Low Carbon Energy Transition: A Systematic Literature Review and Research Agenda. *Energy Strategy Reviews*, 49, 101163. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101163>.
9. Kwilinski A., Lyulyov O., Pimonenko T. (2023) The Effects of Urbanisation on Green Growth within Sustainable Development Goals. *Land*, 12 (2), 511. <https://doi.org/10.3390/land12020511>.
10. Feng C., Wang M., Liu G. C., Huang J. B. (2017) Green Development Performance and Its Influencing Factors: A Global Perspective. *Journal of Cleaner Production*, 144, 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.005>.
11. Marco-Fondevila M., Moneva Abadía J. M., Scarpellini S. (2018) CSR and Green Economy: Determinants and Correlation of Firms' Sustainable Development. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 25 (5), 756–771. <https://doi.org/10.1002/csr.1492>.
12. Shah K. U., Arjoon S., Rambocas M. (2016) Aligning Corporate Social Responsibility with Green Economy Development Pathways in Developing Countries. *Sustainable Development*, 24 (4), 237–253. <https://doi.org/10.1002/sd.1625>.
13. Cai L., Le T. T. (2023) Natural Resources and Financial Development: Role of Corporate Social Responsibility on Green Economic Growth in Vietnam. *Resources Policy*, 81, 103279. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103279>.
14. Li J., Liu Y., Shao R., Zhudro M. K. (2024) Research on the Economic Security Application of Energy Economy in a Low-Carbon Sustainable Development Society. *E3S Web of Conferences*, 497, 01007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449701007>.
15. Bosetti L. (2022). Transition toward a Low-Carbon Economy: The Contribution of Italian Listed Utilities. Bilgin M.H., Danis H., Demir E., Zaremba A. (eds). *Eurasian Business and Economics Perspectives. Eurasian Studies in Business and Economics, Vol. 21*. Springer, Cham, 99–117. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94036-2_6.
16. Ravigné E., Gherzi F., Nadaud F. (2022) Is a Fair Energy Transition Possible? Evidence from the French Low-Carbon Strategy. *Ecological Economics*, 196, 107397. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107397>.
17. Haas T., Schoppek D. E. Next Stop Carbon Dioxide Removal? German Climate Policies and the Risky Road to Negative Emission Technologies. *Zeitschrift für Politikwissenschaft*, 34, 161–181. <https://doi.org/10.1007/s41358-024-00379-5>.
18. Hu W., He X. (2024) The Role of Fiscal Policies in Supporting a Transition to a Low-Carbon Economy: Evidence from the Chinese Shipping Industry. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 179, 103940. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103940>.
19. Shi C., Zhi J., Yao X., Zhang H., Yu Y., Zeng Q., Li L., Zhang Y. (2023) How Can China Achieve the 2030 Carbon Peak Goal – a Crossover Analysis Based on Low-Carbon Economics and Deep Learning. *Energy*, 269, 126776. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126776>.
20. Montes M. (2023) Sustainable Development Economy and the Development of Green Economy in the European Union. *Energy, Sustainability & Society*, 13, 32. <https://doi.org/10.1186/s13705-023-00410-7>.
21. Yan X., Gong H., Wang B. C., Xie K. C. (2017) Analysis of Countermeasures for Industrial Green Development in Xi'an Based on Weaver-Thomas Model. *Ecological Economy*, 33 (12), 72–76 (in Chinese).
22. Wu R. M., Zhang Z., Yan W., Fan J., Gou J., Liu B. [et al.] (2022) A Comparative Analysis of the Principal Component Analysis and Entropy Weight Methods to Establish the Indexing Measurement. *PloS one*, 17 (1), e0262261. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262261>.
23. Dilanchiev A., Somthawinpongsai C., Urinov B., Eyvazov E. (2024) Unraveling the Nexus between Financial Openness and Environmental Quality: Green Finance as the Catalyst in CEE Countries. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 26 (3), 2450011. <https://doi.org/10.1142/s146433322450011x>.
24. Qu X., Xie R., Liu C. (2013). The Choice of Leading Industries under Low-Carbon Constraint in Hunan Province. *Sixth International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering*. Hangzhou, China, IEEE, 343–347. <https://doi.org/10.1109/BIFE.2013.153>.
25. Yu H., Wang X., Nikolaevich K. S., Nikolaevich L. S. (2023) Mechanical Properties and Environmental Protection Analysis of Non-Metallic Fibers. *2023 9th International Conference on Architectural, Civil and Hydraulic Engineering (ICACHE 2023)*. Atlantis Press, 830–842. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-336-8_94.
26. Feng Y., Fanghui Y., Li C. (2019) Improved Entropy Weighting Model in Water Quality Evaluation. *Water Resources Management*, 33, 2049–2056. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02227-6>.
27. Huang L., Xie F., Yang C., Yan H. (2014) Evaluation and Selection of Regional Low-Carbon Leading Industries Based on Weaver-Thomas Model: The Case of Industrial Industries in Nanchang, a Low-Carbon Pilot City. *Ecological Economy*, 30 (10), 50–56 (in Chinese).
28. OECD (2011) *Towards Green Growth: A Summary for Policy Makers, May 2011*. OECD Publishing, Paris. Available at: <https://cawater-info.net/policybriefs/pdf/oecd6.pdf>.

Received: 16.10.2025

Accepted: 29.12.2025

Published online: 30.01.2026