

Комплексная эколого-экономическая оценка низкоуглеродных источников энергии

Д. Ю. Двинин , А. Ю. Даванков 

Челябинский государственный университет,
г. Челябинск, Россия

 dvinin1981@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследования различных низкоуглеродных источников энергии на основе многокритериального анализа с целью комплексной эколого-экономической оценки эффективности их использования. Особенность исследования в анализе возобновляемых и традиционных источников энергии, использующих ископаемое топливо с применением инновационных технологий улавливания и хранения углекислого газа, а также ядерной энергетики. Цель исследования — проведение комплексной оценки на основе трех критериев: нормированной стоимости электроэнергии LCOE (Levelised Cost of Energy)/LEC (Levelized Energy Cost), удельной величины эмиссии углекислого газа и материальной интенсивности выраженной в суммарных MI-числах (Material Input). Гипотеза исследования — введение в комплексную оценку критерия материальной интенсивности в MI-числах позволит выявить низкоуглеродные источники энергии с наибольшим эколого-экономическим эффектом. Было установлено, что в 2023 г. мировые энергопроизводительности низкоуглеродной энергетики достигли 51,8 %, однако доля вырабатываемой ими энергии значительно ниже, составляет всего 39,4 %. Многокритериальный анализ позволил выявить низкоуглеродные источники энергии, которые при наименьших затратах обеспечивают наибольшее снижение эмиссии углекислого газа и одновременно снижают общее воздействие на окружающую среду благодаря уменьшению нарушенности биосферных материальных потоков. Высокой эколого-экономической эффективностью обладают ветряные электростанции, немного меньшей — солнечные источники энергии и биоэлектростанции. Геотермальные и гидроэлектростанции обладают низкой нормированной стоимостью электроэнергии, однако у них относительно высокие величины материальной интенсивности. Эколого-экономическая эффективность у ядерной энергетики выше, чем у газовых и угольных электростанций, использующих технологии улавливания углекислого газа, она занимает промежуточное положение между возобновляемыми и традиционными источниками энергии. Неожиданным установленным фактом стало, что газовые и угольные электростанции с технологиями улавливания углекислого газа имеют одинаковую эколого-экономическую эффективность. Полученные результаты могут быть полезны при принятии решений о возможности приоритетного развития отдельных низкоуглеродных источников энергии.

Ключевые слова: низкоуглеродные источники энергии; нормированная стоимость электроэнергии; удельная эмиссия углекислого газа; материальная интенсивность; комплексная эколого-экономическая эффективность.

1. Введение

Развитие низкоуглеродных источников энергии в настоящее время признано ключевым условием для борьбы с климатическими изменениями и улучшения

в целом экологической ситуации. Их широкое применение в хозяйственной деятельности должно обеспечить успешное и долгосрочное эколого-экономическое развитие. В результате это позволит осу-

существить переход к модели устойчивого развития, основные принципы которой были сформулированы на международных конференциях по вопросам охраны окружающей среды и устойчивого развития (1992, 2002, 2012), а также подтверждены 17 целями в области устойчивого развития, принятыми в 2015 г. Генеральной Ассамблеей ООН.

Многие страны мира начали реализовывать собственные стратегии перехода к низкоуглеродной энергетике, достигнув определенных результатов. Вопросы регулирования эмиссии углерода на международном уровне определяются Парижским соглашением в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2015). Соглашением установлено: страны самостоятельно формируют национальные цели по снижению эмиссии парниковых газов и принимают необходимые меры для их достижения.

Saleh & Hassan [1] отмечают, что результатом их выполнения станет достижение «углеродной нейтральности» в течение XXI в., это должно привести к стабилизации природного углеродного цикла и климатической системы Земли. Для осуществления поставленных целей необходимо осуществить переход электроэнергетического комплекса на различные источники низкоуглеродной энергии.

Причем иногда исследователями упускается из вида, что указанных целей позволяют достичь не только возобновляемые источники энергии, но и традиционные, с использованием ископаемого топлива и основанные на применении новейших технологий по улавливанию и хранению углекислого газа. Данная ситуация обуславливает необходимость проведения некоторого дополнительного анализа источников низкоуглеродной энергии совершенно различных по своей природе.

При исследовании низкоуглеродных источников энергии также необходимо

учитывать, что общее негативное воздействие на окружающую среду обусловлено не только выбросами парниковых газов, но и вызвано изменением существующих биосферных материально-энергетических потоков, неизбежно возникающих в процессе хозяйственной деятельности. Как указано Dorninger et al. [2], использование значительных объемов природных ресурсов, изъятых из биосферы, их дальнейшее перемещение и переработка играют более существенную роль в формировании экологических проблем, чем исключительно выбросы загрязняющих веществ. Нарушение биосферных материально-энергетических потоков через извлечение природных ресурсов лишают существующие экосистемы важных функций, в результате они утрачивают способность поддерживать необходимые условия жизнедеятельности.

В 1990-х гг. Горшковым [3] была сформулирована концепция биотической регуляции. Согласно ее положениям, основным противоречием между хозяйством и природой является переключение экономикой на себя биосферных материально-энергетических потоков. Даже при выполнении условия, связанного с полным переходом к низкоуглеродной энергетике, если данные потоки сохраняют высокую материальную интенсивность, не прекратятся негативные процессы, ведущие к разрушению окружающей среды.

Поэтому для комплексной оценки эколого-экономических преимуществ низкоуглеродных источников энергии необходимо одновременно учитывать снижение эмиссии парниковых газов и уменьшение материальных потоков, возникающих в результате хозяйственной деятельности. Существующие методы оценки уделяют большее внимание выбросам в окружающую среду, в том числе парниковым газам, игнорируя материальные потоки.

Двинин и Даванков [4] установили, что оценка материальных потоков позволяет выявить прямую взаимосвязь между природной и экономической системами, поскольку природные ресурсы имеют рыночную стоимость, это позволяет более адекватно оценить эффективность различных низкоуглеродных источников энергии, в связи с чем вопросы, связанные с комплексным анализом низкоуглеродных источников энергии, становятся одним из основных факторов при оценке их конкурентоспособности.

Проблема заключается в том, что в настоящее время отсутствует комплексная оценка различных низкоуглеродных источников энергии, которая одновременно учитывает операционные затраты, необходимые для их работы, возможность снижения эмиссии парниковых газов и уменьшения материальных потоков в процессе эксплуатации. В результате отсутствуют обоснованные научные данные о перспективных низкоуглеродных источниках энергии, способных при наименьших затратах обеспечить наибольший эколого-экономический эффект. Для решения данной проблемы необходим особый методический инструментарий, который был разработан в результате проведенного исследования.

Цель исследования — проведение комплексной оценки различных по природе низкоуглеродных источников энергии на основе решения экономико-математической задачи выбора при многокритериальном анализе с использованием трех критериев: нормированной стоимости электроэнергии LCOE (Levelised Cost of Energy)/LEC (Levelized Energy Cost), удельной величины эмиссии углекислого газа и материальной интенсивности, выраженной в суммарных МІ-числах (Material Input).

Гипотеза исследования — введение в комплексную оценку низкоуглеродных источников энергии критерия материаль-

ной интенсивности, выраженного в МІ-числах, позволит выявить низкоуглеродные источники энергии с наибольшим эколого-экономическим эффектом.

Структура исследования. В разделе «Обзор литературы» представлен анализ теоретических и эмпирических исследований по вопросу оценки влияния низкоуглеродной энергетики на комплексное достижение целей устойчивого развития, реализация которых предполагает не только прекращение эмиссии углекислого газа, а также и уменьшение общего негативного влияния энергетики на окружающую среду при безусловном сохранении возможностей дальнейшего экономического развития. В разделе «Материалы и методы исследования» приведен разработанный методический инструментарий, основанный на решении экономико-математической задачи выбора при многокритериальном анализе, осуществлен обзор исследуемых низкоуглеродных источников энергии. В разделе «Полученные результаты» проанализирована и обобщена полученная информация о развитии низкоуглеродной энергетики в мире на 2023 г., выявлены низкоуглеродные источники энергии, развитие которых в настоящее время способно обеспечить наибольший эколого-экономический эффект. В разделе «Обсуждение результатов» приведено подтверждение гипотезы на основе верификации полученных результатов с исследованиями других авторов, определены ограничения исследования, приведены интересные данные, которые могут быть положены в основу дальнейших исследований. В разделе «Заключение» сделаны обобщающие выводы, определена теоретическая и практическая значимость представленной работы.

2. Обзор литературы

Guo [5] дает подробный обзор развития низкоуглеродной экономики в мире, рассматривает различных участников

и механизмы данного процесса в последние годы, непосредственно указывает, что низкоуглеродная экономика должна не только стабилизировать климатическую ситуацию, но и сформировать более устойчивую экономическую модель, решающую и иные природоохранные задачи.

Elizbarashvili et al. [6] исследуют сущность устойчивого развития и определение показателей, которые могли бы зафиксировать комплексное движение социо-эколого-экономических систем к его достижению. Отмечается трудность решения поставленной задачи, поскольку она отличается междисциплинарностью. Особое значение авторы придают наблюдениям за ландшафтами, их благополучное функционирование является индикатором сохранения биосферных материально-энергетических потоков.

Korhonen et al. [7] попытались систематизировать общие представления в рамках концепции циркулярной экономики. Проанализировав информацию, авторы пришли к выводу, что научно-исследовательское содержание концепции циркулярной экономики к настоящему времени поверхностно. Они выделили шесть проблем, которые должна решить циркулярная экономика, включая переход к низкоуглеродному развитию, указали на общую цель — устойчивое развитие, придя к заключению о необходимости дальнейших научных исследований в данном направлении.

Chen et al. [8] проанализировали успехи в области низкоуглеродного перехода экономики целым рядом стран и регионов. Опираясь на данные о первичном производстве и анализе уровня ночной освещенности, ими было установлено, что Франция и Великобритания с 2019 г. добились определенных успехов в низкоуглеродной трансформации собственных экономик.

Ali & Anufriev [9] проводят анализ существующей взаимосвязи между экономическим ростом и уровнем использования возобновляемых и традиционных источников энергии, использующих ископаемое топливо, в 16 развивающихся странах. Авторами выявлено, что переход на возобновляемые источники энергии безусловно способствует общему оздоровлению окружающей среды как в краткосрочном, так и долгосрочном периоде, и при этом обеспечивает устойчивый экономический рост.

Стародубец и др. [10] исследуют формирующийся международный механизм трансграничного углеродного регулирования, оценивает его возможное влияние на экономику Свердловской области. В статье указано, что, согласно Парижскому соглашению, установление объемов эмиссии углекислого газа, а также создание механизмов по достижению запланированных результатов является исключительной прерогативой самих стран. Одним из таких механизмов, стимулирующих переход к низкоуглеродным источникам энергии, является трансграничное углеродное регулирование.

В рассмотренных исследованиях авторами было выявлено, что низкоуглеродные источники энергии изначально должны решать комплексную задачу, не только стабилизировать цикл углерода. Это позволит остановить глобальные климатические изменения, обеспечить общее снижение негативного антропогенного воздействия на биосферу и создать более устойчивую модель экономического роста. Указанная проблема на основе национальных целей в настоящее время решается множеством стран, добившихся в области низкоуглеродного перехода определенных успехов.

Proskuryakova [11] анализирует вклад низкоуглеродной энергетики в стабилизацию планетарной климати-

ческой системы, предложив показатели для оценки их эколого-экономической эффективности: потребность в материалах для низкоуглеродных источников энергии (TMR), нормированную стоимость электроэнергии и эмиссию углекислого газа.

Следует отметить наблюдаемое здесь отличие показателя TMR (Total Material Requirement) «Общее материальное потребление» с предлагаемым авторами суммарными МП-числами. TMR позволяет отображать материальное потребление на уровне национальной экономики, дает общую информацию относительно ВВП (валового внутреннего продукта), однако с его помощью затруднительно провести эколого-экономическую оценку отдельных отраслей экономики, таких как низкоуглеродная энергетика, здесь более уместен показатель суммарных МП-чисел. Более подробно обоснование его использования приведено в разделе «Материалы и методы исследования».

Fan et al. [12] исследовали использование технологий улавливания и поглощения углекислого газа на угольных электростанциях Китая. Приводятся данные, что решающим фактором их применения практически всегда является нормированная стоимость электроэнергии, именно ее величина определяет успех либо не успех в практической деятельности.

Porfiriev & Shirov [13], используя методы экономико-математического моделирования с использованием нейросетей, сформировали прогноз эмиссии CO₂ российской энергетикой. При этом учитывалось, что достижение «углеродной нейтральности» может идти с помощью различных низкоуглеродных источников энергии, а их выбор в итоге будет влиять на прогнозируемые величины.

Мальцев & Султанов [14] показывают, что уровень использования природных ресурсов экономикой являет-

ся важнейшим фактором, отвечающим за общую социо-эколого-экономическую сбалансированность системы, его необходимо обязательно учитывать в дальнейших исследованиях.

Ковалева & Столпникова [15] делают вывод, что именно изменение скорости и общего направления природных процессов, материально-энергетических потоков биосферы в результате использования природных ресурсов в хозяйственной деятельности ведет к нарастанию неустойчивости природных экосистем.

Gorshkov & Makarieva [3] на основе теоретических и эмпирических данных утверждают о продолжительной стабильности существования биосферы благодаря сформировавшимся устойчивым материально-энергетическим потокам, они начали испытывать диспропорции лишь с начала эпохи промышленной революции, в особенности со времени активного использования ископаемых источников энергии.

Проблема комплексной оценки низкоуглеродных источников энергии в последние годы привлекает многие исследовательские группы. Часто комплексная оценка затрагивает отдельные сектора экономики.

Akimoto et al. [16] для достижения целей «углеродной нейтральности» транспортного сектора оценили возможность использования не только электричества, но и водорода, синтетических видов топлива, биоэнергии, а также технологий удаления углекислого газа при использовании нефтяного топлива. Основной их вывод: для изучения перспективных стратегий достижения «углеродной нейтральности» обязательно требуется всесторонний анализ, который, кроме сокращения углекислого газа, должен дополнительно учитывать возможности энергосбережения и дальнейшего развития автомобилестроения.

Wu [17] рассматривает проблематику для сферы услуг, связанной с гостиницами. Он делает вывод о необходимости при сооружении отелей учитывать возможность сокращения углекислого газа, а также сокращение потребления энергии и уменьшение общих выбросов в окружающую среду. Кроме того, экологические выгоды должны соотноситься с экономической оценкой затрат и выгод, выраженной чистой приведенной стоимостью услуг.

Saraji & Streimikiene [18] показывают, что переход на низкоуглеродные источники энергии в европейских странах в 2013–2023 гг. вызвал множество разноплановых проблем, возможность решения которых необходимо учитывать ответственным лицам. При внедрении таких источников нужно комплексно учитывать снижение эмиссии парниковых газов, стоимость вырабатываемой энергии и общие вопросы природопользования. Авторы отобрали существующие взаимосвязи установленных проблем, далее провели их анализ.

Следует отметить, что существуют исследования, которые можно отнести к тематическим, поскольку они затрагивают тот или иной сектор экономики, как, например, транспорт у Akimoto et al. [16], гостиничный сектор у Wu [17], или направлены на исследования проблем низкоуглеродного перехода энергетики отдельных стран и регионов, как у Saraji & Streimikiene [18]. В них указывается необходимость более комплексного анализа всех существующих эколого-экономических факторов, однако предлагаемые решения по практическому осуществлению остаются узконаправленными, применимыми для конкретного сектора экономики, либо региональной ситуации.

Проведенный обзор позволяет сделать вывод, что в современных исследованиях указывается необходимость ком-

плексной эколого-экономической оценки низкоуглеродной энергетики. Для ее проведения предлагается использовать критерий нормированной стоимости электроэнергии, причем Filimonova et al. [19] указывают на необходимость адаптации этого критерия к низкоуглеродным источникам энергии.

Для более полной оценки воздействия на окружающую среду предлагается учитывать потребление ими материальных ресурсов при сооружении и эксплуатации (Saurat & Ritthoff [21]), не забывая основную цель перехода к низкоуглеродной энергетике — достижение «углеродной нейтральности».

3. Материалы и методы

3.1. Методика комплексной эколого-экономической оценки низкоуглеродных источников энергии

Разработанный методический инструментарий основан на решении экономико-математической задачи выбора при многокритериальном анализе. Его особенность — применимость для низкоуглеродных источников энергии различной природы и комплексное использование следующих критериев: нормированная стоимость электроэнергии LCOE/LEC (долл./кВт·ч), удельная эмиссия углекислого газа (кг/кВт·ч), суммарные МП-числа (кг/кВт·ч).

Нормированная стоимость электроэнергии — широко используемый в мировой практике критерий, позволяющий осуществлять сравнительный анализ экономической эффективности производства электроэнергии (см. Sklar-Chik et al. [20]).

Он представляет величину расчетной себестоимости производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла исследуемой электростанции. В нашем исследовании этот критерий был несколько модифи-

цирован за счет включения в расчетную формулу необходимых затрат на внедрение технологий улавливания и хранения углекислого газа, что необходимо для дальнейшего анализа традиционных низкоуглеродных источников энергии, использующих ископаемое топливо:

$$\frac{LCOE}{LEC_{\text{низкоугл.}}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + I_{yt} + O_t + O_{yt} + T_t + T_{yt}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (1)$$

где $LCOE/LEC_{\text{низкоугл.}}$ — нормированная стоимость электроэнергии при использовании технологий по улавливанию и хранению углекислого газа; I_t — инвестиционные затраты на производство электроэнергии (ежегодные); I_{yt} — инвестиционные затраты на улавливание углекислого газа (ежегодные); O_t — операционные затраты на производство электроэнергии (ежегодные); O_{yt} — операционные затраты на улавливание углекислого газа (ежегодные); T_t — затраты на топливо (ежегодные); T_{yt} — энергетические затраты на улавливание углекислого газа (ежегодные); E_t — объем производства электроэнергии; r — ставка дисконтирования; n — жизненный цикл электростанции.

Оценка углеродной эффективности осуществлялась на основе данных Межправительственной группы экспертов по изменению климата, а также применялись собственные исследования авторов, осуществленные для низкоуглеродной энергетики [4].

Методологический подход заключается в объединении информации об экономической деятельности, связанной с эмиссией углекислого газа, с коэффициентами, определяющими объемы выбросов на единицу продукции или услуги. Установленные коэффициенты

выбросов зависят от величины содержания в топливе углерода, а также от особенностей используемых технологий при его сжигании. Формула для расчета имеет следующий вид:

$$S = B_t k_f, \quad (2)$$

где S — объем эмиссии углекислого газа; B_t — объем углеродосодержащего топлива использованного при данной технологии производства электроэнергии; k_f — установленный коэффициент эмиссии углекислого газа для данного вида топлива.

Материальная интенсивность низкоуглеродных источников энергии определялась с помощью суммарных МІ-чисел. Их расчет базируется на «Методологии затрат материалов на единицу услуги или полезного использования» (MIPS) [21]. Указанная методология была создана Вуппертальским институтом климата и окружающей среды (Германия) и дает возможность выявить входящий материальный поток на единицу производимого продукта либо услуги.

Материальная интенсивность рассчитывалась для различных по природе низкоуглеродных источников энергии в величинах килограмм на киловатт в час (кг/кВт·ч). МІ-числа, предложенные Вуппертальским институтом климата и окружающей среды, используют несколько категорий материальных потоков: абиотические природные ресурсы, биологические ресурсы, почвенные ресурсы, атмосферный воздух, вода.

Подобная категоризация имеет смысл при оценке отдельных производств, однако избыточна при анализе отдельных отраслей экономики. Поэтому для оценки материальных потоков низкоуглеродной энергетики использовался авторский показатель суммарных МІ-чисел, основанный на модификации оригинальной методики, где было

осуществлено объединение всех материальных входов в единую величину. В дальнейшем это позволило соотнести материальную интенсивность с общим негативным влиянием на экосистемы и таким образом более комплексно оценить эколого-экономическое влияние низкоуглеродных источников энергии.

На основе трех приведенных критериев был сформирован методический инструментарий для комплексной оценки эколого-экономической эффективности низкоуглеродных источников энергии. Данный инструментарий основан на решении экономико-математической задачи выбора для различных низкоуглеродных источников энергии при многокритериальном анализе.

Ключевая его особенность в возможности применения одновременно для возобновляемых и традиционных источников энергии, использующих технологии улавливания и хранения углекислого газа. Это дало возможность выявить источники низкоуглеродной энергии, обладающие наибольшим эколого-экономическим эффектом, развитие которых позволит получить наибольший экологический эффект с наименьшими экономическими затратами.

3.2. Описание исследуемых низкоуглеродных источников энергии

В процессе исследования были рассмотрены следующие источники низкоуглеродной энергии: солнечные электростанции (СЭС), ветряные электростанции (ВЭС), гидроэлектростанции (ГЭС), энергоустановки, работающие на биотопливе, геотермальные электростанции (ГеоТЭС), атомные электростанции (АЭС), газовые электростанции с технологиями улавливания CO₂, угольные электростанции с технологиями улавливания CO₂.

3.2.1. Солнечные электростанции

Солнечные электростанции — энергетические системы, основанные на преобразовании солнечной энергии посредством фотоэлектрических модулей либо параболических концентраторов. Согласно данным международного энергетического агентства (МЭА), суммарная энергетическая мощность солнечных электростанций достигла в 2023 г. величины 1,42 ТВт, что является 16,6 % от общей мощности всех энергоустановок мира, составляющей на данный момент времени 8,51 ТВт¹.

Muniyandy & Dilli Babu [22] отмечают, что особенность функционирования солнечных энергоустановок, их зависимость от региона расположения и уровня инсоляции практически никогда не позволяет использовать установленную мощность в полной мере. Поэтому объем выработанной электроэнергии составил 1,42 трлн кВт·ч, достигая лишь 5,03 % от общего объема произведенной электроэнергии в мире, которая имеет величину в 28,23 трлн кВт·ч.

Следует отметить, что солнечная энергетика в последние годы испытывает очень быстрый рост. Только в период 2022–2023 гг. прирост установленной мощности составил 32 %, с 1,07 ТВт до 1,42 ТВт. В значительной степени ситуация объясняется быстрым уменьшением ее себестоимости благодаря внедрению технических инноваций, за последнее десятилетие она сократилась на 89 %, больше чем у каких-либо иных источников энергии. На данный момент времени усредненная величина ее нормированной стоимости электроэнергии составляет 0,058 долл./кВт·ч².

¹ EES EEAEC. World energy. Statistics. <https://www.eeseaec.org/energeticeskaa-statistika>

² Lazard's Levelized Cost of Energy (LCOE) analysis. Paris, France. <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus/>

Показатели материальной интенсивности солнечных энергетических установок, выраженные в МІ-числах, были выявлены Вуппертальским институтом климата и окружающей среды (Германия) [23]. Они преимущественно связаны с производством необходимых компонентов и эксплуатацией оборудования. Суммарное МІ-число СЭС, отражающее общую материальную интенсивность, — 5,051 кг/кВт·ч¹.

3.2.2. Ветряные электростанции

Ветряные электростанции — обычно одна или несколько установок, объединенных в единую сеть для производства электроэнергии. Huang et al. [24] приводят их подробный обзор. В зависимости от условий размещения ветроэлектростанции могут быть наземными, прибрежными или шельфовыми. В 2023 г. их мощность в мире достигла 1,02 ТВт, что составляет 11,9 % от суммарной мировой энергомощности.

Vivchar & Sigitov [25] указывают, что ветроэлектростанции испытывают схожие проблемы с солнечными электростанциями в плане постоянной и стабильной работы. Использование всей энергомощности будет определяться природными условиями размещения. Другой важный момент — мощные ветряные энергоустановки получили чуть более раннее распространение, в сравнении с крупными солнечными электростанциями.

В настоящее время объем выработки ими электроэнергии составляет 1,97 трлн кВт·ч, достигая 6,97 % от мирового производства электроэнергии. Ее рост в последние годы несколько меньше, чем у солнечных установок, хотя и составляет значительную величину,

в 2022–2023 гг. он был равен 12,8 %. По всей видимости, ситуация объясняется меньшим падением себестоимости в последнее десятилетие в сравнении с солнечной энергией, она сократилась на 70 %, в отличие от 89 % у солнечной энергии.

Необходимо особо отметить, что показатель нормированной стоимости ветряной энергетики до настоящего времени лучше, чем у солнечной, составляет величину в 0,036 долл./кВт·ч. Материальная интенсивность, связанная с производством и эксплуатацией ветроустановок, также лучше, чем у солнечных источников энергии, на их производство затрачивается меньше водных ресурсов, в связи с чем суммарное МІ-число ВЭС — 0,938 долл./кВт·ч.

3.2.3. Гидроэлектростанции

Гидроэлектростанции используют энергию движения водных масс преимущественно на реках и к настоящему времени являются вполне традиционным энергоисточником. Гидроэлектростанции традиционно подразделяют на малые и большие, поскольку такая классификация существенно влияет на особенность их функционирования.

К малым ГЭС, согласно СНиПу², относят объекты, имеющие мощность менее 30 МВт. В 2023 г. общая энергомощность гидроэнергетики составила 1,41 ТВт, ее доля — 16,5 % от мирового энергобаланса. Bayazit [26] замечает, что условия ее работы в большинстве случаев гораздо более стабильны, чем у ветряных и солнечных источников энергии. Поэтому объем произведенной энергии от мировой доли составляет 15,3 %, ежегодно достигая 4,32 трлн кВт·ч.

Значительная часть крупных рек, расположенных в удобных географиче-

¹ Material intensity of materials, fuels, transport services, food. Wuppertal Institute. Germany. <https://wupperinst.org/en/topics/resources/calculating-resources>

² СНиП 2.06.01–86 «Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования». Введ. 1987-07-01. М. : ЦИТП, 1987. 65 с.

ских условиях, уже имеет на своих руслах плотины, а расположение их на других территориях требует значительных капитальных затрат, как указывает Berga [27]. Исходя из этого, прирост энерго мощностей гидроэнергетики в последние годы относительно небольшой, в основном он происходит за счет развития малой гидроэнергетики. В 2022–2023 гг. его величина составила скромные 0,86 %. Одним из достоинств гидроэнергетики является низкая величина нормированной стоимости — 0,047 долл./кВт·ч.¹ Она, несмотря на высокие капитальные затраты, в дальнейшем достигается низкими затратами на операционную деятельность.

Следует заметить, в отличие от солнечной и ветряной энергии, себестоимость гидроэнергии выросла за последнее десятилетие на 27 %. Такой рост обусловлен возросшими затратами строительства, что в свою очередь объясняется размещением новых проектов во все более сложных местах. Материальная интенсивность гидроэлектростанций установлена на основе собственных более ранних исследований [28]. В результате было выявлено, она достигает средней величины 10964,8 кг/кВт·ч. Высокие значения объясняются существенным расходом ресурсов при сооружении капитальных гидроэнергетических объектов, а также очень значительным воздействием на гидроресурсы в регионе.

3.2.4. Биоэнергетика

Биоэнергетика — установки, использующие биомассу при выработке электроэнергии (БиоЭС). При ее функционировании, в отличие от указанных выше возобновляемых энергоисточников, существует некоторая эмиссия CO₂ — 0,37 кг/кВт·ч [4]. Величины эмиссии

меньше, чем у традиционных источников энергии, использующих ископаемые ресурсы, поэтому энергоустановки, работающие на биотопливе, принято относить к низкоуглеродным источникам энергии, как указано в публикации Сорокина [29].

Несмотря на прогнозы десятилетней давности о быстром развитии биоэнергетики, из-за ряда причин, прежде всего связанных с необходимостью перевода сельскохозяйственных угодий с производства продуктов питания на производство топлива, к настоящему времени биоэнергетика широкого распространения не получила.

Существует перспективная возможность развития биоэнергетики в рамках циркулярной экономики, где она может получить гораздо большее распространение в рамках утилизации биогаза, о чем говорится в исследовании Магарил и др. [30]. Ее совокупная мировая энерго мощност в 2023 г. — 150,26 ГВт, это всего 1,76 % в мировом энергобалансе. Благодаря возможности стабильной круглогодичной работы величина выработки от мирового производства электроэнергии значительно выше — 3,88 %.

Нормированная стоимость электроэнергии у биоустановок является относительно небольшой, Ramesh et al. [31] оценили ее величину в 0,043 долл./кВт·ч. Себестоимость электроэнергии за прошедшее десятилетие уменьшилась на 17,6 %, что значительно меньше, чем у солнечной и ветровой энергии [32]. Удельная материальная интенсивность БиоЭС в суммарных MI-числах близка к солнечной энергетике — 4,99 кг/кВт·ч, также была установлена на основе собственных более ранних исследований [4].

3.2.5. Геотермальные электростанции

Геотермальные электростанции вырабатывают электрическую энергию на основе использования тепло-

¹ EIA. Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2022. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf

вой энергии из подземных источников. Kabeyi [33] дает подробный обзор данному источнику энергии и особо отмечает, что в настоящее время он имеет ограниченную область применения на территориях высокой геологической активности. Исходя из указанных особенностей, суммарная мощность на 2023 г. была небольшой — 14,84 ГВт, составляя всего 0,17 % от мировой энергомощности, прирост в 2022–2023 гг. был лишь на 1,44 %. Благодаря возможностям стабильной ежедневной работы доля в мировом производстве электроэнергии имеет несколько большую величину — 0,39 %, производя ежегодно 67 млрд кВт·ч.

Геотермальные электростанции имеют относительно высокую удельную величину материальной интенсивности в суммарных МІ-числах — 44,61 кг/кВт·ч. Такая величина, как и у гидроэлектростанций, объясняется высокими материальными затратами при строительстве капитальных объектов и расходом воды в процессе эксплуатации. Указанная ситуация обуславливает величину нормированной стоимости электроэнергии несколько выше, чем у других возобновляемых источников энергии, — 0,084 долл./кВт·ч. Относительно гидроэнергетики при схожих режимах работы она выше практически в два раза.

Laveet et al. [34] делают заключение, что гидроэлектростанции, как правило, при высоких капитальных затратах имеют значительно большую суммарную мощность и жизненный цикл проекта. Себестоимость геотермальной энергии в последнее десятилетие оставалась стабильной, сократившись на небольшую величину в 6,5 %.

3.2.6. Ядерная энергетика

Ядерная энергетика основана на использовании энергии расщепления атомных ядер в активной зоне реакто-

ров атомных электростанций. В 2023 г. в мире функционировало 440 ядерных реакторов, обладающих мощностью в 396,27 ГВт¹. Величина составляет 4,65 % от мировых энергомощностей.

Vossard [35], оценивая преимущество атомных реакторов, выделяет стабильный ежедневный и круглогодичный режим работы, в связи с чем доля атомной энергетики в общей выработке электроэнергии существенно выше — 2,66 трлн кВт·ч, достигая 9,4 % от мирового производства. В 2022–2023 гг. произошел некоторый прирост энергомощностей, однако он был небольшим и составил 0,57 %. По всей видимости, ситуация объясняется тем, что себестоимость ядерной энергии за последнее десятилетие выросла на 26 %, ее показатель нормированной стоимости электроэнергии составляет 0,155 долл./кВт·ч. Это существенно отличает ее от большинства других источников низкоуглеродной энергии, где, наоборот, отмечалось значительное уменьшение себестоимости.

Основная причина роста себестоимости ядерной энергетики — значительно возросшие требования к экологической безопасности, которые стали предъявлять к строящимся объектам после аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. Указанные меры потребовали увеличения капитальных затрат, что в долгосрочной перспективе сказывается на конкурентоспособности ядерной энергетики относительно других источников низкоуглеродной энергии, о чем делается вывод в работе Krumins & Klavins [36].

Высокая капиталоемкость объектов ядерной энергетики, перемещение огромных масс вещества при добыче, использовании и утилизации ядерного то-

¹ World Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>

плива обуславливают высокую величину удельного материального потребления. В суммарных МП-числах она составляет 79,815 кг/кВт·ч¹.

Sfez et al. [37] объясняют данную ситуацию тем, что ядерная энергетика обладает очень высокой водоемкостью так же, как и гидро- и геотермальные источники энергии. Важная особенность ядерной энергетики при ее деятельности, как и при работе возобновляемых источников энергии, наблюдается полное отсутствие эмиссии углекислого газа.

3.2.7. Угольные и газовые тепловые электростанции

Угольные и газовые тепловые электростанции (ТЭС), использующие современные технологии улавливания углерода (Carbon capture, use, and storage (CCUS)), основаны на сжигании традиционного ископаемого топлива, однако с применением инновационных технологий по нейтрализации углекислого газа. Технологии начали практически использоваться лишь в последние годы [38], и к настоящему времени установленная мощность таких энергообъектов крайне невелика — 3 ГВт угольные и 0,7 ГВт газовые электростанции². Это всего 0,043 % от мировых энерго мощностей.

Общее производство электроэнергии пока также невелико и составляет 14 млрд кВт·ч (угольные ТЭС) и 4 млрд кВт·ч (газовые ТЭС), 0,064 % от мировой выработки. Международное энергетическое агентство прогнозирует их существенный рост в будущем, к 2035 г. суммарная мощность может достичь 1,23 ТВт, составив 14,5 % от мировой

доли энергоустановок, т. е. прирост более чем в 332 раза³.

Особо большое значение технологии улавливания углекислого газа могут иметь в реализации стратегий перехода к «углеродной нейтральности» для ряда экономик, где в энергетике сейчас доминирует природный газ и уголь, в России (47,7 % природный газ) и Китае (60,7 % уголь).

Pelissari et al. [39] делают вывод, что в настоящее время технологические способы улавливания CO₂ позволяют достигать эффективности более 90 %, однако процесс неизбежно сказывается на себестоимости производимой электроэнергии. Усредненные цифры для современных электростанций с подобными технологиями позволили выявить, что остаточная эмиссия для газовых электростанций составляет 0,049 кгCO₂/кВт·ч, для угольных электростанций — 0,082 кгCO₂/кВт·ч.

Нормированная стоимость электроэнергетики у подобных электростанций довольно высокая, у газовых — 0,137 долл./кВт·ч, угольных — 0,087 долл./кВт·ч. Может показаться неожиданным, что у газовых величина оказалась существенно выше. Причина такого явления в том, что технологии по улавливанию углекислого газа на угольных электростанциях начали разрабатываться раньше и отработаны гораздо лучше, в будущем возможно изменение ситуации [40].

За прошедшее десятилетие в газовой и угольной энергетике, использующей технологии улавливания углекислого газа, произошло небольшое сокращение себестоимости на 33 и 2 %, соответственно. Удельная материальная интенсивность, выраженная в суммарных МП-числах для данных электростанций, схожа, в основном связана с исполь-

¹ <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/59294/1/485276682.pdf>

² IEA. The role of CCUS in low-carbon power systems. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems/how-carbon-capture-technologies-support-the-power-transition>

³ IEA. It is time for CCUS to deliver. <https://www.iea.org/commentaries/it-is-time-for-ccus-to-deliver>

зованием водных ресурсов и составляет следующие величины: газовые электростанции — 80,657 кг/кВт·ч, угольные — 81,88 кг/кВт·ч.

4. Результаты

Таким образом, в 2023 г. доля мировых энерго мощностей, относящихся к низкоуглеродным, стала преобладать, достигнув величины в 4,41 ТВт, составив в общемировой структуре 51,8 %, представлено на рис. 1.

Однако доминирование среди них возобновляемых источников энергии, до настоящего времени сильно зависящих от особенностей технологий и природных условий, привело к тому, что существующие энерго мощности зачастую не могут использоваться в полной мере. Поэтому объем производства электроэнергии составил 11,12 трлн кВт·ч, в общемировой структуре составляя лишь 39,4 %, представлено на рис. 2.

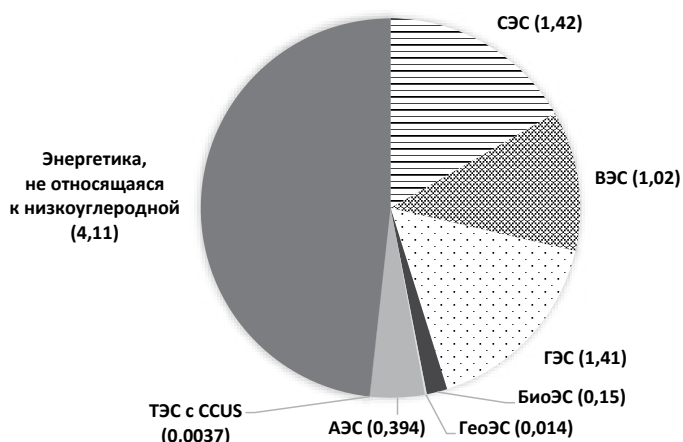


Рис. 1. Мировые энерго мощности низкоуглеродных источников энергии, ТВт

Figure 1. World energy capacity of low-carbon energy sources, TW

Источник: составлено авторами.

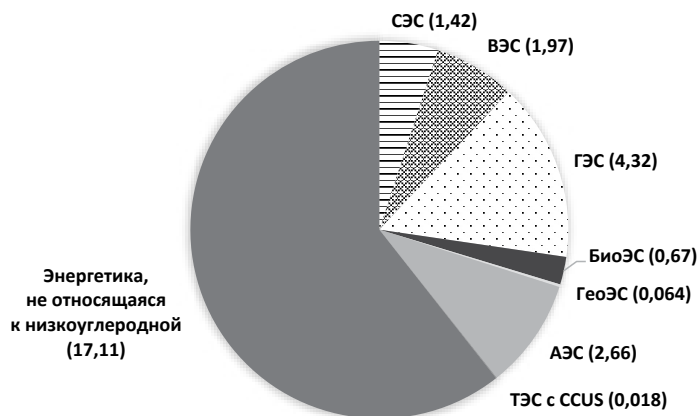


Рис. 2. Мировое производство электроэнергии низкоуглеродными источниками энергии, трлн кВт·ч

Figure 2. World electricity production from low-carbon energy sources, trillion kWh

Источник: составлено авторами.

На основе собранной информации была сформирована табл. 1 с целью проведения многокритериального анализа.

Поскольку приведенные параметры обладают различной размерностью, изначально они были приведены к безразмерному виду. Для этой цели параметры проранжированы, ранжирование осуществлялось по шкале от 1 до 8, где 8 определено как наиболее предпочтительная величина.

Итоговый показатель для различных источников низкоуглеродной энергии определен как сумма балльных оценок всех показателей по следующей формуле:

$$R_i = \sum_{i=1}^n E_i S_i,$$
 (3)

где R_i — итоговый показатель для i -го источника низкоуглеродной энергии; E_i — балльная оценка для i -го параметра;

S_i — уровень значимости i -го параметра; n — количество параметров.

При этом балльная оценка E_i определена по формуле:

$$E_i = \frac{P_i}{P_M},$$
 (4)

где P_i — значение i -го параметра для конкретного источника низкоуглеродной энергии; P_M — максимально возможное значение i -го параметра. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Проведенный многокритериальный анализ позволил выявить, что наиболее высокой итоговой оценкой по всем трем оцениваемым параметрам (LCOE/LEC, долл./кВт·ч; удельной величины эмиссии CO₂, кг/кВт·ч; суммарных MI-чисел, кг/кВт·ч) обладают ветряные электростанции, они получили максимально возможный балл по всем параметрам.

Таблица 1. Эколого-экономические параметры, характеризующие низкоуглеродные источники энергии

Table 1. Ecological and economic parameters characterizing low-carbon energy sources

Тип низкоуглеродного источника энергии	LCOE/LCE, долл./ кВт·ч	Суммарное MI-число, кг/кВт·ч	Удельная эмиссия углекислого газа, кг/кВт·ч
Ветряные электростанции	0,036	0,938	0
Солнечные электростанции	0,058	5,051	0
Гидроэлектростанции	0,047	10964,8	0
Биоэнергетика	0,043	4,99	0,37
Атомные электростанции	0,155	79,815	0
Геотермальные электростанции	0,084	44,609	0
Газовые электростанции с технологиями улавливания CO ₂	0,137	80,657	0,049
Угольные электростанции с технологиями улавливания CO ₂	0,083	81,88	0,082

Источник: составлено авторами.

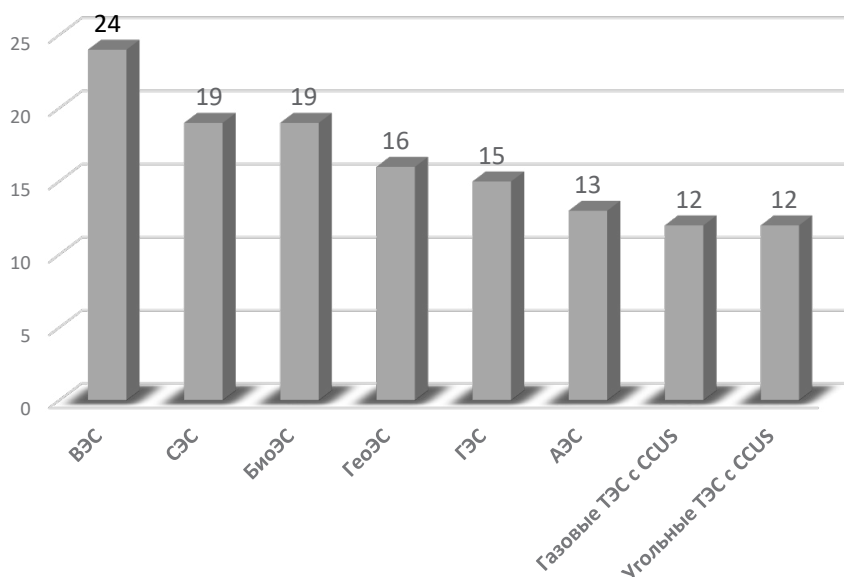


Рис. 3. Комплексная эколого-экономическая оценка низкоуглеродных источников энергии, в баллах

Figure 3. Comprehensive environmental and economic assessment of low-carbon energy sources, in points

Источник: составлено авторами.

Солнечная и биоэнергетика набрали одинаковую величину в 19 баллов и разделили второе место. Третье и четвертое место заняли геотермальные и гидроэлектростанции, получив по 16 и 15 баллов, соответственно.

Атомные электростанции в комплексной эколого-экономической оценке немного опередили газовые и угольные с технологиями улавливания углекислого газа, по всей видимости, результат связан с полным отсутствием его эмиссии в процессе деятельности. Однако серьезным фактором, сказывающимся на их итоговой оценке, является высокая величина нормированной стоимости электроэнергии, возросшая за последние годы.

Некоторым неожиданным выявленным фактом следует считать, что газовые и угольные электростанции, использующие технологии улавливания углекислого газа, получили одинаковые балльные оценки, разделив совместно шестое место.

5. Обсуждение результатов

Исследование позволило определить низкоуглеродные источники энергии, обладающие в настоящее время наибольшей эколого-экономической эффективностью, наивысшую оценку в 24 балла по всем трем оцениваемым критериям получила ветряная энергетика, солнечная энергетика получила всего лишь 19 баллов, что может показаться неожиданным.

Torres & Petrakopoulou [41] при сравнении солнечных энергоустановок с ветряными на основе комплексного анализа жизненного цикла было установлено, что ветроустановки всегда являются более экологическими эффективными. Использование редких материалов при строительстве некоторых фотоэлектрических систем делает их более эффективными только относительно угольных электростанций.

Xie [42] приводит комплексный анализ воздействия на климатическую си-

стему тепловых, ветряных и гидроэлектростанций. Общий вывод, сделанный в работе аналогичный: ветряная энергетика получила наивысшую оценку, гидроэнергетика значительно отстает по эффективности, а тепловая энергетика наиболее проблематична.

Таким образом, наши результаты в целом согласуются с данными от других исследовательских групп, использовавших иные методики работы. Можно считать подтвержденной нашу гипотезу, введение в комплексную оценку критерия материальной интенсивности в МП-числах позволяет адекватно оценивать общее негативное воздействие на окружающую среду, а значит, и выявлять низкоуглеродные источники энергии с наибольшим эколого-экономическим эффектом.

Ограниченность проведенного исследования заключается в актуальности полученных результатов для некоторого конкретного периода времени, поскольку дальнейшие технологические инновации способны изменить любой из трех критериев, в итоге эколого-экономическая эффективность анализируемых низкоуглеродных источников энергии неизбежно изменится.

Другой важный момент: если критерии нормированной стоимости электроэнергии и удельной эмиссии углекислого газа в настоящий момент собираются и анализируются многими организациями, данные о материальной интенсивности представлены пока у отдельных исследовательских групп, по мере дальнейших исследований они могут корректироваться.

В рамках обсуждения полученных результатов следует особо отметить, что в настоящее время при изучении эколого-экономической эффективности низкоуглеродных источников энергии к ним следует относить не только возобновляемые источники, но и использу-

ющие ископаемое углеродосодержащее топливо с технологиями по улавливанию углекислого газа. Инновационные установки по консервации углерода, применяемые некоторыми электростанциями, работающими на угольном и газовом топливе, позволяют снизить эмиссию в выбросах углекислого газа более чем на 90 %.

Однако подобные технологии являются достаточно энергозатратными, в итоге указанная ситуация приводит к увеличению нормированной стоимости электроэнергии, делая такие энергетические источники менее конкурентоспособными. Увеличение усилий и средств, направляемых в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), по совершенствованию данных технологий способно несколько исправить данную ситуацию, что имеет огромное значение для российской энергетики с преобладающим газовым топливом в энергобалансе.

В последнее десятилетие нормированная стоимость электроэнергии газовых и угольных электростанций с технологиями улавливания углекислого газа снизилась на небольшую величину (2 и 33 % соответственно) относительно ветровой и солнечной энергии (70 и 89 %). Ситуация, видимо, объясняется колоссальными вложениями в мире в исследования по технологическому удешевлению возобновляемых источников энергии, в то время как вложения в НИОКР по изучению возможностей превращения традиционных источников энергии в низкоуглеродные были существенно меньше, в особенности в установки, работающие на газовом топливе.

При их существенном росте можно спрогнозировать значительное увеличение экономической эффективности данных источников энергии, что содер-жится и в прогнозе международного

энергетического агентства, их технологический потенциал по удешевлению поглощения углекислого газа в полной мере не использован. Ядерная энергетика как источник низкоуглеродной энергии имеет более лучшую эколого-экономическую эффективность в сравнении с угольными и газовыми электростанциями с технологиями улавливания углекислого газа, однако в последние годы у нее выросла нормированная стоимость электроэнергии, увеличившись за десятилетие с 0,123 долл./кВт·ч до 0,155 долл./кВт·ч.

Данный факт неизбежно будет сказываться на дальнейшей конкурентоспособности ядерной энергетике относительно иных источников низкоуглеродной энергии, для ее улучшения также потребуются увеличение НИОКР с перспективной целью снизить себестоимость электроэнергии при безусловном сохранении всех существующих мер экологической безопасности.

Исследование позволило установить интересный факт: общие энергопотребности низкоуглеродных энергии в 2023 г. стали доминирующими в мире, достигнув величины в 51,8 %, а доля вырабатываемой энергии составляет только 39,4 %, т. е. меньше в 1,31 раза. Данная ситуация объясняется существующими технологическими и природными проблемами возобновляемых источников энергии, не способных в полной мере реализовать собственную установленную мощность. Особенно велико расхождение у солнечной энергетики, чья мощность, достигая 16,6 % от общемировой, позволяет вырабатывать лишь 5,03 % мировой энергии. В то время как у ядерной энергетике с 4,65 % от мировой энергопотребности, доля вырабатываемой электроэнергии составляет 9,4 %.

Установленный факт означает, что традиционные источники энергии рабо-

тают в гораздо более стабильном режиме и в меньшей степени зависят от окружающих природных факторов. В дальнейших исследованиях предполагается придать значение указанному явлению и предложить специальный коэффициент, позволяющий учитывать в многокритериальном анализе стабильность работы и возможность более полного использования установленной энергопотребности для различных низкоуглеродных источников энергии.

Другой важный фактор: переход к низкоуглеродной энергетике должен вести не только к сокращению эмиссии углекислого газа и достижению «углеродной нейтральности», но и к общему улучшению состояния окружающей среды, остановке глобального биосферного кризиса. Это возможно при существенном уменьшении биосферных материальных потоков, используемых энергетикой, поскольку общий перенос вещества одной электроэнергетической отраслью экономики России в настоящее время достигает 2 млрд тонн, что в 6,5 раз больше речного стока российских рек (300 млн тонн) и сопоставимо с речным стоком твердых веществ реками всей Земли (2,5–5 млрд тонн) [4]. Поэтому для полной и адекватной оценки эколого-экономической эффективности низкоуглеродных источников энергии, необходимо проведение обязательного анализа влияния на существующие биосферные потоки.

Использование разработанного методического инструментария в некоторых случаях уже позволяет получать неожиданные результаты, так, в частности, было выявлено, что газовые и угольные электростанции, использующие технологии улавливания углекислого газа, в настоящее время обладают одинаковым уровнем эколого-экономической эффективности.

6. Заключение

Поставленная цель исследования была достигнута, проведенный многокритериальный анализ позволил выявить, что наибольшей эколого-экономической эффективностью обладают ветряные электростанции, у них наименьшая величина LCOE/LEC — 0,036 долл./кВт·ч и суммарного МІ-числа — 0,938 кг/кВт·ч, а выбросы углекислого газа полностью отсутствуют.

Немного им уступают в показателе нормированной стоимости электроэнергии солнечные и биоэлектростанции, величина их материальной интенсивности, выраженная в суммарных МІ-числах, хуже, соответственно, в 5,38 и 5,31 раз. При производстве солнечных панелей и подготовке биотоплива биосферные материально-энергетические потоки трансформируются в большей степени.

Геотермальные и гидроэлектростанции обладают низкой нормированной стоимостью электроэнергии и высокими величинами материальной интенсивности. Причина — высокие капитальные затраты и изменения водного режима на прилегающих территориях, сказывающиеся на состоянии окружающей природной среды.

Ядерная энергетика как источник низкоуглеродной энергии занимает промежуточное положение между возобновляемыми и традиционными источниками энергии. Ее комплексная эколого-экономическая эффективность выше, чем у газовых и угольных электростанций, использующих технологии улавливания CO₂. Ядерную энергетику и возобновляемую объединяет практически полное отсутствие эмиссии углекислого газа, факт, имеющий

важное значение при переходе энергетики к «углеродной нейтральности». Однако необходимо отметить довольно высокую себестоимость электроэнергии новых АЭС. Из-за возросших требований к экологической безопасности она увеличивалась последние годы, достигнув к настоящему моменту величины в 0,155 долл./кВт·ч.

У иных современных источников энергии, использующих ископаемое топливо и применяющих технологии улавливания углекислого газа, произошло некоторое снижение себестоимости, хотя и не очень существенное. В качестве неожиданного факта было выявлено, что, несмотря на изначально большую углеродную эффективность газовых электростанций по сравнению с угольными (в 1,81 раза) и примерно равную удельную материальную интенсивность, благодаря большим затратам на утилизацию углекислого газа, они имеют одинаковую эколого-экономическую эффективность.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании необходимости комплексной оценки низкоуглеродных источников энергии с целью выявления среди них эффективно снижающих эмиссию парниковых газов при наименьших затратах и одновременно уменьшающих нарушенность естественных материальных биосферных потоков в процессе хозяйственной деятельности.

С практической точки зрения полученные результаты позволят при принятии решений определить наиболее перспективные низкоуглеродные источники энергии, первоочередное развитие которых обеспечит достижение «углеродной нейтральности» с наибольшей эколого-экономической эффективностью.

Список использованных источников

1. Saleh H., Hassan A. The challenges of sustainable energy transition: A focus on renewable energy // Applied Chemical Engineering. 2024. Vol. 7, No. 2. 2084. <https://doi.org/10.59429/ace.v7i2.2084>

2. Dorninger C., Abson D., Fischer J., Wehrden H. Assessing sustainable biophysical human–nature connectedness at regional scales // *Environmental Research Letters*. 2017. Vol. 12. 055001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa68a5>
3. Gorshkov V. G., Makarieva A. M. Key ecological parameters of immotile versus locomotive life // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2020. Vol. 5, No. 1. Pp. 1–18. <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-1-1>
4. Двинин Д. Ю., Даванков А. Ю. Влияние альтернативных источников энергии на социо-эколого-экономическую сбалансированность регионов. Челябинск: ЧелГУ, 2022. 126 с. <https://doi.org/10.47475/9785727118245>
5. Guo H. Case study analysis of low-carbon economy // *Advances in Economics Management and Political Sciences*. 2023. Vol. 63. Pp. 249–255. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/63/20231431>
6. Elizbarashvili N., Meladze G., Yeghyan M., Elizbarashvili R. Geographical indicators of sustainable development and assessment of the impact on the environment // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 381. 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012022>
7. Korhonen J., Honkasalo A., Seppala J. Circular Economy: The Concept and its Limitations // *Ecological Economics*. 2018. Vol. 143. Pp. 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
8. Chen J., Gao M., Cheng S., Xu Y., Song M., Liu Y., Hou W., Wang S. Evaluation and drivers of global low-carbon economies based on satellite data // *Humanities and Social Sciences Communications*. 2022. Vol. 9. 153. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01171-y>
9. Ali E. B., Anufriev V. P. Revisiting the energy consumption, economic growth and the environmental Kuznets curve in developing countries // *Economy of Regions*. 2023. Vol. 19, No. 1. Pp. 75–84. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-1-6>
10. Стародубец Н. В., Грищенко Ю. О., Белик И. С., Никулина Н. Л. Экономическая оценка последствий введения трансграничного углеродного регулирования для регионально-го промышленного комплекса (на примере Свердловской области) // *Journal of Applied Economic Research*. 2022. Т. 21, № 4. С. 708–733. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2022.21.4.025>
11. Proskuryakova L. The Contribution of Low-Carbon Energy Technologies to Climate Resilience // *Climate*. 2023. Vol. 11, Issue 12. 231. <https://doi.org/10.3390/cli11120231>
12. Fan J., Wei S., Yang L., Wang H., Zhong P., Zhang X. Comparison of the LCOE between coal-fired power plants with CCS and main low-carbon generation technologies: Evidence from China // *Energy*. 2019. Vol. 176. Pp. 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.003>
13. Porfiriev B. N., Shirov A. A. Strategies for Socioeconomic Development with Low Greenhouse Gas Emissions: Scenarios and Realities for Russia // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2022. Vol. 92, No. 3. Pp. 230–238. <https://doi.org/10.1134/s1019331622030030>
14. Мальцев Ю. Г., Султанов Б. Р. Исследование социо-эколого-экономической сбалансированности регионов РФ // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2022. № 6–1. С. 110–115. <https://doi.org/10.17513/vaael.2253>
15. Ковалева Н. О., Столпникова Е. М. Экология: жизнь в «неустойчивой биосфере» // *История и современность*. 2022. № 4. С. 58–80. <https://doi.org/10.30884/iis/2022.04.04>
16. Akimoto K., Sano F., Nakano Y. Assessment of comprehensive energy systems for achieving carbon neutrality in road transport // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 112. 103487. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103487>
17. Wu L. Comprehensive evaluation and analysis of low-carbon energy-saving renovation projects of high-end hotels under the background of double carbon // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8, Supplement 7. Pp. 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.082>
18. Saraji M. K., Streimikiene D. An analysis of challenges to the low-carbon energy transition toward sustainable energy development using an IFCM-TOPSIS approach: A case study // *Journal of Innovation & Knowledge*. 2024. Vol. 9, Issue 2. 100496. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100496>

19. Filimonova I. V., Kozhevnikov V. D., Provornaya I. V., Komarova A. V., Nemov V. Y. Green energy through the LCOE indicator // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8, Supplement 15. Pp. 887–893. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.165>
20. Sklar-Chik M., Brent A., De Kock I. Critical review of the levelised cost of energy metric // *South African Journal of Industrial Engineering*. 2016. Vol. 27, No. 4. Pp. 124–133. <https://doi.org/10.7166/27-4-1496>
21. Saurat M., Ritthoff M. Calculating MIPS 2.0 // *Resources*. 2013. Vol. 2, Issue 4. Pp. 581–607. <https://doi.org/10.3390/resources2040581>
22. Muniyandy E., Dilli Babu P. Study of Solar Energy and Future Needs // *International Research Journal on Advanced Science*. 2021. Vol. 3, Issue 9S. Pp. 23–28. <https://doi.org/10.47392/irjash.2021.244>
23. Liedtke C., Biengen K., Teubler J. Resource Use in the Production and Consumption System — The MIPS Approach // *Resources*. 2014. Vol. 3, Issue 3. Pp. 544–574. <https://doi.org/10.3390/resources3030544>
24. Huang C., Liu C., Zhong M., Sun H., Gao T., Zhang Y. Research on Wind Turbine Location and Wind Energy Resource Evaluation Methodology in Port Scenarios // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, Issue 3. 1074. <https://doi.org/10.3390/su16031074>
25. Vivchar A. N., Sigitov O. Y. Operational Problems in Incorporating Wind Farms and Thermal Power Plants into an Electric Power System // *Power Technology and Engineering*. 2023. Vol. 57. Pp. 129–135. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01633-6>
26. Bayazit Y. The effect of hydroelectric power plants on the carbon emission: An example of Gokcekaya dam, Turkey // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 170. Pp. 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.130>
27. Berga L. The Role of Hydropower in Climate Change Mitigation and Adaptation: A Review // *Engineering*. 2016. Vol. 2, Issue 3. Pp. 313–318. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.004>
28. Dvinin D. Y. Comparative analysis of traditional and alternative energy in the Russian Federation // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. 03015. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202015703015>
29. Сорокин В. В. Экономические аспекты перехода на низкоуглеродную энергетику // *Дискуссия*. 2023. Т. 116, № 1. С. 46–56. <https://doi.org/46320/2077-7639-2023-1-116-46-56>
30. Магарил Е. Р., Гительман Л. Д., Караева А. П., Киселев А. В., Кожевников М. В. Методический подход к эколого-экономической оценке проектов биогазовой энергетики // *Journal of Applied Economic Research*. 2022. Т. 21, № 2. С. 217–256. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2022.21.2.009>
31. Modeling and Control Dynamics in Microgrid Systems with Renewable Energy Resources / edited by C. B. Ramesh, J. J. Justo, F. Mwasilu. Academic Press, 2023. 419 p. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02542-9>
32. Yao Y., Xu J.-H., Sun D.-Q. Untangling global levelised cost of electricity based on multi-factor learning curve for renewable energy: Wind, solar, geothermal, hydropower and bioenergy // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 285. 124827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124827>
33. Kabeyi M. Geothermal Electricity Generation, Challenges, Opportunities and Recommendations // *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 2019. Vol. 5, No. 8. Pp. 53–95. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2019.33408>
34. Laveet K., Md H., Mamdouh E., Mansoor U. Technological Advancements and Challenges of Geothermal Energy Systems: A Comprehensive Review // *Energies*. 2022. Vol. 15, Issue 23. 9058. <https://doi.org/10.3390/en15239058>
35. Krumins J., Klavins M. Investigating the Potential of Nuclear Energy in Achieving a Carbon-Free Energy Future // *Energies*. 2023. Vol. 16, Issue 9. 3612. <https://doi.org/10.3390/en16093612>

36. Bocard N. The cost of nuclear electricity: France after Fukushima // *Energy Policy*. 2014. Vol. 66. Pp. 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.037>
37. Sfez S., Dewulf J., De Soete W., Schaubroeck T., Mathieux F., Kralisch D., De Meester S. Toward a Framework for Resource Efficiency Evaluation in Industry: Recommendations for Research and Innovation Projects // *Resources*. 2017. Vol. 6, Issue 1. 5. <https://doi.org/10.3390/resources6010005>
38. Alsanousie A., Attia A., Elhelw M., Elsamni O. Towards nearly zero emissions natural gas-fired power plants using cryogenic carbon dioxide capture technology // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2023. Vol. 127. 103928. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103928>
39. Pelissari M., Canas S., Barbosa M., Tassinari C. Decarbonizing coal-fired power plants: Carbon capture and storage applied to the Jorge Lacerda thermoelectric complex // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 19. 101249. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101249>
40. Wang Y., Zhao L., Otto A., Robinius M., Stolten D. A review of post-combustion CO₂ capture technologies from coal-fired power plants // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 114. Pp. 650–665. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1209>
41. Torres J. F., Petrakopoulou F. A Closer Look at the Environmental Impact of Solar and Wind Energy // *Global Challenges*. 2022. Vol. 6, Issue 8. 2200016. <https://doi.org/10.1002/gch2.202200016>
42. Xie R. The Impacts of Different Power Plants on Climate: Evidence from Fossil-fuel, Hydroelectric & Wind Power // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 424. 02007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342402007>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Двинин Дмитрий Юрьевич

Кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник, доцент кафедры геоэкологии и природопользования Челябинского государственного университета, г. Челябинск, Россия (454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9451-4445> e-mail: dvinin1981@mail.ru

Даванков Алексей Юрьевич

Доктор экономических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, профессор кафедры экономической теории и регионального развития Челябинского государственного университета, г. Челябинск, Россия (454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0209-5301> e-mail: iserp@csu.ru

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-00900, <https://rscf.ru/project/24-28-00900/>

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Двинин Д. Ю., Даванков А. Ю. Комплексная эколого-экономическая оценка низкоуглеродных источников энергии // *Journal of Applied Economic Research*. 2024. Т. 23, № 3. С. 696–720. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2024.23.3.028>

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Дата поступления 17 июня 2024 г.; дата поступления после рецензирования 18 июля 2024 г.; дата принятия к печати 24 июля 2024 г.

Comprehensive Environmental and Economic Assessment of Low-Carbon Energy Sources

Dmitry Y. Dvinin  , Alexey Y. Davankov 

Chelyabinsk State University,
Chelyabinsk, Russia

 dvinin1981@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study of various low-carbon energy sources based on a multi-criteria analysis for the purpose of a comprehensive environmental and economic assessment of the effectiveness of their use. The peculiarity of the study is that it analyzed both renewable energy sources and traditional fossil fuel based ones using innovative technologies for carbon dioxide capture and storage, as well as nuclear energy. The purpose of this work is to conduct a comprehensive assessment based on three criteria: normalized cost of electricity LCOE (Levelized Cost of Energy)/LEC (Levelized Energy Cost), specific value of carbon dioxide emissions and material intensity expressed in total MI (Material Input) numbers. The hypothesis of the study is as follows: the introduction of the criterion of material intensity in MI numbers into a comprehensive assessment will allow one to identify low-carbon energy sources with the greatest ecological and economic effect. As a result, it was found that in 2023, the global energy capacity of low-carbon energy sources reached 51.8 %, but the share of energy produced by them is significantly lower, amounting to only 39.4 %. The multi-criteria analysis made it possible to identify low-carbon energy sources that, at the lowest cost, provide the greatest reduction in carbon dioxide emissions, and at the same time reduce the overall environmental impact by reducing the disturbance of biospheric material flows. Wind farms have high ecological and economic efficiency, while solar energy sources and bioelectric power plants — slightly less so. Geothermal and hydroelectric power plants have a low normalized cost of electricity, but they have relatively high values of material intensity. The environmental and economic efficiency of nuclear power is higher than that of gas and coal-fired power plants using carbon dioxide capture technologies; it occupies an intermediate position between renewable and traditional energy sources. An unexpected established fact is that gas and coal-fired power plants with carbon dioxide capture technologies have the same environmental and economic efficiency. The results obtained can be useful in making decisions about the possibility of prioritizing the development of individual low-carbon energy sources.

Key words: low-carbon energy sources; levelised cost of energy; specific carbon dioxide emission; material intensity; integrated environmental and economic efficiency.

JEL C18, Q42, Q43

References

1. Saleh, H., Hassan, A. (2024). The challenges of sustainable energy transition: A focus on renewable energy. *Applied Chemical Engineering*, Vol. 7, No. 2, 2084. <https://doi.org/10.59429/ace.v7i2.2084>
2. Dorninger, C., Abson, D., Fischer, J., Wehrden, H. (2017). Assessing sustainable biophysical human-nature connectedness at regional scales. *Environmental Research Letters*, Vol. 12, 055001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa68a5>
3. Gorshkov, V.G., Makarieva, A.M. (2020). Key ecological parameters of immobile versus locomotive life. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, Vol. 5, No. 1, 1–18. <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-1-1>

4. Dvinin, D.Y., Davankov, A.Y. (2022). *The Influence of Alternative Energy Sources on the Socio-Ecological and Economic Balance of Regions*. Chelyabinsk, ChelSU, 126 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.47475/9785727118245>
5. Guo, H. (2023). Case study analysis of low-carbon economy. *Advances in Economics Management and Political Sciences*, Vol. 63, 249–255. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/63/20231431>
6. Elizbarashvili, N., Meladze, G., Yeghyan, M., Elizbarashvili, R. (2019). Geographical indicators of sustainable development and assessment of the impact on the environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 381, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012022>
7. Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppala, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, Vol. 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
8. Chen, J., Gao, M., Cheng, S., Xu, Y., Song, M., Liu, Y., Hou, W., Wang, S. (2022). Evaluation and drivers of global low-carbon economies based on satellite data. *Humanities and Social Sciences Communications*, Vol. 9, 153. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01171-y>
9. Ali, E.B., Anufriev, V.P. (2023). Revisiting the energy consumption, economic growth and the environmental Kuznets curve in developing countries. *Economy of Regions*, Vol. 19, No. 1, 75–84. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-1-6>
10. Starodubets, N.V., Grischenko, Y.O., Belik, I.S., Nikulina, N.L. (2022). Economic assessment of the consequences of the introduction of transboundary carbon regulation for the regional industrial complex (based on the example of the Sverdlovsk region). *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 21, No. 4, 708–733. (In Russ.). <https://doi.org/10.15826/vestnik.2022.21.4.025>
11. Proskuryakova, L. (2023). The Contribution of Low-Carbon Energy Technologies to Climate Resilience. *Climate*, Vol. 11, Issue 12, 231. <https://doi.org/10.3390/cli11120231>
12. Fan, J., Wei, S., Yang, L., Wang, H., Zhong, P., Zhang, X. (2019). Comparison of the LCOE between coal-fired power plants with CCS and main low-carbon generation technologies: Evidence from China. *Energy*, Vol. 176, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.003>
13. Porfiryev, B.N., Shirov, A.A. (2022). Strategies for Socioeconomic Development with Low Greenhouse Gas Emissions: Scenarios and Realities for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 92, No. 3, 230–238. <https://doi.org/10.1134/s1019331622030030>
14. Maltsev, Yu.G., Sultanov, B.R. (2022). Study of socio-ecological-economic balance of regions of the Russian Federation. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*, No. 6–1, 110–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/vaael.2253>
15. Kovaleva, N.O., Stolpnikova, E.M. (2022). Ecology: Life in an “unstable biosphere”. *History and Modernity*, No. 4, 58–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.30884/iis/2022.04.04>
16. Akimoto, K., Sano, F., Nakano, Y. (2022). Assessment of comprehensive energy systems for achieving carbon neutrality in road transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 112, 103487. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103487>
17. Wu, L. (2022). Comprehensive evaluation and analysis of low-carbon energy-saving renovation projects of high-end hotels under the background of double carbon. *Energy Reports*, Vol. 8, Supplement 7, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.082>
18. Saraji, M.K., Streimikiene, D. (2024). An analysis of challenges to the low-carbon energy transition toward sustainable energy development using an IFCM-TOPSIS approach: A case study. *Journal of Innovation & Knowledge*, Vol. 9, Issue 2, 100496. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100496>
19. Filimonova, I.V., Kozhevin, V.D., Provornaya, I.V., Komarova, A.V., Nemov, V.Y. (2022). Green energy through the LCOE indicator. *Energy Reports*, Vol. 8, Supplement 15, 887–893. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.165>
20. Sklar-Chik, M., Brent, A., De Kock, I. (2016). Critical review of the levelised cost of energy metric. *South African Journal of Industrial Engineering*, Vol. 27, No. 4, 124–133. <https://doi.org/10.7166/27-4-1496>

21. Saurat, M., Ritthoff, M. (2013). Calculating MIPS 2.0. *Resources*, Vol. 2, Issue 4, 581–607. <https://doi.org/10.3390/resources2040581>
22. Muniyandy, E., Dilli Babu, P. (2021). Study of Solar Energy and Future Needs. *International Research Journal on Advanced Science*, Vol. 3, Issue 9S, 23–28. <https://doi.org/10.47392/ir-jash.2021.244>
23. Liedtke, C., Bienge, K., Teubler, J. (2014). Resource Use in the Production and Consumption System — The MIPS Approach. *Resources*, Vol. 3, Issue 3, 544–574. <https://doi.org/10.3390/resources3030544>
24. Huang, C., Liu, C., Zhong, M., Sun, H., Gao, T., Zhang, Y. (2024). Research on Wind Turbine Location and Wind Energy Resource Evaluation Methodology in Port Scenarios. *Sustainability*, Vol. 16, Issue 3, 1074. <https://doi.org/10.3390/su16031074>
25. Vivchar, A.N., Sigitov, O.Y. (2023). Operational Problems in Incorporating Wind Farms and Thermal Power Plants into an Electric Power System. *Power Technology and Engineering*. Vol. 57, 129–135. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01633-6>
26. Bayazit, Y. (2021). The effect of hydroelectric power plants on the carbon emission: An example of Gokcekaya dam, Turkey. *Renewable Energy*, Vol. 170, 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.130>
27. Berga, L. (2016). The Role of Hydropower in Climate Change Mitigation and Adaptation: A Review. *Engineering*, Vol. 2, Issue 3, 313–318. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.004>
28. Dvinin, D.Y. (2020). Comparative analysis of traditional and alternative energy in the Russian Federation. *E3S Web of Conferences*, Vol. 157, 03015. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202015703015>
29. Sorokin, V.V. (2023). Economic aspects of the transition to low-carbon energy. *Discussion*, Vol. 116, No. 1, 46–56. (In Russ.). <https://doi.org/46320/2077-7639-2023-1-116-46-56>
30. Magaril, E.R., Gitelman, L.D., Karaeva, A.P., Kiselev, A.V., Kozhevnikov, M.V. (2022). Methodological approach to environmental and economic assessment of biogas energy projects. *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 21, No. 2, 217–256. (In Russ.). <https://doi.org/10.15826/vestnik.2022.21.2.009>
31. *Modeling and Control Dynamics in Microgrid Systems with Renewable Energy Resources*. (2023). Edited by C. B. Ramesh, J. J. Justo, F. Mwasilu. Academic Press, 419 p. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02542-9>
32. Yao, Y., Xu, J.-H., Sun, D.-Q. (2021). Untangling global levelised cost of electricity based on multi-factor learning curve for renewable energy: Wind, solar, geothermal, hydropower and bioenergy. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 285, 124827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124827>
33. Kabeyi, M. (2019). Geothermal Electricity Generation, Challenges, Opportunities and Recommendations. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, Vol. 5, No. 8, 53–95. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2019.33408>
34. Laveet, K., Md, H., Mamdouh, E., Mansoor, U. (2022). Technological Advancements and Challenges of Geothermal Energy Systems: A Comprehensive Review. *Energies*, Vol. 15, Issue 23, 9058. <https://doi.org/10.3390/en15239058>
35. Krumins, J., Klavins, M. (2023). Investigating the Potential of Nuclear Energy in Achieving a Carbon-Free Energy Future. *Energies*, Vol. 16, Issue 9, 3612. <https://doi.org/10.3390/en16093612>
36. Bocard, N. (2014). The cost of nuclear electricity: France after Fukushima. *Energy Policy*, Vol. 66, 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.037>
37. Sfez, S., Dewulf, J., De Soete, W., Schaubroeck, T., Mathieux, F., Kralisch, D., De Meester, S. (2017). Toward a Framework for Resource Efficiency Evaluation in Industry: Recommendations for Research and Innovation Projects. *Resources*, Vol. 6, Issue 1, 5. <https://doi.org/10.3390/resources6010005>

38. Alsanousie, A., Attia, A., Elhelw, M., Elsamni, O. (2023). Towards nearly zero emissions natural gas-fired power plants using cryogenic carbon dioxide capture technology. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 127, 103928. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103928>
39. Pelissari, M., Canas, S., Barbosa, M., Tassinari, C. (2023). Decarbonizing coal-fired power plants: Carbon capture and storage applied to the Jorge Lacerda thermoelectric complex. *Results in Engineering*, Vol. 19, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101249>
40. Wang, Y., Zhao, L., Otto, A., Robinius, M., Stolten, D. (2017). A review of post-combustion CO₂ capture technologies from coal-fired power plants. *Energy Procedia*, Vol. 114, 650–665. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1209>
41. Torres, J.F., Petrakopoulou, F. (2022). A Closer Look at the Environmental Impact of Solar and Wind Energy. *Global Challenges*, Vol. 6, Issue 8, 2200016. <https://doi.org/10.1002/gch2.202200016>
42. Xie, R. (2023). The Impacts of Different Power Plants on Climate: Evidence from Fossil-fuel, Hydroelectric & Wind Power. *E3S Web of Conferences*, Vol. 424, 02007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342402007>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Dmitry Yurievich Dvinin

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Geoecology and Environmental Management, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia (454001, Chelyabinsk, Kashirin Brothers street, 129); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9451-4445> e-mail: dvinin1981@mail.ru

Alexey Yurievich Davankov

Doctor of Economics, Professor, Leading Researcher, Professor of the Department of Economic Theory and Regional Development, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia (454001, Chelyabinsk, Kashirin Brothers street, 129); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0209-5301> e-mail: iserp@csu.ru

ACKNOWLEDGMENTS

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-28-00900, <https://rscf.ru/project/24-28-00900>

FOR CITATION

Dvinin, D.Yu., Davankov, A.Yu. (2024). Comprehensive Environmental and Economic Assessment of Low-Carbon Energy Sources. *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 23, No. 3, 696–720. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2024.23.3.028>

ARTICLE INFO

Received June 17, 2024; Revised July 18, 2024; Accepted July 24, 2024.

