

УДК 332.1:338.45  
DOI

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ НИЗКОУГЛЕРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РЕГИОНАХ УРАЛЬСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Двинин Д.Ю., Даванков А.Ю., Малыгин Н.В., Сидельников П.А.

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск,  
e-mail: [dvinin1981@mail.ru](mailto:dvinin1981@mail.ru)

Исследование посвящено комплексной экономической и экологической оценке возможности развития низкоуглеродной электроэнергетики в различных регионах Уральского федерального округа. Особенностью проведенной оценки является исследование как возобновляемых источников энергии, так и традиционной энергетики, использующей ископаемое топливо с инновационными технологиями улавливания и консервации углекислого газа. Другой важный фактор, учтенный в исследовании: развитие низкоуглеродных источников энергии должно обеспечить достижение общей эколого-экономической сбалансированности в регионах Уральского федерального округа. Оценку проводили на основе 4 выбранных экономических и экологических критериев. В группу экономических критериев вошли коэффициент использования установленной мощности и нормированная стоимость электроэнергии. В группу экологических критериев вошли удельная величина материальной интенсивности производства энергии, а также удельная эмиссия углекислого газа на 1 выработанный кВт\*ч. В результате было выявлено, что состояние всех рассматриваемых регионов, за исключением Ямало-Ненецкого автономного округа, – несбалансированное. Для достижения их сбалансированности потребуется увеличение в энергобалансе доли низкоуглеродных источников энергии до 37–93% в зависимости от региона. При этом установлена наибольшая эффективность энергоустановок, использующих силу ветра. Они обладают минимальными эксплуатационными и инвестиционными затратами, выбросы CO<sub>2</sub> в результате работы отсутствуют. Солнечные энергоустановки, а также энергоустановки, использующие биотопливо, показали несколько худший результат. Атомные электростанции, а также электростанции, работающие на природном газе и угле, однако применяющие технологии подавления эмиссии CO<sub>2</sub>, имеют наилучшие результаты по коэффициенту использования установленной мощности. В связи с этим сделан вывод, что для обеспечения устойчивого энергоснабжения необходимо соблюдение в регионах баланса между возобновляемыми и традиционными источниками энергии.

**Ключевые слова:** комплексная оценка эффективности, низкоуглеродная энергетика, углеродная эффективность, нормированная стоимость электроэнергии, материальная интенсивность, регион, Уральский федеральный округ

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

## COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF DEVELOPING LOW-CARBON ENERGY SOURCES IN THE REGIONS OF THE URAL FEDERAL DISTRICT

Dvinin D. Yu., Davankov A. Yu., Malygin N. V., Sidelnikov P. A.

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, e-mail: [dvinin1981@mail.ru](mailto:dvinin1981@mail.ru)

The study is devoted to a comprehensive economic and environmental assessment of the possibility of developing a low-carbon electric power industry in various regions of the Ural Federal District. A special feature of the assessment is the study of both renewable energy sources and traditional energy using fossil fuels with innovative technologies for carbon dioxide capture and conservation. Another important factor taken into account in the study is that the development of low-carbon energy sources should ensure the achievement of overall ecological and economic balance in the regions of the Ural Federal District. The assessment was based on 4 selected economic and environmental criteria. The economic group includes 2 criteria: the utilization rate of installed capacity and the normalized cost of electricity. The environmental group includes the specific value of the material intensity of energy production, as well as the specific emission of carbon dioxide per generated kWh. As a result, it was revealed that the state of all the regions under consideration, with the exception of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, is unbalanced. To achieve their balance, it will be necessary to increase the share of low-carbon energy sources in the energy balance to 37-93%, depending on the region. At the same time, the highest efficiency is found in power plants using wind power. They have minimal operating and investment costs, and CO<sub>2</sub> emissions as a result of their work are not present, but material. Solar power plants, as well as power plants using biofuels, showed slightly worse results. Nuclear power plants, as well as natural gas and coal-fired power plants, but using CO<sub>2</sub> emission suppression technologies, have the best results in terms of installed capacity utilization. In this regard, in order to ensure sustainable energy supply, it is concluded that it is necessary to maintain a balance between renewable and traditional energy sources in the regions.

**Keywords:** integrated efficiency assessment, low-carbon energy, carbon efficiency, normalized cost of electricity, material intensity, region, Ural Federal District

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

## Введение

Развитие низкоуглеродных источников энергии признано основным условием, позволяющим повлиять на процессы, вызванные климатическими изменениями, стабилизировать экологическую ситуацию в целом. Переход к низкоуглеродной энергетике позволит обеспечить успешное эколого-экономическое развитие регионов в долгосрочный период времени [1]. Во многих регионах и странах приняты долгосрочные стратегии развития низкоуглеродных источников энергии [2]. Вопросы регулирования эмиссии парниковых газов определяет Парижское соглашение, ратифицированное 186 странами мира. Согласно этому Соглашению, страны в добровольном порядке формируют долгосрочные цели по уменьшению антропогенной эмиссии и самостоятельно определяют меры по их достижению. По завершении исполнения принятых решений эмиссия парниковых газов должна стать минимальной и обеспечить общую стабилизацию климатической системы [3].

Для реализации поставленных целей планируется использование разнообразных источников энергии с низким уровнем выбросов углерода [4, 5]. Эти источники могут включать как возобновляемые ресурсы, так и традиционные, основанные на ископаемом топливе, но с обязательным внедрением передовых подходов по нейтрализации  $\text{CO}_2$ . В связи с этим требуется всестороннее исследование различных низкоуглеродных вариантов генерации энергии, которое учитывало бы специфические региональные условия территорий, на которых рассматривается их внедрение. Такой анализ позволит определить наиболее эффективные и устойчивые решения для каждой конкретной местности.

Следует особо отметить, что негативные изменения в природной среде в значительной степени вызваны уменьшением возможности экосистем устранять последствия хозяйственной деятельности. Техносфера переключает на себя природные материальные потоки, что и является наиболее существенным экологическим фактором в сравнении с выбросами загрязняющих веществ. Исчезает ряд важных функций у экосистем, в результате поддержание необходимых условий жизнедеятельности становится невозможным. Даже при условии полного перехода к возобновляемой и низкоуглеродной энергетике, если указанные потоки имеют существенную материальную интенсивность, негативные процессы, связанные с разрушением окружающей природной среды, не прекратятся.

Поэтому при комплексной оценке преимуществ низкоуглеродных источников энергии нужно использовать одновременно совокупность экологических и экономических критериев. К экономическим следует отнести величину инвестиционных и эксплуатационных затрат, связанных с производственной деятельностью, а также коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). Последний показатель имеет значение, поскольку низкоуглеродной энергетикой являются как возобновляемые, так и невозобновляемые источники энергии. Важным критерием представляется степень сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  наряду с минимизацией потоков веществ, генерируемых в ходе работы предприятий, их комплексный анализ позволяет в дальнейшем установить связь между природной средой и экономикой [6].

При отсутствии комплексной эколого-экономической оценки для различных низкоуглеродных источников энергии нет возможности обоснованно выявить источники энергии, которые при наименьших затратах позволят получить наибольший эколого-экономический эффект.

**Цель исследования** – провести комплексную эколого-экономическую оценку возможности развития различных низкоуглеродных источников энергии в регионах, входящих в состав Уральского федерального округа.

## Материалы и методы исследования

Исследование основано на разработанном авторском методическом инструментарии, который использует многокритериальный анализ и экономико-математическую задачу выбора. В методике применено комплексное исследование следующих критериев различных источников низкоуглеродной энергии: LCOE (Levelised Cost of Energy) / LEC (Levelized Energy Cost) (дол./кВт), КИУМ (коэффициент использования установленной мощности), удельной величины эмиссии углекислого газа (кг/кВт), суммарных MI (Material Input) – чисел (кг/кВт).

Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE/LEC) является общепринятым в мире инструментом для оценки экономической целесообразности и принятия решения о развитии различных источников энергии [6, 7]. Данный показатель отражает среднюю себестоимость генерации энергии за весь период эксплуатации электроэнергетической установки. В нем учитываются как текущие расходы, так и первоначальные инвестиции.

Для целей исследования использовались данные Международного энергетического агентства (МЭИ), полученные другими исследовательскими коллективами для раз-

личных источников низкоуглеродной энергии, и данные, полученные в собственных более ранних исследованиях [8]. Формула для расчета имеет следующий вид:

$$\text{LCOE}/\text{LEC} = \sum_{t=1}^n \frac{Z_t + Z_{ct} + O_t + Oz_t + T_t + T_{ct}}{(1+r)^t} / \sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}. \quad (1)$$

LCOE/LEC в данном случае включает в себя технологии подавления эмиссии CO<sub>2</sub> и определяется на основе следующих переменных параметров: E<sub>t</sub> – обозначает годовую выработку энергии; r – это принятая ставка дисконтирования; n – заданный период эксплуатации энергетической установки; Z<sub>t</sub> – годовая сумма капитальных вложений в генерацию электроэнергии; Z<sub>ct</sub> – ежегодные инвестиции, направленные на сокращение выбросов CO<sub>2</sub>; O<sub>t</sub> – текущие годовые операционные затраты; O<sub>ct</sub> – операционные расходы, непосредственно связанные с использованием процессов подавления CO<sub>2</sub>; T<sub>t</sub> – ежегодные затраты на топливо (применимо к традиционным источникам энергии); T<sub>ct</sub> – годовые издержки на энергию и топливо, используемые в процессах подавления CO<sub>2</sub>.

Углеродная эффективность определялась на основе данных МГЭИК (Межправительственной группы экспертов по изменению климата), а также результатов предыдущих авторских исследований [9]. Данный методологический подход основан на учете выбросов всех парниковых газов, возникающих в результате сжигания различных видов топлива в ходе экономической деятельности. Для более удобного применения они в дальнейшем пересчитываются в CO<sub>2</sub>-эквивалент, имеющий размерность кг/кВт. Величины коэффициентов эмиссии обусловлены концентрацией углерода в топливе.

Базовая формула для расчетов следующая:

$$V_{ol} = I_c \times k_c. \quad (2)$$

В данной формуле V<sub>ol</sub> – текущий объем выбросов CO<sub>2</sub>. Параметр I<sub>c</sub> отражает информацию о конкретных подходах, применяемых в энергетическом секторе. k<sub>c</sub> представляет собой коэффициент, определяющий уровень эмиссии CO<sub>2</sub> для конкретного вида углеродосодержащего топлива.

Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) был выбран в качестве одного из критериев, поскольку технологические особенности энергоустановок в совокупности с природными особенностями возобновляемых источников энергии часто не позволяют обеспечить реализацию всей установленной энерго-

мощности [5]. Для энергосистем регионов Уральского федерального округа были использованы данные, приведенные в отчете АО «СО ЕЭС России», где содержатся обобщенные сведения для Урала [10]. В отчете указаны следующие величины КИУМ: АЭС – 83,03%, БиоЭС – 60,0%, газовые и угольные ТЭС с технологиями улавливания и консервации CO<sub>2</sub> – 49,84%, СЭС – 13,84%, ВЭС – 6,0%.

Оценка материалоемкости объектов энергетической отрасли была проведена посредством агрегированных показателей МІ (материальные затраты). Эти показатели базируются на анализе MIPS (материальные затраты на единицу полезного действия или услуги) [11]. Отдельные категории материальных входов не рассматривались, поскольку при анализе целых отраслей экономики более логично объединить их в интегрированный показатель суммарных МІ-чисел.

В работе применялся методологический подход, опирающийся на решение экономико-математической задачи выбора. Рассматриваемые энергоисточники классифицировались по шкале от 1 до 6 баллов. Далее рассчитывалась общая сумма баллов:

$$I_i = \sum_{i=1}^n O_i \cdot v_i. \quad (3)$$

При расчете итогового показателя для i-го энергоисточника учитывали несколько факторов. Каждый фактор (i-й параметр) оценивали в баллах (O<sub>i</sub>), а также определяли его существенность (v<sub>i</sub>). Общее число рассматриваемых параметров обозначается как n.

Значение O<sub>i</sub> рассчитывалось на основе следующего уравнения:

$$O_i = Z_i / Z_{\max}, \quad (4)$$

В данном случае Z<sub>i</sub> представляет собой значение i-й величины, характеризующей рассматриваемый энергоисточник. Z<sub>max</sub>, в свою очередь, является верхней границей, то есть наивысшим достижимым значением.

Использование данного методического инструментария позволило установить источники низкоуглеродной энергии в регионах Уральского федерального округа, раз-

витие которых даст возможность получить с наименьшими затратами наибольший экологический эффект.

Важное условие долгосрочного устойчивого развития региона – достижение им социо-эколого-экономической сбалансированности [12]. Требуемые объемы низкоуглеродной энергетики в региональном энергодбалансе, позволяющие достичь региону указанной сбалансированности, были выявлены с помощью особой методики. В первую очередь, для определения текущего эколого-экономического баланса исследуемых в работе регионов был применен специализированный показатель. Данный индикатор дает возможность оценить уровень антропогенного прессинга на территорию региона на основе расчета отношения потребляемой в хозяйственной деятельности энергии к существующей способности местных экосистем нейтрализовать негативные последствия, при этом также выраженной в энергетическом эквиваленте. Для расчета индикатора использовалось следующее уравнение:

$$G_i = R^t / A \sum_{i=1}^6 (S_i^R / S_i) k_i. \quad (5)$$

Региональный показатель сбалансированности развития ( $G_i$ ) определяется на основе следующих параметров:  $R^t$  – объем потребляемой регионом энергии в рассматриваемый период;  $A$  – суммарная ассимиляционная способность биосферы Земли (около 1,5 ТВт [13]);  $S_1$  – площади, занятые лиственными лесами;  $S_2$  – площади, покрытые хвойными лесами;  $S_3$  – участки, занятые иными типами лесных ландшафтов;  $S_4$  – территории, представляющие ландшафты, не связанные с лесными породами;  $S_5$  – сельскохозяйственные угодья;  $S_6$  – водные поверхности.

$S_i^R$  – это сопоставимые площади ландшафтов в конкретном исследуемом регионе, а  $k_i$  – коэффициент, позволяющий отразить вклад каждого рассматриваемого ландшафтного типа в общую ассимиляционную способность территории.

Индикатор не больше 1 отмечается при сбалансированном эколого-экономическом развитии региона. Значение больше 1 свидетельствует о неблагополучии и необходимости введения корректирующих мер. Среднее значение индикатора при взаимодействии всего земного хозяйства и биосферы равно 10. Если в регионе выявлена большая величина индикатора, он обеспечивает особо значимый вклад в развитие общего экологического кризиса.

Важный момент: если индикатор больше 1, его величину можно несколько скор-

ректировать с помощью развития возобновляемых и низкоуглеродных источников энергии. В большинстве случаев возобновляемая и низкоуглеродная энергетика использует уже существующие материальные и энергетические потоки в экосистемах и поэтому не оказывает большого влияния на естественные природные процессы [14, 15]. Путем применения данного явления можно смоделировать требуемую величину развития низкоуглеродных источников энергии с целью достижения региональной эколого-экономической сбалансированности [16].

### Результаты исследования и их обсуждение

В качестве базы для исследования были взяты регионы, относящиеся к Уральскому федеральному округу: Свердловская, Курганская и Челябинская области, а также Тюменская область, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа.

Для вычисления индикаторов баланса были применены статистические сведения о размерах природных зон и преобразованных территорий в изучаемых регионах. Собранные данные послужили основой для расчета индикаторов всех регионов Уральского федерального округа (согласно формуле 2). В свою очередь, это дало возможность выявить желательную величину возобновляемых и низкоуглеродных энергоисточников, необходимых для достижения регионального баланса. Итоги проведенных расчетов отражены в таблице 1.

Далее был осуществлен многокритериальный анализ с использованием экономико-математической задачи выбора, позволивший проранжировать различные источники низкоуглеродной энергии, исходя из их комплексной эффективности, для всех регионов Уральского федерального округа. Анализ был проведен на основе балльной оценки по выбранным критериям. Критерии оценивались по шкале от 1 до 6 баллов, исходя из общего количества низкоуглеродных энергоисточников, которые возможно развивать в регионах УрФО. Максимальная величина баллов, которую способен был получить энергоисточник, – 24 балла. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Окончательные результаты оценки, демонстрирующие потенциал расширения использования разнообразных низкоуглеродных энергетических ресурсов в каждом регионе Уральского федерального округа с учетом достижения экономического и экологического баланса, систематизированы и представлены в таблице 3.

Таблица 1

Уровень сбалансированности развития в регионах  
Уральского федерального округа [9]

Регион	Экологическая или ассимиляционная емкость экосистем, ГВт	Энергопотребление хозяйством региона в единицу времени (мощность), ГВт	Региональный индикатор сбалансированности (Gi)	Доля возобновляемой и низкоуглеродной энергетики, когда Gi равен единице, %	Необходимый объем производства возобновляемой и низкоуглеродной энергетики, когда Gi равен единице, млрд кВт
Курганская область	0,67	1,7	2,56	61	1,95
Свердловская область	5,64	14,35	2,54	61	33,97
Тюменская область	2,39	4,81	2,01	50	5,95
Челябинская область	0,94	14,17	15,02	93	26,03
Ямало-Ненецкий автономный округ	10,28	5,25	0,51	–	–
Ханты-Мансийский автономный округ	14,05	22,16	1,58	37	28,67

Примечание: составлено авторами на основе более ранних исследований [9]

Таблица 2

Ранжирование возможных к развитию низкоуглеродных источников энергии в Уральском федеральном округе с учетом эколого-экономического эффекта

Предпочтительная величина	Предпочтительный параметр	СЭС	ВЭС	БиоЭС	АЭС	Газовые ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	Угольные ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>
0,036	ЛСОЕ, долл./ кВт.ч	4	6	5	1	3	2
0,938	Суммарное MI-число, кг/кВт.ч	4	6	5	3	2	1
0	Удельная эмиссия CO <sub>2</sub> , кг/кВт.ч	6	6	3	6	5	4
83,03 %	КИУМ	3	2	5	6	4	4
Итоговый показатель		17	20	18	16	13	11

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Исходя из природных условий регионов Уральского федерального округа, установлено, что наибольшим эколого-экономическим эффектом будут обладать ветряные электростанции. Они имеют максимальные показатели по всем трем оцениваемым критериям, в результате итоговый балл приоритета равен 20. Совокупные инвестиционные и эксплуатационные затраты в течение года на их деятельность при условии достижения регионами социо-эколого-экономической сбалансированности составят от 70 млн долл. в Курганской области до 1,22 млрд долл. в Свердловской области, при этом материальная интенсивность

в суммарных MI-числах будет минимальной при полностью отсутствующей эмиссии парниковых газов, а значит, минимальным будет и общее негативное воздействие на природные экосистемы. Биоэнергетика и солнечные электростанции продемонстрировали чуть меньшую комплексную эффективность. В качестве неожиданного факта следует отметить выявленный относительно высокий уровень эффективности ядерной энергетики как низкоуглеродного источника энергии. Ситуация объясняется высокой величиной КИУМ у атомных электростанций, достигающей величины в 83,03 %.

Таблица 3

Эколого-экономические показатели возможности развития низкоуглеродных источников энергии в регионах Уральского федерального округа

Низкоуглеродный источник энергии	Балл приоритета	LCOE/LCE, долл./ кВт.ч	Необходимые ежегодные затраты при условии достижения эколого-экономического баланса, млрд долл./год	Материальная интенсивность в суммарных MI-числах, млн т/год	Эмиссия CO <sub>2</sub> , млн т/год
<b>Свердловская область</b>					
ВЭС	20	0,036	1,22	31,86	0
БиоЭС	19	0,043	1,46	169,51	0
СЭС	17	0,058	1,97	171,58	12,57
АЭС	16	0,155	5,26	2711,31	0
Газовые ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	13	0,137	4,65	2739,92	1,66
Угольные ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	11	0,083	2,82	2781,46	2,79
<b>Челябинская область</b>					
ВЭС	20	0,036	0,93	24,41	0
БиоЭС	19	0,043	1,12	129,89	0
СЭС	17	0,058	1,51	131,47	9,63
АЭС	16	0,155	4,03	2077,58	0
Газовые ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	13	0,137	3,57	2099,5	1,27
Угольные ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	11	0,083	2,16	2131,33	2,13
<b>Курганская область</b>					
ВЭС	20	0,036	0,07	1,83	0
БиоЭС	19	0,043	0,084	9,73	0
СЭС	17	0,058	0,11	9,85	0,72
АЭС	16	0,155	0,3	155,64	0
Газовые ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	13	0,137	0,27	157,28	0,09
Угольные ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	11	0,083	0,16	159,67	0,16
<b>Тюменская область</b>					
ВЭС	20	0,036	0,21	5,58	0
БиоЭС	19	0,043	0,25	29,69	0
СЭС	17	0,058	0,34	30,053	2,2
АЭС	16	0,155	0,92	474,9	0
Газовые ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	13	0,137	0,81	479,91	0,29
Угольные ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	11	0,083	0,49	487,19	0,49
<b>Ханты-Мансийский автономный округ</b>					
ВЭС	20	0,036	1,03	26,89	0
БиоЭС	19	0,043	1,23	143,06	0
СЭС	17	0,058	1,66	144,81	10,61
АЭС	16	0,155	4,44	2288,29	0
Газовые ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	13	0,137	3,93	2312,43	1,4
Угольные ТЭС с улавливанием CO <sub>2</sub>	11	0,083	2,38	2347,5	2,35

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в ходе исследования.

Газовые и угольные электростанции с технологиями улавливания и консервации CO<sub>2</sub> по большинству оцениваемых критериев показали худший результат, за исключением также относительно высокой величины КИУМ, достигающей значения в 49,84%.

### Заключение

В результате проведенной комплексной эколого-экономической оценки было установлено, что большинство регионов Уральского федерального округа, кроме Ямало-Ненецкого автономного округа, находятся в несбалансированном состоянии. Скорректировать сложившуюся негативную ситуацию возможно за счет развития низкоуглеродных и возобновляемых энергоисточников, их доля в энергобалансе регионов в таком случае должна достигнуть величины в 37–93% в зависимости от природных и хозяйственных особенностей региона. При этом наибольшей эффективностью по оцениваемым эколого-экономическим критериям обладает ветряная энергетика. При ее развитии потребуются наименьшие ежегодные инвестиционные и эксплуатационные затраты – 3,46 млрд долл. в совокупности по всем регионам УрФО, а величина материальной интенсивности окажется наименьшей – 90,57 млн т/год в суммарных МП-числах, что в 87 раз меньше, чем у угольных электростанций с технологиями улавливания и консервации CO<sub>2</sub>. Эмиссия углекислого газа при этом будет полностью отсутствовать. Чуть меньшая комплексная эколого-экономическая эффективность выявлена у биоэнергетики и солнечных электростанций. Ядерная энергетика не сильно уступила им в комплексной оценке благодаря высокой величине КИУМ. Также КИУМ значительно выше, чем у возобновляемых источников энергии, выявлен у газовых и угольных электростанций с технологиями улавливания и консервации CO<sub>2</sub>. В качестве рекомендаций следует отметить, что в настоящее время, при развитии низкоуглеродных источников энергии, для обеспечения устойчивого энергоснабжения требуется предусмотреть определенный уровень баланса между возобновляемыми и традиционными низкоуглеродными источниками энергии.

### Список литературы

1. 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. № 381. P. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012022.

2. Keiko H., Takanori M., Takashi H., Ken-ichi F., Takashi M. Development and application of the renewable energy regional optimization utility tool for environmental sustainability // Renewable Energy. 2016. № 93. С. 548-561. DOI: 10.1016/j.renene.2016.02.051.

3. Proskuryakova L. The Contribution of Low-Carbon Energy Technologies to Climate Resilience // Climate. 2023. № 11. P. 231. DOI: 10.3390/cli11120231.

4. Порфирьев Б.Н., Широв А.А. Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России // Вестник Российской академии наук. 2022. № 5. С. 415-423. DOI: 10.31857/S086958732205005X.

5. Dvinin D.Yu., Davankov A.Yu. Comprehensive Environmental and Economic Assessment of Low-Carbon Energy Sources // Journal of Applied Economic Research. 2024. Vol. 23. № 3. P. 696-720. DOI: 10.15826/vestnik.2024.23.3.028.

6. Двинин Д.Ю., Даванков А.Ю. Влияние уровня развития альтернативной энергетики на сбалансированность регионов Уральского федерального округа // Журнал экономической теории. 2021. Т. 18. № 2. С. 265-276. DOI: 10.31063/2073-6517/2021.18-2.8.

7. Sklar-Chik M., Brent A., De Kock I. Critical review of the levelised cost of energy metric // South African Journal of Industrial Engineering. 2016. № 27. P. 124-133. DOI: 10.7166/27-4-1496.

8. 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. 143-155. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.003.

9. Двинин Д.Ю., Даванков А.Ю. Влияние альтернативных источников энергии на социо-эколого-экономическую сбалансированность регионов. Челябинск: ЧелГУ, 2022. 126 с. DOI: 10.47475/9785727118245.

10. Анализ показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России. АО «СО ЕЭС». М., 2022. 47 с.

11. Liedtke C., Bienge K., Teubler J. Resource Use in the Production and Consumption System. The MIPS Approach // Resources. 2014. № 33. P. 544-574. DOI: 10.3390/resources3030544.

12. Даванков А.Ю., Двинин Д.Ю., Мальцев Ю.Г. Моделирование уровня сбалансированности социо-эколого-экономической системы региона при переходе к альтернативной энергетике // Управление в современных системах. 2021. № 2 (30). С. 3-12. DOI: 10.24412/2311-1313-30-3-12.

13. Gorshkov V.G., Makarieva A.M. Key ecological parameters of immobile versus locomotive life // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2020. № 5. P. 1–18. DOI: 10.21685/2500-0578-2020-1-1.

14. Ковалева Н.О., Столпникова Е.М. Экология: жизнь в «неустойчивой биосфере» // История и современность. 2022. № 4 (46). С. 58–80. DOI: 10.30884/iis/2022.04.04.

15. Guo H. Case study analysis of low-carbon economy // Advances in Economics Management and Political Sciences. 2023. № 63. 249-255. DOI: 10.54254/2754-1169/63/20231431.

16. Мальцев Ю.Г., Султанов Б.Р. Исследование социо-эколого-экономической сбалансированности регионов РФ // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2022. № 6-1. 110-115. DOI: 10.17513/vaael.2253.