

Международный научно-исследовательский журнал

«Прогрессивная экономика»

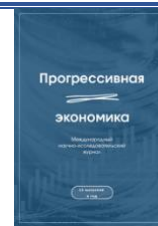
№ 10 / 2025 https://progressive-economy.ru/vypusk_1/sravnitelnyj-analiz-ekologicheskoy-effektivnosti-generiruyushhih-sistem-na-osnove-razlichnyh-vidov-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii/

Научная статья / Original article

Шифр научной специальности ВАК: 5.2.3

УДК 502.174.3:620.92

DOI: 10.54861/27131211_2025_10_137



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

*Плотницкий И.О., аспирант, Научно-исследовательский Центр
Информатики при МИД РФ, г. Москва, Россия*

*Журавлева Т.Б., доктор экономических наук, профессор, заведующий
отделом аспирантуры, Научно-исследовательский Центр Информатики при
МИД РФ, г. Москва, Россия*

Аннотация. В статье рассмотрен базовый метод оценки экологической эффективности электроэнергетических проектов – метод анализа жизненного цикла (Life-Cycle Assessment) и его основные модификации, используемые различными организациями в сфере экологических исследований и борьбы с изменением климата с целью проведения сравнительного анализа экологической эффективности генерирующих систем на основе различных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Определен наиболее важный показатель экологической эффективности электроэнергетических проектов – потенциал глобального потепления или показатель общего объема выбросов парниковых газов (эмиссия CO₂) за весь жизненный цикл работы электроэнергетической системы. Проведен сравнительный анализ экологической эффективности генерирующих систем на основе различных видов возобновляемых источников энергии по показателю потенциала глобального потепления. Полученные результаты показывают, что наиболее экологически эффективными являются ветрогенерирующие системы воздушного базирования, за ними следуют геотермальные и современные солнечные PV-системы III–IV поколений. Наименее эффективными среди ВИЭ оказались осмотические и электродиализные гидроустановки, но даже они значительно превосходят традиционные угольные и газовые электростанции. Определено, что использование инновационных технологий ВИЭ для проектирования и строительства генерирующих систем имеют высокую экологическую оценку в отношении снижения негативных последствий изменения климата. Практическая значимость проведенного исследования заключается в возможности использования



полученных результатов при разработке стратегий энергетического перехода, выборе приоритетных направлений инвестиций в возобновляемую энергетику.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, экологическая эффективность, метод анализа жизненного цикла, потенциал глобального потепления.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Плотницкий И.О., Журавлева Т.Б. Сравнительный анализ экологической эффективности генерирующих систем на основе различных видов возобновляемых источников энергии // Прогрессивная экономика. 2025. № 10. С. 137–152. https://doi.org/10.54861/27131211_2025_10_137.

Статья поступила в редакцию: 30.09.2025 г. Одобрена после рецензирования: 24.10.2025 г. Принята к публикации: 25.10.2025 г.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF GENERATING SYSTEMS BASED ON VARIOUS TYPES OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Plotnitsky I.O., Postgraduate student, Scientific Research Center of Informatics at the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation, Moscow, Russia

Zhuravleva T.B., Doctor of Economics, Professor, Head of the Postgraduate Department, Scientific Research Center for Informatics at the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation, Moscow, Russia

Abstract. The article considers the basic method of assessing the environmental efficiency of electric power projects – the Life-Cycle Assessment method and its main modifications used by various organizations in the field of environmental research and combating climate change in order to conduct a comparative analysis of the environmental efficiency of generating systems based on various types of renewable energy sources (RES). The most important indicator of the environmental efficiency of electric power projects has been identified – the global warming potential or the indicator of total greenhouse gas emissions (CO₂ emissions) over the entire life cycle of an electric power system. A comparative analysis of the environmental efficiency of generating systems based on various types of renewable energy sources in terms of global warming potential has been carried out. The results show that air-based wind generation systems are the most environmentally efficient, followed by geothermal and modern solar PV systems of the III–IV generations. Osmotic and electrodialysis hydraulic installations turned out to be the least effective among renewable energy sources, but even they are significantly superior to traditional coal and gas power plants. It is determined that the use of innovative renewable energy technologies for the design and construction of generating systems has a high environmental assessment in terms of reducing the negative effects of climate change. The practical significance of the conducted research lies in the possibility of using the results obtained in the development of energy transition strategies and the selection of priority areas for investments in renewable energy.



Keywords: renewable energy sources, environmental efficiency, life cycle analysis method, global warming potential.

JEL classification: J49, J21, P28.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Plotnitsky I.O., Zhuravleva T.B. (2025). Comparative analysis of the environmental efficiency of generating systems based on various types of renewable energy sources. *Progressivnaya ekonomika* [Progressive Economy], 10, 137–152. https://doi.org/10.54861/27131211_2025_10_137 (In Russ., abstract in Eng.)

The article was submitted to the editorial office: 30/09/2025. Approved after review: 24/10/2025. Accepted for publication: 25/10/2025.

Введение

На фоне индустриального развития и увеличения потребностей в энергии наблюдается существенное наращивание использования традиционных ископаемых видов топлива. При этом, одним из главных реципиентов ископаемого топлива выступает сектор электроэнергетической генерации, который является серьезным источником выбросов углекислого газа – к 2040 году данный показатель может достичь 16% совокупного объема выбросов в странах ОЭСР [1], что оказывает значительное негативное воздействие на окружающую среду и изменение климата. Разработка концепции борьбы с изменением климата, выработки соответствующих целей устойчивого развития и постепенный переход к декарбонизации и низкоуглеродной экономике привела к необходимости поиска альтернативных источников энергии, которые являются наиболее эффективным решением для минимизации соответствующих экологических проблем [2; 3]. По многочисленным исследованиям определено, что использование инновационных технологий ВИЭ в производстве электроэнергии уже к настоящему времени к существенному сокращению выбросов углекислого газа – по состоянию на 2023 год данное снижение достигло 527 млн т [4], а по прогнозным оценкам некоторых исследователей переход мировой электроэнергетики «на 100% возобновляемые источники энергии приведет к сокращению выбросов в эквиваленте углекислого газа достигнет 90% к 2040 году и сведению их к нулю к 2050 году» [3].

Таким образом, использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электроэнергетике и смежных сферах позволяет существенно снизить выбросы углекислого газа, что особенно важно в борьбе с изменением климата. При этом, важным аспектом оценки проектов генерирующих систем является анализ экологической эффективности. *Целью* исследования является проведение сравнительного анализа экологической эффективности



генерирующих систем на основе различных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Материалы и методы

Одним из методов анализа экологической эффективности генерирующих систем на основе различных видов энергии, который успешно зарекомендовал себя в теоретических и эмпирических исследованиях, выступает метод анализа жизненного цикла (англ. Life-Cycle Assessment, LCA) [5]. В электроэнергетике LCA-анализ представляет собой методологию оценки потенциального воздействия генерации электроэнергии из какого-либо источника (возобновляемого или невозобновляемого) на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла объекта генерации, начиная от добычи сырья до завершения эксплуатации [6].

LCA-анализ базируется на проведении количественной оценки энергетических затрат на входе и экологического следа от генерации электроэнергии на выходе по каждой стадии жизненного цикла и в целом. Особенность методов LCA-анализа заключается в оценке различных индикаторов воздействия. Методы LCA-анализа различаются по включенным в методику индикаторам, технологии их расчета, весовым коэффициентам приведения и нормализации с целью приведения к единому показателю.

В настоящее время разработаны и используются следующие методы в рамках LCA-анализа:

1. Метод оценки экологического воздействия CML-2001 [7], разработан Институтом экологических исследований (Нидерланды), как руководство к стандарту ISO 14042 «Управление окружающей средой. Оценка воздействия жизненного цикла». Данный метод называется методом средних точек, т.к. оценивает десять единичных показателей без их разделения по направлениям воздействия. Показатели включаются только в три категории – базовые показатели, специфичные показатели (связанные с определенным исследованием), прочие показатели. Метод CML-2001 не позволяет вычислить единый интегральный индикатор воздействия.

2. Метод Eco-indicator 99 [8] разработан консалтинговой компании в сфере устойчивого развития PRé Sustainability. Данный метод ориентирован на оценку экологического ущерба путем расчета показателей по трем направлениям воздействия – здоровье человека, качество экосистемы, использование минеральных и ископаемых ресурсов, со сведением в единый показатель экологического ущерба.

3. Метод оценки экологического воздействия ReCiPe 2016 [9] – совместная разработка Национального института общественного здоровья и окружающей среды Нидерландов (RIVM) и консалтинговой компании в сфере устойчивого развития PRé Sustainability. Основная цель проведения расчетов в рамках метода ReCiPe – перевод показателей добычи и использования ресурсов, а также выбросов в соответствующие баллы экологического

воздействия, которые отражают уровень влияния восемнадцати показателей, разбитых на три направления воздействия – здоровье человека, экосистема, доступность ресурсов.

4. Метод оценки экологического дефицита – Eco-Factors 2021 [10] – разработка Федерального ведомства по охране окружающей среды Швейцарии. Данный метод позволяет оценить воздействие выбросов, использования ресурсов и образования отходов на экологию в рамках LCA-анализа. Ключевыми показателями метода Eco-Factors 2021 являются экологические факторы – индикаторы нанесения вреда окружающей среде, которые измеряются в экобаллах (нем. Umweltbewertungspunktzahl, UBP).

5. Метод оценки экологического следа ЕС – European environmental footprint method EF 3.1 – 2023 [11]. Данный метод включает шестнадцать единичных показателей экологического воздействия, которые после нормализации (приведения к единой единице измерения) и относительной оценки по весовым коэффициентам суммируются в общую балльную оценку экологического следа (EF score).

6. Метод IMPACT World + 2019 [9]. Данный метод является совместной разработкой нескольких организаций из разных стран мира – Международный центр оценки жизненного цикла продуктов, процессов, услуг (CIRAIG, Канада), Мичиганский университет (США), Консалтинговая компания Quantis International (Швейцария), Датский технический университет (DTU, Дания) и Федеральная политехническая школа Лозанны (EPFL, Швейцария). Метод основан на оценке показателей оценки ущерба по трем направлениям воздействия – здоровье человека, качество экосистемы, эксплуатация природных ресурсов. Метод IMPACT World позволяет проводить оценку на четырех уровнях – глобальный (по умолчанию), континентальный (или региональный), страновой и местный.

Все представленные методы LCA-анализа, кроме метода CML-2001, являются интегральными, т.е. позволяют рассчитать единый показатель экологического воздействия как суммарный показатель оценки после нормализации (приведения к единой единице измерения) и относительной оценки по весовым коэффициентам показателей по каждому направлению воздействия. В таблице 1 представлено сравнение указанных выше методов LCA-анализа по используемым в них индикаторам оценки экологического воздействия.

Таблица 1

Индикаторы оценки экологического воздействия, используемые для LCA-анализа в рамках различных методов

Table 1

Environmental impact assessment indicators used for LCA analysis using various methods

Показатель	CML-2001 (базовые показатели)	Eco-indicator 99	ReCiPe	Eco-Factors 2021	EF 3.1	IMPACT World +
Потенциал глобального потепления (эмиссия CO ₂)	√	√	√	√	√	√
Потенциал истощения абиотических (минеральных) ресурсов	√	√	√	√		
Потенциал истощения водных ресурсов		√	√			
Потенциал истощение запасов ископаемого топлива	√	√	√			√
Потенциал закисления среды	√	√	√	√	√	√
Потенциал эвтрофикации (заболачивания водоемов)	√	√	√			√
Потенциал разрушения озонового слоя	√	√	√	√	√	√
Потенциал фотохимического окисления	√		√			
Потенциал загрязнения пресной воды токсичными веществами	√	√	√			√
Потенциал загрязнения морской акватории токсичными веществами	√	√	√			√
Потенциал токсического воздействие на человека	√	√	√			√
Потенциал токсического воздействия на земные экосистемы	√	√	√		√	√
Радиоактивное излучение		√	√	√	√	√
Потенциал образования фотохимического озона					√	
Объем использования земельных ресурсов		√	√		√	√
Объем водопотребления					√	
Использование ископаемых ресурсов (первичных видов энергии)				√	√	
Потенциал канцерогенного загрязнения				√		
Потенциал бионакопления химических вещества				√		
Эффективность воздействия				√		
Потенциал ущерба биоразнообразию				√		
Общее количество показателей	11	13	14	10	9	11

Источник: составлено авторами

Source: compiled by the authors



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Из представленных в таблице 1 данных видно, что только два показателя используются во всех методиках оценки экологического воздействия – Потенциал глобального потепления (эмиссия CO₂) и Потенциал закисления среды. Ввиду ограниченного объема статьи и невозможности анализа всех показателей в рамках проведения сравнительного анализа экологической эффективности генерирующих систем на основе различных видов инновационных технологий ВИЭ, в рамках настоящего исследования будем использовать показатель – Потенциал глобального потепления или показатель общего объема выбросов парниковых газов (эмиссия CO₂) за весь жизненный цикл работы электроэнергетической системы.

Оценка экологической эффективности использования PV-технологий в рамках LCA-анализа прослеживается по всем четырем поколениям. В перерасчете на минимальный среди проанализированных срок службы PV-установок – 20 лет, будут получены следующие результаты в отношении потенциала глобального потепления или эмиссии CO₂ (см. рисунок 1).

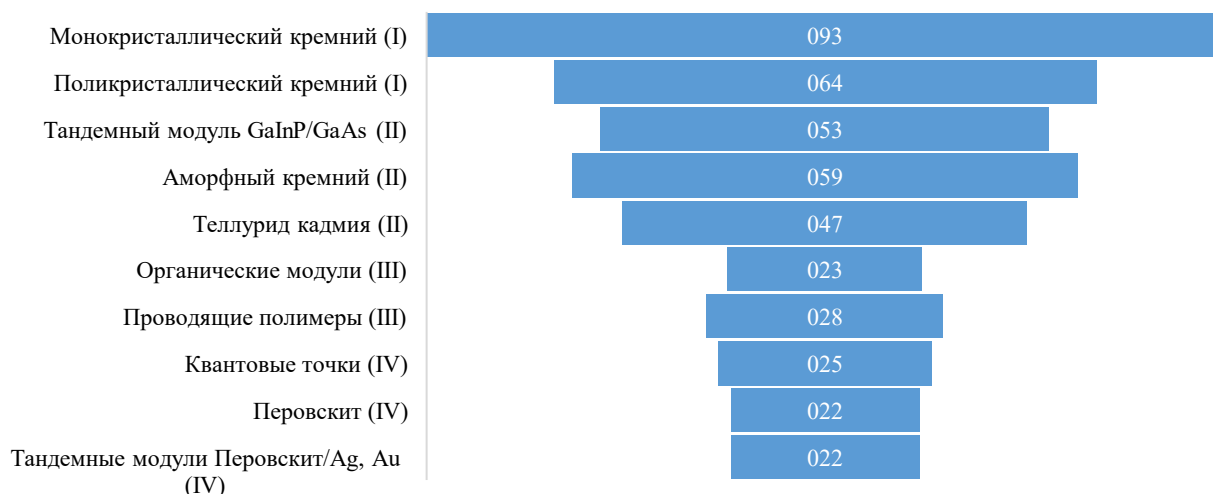


Рис. 1. Результаты LCA-анализа в отношении потенциала глобального потепления (эмиссии CO₂) при сроке службы PV-установок 20 лет, г·CO₂экв/кВт·ч

Источник: составлено авторами по собственным расчетам на основании данных литературного обзора

Fig. 1. Results of the LCA analysis regarding the global warming potential (CO₂ emissions) with a service life of PV installations of 20 years, g·CO₂eq/kWh

Source: compiled by the authors according to their own calculations based on data from the literature review

Существенный объем удельного воздействия на окружающую среду, выраженную в достаточно высоком показателе эмиссии CO₂, (по оценкам различных исследователей от 60 до 95 г·CO₂экв/кВт·ч) в значительной степени обусловлен существенной энергоемкостью производства моно- и

поликристаллического кремния. Для последующих поколений PV-установок менее энергозатратные процессы производства ведут к сокращению воздействия на экологию в разрезе выбросов углекислого газа – для II поколения данный показатель варьируется в пределах – 45-60 г·CO_{2экв}/кВт·ч, для III и IV поколения – 22-28 г·CO_{2экв}/кВт·ч, при одновременном сокращении сроков возмещения энергетических затрат.

Таким образом, можно сделать вывод о повышении экологической эффективности PV-установок в рамках перехода между поколениями, а также внедрения инновационных технологий.

Использование инструментов LCA-анализа для оценки экологического воздействия SCP-технологий достаточно распространено в научной литературе. При приведении результатов исследования к единому сроку службы CSP-установок – 20 лет в отношении потенциала глобального потепления или эмиссии CO₂ будут получены следующие результаты (см. рисунок 2).

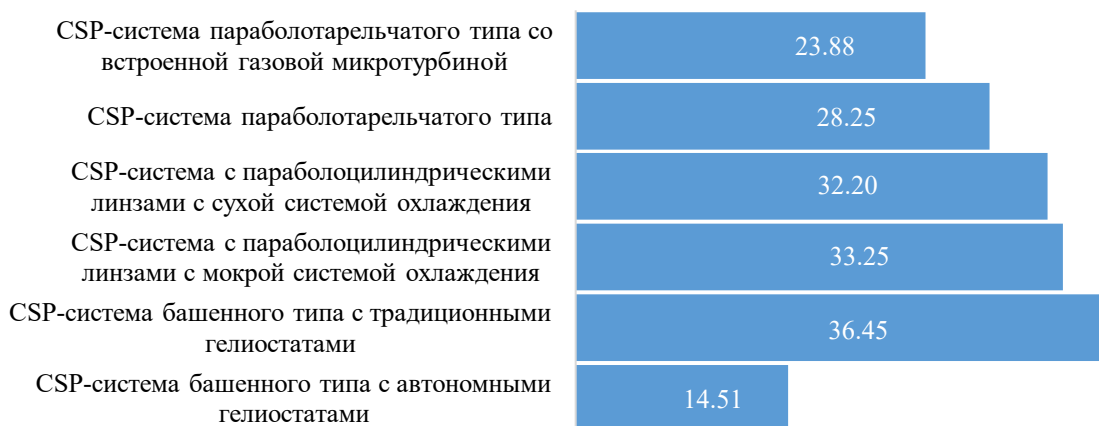


Рис. 2. Результаты LCA-анализа в отношении потенциала глобального потепления (эмиссии CO₂) при сроке службы CSP-установок 20 лет, г·CO_{2экв}/кВт·ч

Источник: составлено авторами по собственным расчетам на основании данных литературного обзора

Fig. 2. Results of the LCA analysis regarding the global warming potential (CO₂ emissions) with a service life of CSP installations of 20 years, g·CO_{2eq}/kWh

Source: compiled by the authors according to their own calculations based on data from the literature review

Наименьший вклад в потенциал глобального потепления (эмиссия CO₂) при сроке службы 20 лет составляет 14,51 г·CO_{2экв}/кВт·ч для CSP-систем башенного типа, базирующихся на автономных гелиостатах, а наибольший – 36,45 г·CO_{2экв}/кВт·ч – для CSP-систем башенного типа с традиционными гелиостатами. Использование инструментов LCA-анализа для оценки

экологического воздействия ветроэнергетических технологий в меньшей степени распространены в научной литературе, в основном исследователи анализируют экологическое воздействие ветрогенераторов с горизонтальной и вертикальной осями вращения, при этом практически все изыскания направлены на оценку влияния ветроэнергетических технологий в странах Европы. Оценка для ветровых энергогенерирующих установок воздушного базирования производится в единичных случаях, а безопасные турбины и их экологическое воздействие не рассматривается совсем.

В отношении потенциала глобального потепления или эмиссии CO₂ будут получены следующие результаты (см. рисунок 3).



Рис. 3. Результаты LCA-анализа в отношении потенциала глобального потепления (эмиссии CO₂) при сроке службе ветроэнергетических установок 20 лет, г·CO₂экв/кВт·ч

Источник: составлено авторами по собственным расчетам на основании данных литературного обзора

Fig. 3. Results of the LCA analysis with respect to the global warming potential (CO₂ emissions) for the service life of wind power plants of 20 years, g·CO₂eq/kWh

Source: compiled by the authors according to their own calculations based on data from the literature review

Таким образом, можно сделать вывод о том, что инновационные технологии, применяемые в ветроэнергетике ведут к снижению показателя (эмиссия CO₂), если традиционные ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения имеют потенциал глобального потепления при 20-летнем сроке службы в среднем диапазоне 12,77 г·CO₂экв/кВт·ч, то переход на ветровые энергогенерирующие установки воздушного базирования ведет к снижению данного показателя до 7,8 г·CO₂экв/кВт·ч.

В связи с меньшим распространением инновационных технологий гидрогенерации, анализ экологического воздействия данных систем находится в стадии разработки и недостаточно изучен в теоретических и эмпирических исследованиях. При приведении результатов исследования к единому сроку службы гидроэнергетических установок – 20 лет в отношении потенциала

глобального потепления или эмиссии CO₂ получены следующие результаты (см. рисунок 4).

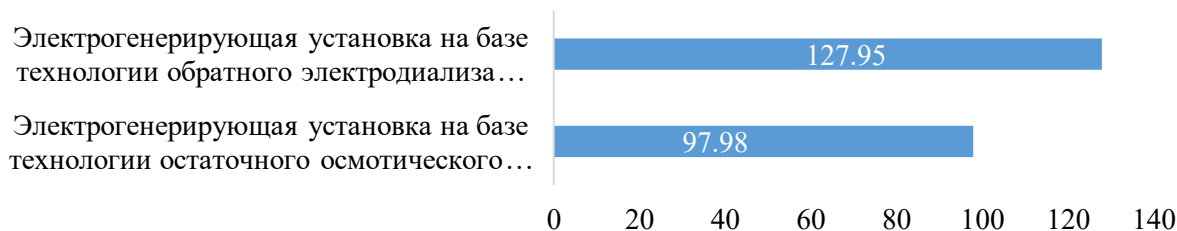


Рис. 4. Результаты LCA-анализа в отношении потенциала глобального потепления (эмиссии CO₂) при сроке службы гидроэнергетических установок 20 лет, г·CO₂экв/кВт·ч

Источник: составлено авторами по собственным расчетам на основании данных литературного обзора

Fig. 4. Results of the LCA analysis with respect to the global warming potential (CO₂ emissions) for the lifetime of hydropower plants of 20 years, g·CO₂eq/kWh

Source: compiled by the authors according to their own calculations based on data from the literature review

Можно сделать вывод о том, что инновационные технологии, применяемые в гидроэнергетике, показывают умеренное значение эмиссии CO₂, для технологии PRO при 20-летнем сроке службы в среднем 97,98 г·CO₂экв/кВт·ч, показатели при использовании технологии RED намного выше – 127,95 г·CO₂экв/кВт·ч. В сравнении с традиционной гидроэнергетикой, где потенциал глобального потепления может достигать 184-220 г·CO₂экв/кВт·ч¹, рассмотренные инновационные технологии вносят существенный вклад в борьбу с изменением климата.

Использование инструментов LCA-анализа для оценки экологического воздействия геотермальных энергетических технологий в настоящее время недостаточно распространены в научной литературе.

В перерасчете на минимальный среди проанализированных срок службы геотермальных установок – 20 лет, получены следующие результаты в отношении потенциала глобального потепления или эмиссии CO₂ (см. рисунок 5).

¹ Достижение углеродной нейтральности в регионе ЕЭК ООН: комплексная оценка жизненного цикла источников электроэнергии. UNECE. Режим доступа: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/LCA_russian%20version-compressed.pdf (дата обращения: 07.08.2025)

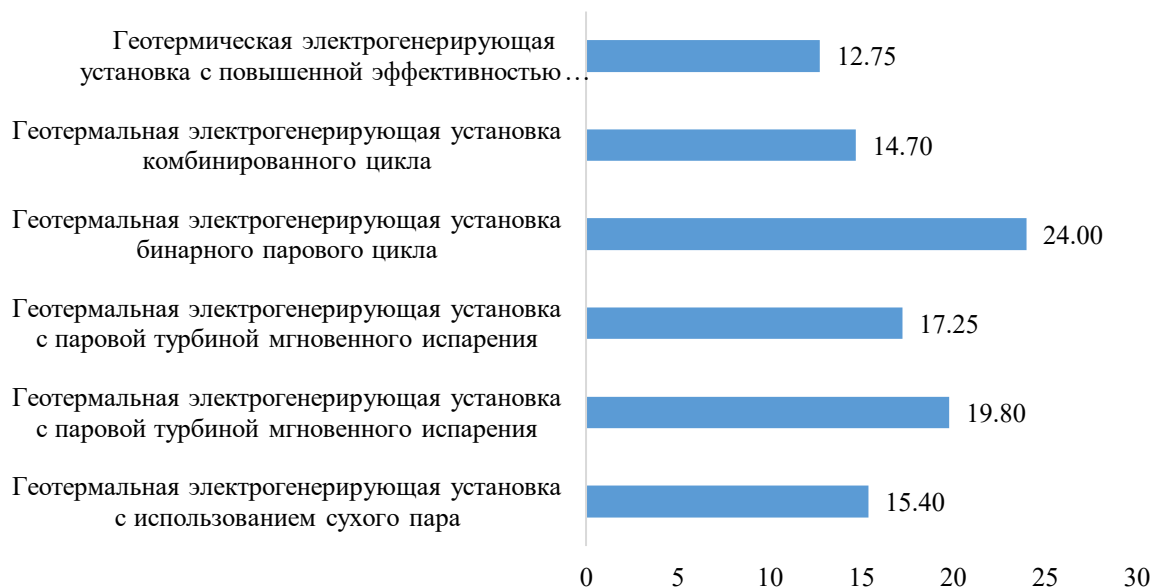


Рис. 5. Результаты LCA-анализа в отношении потенциала глобального потепления (эмиссии CO₂) при сроке службы геотермальных установок 20 лет, г·CO₂экв/кВт·ч

Источник: составлено авторами по собственным расчетам на основании данных литературного обзора

Fig. 5. Results of the LCA analysis with respect to the global warming potential (CO₂ emissions) for the service life of geothermal installations of 20 years, g·CO₂eq/kWh

Source: compiled by the authors according to their own calculations based on data from the literature review

Наибольший объем удельного воздействия на окружающую среду приходится на геотермальные электроэнергетические установки с использованием бинарного парового цикла – 24 г·CO₂экв/кВт·ч при 20-летнем сроке службы, что в значительной степени обусловлено существенной энергоемкостью производства электроэнергии при использовании данной технологии. Наименьшее воздействие оказывают геотермальные электроэнергетические установки с повышенной эффективностью энергопреобразования – 12,75 г·CO₂экв/кВт·ч, при одновременном существенном сокращении сроков возмещения энергетических затрат.

Данное положение свидетельствует о повышении экологической эффективности геотермальных электроэнергетических установок по мере внедрения инновационных технологий.

Оценка экологического воздействия гибридных энергетических технологий в настоящее время также недостаточно изучена. В некоторых исследованиях авторы научных работ проводят сравнительный анализ нескольких гибридных технологий при одинаковом сроке службы установок.

В отношении потенциала глобального потепления или эмиссии CO₂ будут получены следующие результаты (см. рисунок 6).



Рис. 6. Результаты LCA-анализа в отношении потенциала глобального потепления (эмиссии CO₂) при сроке службы гибридных электроэнергетических установок 20 лет, г·CO₂экв/кВт·ч

Источник: составлено авторами по собственным расчетам на основании данных литературного обзора

Fig. 6. Results of the LCA analysis with respect to the global warming potential (CO₂ emissions) for the service life of hybrid electric power plants of 20 years, g·CO₂eq/kWh

Source: compiled by the authors according to their own calculations based on data from the literature review

Результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что гибридные электроэнергетические установки имеют показатели эмиссии CO₂ в диапазоне от 18,3 г·CO₂экв/кВт·ч до 27,4 г·CO₂экв/кВт·ч в зависимости от используемых ВИЭ, комбинации технологий и других факторов.

Если провести сравнение экологической эффективности в отношении потенциала глобального потепления (эмиссии CO₂) для генерирующих систем на основе различных видов ВИЭ между собой и в сопоставлении с генерирующими системами на традиционных видах энергии при сроке службы 20 лет, то будут получены следующие результаты (см. рисунок 7). Для генерирующих систем на основе всех видов ВИЭ были взяты средние значения по данным из представленного выше анализа. Для проведения сравнения PV-панели взяты только III и IV поколения как инновационные и более прогрессивные, ветрогенераторы разделены на два вида – воздушного и наземного базирования, генерирующие установки на основе других видов ВИЭ взяты в среднем без разделения по типам технологий. Данные о потенциале глобального потепления генерирующих систем на традиционных видах энергии взяты из отчета ООН по комплексной оценке жизненного цикла источников электроэнергии [12].

Из представленных данных видно, что для генерирующих систем на основе различных видов ВИЭ экологической эффективности в отношении

потенциала глобального потепления существенно ниже, чем для традиционных генерирующих систем. Наиболее эффективными с данной позиции являются ветрогенерирующие системы воздушного базирования со средней эмиссией CO_2 7,8 г· $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /кВт·ч.



Рис. 7. Результаты сравнительного анализа экологической эффективности в отношении потенциала глобального потепления (эмиссии CO_2) для генерирующих систем на основе различных видов ВИЭ и традиционных видах энергии

Источник: составлено авторами по собственным расчетам на основании данных литературного обзора

Fig. 7. Results of a comparative analysis of environmental efficiency in relation to the potential of global warming (CO_2 emissions) for generating systems based on various types of renewable energy sources and traditional types of energy

Source: compiled by the authors according to their own calculations based on data from the literature review

По другим технологиям ВИЭ результаты в среднем не превышают 30 г· $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /кВт·ч, кроме осмотических и электролизных гидроэнергетических установок – в среднем 112,96 г· $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /кВт·ч, что существенно ниже традиционных гидроэлектростанций со средней эмиссией CO_2 более 200 г· $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /кВт·ч. При этом, традиционное ископаемое топливо (уголь и природный газ) для выработки электроэнергии дают максимальные значения потенциала глобального потепления. Таким образом, использование инновационных технологий ВИЭ для проектирования и строительства генерирующих систем имеют высокую экологическую оценку в отношении снижения негативных последствий изменения климата.

При этом, необходимо принимать во внимание еще одно допущение – использование данных по экологическому воздействию инновационных технологий ВИЭ в электрогенерации на объектах за рубежом невозможно в полной мере принимать для российских условий, т.к. фиксируются существенные различия по географическому размещению, технологическим условиям и другим факторам.

Заключение

Проведенный анализ показал, что метод анализа жизненного цикла (LCA) является универсальным инструментом оценки экологической эффективности генерирующих систем, позволяющим учитывать воздействие на окружающую среду на всех стадиях жизненного цикла – от добычи сырья до вывода объекта из эксплуатации. Среди рассмотренных методов LCA наибольшую комплексность и информативность обеспечивают подходы ReCiPe и IMPACT World+, позволяющие получать сводную оценку экологического ущерба.

Сравнительный анализ показателя потенциала глобального потепления показал, что генерирующие системы на основе ВИЭ характеризуются значительно более низким уровнем эмиссий CO₂, чем традиционные установки на ископаемом топливе. Наиболее экологически безопасными являются ветровые установки воздушного базирования и фотоэлектрические системы последних поколений. Внедрение инновационных технологий в области ВИЭ обеспечивает повышение экологической эффективности и сокращение энергетических затрат на производство электроэнергии, что делает данные системы ключевым элементом устойчивого развития и декарбонизации мировой экономики.

Литература

1. Bella G. et al. The relationship among CO₂ emissions, electricity power consumption and GDP in OECD countries // Journal of Policy Modeling. 2014. Vol. 36 (6). P. 970–985. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2014.08.006>
2. Bogdanov D. et al. Full energy sector transition towards 100% renewable energy supply: integrating power, heat, transport and industry sectors including desalination // Applied Energy, 2021. Vol. 283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116273>
3. Bogdanov D. et al. Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability // Energy. 2021. Vol. 227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>
4. Farghali M. et al. Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review. Environmental Chemistry Letters, 2023. Vol. 21. P. 1381–1418. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01587-1>



5. Eco-indicator 99. A damage-oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Manual for Designers, 2000. [Электронный ресурс] URL: https://pre-sustainability.com/files/2013/10/EI99_Manual.pdf (дата обращения: 18.07.2025).
6. Elum Z.A.A., Momodu A.S. Climate change mitigation and renewable energy for sustainable development in Nigeria: a discourse approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 76. P. 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.040>
7. Environmental Footprint (EF). European Platform on LCA, 2022. [Электронный ресурс] URL: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.html> (дата обращения: 18.07.2025).
8. Handbook on life cycle assessment. Writing an operational guide to the ISO standards for LCA and related sub-projects. Universiteit Leiden. [Электронный ресурс] URL: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-new-dutch-lca-guide> (дата обращения: 22.07.2025).
9. IMPACT World +. Methodology. Available at: <https://www.impactworldplus.org/methodology/> (дата обращения: 18.07.2025)
10. Schumacher L. ReCiPe 2016. Life cycle assessment. PRé Sustainability, 2025. [Электронный ресурс] URL: <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/> (дата обращения: 26.07.2025).
11. Swiss Eco-Factors 2021 according to the Ecological Scarcity Method. Federal Office for the Environment FOEN, 2021. 252 p. [Электронный ресурс] URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/economy-consumption/economy-and-consumption-publications/publications-economy-and-consumption/eco-factors-switzerland.html> (дата обращения: 28.07.2025).
12. Достижение углеродной нейтральности в регионе ЕЭК ООН: комплексная оценка жизненного цикла источников электроэнергии. UNECE. [Электронный ресурс] URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/LCA_russian%20version-compressed.pdf (дата обращения: 30.08.2025).

References

1. Bella, G., Sharif, A., & Azam, M. (2014). The relationship among CO₂ emissions, electricity power consumption and GDP in OECD countries. *Journal of Policy Modeling*, 36(6), 970–985. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2014.08.006> (In Eng.)
2. Bogdanov, D., Ram, M., & Aghahosseini, A. (2021). Full energy sector transition towards 100% renewable energy supply: integrating power, heat, transport and industry sectors including desalination. *Applied Energy*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116273> (In Eng.)
3. Bogdanov, D., Ram, M., & Aghahosseini, A. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467> (In Eng.)



4. Farghali, M., Abdel-Rahman, M., & Ezzat, M. (2023). Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 1381–1418. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01587-1> (In Eng.)
5. Eco-indicator 99. A damage-oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Manual for Designers. (2000). Retrieved from: https://pre-sustainability.com/files/2013/10/EI99_Manual.pdf (Date of access: 18.07.2025). (In Eng.)
6. Elum, Z. A. A., & Momodu, A. S. (2017). Climate change mitigation and renewable energy for sustainable development in Nigeria: a discourse approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.040> (In Eng.)
7. Environmental Footprint (EF). European Platform on LCA. (2022). Retrieved from: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.html> (Date of access: 18.07.2025). (In Eng.)
8. Handbook on Life Cycle Assessment. Writing an operational guide to the ISO standards for LCA and related sub-projects. Universiteit Leiden. Retrieved from: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-new-dutch-lca-guide> (Date of access: 22.07.2025). (In Eng.)
9. IMPACT World +. Methodology. Retrieved from: <https://www.impactworldplus.org/methodology/> (Date of access: 18.07.2025). (In Eng.)
10. Schumacher, L. (2025). ReCiPe 2016. Life Cycle Assessment. PRé Sustainability. Retrieved from: <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/> (Date of access: 26.07.2025). (In Eng.)
11. Swiss Eco-Factors 2021 according to the Ecological Scarcity Method. (2021). Federal Office for the Environment (FOEN), 252 p. Retrieved from: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/economy-consumption/economy-and-consumption-publications/publications-economy-and-consumption/eco-factors-switzerland.html> (Date of access: 28.07.2025). (In Eng.)
12. Dostizhenie uglerodnoy neytral'nosti v regione EEK OON: kompleksnaya otsenka zhiznennogo tsikla istochnikov elektroenergii [Achieving carbon neutrality in the UNECE region: comprehensive life cycle assessment of electricity sources]. (2023). UNECE. Retrieved from: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/LCA_russian%20version-compressed.pdf (Date of access: 30.08.2025). (In Russ.)

© Плотницкий И.О., Журавлева Т.Б., 2025 г.

