

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВЭС ПО УКРУПНЁННЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

П.Ю. Михеев, А.С. Страхов, С.А. Агафонов, А.И. Лёвина

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
veehkim@rambler.ru*

В статье представлены данные о развитии ветроэнергетики в России и мире. Приведены результаты расчётов эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии в течение жизненного цикла наземной ветроэлектростанции (ВЭС), расположенной в Арктической зоне РФ, полученные по новой методике. Оценён геоэкологический эффект от использования наземной ВЭС в качестве источника электроснабжения по сравнению с тепловыми электростанциями на каменном угле, мазуте и природном газе. Определена энергетическая эффективность наземной ВЭС.

Ключевые слова: ветроэлектростанция, жизненный цикл, укрупнённые показатели, эмиссия, загрязняющие вещества, экологическая эффективность, затраты энергии, энергетическая эффективность.

В 2024 г. установленная мощность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире выросла на 700 ГВт, а суммарная установленная мощность ВИЭ достигла 4448 ГВт [1, 2]. Ветровая энергетика является одной из самых динамично развивающихся отраслей ВИЭ. Установленная мощность

ветроэлектростанций (ВЭС) к концу 2024 г. составила более 1000 ГВт, при этом её прирост в 2024 г. составил порядка 120 ГВт [3]. По прогнозам [4] доля ветровой энергетики будет возрастать и к 2030 г. её доля достигнет 21%. В России ветроэнергетика также активно развивается несмотря на существующие проблемы и ограничения. По данным Системного оператора единой энергетической системы РФ установленная мощность ВЭС в 2024 г. превысила 2,5 ГВт [5]. В настоящее время в России эксплуатируется более 40 ВЭС [6]. Из-за динамичного развития ветроэнергетики увеличиваются и масштабы её воздействия на окружающую среду.

В мировой практике для оценки загрязнения окружающей среды и энергетической эффективности энергообъектов применяется анализ жизненных циклов (АЖЦ), который проводится с учётом требований международных стандартов. Для оценки загрязнения окружающей среды определяются эмиссии загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС (строительство, эксплуатация и снятие с эксплуатации), а энергетической эффективности – затраты энергии. Несмотря на внедрение программного обеспечения АЖЦ остаётся громоздким, трудоёмким, не унифицированным и имеет ограничения по использованию. АЖЦ главным образом предназначен для проведения «детальных» расчётов эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла энергообъектов, результаты которых применяются для оптимизации их параметров и технических характеристик, составления экологических деклараций, которые используются преимущественно в маркетинговых целях. В России АЖЦ не применяется, а альтернативных методик, как в России, так и в других странах мира в настоящее время нет. Для унификации расчётов эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии необходимо использовать унифицированную методику определения эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии на основе укрупнённых экологических и энергетических показателей (далее укрупнённых показателей) [6, 7].

В работах [8,9] была предложена новая методика определения эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии в течение жизненного цикла ВЭС по укрупнённым показателям, проведена её апробация. В рамках методики был разработан алгоритм определения эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии при производстве элементов ветроэнергетических установок (ВЭУ) и ВЭС, предложен математический аппарат для их расчёта на этапах жизненного цикла ВЭС и критерии экологической и энергетической эффективности. Также было проведено сравнение результатов расчётов по разработанной методике с результатами, полученными на основе апробированного в мировой практике АЖЦ. Результаты показали хорошую сходимость (разница значений составила менее 10%).

В этой статье приведены результаты расчётов эмиссий загрязняющих веществ ($\text{CO}_2\text{экв}$ (диоксид углерода), $\text{SO}_2\text{экв}$ (диоксид серы), $\text{PO}_4\text{экв}$ (фосфаты) и затрат энергии с применением укрупнённых показателей в течение жизненного цикла Кольской ВЭС (Мурманская область), на основе которых была определена её экологическая и энергетическая эффективность.

На рис. 1 показана фотография Кольской ВЭС, а в табл. 1 приведены её основные параметры и технические характеристики. Количество электроэнергии, производимой на Кольской ВЭС при проведении расчётов принято согласно данным, приведённым в [11] и равно $750 \cdot 10^6$ кВт·ч в год. Срок эксплуатации Кольской ВЭС принят по аналогии с другими ВЭС равным 25 лет.



Рис. 1. Кольская ВЭС [10]

Таблица 1

Основные параметры технические характеристики Кольской ВЭС [6, 7]

Наименование	Значение/материалы
Фирма производитель ВЭУ	Siemens-Gamesa (Германия, Испания)
Модель ВЭУ	G 126
¹ Ветровой класс ВЭУ	IIA
Установленная мощность ВЭУ, МВт	3,55
Количество ВЭУ в составе ВЭС, шт.	57
Установленная мощность ВЭС, МВт	202,35
Диаметр ротора ВЭУ, м	132
Ометаемая поверхность ВЭУ, м ²	13685
² Длина лопастей ВЭУ, м	65
Материал лопастей ВЭУ	стекловолокно, углеродное волокно, эпоксидная смола
Высота башни ВЭУ, м	84
Материал и форма башни ВЭУ	сталь, коническая
Масса фундамента ВЭУ, т	2400
³ Масса кабелей ВЭС, т	5100
Площадь занимаемая ВЭС, га	257

Примечания: 1. Ветровой класс ВЭУ приведён в соответствии с международной классификацией. 2. Длина лопастей дана с округлением до метра. 3. Массы внутренних кабелей для проведения расчётов были определены исходя из длины кабелей, сечений и напряжений.

Результаты расчётов эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии в течение жизненного цикла Кольской ВЭС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчётов эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии в течение жизненного цикла Кольской ВЭС [6, 7]

Технологический процесс	Эмиссии			Затраты энергии, МВт·ч
	CO ₂ экв, т	SO ₂ экв, т	PO ₄ экв, кг	
Производство элементов ВЭС	156 315,0	644,0	52 540,0	563730,0
Строительные работы и	6252,6	25,8	2102,6	28186,5
Сервисное обслуживание	7815,8	32,2	2627,0	28186,5
Демонтаж	4689,5	19,3	1575,1	16911,9
Утилизация	54 710,3	193,2	5254,0	140932,5
Всего (при демонтаже)	175 072,9	721,3	58 844,7	546818,1
Всего (с учётом утилизации)	115 673,1	508,8	52 015,6	422797,5

Примечание. Утилизация включает переработку и повторное использование материалов.

Кроме этого, был выполнен расчёт эмиссии CO₂экв, которая может быть предотвращена при выборе в качестве источника электроснабжения Кольской ВЭС по сравнению с использованием для производства электроэнергии на тепловой электростанции (ТЭС) на различном топливе. Расчёт проводился по новой методике, предложенной в [8,9], и в соответствии с нормативно-правовыми документами [11, 12]. Из результатов расчёта следует, что использование в качестве источника электроснабжения Кольской ВЭС позволяет предотвратить от 9,1 до 15,85 млн т эмиссии CO₂экв (рис. 2).

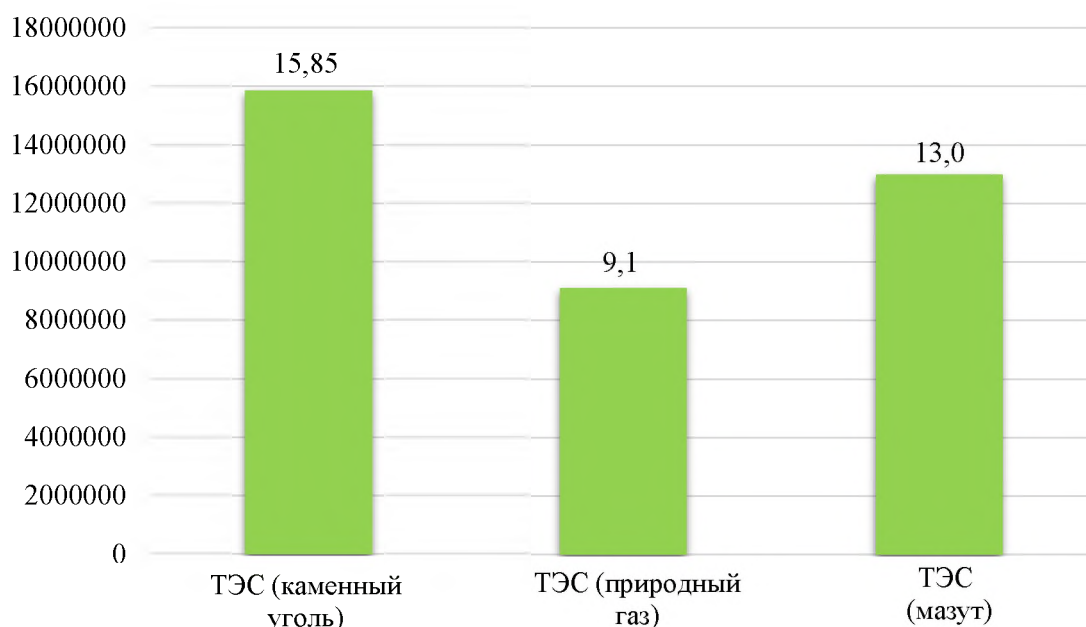


Рис. 2. Предотвращённые эмиссии CO₂экв при эксплуатации Кольской ВЭС по сравнению с использованием ТЭС, млн т [6]

В соответствии с методикой, предложенной в [8, 9], были определены коэффициенты экологической и энергетической эффективности для Кольской ВЭС. Согласно полученным результатам, эмиссия CO₂экв в течение жизненного цикла ВЭС меньше эмиссии CO₂экв при производстве

электроэнергии на ТЭС на каменном угле в 90–136 раз, на мазуте — в 74–112 раз и природном газе — в 51–79 раз (в зависимости от типа топлива, используемого на ТЭС, и рассматриваемых процессов на этапе снятия ВЭС с эксплуатации) [6]. Срок энергетической окупаемости Кольской ВЭС равен 8,6 мес. при рассмотрении на этапе снятия с эксплуатации демонтажа и 6,7 мес. при утилизации. Коэффициент энергетической эффективности Кольской ВЭС равен 34 при рассмотрении варианта демонтажа и 44 при утилизации [7].

Таким образом можно сделать вывод, что Кольская ВЭС является экологически и энергетически эффективным энергообъектом.

Применение укрупнённых показателей позволяет значительно упростить и унифицировать определение эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии в течение жизненного цикла ВЭС. При наличии соответствующих данных и обосновании использование укрупнённых показателей возможно и для других типов энергообъектов, что позволит унифицировать определение эмиссий загрязняющих веществ и затрат энергии и более широко использовать экологические и энергетические показатели наряду с экономическими показателями для многокритериальной оценки эффективности жизненного цикла энергообъектов.

Это исследование было выполнено Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого в рамках гранта Российского научного фонда № 23–78–10190 «Моделирование цифровой и логистической инфраструктуры в интересах устойчивого развития Арктики» <https://rscf.ru/project/23-78-10190>.

Библиографический список

1. Global Wind Energy Report 2024. URL: https://26973329.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/26973329/2.%20Reports/Global%20Wind%20Report/GWR24.pdf?__hstc=45859835.705de88cb34c799f34ba7f3c06ec6d9f.1744111285006.1744111285006.1744111285006.1&__hssc=45859835.4.1744111285006&__hsfp=4049606327 (дата обращения 18.09.2025).
2. Renewable capacity statistics 2025. URL: <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025> (дата обращения 18.09.2025).
3. Global Energy Review 2025. International Energy Agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf> (дата обращения 18.09.2025).
4. Global Energy Perspective 2024. McKinsey and Company. – 41 p.
5. Системный оператор единой энергетической системы РФ. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2025/res/res_feb_25.pdf (дата обращения 19.09.2025).
6. Михеев П.Ю., Страхов А.С., Агафонов С.А. Оценка загрязнения окружающей среды в течение жизненного цикла наземной ветроэлектростанции в Арктике. Арктика и инновации. 2025. №3(3). С. 65–78. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-3-65-78>.

7. Михеев П.Ю., Страхов А.С., Агафонов С.А., Лёвина А. И. Оценка энергетической эффективности жизненного цикла Кольской ветроэлектростанции по укрупнённым показателям Арктика и инновации. 2025. №4(4) [в печати].
8. Mikheev P. Yu., Fedorov M. P., Chusov A. N., Politaeva N. A. Determination of the energy efficiency of the life cycles of wind farms by aggregated data of energy costs. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. № 72. P. 498–505. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.231>
9. Михеев П.Ю., Фёдоров М.П., Чусов А.Н., Политаева Н.А. Методика определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ветроэлектростанций по укрупненным показателям. *Экология и промышленность России*. 2023. №27(10). С. 64–71. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-10-64-71>.
10. Кольская ВЭС. URL: <https://www.el5-energo.ru/about-us/kola-wind-farm/> (дата обращения 21.09.2025).
11. Чистая энергия Арктики. Кольская ветроэлектростанция – крупнейший ветропарк в мире за полярным кругом URL: https://el5-energo.ru/upload/iblock/3f7/760o8fe82p2s30fev6juud36klxvoyhq/Buklet_KVES_format_A4_27.11.pdf (дата обращения 21.09.2025).
12. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июня 2015 г. N 300 "Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объёма выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации". М.: – 2015. – 57 с.
13. ГОСТ Р 51750-2001. Энергосбережение. Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Москва: Госстандарт. 2001. – 33 с.