

УДК 632.15

ББК 20.1:71

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-3-65-78>



## Оценка загрязнения окружающей среды в течение жизненного цикла наземной ветроэлектростанции в Арктике

Михеев П.Ю.✉, Страхов А.С., Агафонов С.А.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Санкт-Петербург, Россия

✉[vechkim@rambler.ru](mailto:vechkim@rambler.ru)

**Аннотация.** В статье приведены данные о климатических изменениях на планете и их последствиях. Представлены сведения о развитии ветроэнергетики в мире и России. Проанализирована существующая методика определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ветроэлектростанций (ВЭС). Изложены основные положения новой методики по определению эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС с применением укрупненных показателей. Приведены результаты расчетов эмиссий загрязняющих веществ по новой методике в течение жизненного цикла наземной ВЭС, расположенной в Арктической зоне РФ. Оценен геоэкологический эффект от использования наземной ВЭС в качестве источника электро-снабжения по сравнению с тепловыми электростанциями на каменном угле, мазуте и природном газе.

**Ключевые слова:** климатические изменения, Арктика, окружающая среда, эмиссии, жизненный цикл, загрязняющие вещества, укрупненные показатели, ветроэлектростанция.

**Конфликт интересов:** авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** 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):65–78. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-3-65-78>

## Environmental pollution evaluation during the life cycle of an onshore wind farm in the Arctic

Pavel Yu. Mikheev✉, Aleksander S. Strakhov,  
Sergei A. Agafonov

Peter the Great State Polytechnical University, Saint Peterburg, Russia

✉[vechkim@rambler.ru](mailto:vechkim@rambler.ru)

**Abstract.** This article presents data on the consequences of climate change on the planet. The achievements of wind power both in Russia and other countries are discussed. The existing method for determination of pollutant emissions during the life cycle of wind farms is analyzed. The main

provisions of a new method for determining pollutant emissions during the life cycle of wind farms based on aggregated data are presented. The developed method is applied to calculate pollutant emissions during the life cycle of an onshore wind farm located in the Arctic zone of the Russian Federation. The geoecological effect of using onshore wind farm as a source of electricity supply is assessed in comparison with thermal power plants running on coal, fuel oil, and natural gas.

**Keywords:** climate change, Arctic, environment, emissions, life cycle, pollutants, aggregated data, wind farm

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Mikheev P.Yu., Strakhov A.S., Agafonov S.A. Environmental pollution evaluation during the life cycle of an onshore wind farm in the Arctic. *Арктика и инновации*. 2025;3(3):65–78. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-3-65-78>

Начиная со второй половины XX века в мире наблюдаются климатические изменения, которые вызваны как естественными, так и антропогенными причинами. К естественным относятся изменение солнечной активности, смещение орбиты и угла наклона планеты, вулканическая активность, смещение тектонических плит, к антропогенным — хозяйственная деятельность человека в различных отраслях. В результате наложения друг на друга естественных и антропогенных факторов скорость климатических изменений, происходящих на планете за последние 70 лет, значительно увеличилась [1].

По данным Национального управления океанических и атмосферных исследований США, концентрация диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) в атмосфере в мире в 1980 г. составляла 337,19 г/т, а в 2024 г. достигла 422,77 г/т [2]. Следствием этого стало увеличение температуры воздуха, воды и поверхности на планете [3–5]. Средняя температура воздуха на планете с 1850 г. по июнь 2025 г. выросла более чем на 1,5 °C, а в Арктике по сравнению с 1940 г. — на 2,8 °C [4, 6].

Согласно прогнозам [7, 8], если существующие тренды сохранятся, то повышение температуры продолжится. При климатическом прогнозировании и создании климатических моделей в международной практике используются различные социально-экономические сценарии (англ. Shared Socio-economic Pathways (SSP)). Всего на сегодня для прогнозирования климатических изменений применяется 5 сценариев (SSP1 — устойчивое развитие; SSP2 — средний путь; SSP3 — фрагментация; SSP4 — неравенство; SSP5 — классический сценарий) [7]. Эти сценарии учитывают изменения в численности населения, экономическом росте,

уровне образования, урбанизации и скорости технологического развития, которые повлияют в краткосрочной и долгосрочной перспективах на выбросы парниковых газов (ПГ). При наиболее благоприятном сценарии SSP1 средняя температура воздуха на поверхности планеты в 2100 г. повысится на 2,6 °C, а при наименее благоприятном сценарии SSP5 — на 8,5 °C.

Согласно прогнозам, из-за последствий происходящих климатических изменений уровень Мирового океана будет продолжать повышаться. В своем климатическом сценарии с низким уровнем выбросов ПГ (сценарий SSP1) Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) прогнозирует, что уровень моря в 2100 г. будет на 0,28–0,55 м выше уровня 1995–2014 гг. В сценарии с наибольшим уровнем выбросов ПГ (сценарий SSP5) диапазон увеличивается с 0,63 до 1,01 м [8].

В зависимости от рассматриваемого сценария к 2100 г. площадь вечной мерзлоты может сократиться на 25–69 % [7]. Это может ускорить глобальное потепление, так как в вечномерзлых грунтах содержится большое количество таких ПГ, как углерод и метан.

По прогнозам МГЭИК, в глобальном масштабе в конце XXI века доля интенсивных тропических циклонов увеличится до 10 % при сценарии с низким уровнем выбросов ПГ (сценарий SSP1) и более чем на 30 % в сценарии с высоким уровнем выбросов ПГ (сценарий SSP5) [8].

В сценарии с самыми высокими выбросами ПГ периоды сильной жары будут повторяться девять раз в десять лет и будут на 5 °C интенсивнее. Повышение температуры в городах

**Таблица 1.** Эмиссия диоксида углерода в энергетической отрасли в мире в 2022–2024 гг. [14]

**Table 1.** Global carbon dioxide emissions by the energy industry in 2022–2024 [14]

Источник эмиссии	Эмиссия CO <sub>2</sub> , Мт			Темпы роста, %	
	2022	2023	2024	2022–2023	2023–2024
Природный газ	7438	7502	7684	0,9	2,4
Нефть	11250	11344	11377	0,8	0,3
Уголь	15192	15489	15623	2,0	0,9
Биоэнергия и отходы	240	241	250	0,7	3,5
Производственные процессы	2700	2694	2632	–0,2	–2,3
Всего	36 820	37 270	37 566	1,2	0,8

будет более значительным, учитывая плотность застройки, инженерную инфраструктуру и тепловую инерцию зданий. Согласно прогнозам, как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективах периоды сильной жары станут более частыми и интенсивными. Без адаптации к изменяющимся условиям к 2050 г. более 350 млн чел. могут подвергнуться смертельному тепловому воздействию [8].

Для снижения загрязнения окружающей среды и борьбы с климатическими изменениями 12 декабря 2015 г. под эгидой Организации Объединенных Наций (ООН) 194 странами мира было принято Парижское соглашение по климату (далее Парижское соглашение), направленное на существенное сокращение глобальных выбросов ПГ и ограничение повышения глобальной температуры в XXI веке до 2 °С при одновременном поиске средств для еще большего ограничения этого повышения до 1,5 °С [9]. После принятия Парижского соглашения различные международные организации начали разрабатывать дорожные карты по достижению углеродной нейтральности к 2050 г. Так, например, Международное энергетическое агентство (МЭА) разработало дорожную карту для энергетического сектора, которая предусматривает увеличение доли ветроэлектростанций (ВЭС) и солнечных электрических станций (СЭС) в производстве энергии к 2050 г. до 70 % [10]. На момент написания статьи более 100 стран мира взяли обязательства достичь углеродной нейтральности к 2050 г. [11].

В соответствии с Указом Президента РФ от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» в целях реализации Российской Федерацией Парижского

соглашения от 12 декабря 2015 г. выбросы парниковых газов к 2030 г. должны быть сокращены до 70 % относительно 1990 г. [12]. Для исполнения этого указа Распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р была утверждена Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. В рамках реализации данной стратегии предусмотрено применение технологий с низкими выбросами парниковых газов в различных отраслях [13].

Энергетическая отрасль — одна из наиболее активно развивающихся отраслей в мире, которая оказывает влияние на климатические изменения. Согласно данным МЭА, в 2024 г. суммарный объем эмиссии CO<sub>2</sub>, связанной с энергетикой, увеличился на 0,8 %, достигнув рекордного уровня в 37,6 Гт CO<sub>2</sub> (более 20 % от суммарных эмиссий CO<sub>2</sub>) [17]. В табл. 1 приведены данные об эмиссии CO<sub>2</sub> в энергетической отрасли в мире в 2022–2024 гг.

В настоящее время наиболее развивающимися в энергетической отрасли являются возобновляемые источники энергии (ВИЭ), и их доля на конец 2024 г. составила более 40 %. Среди ВИЭ наиболее развивающимися отраслями являются солнечная и ветровая энергетика. Установленная мощность ВЭС в мире составила в 2024 г. более 1000 ГВт, при этом рост установленной мощности ВЭС в 2024 г. составил около 120 ГВт [15]. По данным МЭА, установленная мощность СЭС в мире на конец 2024 г. составила более 2200 ГВт, при этом в 2024 г. было введено в эксплуатацию более чем 550 МВт (рост около 30 %) [12]. Производство электроэнергии на ВЭС в 2024 г. выросло на 182 ТВт·ч (рост на 7,9 %), на СЭС количе-

ство произведенной электроэнергии достигло 474 ТВт·ч (рост на 29 %) [14]. В России ветровая и солнечная энергетика, несмотря на существующие ограничения и проблемы, также активно развиваются, и в последние годы вводятся в эксплуатацию новые электростанции. По состоянию на конец 2024 г. установленная мощность ВЭС превысила 2,5 ГВт, а СЭС — более 2,0 ГВт [16]. По состоянию на июнь 2025 г. в России эксплуатируется более 40 ВЭС, а в Арктической зоне расположена Кольская ВЭС (самая мощная ВЭС в мире в Арктике) [16–18].

Площадь Арктической зоны РФ составляет 4,8 млн км<sup>2</sup> (порядка 28 % территории страны). Здесь проживает около 2,6 млн чел. [19]. Арктика имеет значительный потенциал для развития ветроэнергетики. Согласно данным Глобального атласа ветров, среднегодовая скорость ветра в Арктической зоне превышает 8 м/с, что является очень хорошим условием для эксплуатации ВЭС [20]. Многие районы Арктики относятся к зонам децентрализованного энергоснабжения, которые главным образом снабжаются электроэнергией от электростанций, работающих на ископаемом топливе, преимущественно на мазуте и угле, поставляемых в рамках северного завоза [21] и которые в процессе эксплуатации загрязняют окружающую среду эмиссиями различных загрязняющих веществ, в том числе CO<sub>2</sub>. Для снижения уровня загрязнения окружающей среды в Арктике можно использовать ВЭС.

В мировой практике для оценки загрязнения окружающей среды применяется анализ жизненных циклов (АЖЦ) (англ. Life Cycle Analysis), который проводится с учетом требований международных стандартов. Для оценки загрязнения окружающей среды определяются эмиссии загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС (строительство, эксплуатация и снятие с эксплуатации) [22, 23].

В качестве основных экологических показателей в АЖЦ принимаются: потенциал глобального потепления, потенциал закисления и потенциал эвтрофикации. Потенциал глобального потепления — показатель, характеризующий воздействие парниковых газов на глобальное потепление (рассчитывается на основе эмиссии CO<sub>2</sub> экв); потенциал закисления характеризует воздействие на окружающую среду от эмиссий загрязняющих

веществ, способных образовывать кислоты (рассчитывается на основе эмиссии диоксида серы (SO<sub>2</sub> экв)). Потенциал эвтрофикации характеризует ухудшение качества воды в результате накопления в воде биогенных элементов (рассчитывается на основе эмиссии фосфатов (PO<sub>4</sub> экв)) [24].

Для проведения АЖЦ разработаны программные продукты. Наиболее известными из них являются SimaPro (Нидерланды) <https://simapro.com>; Sphera (Gabi) (США) <https://sphera.com>; OneClick LCA (Финляндия) <https://oneclicklca.com>, OpenLCA (Германия) <https://www.openlca.org>; iPoint (Umberto) (Германия) <https://www.ipoint-systems.com/software/>; Ecochain (Нидерланды) <https://ecochain.com>; Preoptima (Великобритания) <https://www.preoptima.com>. Для оценки жизненных циклов энергообъектов наиболее часто используются программные продукты SimaPro и Gabi. Следует отметить, что в строительной отрасли для унификации расчетов эмиссии загрязняющих веществ в течение жизненного цикла зданий и сооружений в зарубежной практике используется программный продукт LCABug <https://lcabug.dk/en/>, который позволяет несколько упростить расчеты. В данной программе задается информация о материалах, параметрах и технических характеристиках элементов зданий и проводится расчет эмиссий CO<sub>2</sub>. Вместе с тем в LCABug учитываются не все составляющие элементов зданий и сооружений, и такой подход не подходит и не применяется в настоящее время для энергообъектов.

В последнее время для определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла в АЖЦ начали интегрироваться технологии информационного моделирования (ТИМ). В настоящее время такая интеграция и соответствующие расчеты проводятся в основном для зданий и сооружений. Суть такого подхода заключается в импорте цифровых моделей зданий и сооружений из программных продуктов, поддерживающих ТИМ в программные продукты АЖЦ для расчета эмиссий загрязняющих веществ [25–29]. Вместе с тем интеграция ТИМ в АЖЦ имеет многочисленные проблемы (табл. 2).

Несмотря на внедрение программного обеспечения и интеграцию с ТИМ, АЖЦ остается громоздким, трудоемким, не унифицированным и имеет ограничения

**Таблица 2.** Проблемы применения ТИМ в АЖЦ [29]

**Table 2.** Issues of using BIM in life cycle analysis [29]

Проблемы	Примечания
Отсутствие управления моделью здания для процесса совместной работы	<ul style="list-style-type: none"> <li>• в некоторых проектах моделирование начинается на поздних стадиях проектирования, например конструктивной системы (раздел «Конструктивные решения»);</li> <li>• генеральный проектировщик может не проектировать все разделы проекта, а отдать это субподрядчику, вследствие этого у генерального проектировщика может не быть всех необходимых данных;</li> <li>• могут быть ограничения, связанные с условиями договора, которые не позволяют проектировщику вносить изменения в архитектурную модель;</li> <li>• не существует минимальных требований к уровню детализации (англ. Level of Detail (LOD) в отношении информации о материалах;</li> <li>• нет общего понимания или стандарта для формирования спецификаций;</li> <li>• сложно мотивировать других участников включать материалы в цифровую модель здания, когда это занимает много времени и не приносит прибыли тому, кто занимается моделированием</li> </ul>
Ошибки рабочего процесса	<ul style="list-style-type: none"> <li>• наличие человеческих ошибок при ручном вводе в инструменты АЖЦ данных из различных спецификаций моделей;</li> <li>• извлечение спецификаций из программных продуктов фактически представляет собой черный ящик, в котором невозможно увидеть недостающие элементы</li> </ul>
Недостаточная наполненность и качество данных в моделях	<ul style="list-style-type: none"> <li>• данные в моделях могут быть недостаточно хорошего качества, чтобы сформировать основу для хорошей интеграции ТИМ–АЖЦ;</li> <li>• проблемы с извлечением правильных количеств из моделей, в частности получения ведомостей объемов работ (ВОР);</li> <li>• модели могут быть смоделированы неправильно с точки зрения формирования спецификаций, хотя графическое представление модели выглядит корректным;</li> <li>• модель может быть выполнена с ошибками, а качество моделируемых элементов отличаться;</li> <li>• модель может не подойти для использования в программных продуктах АЖЦ из-за плохого качества, тогда спецификации необходимо составлять вручную;</li> <li>• качество информации, получаемой из конструктивной модели от проектировщика, может быть хуже, чем от подрядчика;</li> <li>• вариативность уровня детализации в цифровых моделях;</li> <li>• конструктивные узлы могут иметь различные технические решения;</li> <li>• не все данные в модели могут быть доступны;</li> <li>• часто отсутствуют конструктивные модели и модели инженерных систем и оборудования здания</li> </ul>
Ошибки моделирования	<ul style="list-style-type: none"> <li>• балки треугольного сечения, трубопроводы и т. д. моделируются как твердые полнотелые объекты, что приводит к неправильному подсчету ВОР;</li> <li>• ошибки в модели, например внутренние стены моделируются как наружные, или стены вместо фундаментов, а оконные заполнения смоделированы как часть вентилируемых фасадов;</li> <li>• некоторые элементы моделируются в двух экземплярах, поскольку они были смоделированы в нескольких разделах (например, архитектурные и конструктивные модели включают несущие конструкции), вследствие этого существует риск двойного учета;</li> <li>• неправильные размеры элементов</li> </ul>
Вариации в структуре моделей	<ul style="list-style-type: none"> <li>• структура моделей меняется из-за этого, и модель, которую получили от архитектора, может быть структурирована по-разному;</li> <li>• структура конструктивных элементов в моделях различается, например различается конструкция пола; с настилом или без него и т. д.;</li> <li>• на ранней стадии проектирования объекты моделируются как базовые элементы, в то время как на стадии рабочего проектирования элементы здания моделируются со всеми функциональными уровнями;</li> <li>• в разных странах подход к моделированию может отличаться.</li> </ul>
Обмен данными и их применение для оценки воздействия на окружающую среду на этапах жизненного цикла	<ul style="list-style-type: none"> <li>• сложно создать универсальные скрипты плагинов для всех моделей, поскольку они моделируются по-разному, поэтому всегда нужно настраивать визуальный язык программирования (англ. Visual Programming Language (VPL)/скрипт;</li> <li>• трудно разработать инструменты или рабочий процесс для будущих процессов;</li> <li>• чрезмерно упрощенные или не слишком удобные для пользователя инструменты;</li> <li>• проблемы со стабильностью и/или рабочим процессом различных VPL</li> </ul>
Рабочий процесс и большие модели	<ul style="list-style-type: none"> <li>• трудоемкий и энергозатратный рабочий процесс ТИМ–АЖЦ;</li> <li>• слишком большой объем информации в моделях может замедлить работу с ними</li> </ul>

*Примечание.* Проблемы применения ТИМ в АЖЦ, приведенные в [29], были дополнены и отредактированы авторами статьи с учетом современного состояния развития ТИМ.

*Note.* The issues of using BIM in life cycle analysis given in [29] were revised by the authors considering the current state of BIM development.

по использованию. Например, для оценки загрязнения окружающей среды в течение жизненного цикла ВЭС необходимо выполнить несколько тысяч операций различной степени сложности. АЖЦ главным образом предназначен для проведения «детальных», результаты которых применяются для оптимизации параметров и технических характеристик рассматриваемых объектов, а также для составления экологических деклараций (англ. Environmental Product Declaration), которые используются преимущественно в маркетинговых целях. Для применения АЖЦ необходимо разрабатывать или иметь готовый детализированный проект объекта, вследствие этого его применение на предпроектных стадиях затруднено. АЖЦ не подходит для решения геоэкологических задач, включая оценку вклада в антропогенной составляющей в загрязнение окружающей среды и климатические изменения. Для решения геоэкологических задач и оценки вклада объектов различного функционального назначения и их совокупности в течение жизненного цикла в антропогенную составляющую загрязнения окружающей среды необходима унифицированная методика определения эмиссий загрязняющих веществ на основе укрупненных экологических показателей (далее укрупненных показателей).

В работе [30] было обосновано использование укрупненных показателей для определения эмиссий загрязняющих веществ ( $\text{CO}_2$  экв,  $\text{SO}_2$  экв,  $\text{PO}_4$  экв) в течение жизненного цикла ВЭС и составлена база данных по укрупненным показателям эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ветроэнергетических установок и ветроэлектростанций (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621868 от 07 июня 2023 г.) [31].

В работе [32] предложена новая методика определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС по укрупненным показателям и проведена ее апробация. В рамках методики был разработан алгоритм определения эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ветроэнергетических установок (ВЭУ) и ВЭС, предложены формулы для их расчета на этапах жизненно-

го цикла ВЭС и критерий экологической эффективности.

Для унификации расчетов эмиссий загрязняющих веществ в новой методике предложено следующее [32].

1. Определять эмиссии загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС без детализации производственных процессов и применять для этого составленную базу данных по укрупненным показателям.
2. Определять эмиссии загрязняющих веществ при производстве строительных работ, проведении сервисного обслуживания, транспортировке элементов энергообъектов, демонтаже и утилизации энергообъектов также без детализации технологических и эксплуатационных процессов по укрупненным показателям в процентном отношении от эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭС.

Подробное обоснование изложенных выше положений новой методики и предложенных процентных отношений для определения эмиссий загрязняющих веществ приведено в ранее опубликованных работах [27, 32–39].

В этой статье приведены результаты расчетов эмиссий загрязняющих веществ по новой методике с применением укрупненных показателей в течение жизненного цикла Кольской ВЭС, расположенной в Мурманской области. На рис. 1 представлена фотография Кольской ВЭС, а в табл. 3 приведены ее основные технические характеристики.



Рис. 1. Кольская ВЭС [40]

Fig. 1. Kola wind farm [40]

**Таблица 3.** Основные технические характеристики Кольской ВЭС [41, 42]

**Table 3.** Main technical characteristics of the Kola wind farm [41, 42]

Наименование	Значение/материалы
Фирма-производитель ВЭУ	Siemens-Gamesa
Модель ВЭУ	G 126
Ветровой класс ВЭУ	IIA
Установленная мощность ВЭУ, МВт	3,55
Количество ВЭУ, шт.	57
Диаметр ротора ВЭУ, м	132
Ометаемая поверхность ВЭУ, м <sup>2</sup>	13685
Длина лопастей ВЭУ, м	65
Материал лопастей ВЭУ	Стекловолокно, углеродное волокно, эпоксидная смола
Высота башни ВЭУ, м	84
Форма и материал башни ВЭУ	Коническая, сталь
Масса фундамента ВЭУ, т	2400
Масса кабелей ВЭС, т	5100
Площадь, занимаемая ВЭС, га	257

**Таблица 4.** Значения укрупненных показателей эмиссии загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС [31]

**Table 4.** Aggregated data on pollutant emissions in the production of wind turbine and wind farm elements [31]

Наименование элементов энергообъекта	Эмиссия CO <sub>2</sub> экв, т	Эмиссия SO <sub>2</sub> экв, т	Эмиссия PO <sub>4</sub> экв, кг
Лопасты	270	0,8	115
Гондола	270	0,9	70
Башня	510	3,1	265
Фундамент	640	2,0	160
Кабели	28 350	165,2	9220
Другие элементы	555	1,6	150

В табл. 4 даны значения укрупненных показателей при производстве элементов ВЭУ и ВЭС, принятые по составленной базе данных [31].

Количество производимой электроэнергии Кольской ВЭС при проведении расчетов принято согласно данным, приведенным в [42], и равно  $750 \cdot 10^6$  кВт·ч в год. Срок эксплуатации Кольской ВЭС принят по аналогии с другими ВЭС и составляет 25 лет.

Результаты расчета эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла Коль-

**Таблица 5.** Результаты расчетов эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла Кольской ВЭС (таблица выполнена авторами)

**Table 5.** Calculation of pollutant emissions during the life cycle of the Kola wind farm (performed by the authors)

Технологический процесс	Эмиссия CO <sub>2</sub> экв, т	Эмиссия SO <sub>2</sub> экв, т	Эмиссия PO <sub>4</sub> экв, кг
Производство элементов ВЭС	156 315,0	644,0	52 540,0
Строительные работы и транспортировка	6252,6	25,8	2102,6
Сервисное обслуживание	7815,8	32,2	2627,0
Демонтаж	4689,5	19,3	1575,1
Утилизация	54 710,3	193,2	5254,0
Всего (при демонтаже)	175 072,9	721,3	58 844,7
Всего (с учетом утилизации)	115 673,1	508,8	52 015,6

Примечание. Утилизация включает переработку и повторное использование материалов.

Note. Disposal includes the recycling and reuse of materials.

**Таблица 6.** Эмиссии CO<sub>2</sub> экв, SO<sub>2</sub> экв и PO<sub>4</sub> экв на кВт·ч произведенной энергии (таблица выполнена авторами)

**Table 6.** Emissions of CO<sub>2</sub> eq, SO<sub>2</sub> eq, and PO<sub>4</sub> eq per kWh of the energy produced (performed by the authors)

Процесс на этапе снятия с эксплуатации	Эмиссии		
	CO <sub>2</sub> экв, г/кВт·ч	SO <sub>2</sub> экв, мг/кВт·ч	PO <sub>4</sub> экв, мг/кВт·ч
Демонтаж	9,3	38,5	3,1
Утилизация	6,2	27,1	2,8

Примечание. Утилизация включает переработку и повторное использование материалов.

Note. Disposal includes the recycling and reuse of materials.

ской ВЭС приведены в табл. 5, а в табл. 6 — на 1 кВт·ч произведенной электроэнергии.

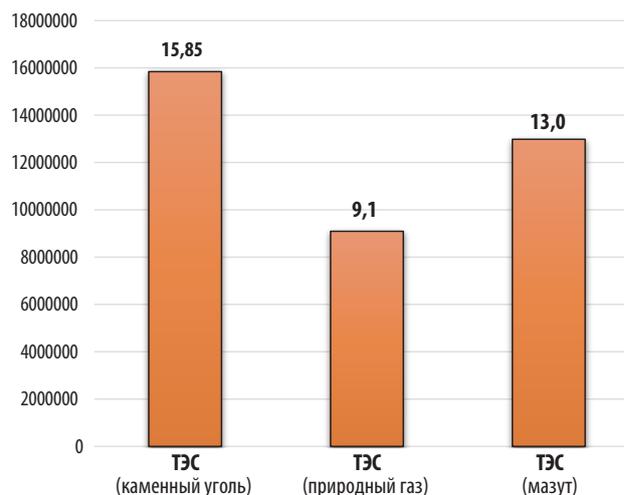
Для сравнения: эмиссия CO<sub>2</sub> экв, г/кВт·ч в течение жизненного цикла тепловых электростанций (ТЭС) на угле составляет 910–1250 г/кВт·ч произведенной энергии, а для ТЭС на природном газе — 410–725 г/кВт·ч [43].

Также был выполнен расчет эмиссии CO<sub>2</sub> экв, которая может быть предотвращена при выборе в качестве источника электроснабжения Кольской ВЭС по сравнению с использованием для производства электроэнергии

ТЭС на различном топливе. Расчет проводился по новой методике, предложенной в [32], и в соответствии с нормативными правовыми документами [44, 45]. Из результатов расчета следует, что использование в качестве источника электроснабжения Кольской ВЭС позволяет предотвратить от 9,1 до 15,85 млн т эмиссии CO<sub>2</sub>экв (рис. 2).

Также в соответствии с методикой, предложенной в [32], были определены коэффициенты экологической эффективности для Кольской ВЭС. Согласно полученным результатам, эмиссия CO<sub>2</sub>экв в течение жизненного цикла ВЭС меньше эмиссии CO<sub>2</sub>экв 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).

Применение укрупненных показателей позволяет значительно упростить и унифицировать определение эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС. При наличии соответствующих данных и обосновании использование укрупненных показателей возможно и для других типов энергообъектов. В дальнейшем применение укрупненных показателей позволит не только проводить экспресс-оценку загрязнения окружающей среды в течение жизненного цикла энергообъек-



**Рис. 2.** Предотвращенные эмиссии CO<sub>2</sub>экв при эксплуатации Кольской ВЭС по сравнению с использованием ТЭС, млн т (рисунок выполнен авторами)

**Fig. 2.** Prevented CO<sub>2</sub>eq emissions during the operation of the Kola wind farm compared with the use of thermal power plants, million tons (performed by the authors)

тов, но и определять вклад целых отраслей в загрязнение окружающей среды, что позволит оценивать вклад антропогенной составляющей в загрязнение окружающей среды и ее влияние на климатические изменения. На основе этих расчетов могут быть разработаны и внедрены инструменты, которые позволят минимизировать воздействие антропогенных источников загрязнения окружающей среды на климатические изменения.

## Литература

1. Михеев П.Ю., Агафонов С.А., Страхов А.С., Ильин И.В., Борреманс А.Д., Левина А.И. Применение укрупненных экологических показателей для оценки загрязнения окружающей среды в течение жизненного цикла природно-технических систем. *Альтернативная энергетика и экология*. 2025;(2):147–162. <https://doi.org/10.15518/issue.2025.02.147-162>
2. NOAA Global Monitoring Laboratory. Global atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/global-co2-concentration> (accessed 13 June 2025).
3. Met Office Hadley Centre. Annual temperature anomalies relative to the pre-industrial period in the world. Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/temperature-anomaly> (accessed 13 June 2025).
4. Change in water temperature on the planet. Climate Reanalyzer. Climate Change Institute / University of Maine [internet]. Available at: [https://climateanalyzer.org/clim/sst\\_daily/?dm\\_id=world2](https://climateanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2) (accessed 16 June 2025).
5. Average monthly surface temperature. Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/average-monthly-surface-temperature?tab=chart> (accessed 16 June 2025).

6. Temperatures in the Arctic and Europe. Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/data-insights/the-arctic-is-the-worlds-region-that-has-warmed-the-most-followed-by-europe> (accessed 16 June 2025).
7. Climate Resilience for Energy Security. International Energy Agency [internet]; November 2022. Available at: <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-for-energy-security>.
8. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [internet]. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> (accessed 17 June 2025).
9. Парижское соглашение. ООН [интернет]; 2015. Режим доступа: [https://esg-library.mgi-mo.ru/upload/iblock/7a6/uqoe4vlafz99pvkr7nfyppj1fd3y2gkd2/russian\\_paris\\_agreement.pdf?utm\\_source=docviewer.yandex.ru&utm\\_medium=referral&utm\\_campaign=docviewer.yandex.ru&utm\\_referrer=docviewer.yandex.ru](https://esg-library.mgi-mo.ru/upload/iblock/7a6/uqoe4vlafz99pvkr7nfyppj1fd3y2gkd2/russian_paris_agreement.pdf?utm_source=docviewer.yandex.ru&utm_medium=referral&utm_campaign=docviewer.yandex.ru&utm_referrer=docviewer.yandex.ru) (accessed 17 June 2025).
10. Net zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency [internet]; 2021. Available at: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9doc-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9doc-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf) (accessed 17 June 2025).
11. Which countries have set a net-zero emissions target? Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/net-zero-target-set?tab=table&time=2000.2050> (accessed 17 June 2025).
12. Указ Президента РФ от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» [интернет]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (дата обращения 18.06.2025).
13. Распоряжение правительства РФ № 3052-р «О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» [интернет]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCz-p3fW032e2yAoBhtIpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения 19.06.2025).
14. Global Energy Review 2025. International Energy Agency [internet]; March 2025. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>.
15. Global Wind Report 2024. Global Wind Energy Council [internet]. Available at: [https://26973329.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/26973329/2.%20Reports/Glob-al%20Wind%20Report/GWR24.pdf?\\_\\_hstc=45859835.705de88cb34c799f34ba7f3c06ec6d9f.1744111285006.1744111285006.1744111285006.1&\\_\\_hssc=45859835.4.1744111285006&\\_\\_hsfp=4049606327](https://26973329.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/26973329/2.%20Reports/Glob-al%20Wind%20Report/GWR24.pdf?__hstc=45859835.705de88cb34c799f34ba7f3c06ec6d9f.1744111285006.1744111285006.1744111285006.1&__hssc=45859835.4.1744111285006&__hsfp=4049606327) (accessed 17 June 2025).
16. Системный оператор единой энергетической системы РФ [интернет]; февраль 2025. Режим доступа: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2025/res/res\\_feb\\_25.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2025/res/res_feb_25.pdf) (дата обращения 18.06.2025).
17. Бутузов В.А., Безруких П.П., Грибков С.В. Российская ветроэнергетика: научно-конструкторские школы, этапы развития, перспективы. Журнал С.О.К. 2021;(5):62–76.
18. Кольская ВЭС - чистая энергия Арктики. С.О.К. [интернет]; 15 мая 2023. Режим доступа: [https://www.c-o-k.ru/market\\_news/kolskaya-ves-chistaya-energiya-arktiki](https://www.c-o-k.ru/market_news/kolskaya-ves-chistaya-energiya-arktiki) (дата обращения 21.06.2025).
19. Агафонов С.А., Михеев П.Ю., Углов А.К. Перспективы применения древесины перекрестно-клееной в условиях Арктики. Арктика и инновации. 2024;(2):92–101. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2024-2-2-92-101>.
20. Global Wind Atlas [internet]. Available at: <https://globalwindatlas.info/en/> (accessed 22 June 2025).
21. Кузнецов Н.М., Маслобоев В.А., Коновалова О.Е. Распределенная энергетика регионов Арктической зоны Российской Федерации. АРКТИКА-2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2021;(5):13–21.
22. Сидоренко Г.И., Михеев П.Ю. Оценка энергетической эффективности жизненных циклов энергетических объектов на основе ВИЭ. Альтернативная энергетика и экология. 2017;(1–3):101–110. <https://doi.org/10.15518/1542-0177.01-03.101-110>
23. Сидоренко Г., Михеев П. Оценка экологической эффективности жизненных циклов энергетических объектов на основе возобновляемых источников энергии. Экология и промышленность России. 2017;(21(5)):44–49. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-5-44-49>.
24. Сидоренко Г.И., Михеев П.Ю. К вопросу об эффективности энергообъектов на основе ВИЭ. Энергия: экономика, техника, экология. 2018;(2):9–16.

25. Obrecht T.P., Rock M., Hoxha E., Passer A. BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2020;12(14):5534. <https://doi.org/10.3390/su12145534>
26. Samniang W., Panuwatwanich K., Tangtermsirikul S., Papong S. BIM-LCA Integration for Carbon Emission Assessment in Construction Industry: Systematic Review and Research Opportunities. In: *The 13th International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-13)*, Arnhem, Netherlands, 8–11 May 2023. Available at: <https://research-repository.griffith.edu.au/items/ocede7d4-581f-43dc-8e06-59b1f9f63812>
27. Xue K., Hossain Md. Uzzal, Liu M., Ma M., Zhang Y., Hu M. BIM Integrated LCA for Promoting Circular Economy towards Sustainable Construction: An Analytical Review. *Sustainability*. 2021;13(3):1310. <https://doi.org/10.3390/su13031310>
28. Bernardette S-V, Latas C., García-Martínez A. Critical review of BIM-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*. 2017;136:110–120. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>
29. Safari K., Azarijafari H. Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development. *Sustainable Cities and Society*. 2021;67: 102728. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102728>
30. Михеев П.Ю. Определение эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС по укрупненным показателям. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2023;(5):39–53.
31. Михеев П.Ю., Чусов А.Н., Полтаева Н.А. База данных по укрупненным показателям эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ветроэнергетических установок и ветроэлектростанций. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621868. Дата государственной регистрации 07.06.2023.
32. Михеев П.Ю., Фёдоров М.П., Чусов А.Н., Полтаева Н.А. Методика определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ветроэлектростанций по укрупненным показателям. *Экология и промышленность России*. 2023;27(10):64–71. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-10-64-71>
33. Mikheev P.Yu., Fedorov M.P., Chusov A.N., Poltaeva N.A. Determination of pollutant emissions during the life cycle of wind power plants according to aggregate indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;69:1084–1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.305>
34. Сидоренко Г.И., Михеев П.Ю. Влияние параметров и технических характеристик элементов ВЭУ на финансовые затраты, затраты энергии и выбросы загрязняющих веществ. *Промышленная энергетика*. 2018;(4):101–110.
35. Михеев П.Ю. Выбросы парниковых газов в течение жизненного цикла наземных ВЭС. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2022;(5):39–53.
36. Михеев П.Ю. Эмиссии загрязняющих веществ SO<sub>2</sub> экв в течение жизненного цикла наземных ВЭС в окружающую среду. *Энергетика за рубежом*. 2022;(4):24–41.
37. Михеев П.Ю. Эмиссии PO<sub>4</sub> экв в течение жизненного цикла наземных ВЭС в окружающую среду. *Энергетика за рубежом*. 2023;(1):32–50.
38. Михеев П.Ю. Влияние выбросов загрязняющих веществ на этапах жизненного цикла наземных ВЭС на показатели экологической эффективности. *Энергетика за рубежом*. 2018;(5):32–45.
39. Михеев П.Ю. Влияние параметров и технических характеристик элементов ветротурбин на выбросы загрязняющих веществ. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2022;(6):50–63.
40. Кольская ВЭС Самая мощная в мире ветроэлектростанция за Полярным кругом. Россия — страна достижений [интернет]; Режим доступа: <https://достижения.рф/achievements/country/371> (дата обращения 23.06.2025).
41. SG 3.4-132. Enhanced LCoE and experience in the 3 MW segment [internet]. Available at: <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-3-4-132.html> (accessed 24 June 2025).
42. Чистая энергия Арктики теперь доступна каждому. Кольская ветроэлектростанция — крупнейший ветропарк в мире за полярным кругом [интернет]. Режим доступа: [https://el5-energo.ru/upload/iblock/3f7/76008fe82p2s30fev6juud36klxvoyhq/Buklet\\_KVES\\_format\\_A4\\_27.11.pdf](https://el5-energo.ru/upload/iblock/3f7/76008fe82p2s30fev6juud36klxvoyhq/Buklet_KVES_format_A4_27.11.pdf) (дата обращения 24.06.2025).
43. Agrawal K.Kr., Jain S.A., Jain Kr., Dahiya S. Assessment of greenhouse gas emissions from coal and natural gas thermal power plants using life cycle approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014;11:1157–1164. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0420-z>

44. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июня 2015 г. № 300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации» [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=264381>
45. ГОСТ Р 51750-2001. Энергосбережение. Методика определения энергоёмкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах Москва: Госстандарт; 2001.

## References

1. Mikheev P.Yu., Agafonov S.A., Strakhov A.S., Ilin I.V., Borremans A.D., Levina A.I. Application of environmental aggregated data to assess environmental pollution during the life cycle of natural engineering systems. *Alternative Energy and Ecology (IS/AEE)*. 2025;(2):147–162. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2025.02.147-162>
2. NOAA Global Monitoring Laboratory. Global atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/global-co2-concentration> (accessed 13 June 2025).
3. Met Office Hadley Centre. Annual temperature anomalies relative to the pre-industrial period in the world. Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/temperature-anomaly> (accessed 13 June 2025).
4. Change in water temperature on the planet. Climate Reanalyzer. Climate Change Institute / University of Maine [internet]. Available at: [https://climateanalyzer.org/clim/sst\\_daily/?dm\\_id=world2](https://climateanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2) (accessed 16 June 2025).
5. Average monthly surface temperature. Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/average-monthly-surface-temperature?tab=chart> (accessed 16 June 2025).
6. Temperatures in the Arctic and Europe. Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/data-insights/the-arctic-is-the-worlds-region-that-has-warmed-the-most-followed-by-europe> (accessed 16 June 2025).
7. Climate Resilience for Energy Security. International Energy Agency [internet]; November 2022. Available at: <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-for-energy-security>.
8. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [internet]. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> (accessed 17 June 2025).
9. The Paris Agreement. UN [internet]; 2015. Available at: [https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/7a6/uqoe4vlfaz99pvkr7nfyjpj1fd3y2gkd2/russian\\_paris\\_agreement.pdf?utm\\_source=docviewer.yandex.ru&utm\\_medium=referral&utm\\_campaign=docviewer.yandex.ru&utm\\_referrer=docviewer.yandex.ru](https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/7a6/uqoe4vlfaz99pvkr7nfyjpj1fd3y2gkd2/russian_paris_agreement.pdf?utm_source=docviewer.yandex.ru&utm_medium=referral&utm_campaign=docviewer.yandex.ru&utm_referrer=docviewer.yandex.ru) (accessed 17 June 2025). (In Russ.).
10. Net zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency [internet]; 2021. Available at: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9doc-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9doc-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf) (accessed 17 June 2025).
11. Which countries have set a net-zero emissions target? Our World in Data [internet]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/net-zero-target-set?tab=table&time=2000.2050> (accessed 17 June 2025).
12. Decree of the President of the Russian Federation No. 666 dated November 4, 2020 “On reducing greenhouse gas emissions” [internet]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (accessed 18 June 2025). (In Russ.).
13. Order of the Government of the Russian Federation No. 3052-р “On the strategy for the socioeconomic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050” [internet]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzpfWO32e2yAoBhtIpyzWfHaiUa.pdf> (accessed 19 June 2025). (In Russ.).
14. Global Energy Review 2025. International Energy Agency [internet]; March 2025. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>.
15. Global Wind Report 2024. Global Wind Energy Council [internet]. Available at: [https://26973329.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/26973329/2.%20Reports/Glob-al%20Wind%20Report/GWR24.pdf?\\_\\_hstc=45859835.705de88cb34c799f34ba7f3c06ec6d](https://26973329.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/26973329/2.%20Reports/Glob-al%20Wind%20Report/GWR24.pdf?__hstc=45859835.705de88cb34c799f34ba7f3c06ec6d)

- [9f.1744111285006.1744111285006.1744111285006.1&\\_\\_hssc=45859835.4.1744111285006&\\_\\_hsfp=4049606327](https://www.socnet.ru/1744111285006.1744111285006.1744111285006.1&__hssc=45859835.4.1744111285006&__hsfp=4049606327) (accessed 17 June 2025).
16. The system operator of the unified energy system of the Russian Federation [internet]; February 2025. Available at: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2025/res/res\\_feb\\_25.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2025/res/res_feb_25.pdf) (accessed 18 June 2025). (In Russ.).
  17. Butuzov V.A., Bezrukikh P.P., Gribkov S.V. Russian wind power: scientific and design schools, stages of development, prospects. Zhurnal Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK) [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2021;(5):62–76. (In Russ.).
  18. Kola wind farm — clean energy of the Arctic. C.O.K. [internet]; 15 May 2023. Available at: [https://www.c-o-k.ru/market\\_news/kolskaya-ves-chistaya-energiya-arktiki](https://www.c-o-k.ru/market_news/kolskaya-ves-chistaya-energiya-arktiki) (accessed 21 June 2025). (In Russ.).
  19. Agafonov S.A., Mikheev P.Yu., Uglov A.K. Prospects for the application of cross-laminated timber under Arctic conditions. Arctic and Innovations. 2024;2(2):92–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2024-2-2-92-101>
  20. Global Wind Atlas [internet]. Available at: <https://globalwindatlas.info/en/> (accessed 22 June 2025).
  21. Kuznetsov N.M., Masloboev V.A., Konovalova O.E. Distributed energy in the regions of the arctic zone of the Russian Federation. Arctic 2035: current issues, problems, solutions. 2021;1(5):13–21. (In Russ.).
  22. Sidorenko G.I., Mikheev P.Yu. Assessment of energy efficiency of power plant life cycles on the basis of RES. Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). 2017;(1-3):101–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.01-03.101-110>
  23. Sidorenko G.I., Mikheev P.Yu. Assessment of the Environmental Efficiency of the Life Cycles of Energy Facilities Based on Renewable Energy Sources. Ecology and Industry of Russia. 2017;21(5):44–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-5-44-49>
  24. Sidorenko G.I., Mikheev P.Yu. On the efficiency of RES. Energy: economics, technology, ecology. 2018;(2):9–16. (In Russ.).
  25. Obrecht T.P., Rock M., Hoxha E., Passer A. BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. Sustainability. 2020;12(14):5534. <https://doi.org/10.3390/su12145534>
  26. Sammiang W., Panuwatwanich K., Tangtermsirikul S., Papong S. BIM-LCA Integration for Carbon Emission Assessment in Construction Industry: Systematic Review and Research Opportunities. In: The 13th International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-13), Arnhem, Netherlands, 8–11 May 2023. Available at: <https://research-repository.griffith.edu.au/items/ocede7d4-581f-43dc-8e06-59b1f9f63812>
  27. Xue K., Hossain Md. Uzzal, Liu M., Ma M., Zhang Y., Hu M. BIM Integrated LCA for Promoting Circular Economy towards Sustainable Construction: An Analytical Review. Sustainability. 2021;13(3):1310. <https://doi.org/10.3390/su13031310>
  28. Bernardette S-V., Latas C., García-Martínez A. Critical review of BIM-based LCA method to buildings. Energy and Buildings. 2017;136:110–120. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>
  29. Safari K., Azarijafari H. Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development. Sustainable Cities and Society. 2021;67:102728. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102728>
  30. Mikheev P.Yu. Determination of emissions pollutants in the production of elements of wind turbines and wind farms by aggregated data. Energy: economics, technology, ecology. 2023;(5):39–53. (In Russ.).
  31. Mikheev P.Yu., Chusov A.N., Politaeva N.A. Database on aggregated data of pollutant emissions during the production of elements of wind turbines and wind farms. Certificate of state registration of the database No. 2023621868. Date of state registration: 07.06.2023. (In Russ.).
  32. Mikheev P.Yu., Fedorov M.P., Chusov A.N., Politaeva N.A. Methodology for determining emissions of pollutants during the life cycle of wind power plants by aggregated data. Ecology and Industry of Russia. 2023;27(10):64–71. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-10-64-71>
  33. Mikheev P.Yu., Fedorov M.P., Chusov A.N., Politaeva N.A. Determination of pollutant emissions during the life cycle of wind power plants according to aggregate indicators. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;69:1084–1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.305>
  34. Sidorenko G.I., Mikheev P.Yu. The effect of the parameters and technical characteristics of wind turbine components on financial and energy costs and emission of pollutants. Industrial Power Engineering. 2018;(4):101–110. (In Russ.).

35. Mikheev P.Yu. Greenhouse gas emissions during the life cycle of onshore wind farms. Energy: economics, technology, ecology. 2022;(5):39–53. (In Russ.).
36. Mikheev P.Yu. Emissions of SO<sub>2</sub>eq pollutants during the life cycle of onshore wind farms. Power Engineering Abroad. 2022;(4):24–41. (In Russ.).
37. Mikheev P.Yu. PO<sub>4</sub>eq emissions during the life cycle of onshore wind farms. Power Engineering Abroad. 2023;(1):32–50. (In Russ.).
38. Mikheev P.Yu. Impact of pollutant emissions at the stages of the life cycle of onshore wind farms on indicators environmental efficiency Power Engineering Abroad. 2018;(5):32–45. (In Russ.).
39. Mikheev P.Yu. The impact of parameters and technical characteristics of wind turbines pollutant emissions. Energy: economics, technology, ecology. 2022;(6):50–63. (In Russ.).
40. Kola Wind Farm is the world's most powerful wind farm located in the arctic circle. Russia is a country of achievements [internet]; Available at: <https://достижения.рф/achievements/country/371> (accessed 23 June 2025). (In Russ.).
41. SG 3.4-132. Enhanced LCoE and experience in the 3 MW segment [internet]. Available at: <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-3-4-132.html> (accessed 24 June 2025).
42. The clean energy of the Arctic is now available to everyone. The Kola wind farm is the largest wind farm in the world above the arctic circle [internet]. Available at: [https://el5-energo.ru/upload/iblock/3f7/76008fe82p2s3ofev6juud36klxvoyhq/Buklet\\_KVES\\_format\\_A4\\_27.11.pdf](https://el5-energo.ru/upload/iblock/3f7/76008fe82p2s3ofev6juud36klxvoyhq/Buklet_KVES_format_A4_27.11.pdf) (accessed 24 June 2025). (In Russ.).
43. Agrawal K.Kr., Jain S.A., Jain Kr., Dahiya S. Assessment of greenhouse gas emissions from coal and natural gas thermal power plants using life cycle approach. International Journal of Environmental Science and Technology. 2014;11:1157–1164. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0420-z>
44. Order No. 300 of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated June 30, 2015, “On Approval of guidelines and instructions for quantifying greenhouse gas emissions by organizations engaged in economic and other activities in the Russian Federation” [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=264381>. (In Russ.).
45. State Standard P 51750-2001. Energy conservation. Methods for determination of energy capacity on production of output and rendering of services in technological energy systems. General principles. Moscow: Gosstandart; 2001. (In Russ.).

## Сведения об авторах

**Михеев Павел Юрьевич** — кандидат технических наук, старший преподаватель Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
Россия, 195251, Санкт-Петербург,  
вн. тер. г. Муниципальный округ Академическое,  
ул. Политехническая, д. 29, литера Б  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0934-6935>  
Researcher ID: K-1289-2013  
SPIN-код: 8252-8277  
Scopus ID 57202760535  
Тел.: +7 (911) 759-90-58  
E-mail: [vechkim@rambler.ru](mailto:vechkim@rambler.ru)

**Страхов Александр Сергеевич** — аспирант Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

## Information about the authors

**Pavel Yu. Mikheev** — Cand. Sci. (Engineering), Senior Lecturer, Higher School of Hydraulic and Energy Construction, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University  
Russia, 195251, Saint Petersburg, ext. ter. Akademicheskoe Municipal district, st. Politekhnikeskaya, 29, litera B  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0934-6935>  
Researcher ID: K-1289-2013  
SPIN-code: 8252-8277  
Scopus ID: 57202760535  
Tel.: +7(911) 759-90-58  
E-mail: [vechkim@rambler.ru](mailto:vechkim@rambler.ru)

**Aleksander S. Strakhov** — PhD Researcher, Higher School of Hydraulic and Energy Construction, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

Россия, 195251, Санкт-Петербург,  
вн. тер. г. Муниципальный округ Академическое,  
ул. Политехническая, д. 29, литера Б  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1960-1972>  
Researcher ID: КАМ-5340-2024  
Тел.: +7 (906) 272-66-13  
E-mail: [astrakhov@vohkarts.com](mailto:astrakhov@vohkarts.com)

**Агафонов Сергей Александрович** — ассистент  
Высшей школы промышленно-гражданского  
и дорожного строительства, аспирант Высшей школы  
гидротехнического и энергетического строительства  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
Россия, 195251, Санкт-Петербург,  
вн. тер. г. Муниципальный округ Академическое,  
ул. Политехническая, д. 29, литера Б  
Researcher ID: ННМ-5486-2022  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5742-8532>  
SPIN-код: 7944-9351  
Тел.: +7 (921) 345-82-36  
E-mail: [agafonov\\_sa@spbstu.ru](mailto:agafonov_sa@spbstu.ru)

Russia, 195251, Saint Petersburg,  
ext. ter. Akademicheskoe Municipal district,  
st. Politekhnikeskaya, 29, litera B  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1960-1972>  
Researcher ID: КАМ-5340-2024  
Tel.: +7(906) 272-66-13  
E-mail: [astrakhov@vohkarts.com](mailto:astrakhov@vohkarts.com)

**Sergei A. Agafonov** — Research Assistant, Higher  
School of Industrial, Civil and Road Construction,  
PhD Researcher, Higher School of Hydraulic and Energy  
Construction, Peter the Great Saint-Petersburg  
Polytechnic University  
Russia, 195251, Saint Petersburg,  
ext. ter. Akademicheskoe Municipal district,  
st. Politekhnikeskaya, 29, litera B  
Researcher ID: ННМ-5486-2022  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5742-8532>  
SPIN-code: 7944-9351  
Tel.: +7 (921) 345-82-36  
E-mail: [agafonov\\_sa@spbstu.ru](mailto:agafonov_sa@spbstu.ru)

## Вклад авторов

**Михеев Павел Юрьевич** — постановка задачи,  
обоснование актуальности, структурирование статьи,  
формулирование выводов.

**Страхов Александр Сергеевич** — анализ  
существующих методик, расчет эмиссий загрязняющих  
веществ в течение жизненного цикла наземной  
ветроэлектростанции.

**Агафонов Сергей Александрович** — сбор и анализ  
данных, оценка геоэкологического эффекта  
от использования наземной ветроэлектростанции  
в качестве источника электроснабжения.

## Author contribution statement

**Pavel Yu. Mikheev** — problem statement, substantiation  
of relevance, research design, formulation of conclusions.

**Aleksander S. Strakhov** — analysis of existing methods,  
calculation of pollutant emissions during the life cycle  
of an onshore wind farm.

**Sergei A. Agafonov** — data collection and analysis,  
assessment of the geoeological effect of using onshore  
wind farm as a source of electricity supply.

## Финансирование

Исследование 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>.

## Funding

The research was supported by the Russian Science  
Foundation No. 23-78-10190 “Modeling digital and logistics  
infrastructure for sustainable development in the Arctic»  
<https://rscf.ru/project/23-78-10190>