

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ INDUSTRIAL ECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-341-363

EDN: GOAOVW

УДК 658.26:504

Научная статья / Research article

Оценка влияния цифровых систем мониторинга энергопотребления на снижение углеродного следа промышленных объектов

Л.Р. Абдуллина¹, В.С. Смирнов²¹Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва,
Российская Федерация
chechevitsa@ro.ru

Аннотация. Рассмотрены архитектура и функциональные особенности цифровых систем мониторинга энергопотребления, а также их роль в декарбонизации промышленного производства. Подчеркивается стратегическое значение цифровизации для формирования устойчивых бизнес-моделей, повышения ресурсной эффективности и выполнения климатических обязательств. Отмечается возможность интеграции цифровых систем мониторинга с корпоративными платформами управления (ERP, MES), что повышает полноту данных об энергопотреблении, обеспечивает их сопоставимость по производственным участкам и способствует формированию более точной нефинансовой отчетности. Особое внимание уделено связи между мониторингом энергетических потоков, управленческими решениями и снижением энергоемкости производственных процессов. Практическая часть представлена параметрическим сценарным анализом, позволяющим количественно оценить снижение выбросов CO₂ (Score 1 и Score 2) при различных уровнях оптимизации энергопотребления. Полученные результаты демонстрируют значимость цифрового мониторинга как инструмента декарбонизации, предварительной оценки экологического эффекта и повышения ресурсной эффективности производства.

Ключевые слова: цифровой мониторинг, декарбонизация, энергоэффективность, промышленность

Вклад авторов. Абдуллина Л.Р. — курирование данных, подготовка и написание черновика рукописи, визуализация, проведение исследования. Смирнов В.С. — концептуализация, разработка методологии исследования, работа с программным обеспечением

© Абдуллина Л.Р., Смирнов В.С., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

нием, валидация данных. *Абдуллина Л.Р., Смирнов В.С.* — написание, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 23.09.2025; доработана после рецензирования 26.02.2026; принята к публикации 12.03.2026.

Для цитирования: *Абдуллина Л.Р., Смирнов В.С.* Оценка влияния цифровых систем мониторинга энергопотребления на снижение углеродного следа промышленных объектов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 341–363. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-341-363> EDN: GOAOVW

Assessment of the impact of digital energy consumption monitoring systems on reducing the carbon footprint of industrial facilities

Leila R. Abdullina¹, Vladislav S. Smirnov²

¹*RUDN University, Moscow, Russian Federation*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

chechevitsa@ro.ru

Abstract. The paper examines the architecture and functional features of digital energy consumption monitoring systems and their role in the decarbonization of industrial production. The strategic importance of digitalization for building sustainable business models, improving resource efficiency, and meeting climate commitments is emphasized. The possibility of integrating digital monitoring systems with corporate management platforms (ERP, MES) is noted, which enhances the completeness of energy consumption data, ensures its comparability across production sites, and contributes to the preparation of more accurate non-financial reporting. Particular attention is paid to the relationship between monitoring energy flows, managerial decision-making, and reducing the energy intensity of industrial processes. The practical component is presented as a parametric scenario analysis that enables a quantitative assessment of reductions in CO₂ emissions (Scope 1 and Scope 2) under different levels of energy consumption optimization. The results demonstrate the significance of digital monitoring as a tool for decarbonization, preliminary assessment of environmental effects, and improvement of the resource efficiency of production.

Keywords: digital monitoring, decarbonization, energy efficiency, industry

Authors' contribution. *L.R. Abdullina* — data curation, preparation and drafting of the manuscript writing, visualization, investigation. *V.S. Smirnov* — conceptualization, methodology, software, validation. *L.R. Abdullina, V.S. Smirnov* — writing, review and editing. All authors contributed equally to the preparation of this article, have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article (and its supplementary files).

Article history: received 23.09.2025; revised 26.02.2026; accepted 12.03.2026.

For citation: Abdullina LR, Smirnov VS. Assessment of the impact of digital energy consumption monitoring systems on reducing the carbon footprint of industrial facilities. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):341–363. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-341-363> EDN: GOAOVW

Введение

В условиях усиления глобального перехода к устойчивому развитию (УР) проблема сокращения углеродного следа промышленных предприятий приобретает особую актуальность. Промышленный сектор остается одним из крупнейших источников выбросов CO₂, что требует внедрения инновационных подходов к управлению энергопотреблением. Одним из перспективных направлений является применение цифровых систем мониторинга (ЦСМ).

Актуальность темы подтверждается возрастающим числом исследований в данной области. Так, Г.И. Морзак, Н.В. Сидорская и С.С. Мартынюк (2025) предложили методологию поэтапного снижения углеродного следа для промышленных предприятий с использованием энергоаудита и цифрового мониторинга [1]. А. Байрамнелдиева с соавт. (2024) подчеркнули значимость зеленой экономики и внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в стратегии декарбонизации [2]. В свою очередь, J. Liu и Z. Zhang (2023) разработали интегрированную ЦСМ выбросов для «умных» городов, обеспечивающую визуализацию и прогнозирование данных в реальном времени [3]. Эти научные работы формируют теоретическую базу, однако их результаты преимущественно носят общий характер и недостаточно отражают количественные эффекты внедрения подобных систем на уровне конкретных промышленных объектов.

Цель исследования — оценка потенциального влияния внедрения ЦСМ энергопотребления на снижение выбросов CO₂ промышленных объектов по категориям Scope 1 и Scope 2 при фиксированных объемах производства.

Научная гипотеза состоит в том, что использование ЦСМ как инструмента энергоменеджмента способно обеспечить снижение выбросов CO_2 за счет уменьшения энергоемкости; ожидаемая величина эффекта зависит от степени использования результатов мониторинга в контуре управленческих решений и проявляется в виде количественно оцениваемого диапазона снижения выбросов в рамках параметрического сценарного моделирования.

Научная новизна исследования заключается в разработке воспроизводимой параметрической схемы, предназначенной для предварительной количественной оценки влияния цифрового мониторинга энергопотребления на снижение выбросов CO_2 на уровне промышленного объекта. В отличие от нормативных и корпоративных подходов (включая GHG Protocol, ISO 50001, CDP/GRI), ориентированных преимущественно на учет, верификацию и раскрытие показателей, предложенная схема решает иную прикладную задачу — раннюю количественную оценку диапазона возможного эффекта на этапе проектирования и обоснования внедрения, когда объектно-специфичные данные «до/после» и полные временные ряды телеметрии еще отсутствуют.

Практическая ценность схемы заключается в формализации перехода от уровня использования данных мониторинга в контуре энергоменеджмента к расчетному диапазону изменения энергоемкости и далее — к оценке выбросов Score 1 и Score 2 в единой логике, пригодной для последующей калибровки по данным конкретного предприятия.

Методы

В исследовании использован комплекс взаимодополняющих методов, обеспечивших оценку влияния ЦСМ энергопотребления. Анализ и синтез применялись для выявления закономерностей цифровизации энергомониторинга и процессов декарбонизации; индукция и дедукция — для формулирования научной гипотезы и построения логики исследования. Абстрагирование позволило выделить ключевые характеристики ЦСМ. В качестве эмпирического метода использовалось параметрическое сценарное моделирование, направленное на количественную оценку диапазона изменения энергопотребления и выбросов CO_2 по категориям Score 1 и Score 2 при фиксированных объемах производства и заданных коэффициентах эмиссии, с интерпретацией сценариев как уровней зрелости применения данных мониторинга в контуре энергоменеджмента.

В отличие от распространенных схем в настоящей работе сценарии трактуются не как произвольно заданные проценты экономии, а как последовательные уровни зрелости использования данных мониторинга: от оперативного реагирования на отклонения — к их аналитической интерпретации — и далее к интеграции показателей в планирование и управление режимами.

Результаты

Современные ЦСМ энергопотребления играют важную роль в повышении ресурсной эффективности и снижении углеродного следа промышленных предприятий. Их применение позволяет не только фиксировать фактическое энергопотребление в реальном времени, но и выявлять неэффективные участки, прогнозировать нагрузку на оборудование и формировать управленческие решения на основе достоверных данных. Развернутое теоретическое описание архитектуры и функциональных возможностей ЦСМ необходимо для корректной интерпретации расчетного блока исследования, поскольку именно эти характеристики определяют степень охвата измерений, регулярность контроля и возможность преобразования данных мониторинга в управленческие воздействия. В связи с этим обзорная часть используется как методологическое обоснование выбранных уровней зрелости энергоменеджмента и параметров сценарного анализа (5, 10, 15 %), применяемых для количественной оценки изменения выбросов Score 1 и Score 2. Комплексный подход к интеграции таких систем способствует переходу к доказательному управлению энергоресурсами, улучшению экологической отчетности и достижению целевых показателей декарбонизации.

Цифровые системы мониторинга энергопотребления: архитектура и функциональные особенности

По данным Международного энергетического агентства (IEA), в 2024 г. глобальные выбросы CO₂ от сжигания топлива и промышленных процессов выросли на 0,8 % и достигли 37,8 Гт, что подчеркивает сохраняющуюся тенденцию к высокому уровню антропогенной нагрузки¹. Промышленный сектор остается одним из ключевых источников этих выбросов, что делает необходимым внедрение инновационных подходов к управлению энергетическими потоками и повышению их эффективности.

Одним из перспективных направлений является применение **ЦСМ энергопотребления**. По данным Fortune Business Insights, объем мирового рынка систем мониторинга энергии в 2024 г. составил около 4,76 млрд США, что подтверждает устойчивый рост интереса к данным решениям и их стратегическую значимость для промышленности (рис. 1).

В целом ЦСМ энергопотребления представляют собой многоуровневые комплексы, обеспечивающие непрерывный контроль, сбор и анализ данных об энергетических потоках на промышленных объектах [4]. Они функционируют как единая экосистема, где каждый уровень выполняет свою роль в формировании информации об энергопотреблении. В архитектуру таких систем входят несколько ключевых компонентов (рис. 2).

¹ International Energy Agency / Global Energy Review 2025: CO₂ Emissions // Paris : IEA, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions> (accessed: 13.10.2025).

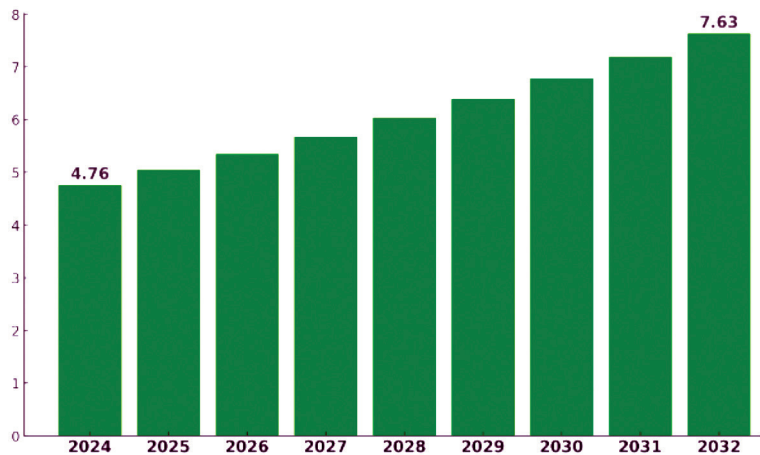


Рис. 1. Объем мирового рынка ЦСМ энергии, млрд долл. США
Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

Figure 1. Global market volume of energy digital monitoring systems, billion USD
Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

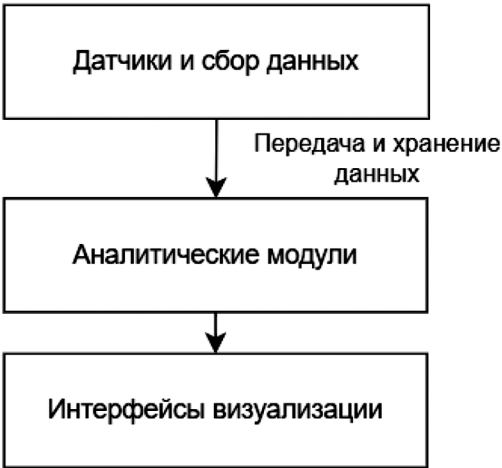


Рис. 2. Архитектура ЦСМ энергопотребления
Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

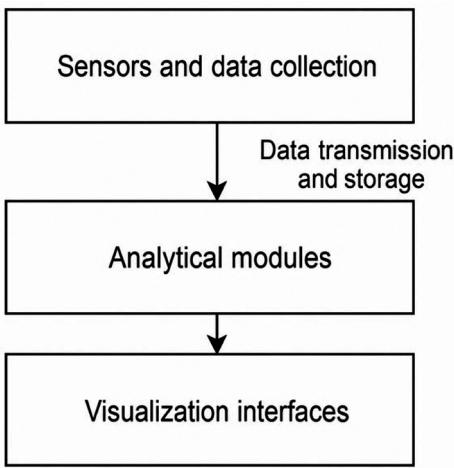


Figure 2. Architecture of energy consumption digital monitoring systems
Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Сбор данных в ЦСМ энергопотребления осуществляется интеллектуальными датчиками, фиксирующими ключевые параметры энергетического баланса предприятия (мощность, расход тепла, давление, температуру), с применением калиброванных устройств и цифровых интерфейсов (Modbus, BACnet, OPC UA) для обеспечения точности измерений. Информация передается по проводным и беспроводным каналам связи на шлюзы и контроллеры, где фильтруется и агрегируется, а затем сохраняется в SCADA-системах или облачных хранилищах для дальнейшего анализа. Обработка данных включает расчет показателей энергоэффективности, выявление аномалий и формирова-

ние рекомендаций по оптимизации, а применение методов машинного обучения позволяет прогнозировать нагрузку и предотвращать неэффективные режимы. Результаты визуализируются в дашбордах и отчетах, что облегчает интерпретацию и ускоряет управленческие решения.

Отметим, что ЦСМ энергопотребления имеют ряд специфических функциональных особенностей, определяющих их роль в промышленности и УР. С одной стороны, они обеспечивают высокую точность измерений, позволяют оперативно реагировать на неэффективные режимы работы оборудования и поддерживают интеграцию с корпоративными системами управления. С другой — внедрение подобных решений связано с определенными организационными и финансовыми барьерами, включая необходимость адаптации инфраструктуры, инвестиций в программное и аппаратное обеспечение, а также подготовки персонала (табл. 1).

Следует отметить, что ЦСМ энергопотребления формируют основу современного подхода к управлению энергетическими потоками на промышленных предприятиях. Несмотря на существующие барьеры (необходимость значительных инвестиций, модернизации инфраструктуры и подготовки персонала), такие системы демонстрируют высокий потенциал для дальнейшего развития и масштабирования. Их использование становится ключевым инструментом в стратегии декарбонизации промышленности и перехода к устойчивым моделям производства.

Таблица 1. Функциональные особенности ЦСМ энергопотребления

Критерий	Преимущества	Ограничения / недостатки
Точность и оперативность	Высокая точность измерений, доступ к данным в реальном времени, возможность быстрого реагирования на отклонения	Необходимость регулярной калибровки датчиков и технического обслуживания оборудования
Аналитические возможности	Автоматический расчет показателей энергоэффективности, прогнозирование потребления, выявление аномалий и оптимизация режимов	Сложность внедрения продвинутых аналитических модулей, потребность в квалифицированных специалистах по работе с данными
Интеграция с другими системами	Сопряжение с ERP и MES, единое информационное пространство, поддержка ESG-отчетности	Затраты на адаптацию и настройку интерфейсов интеграции, риски несовместимости с устаревшими системами
Экономическая эффективность	Снижение операционных затрат, предотвращение потерь энергии, повышение окупаемости энергосберегающих мероприятий	Высокие первоначальные инвестиции в оборудование, ПО и обучение персонала
Управленческие решения	Повышение прозрачности процессов, ускорение принятия решений, поддержка стратегического планирования и декарбонизации	Зависимость от качества исходных данных и стабильности коммуникационной инфраструктуры

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым по [5; 6].

Table 1. Functional features of energy consumption digital monitoring systems

Criterion	Advantages	Limitations / disadvantages
Accuracy and timeliness	High measurement accuracy, access to real-time data, and the ability to respond quickly to deviations	The need for regular sensor calibration and technical maintenance of equipment
Analytical capabilities	Automatic calculation of energy efficiency indicators, consumption forecasting, anomaly detection, and optimization of operating modes	Complexity of implementing advanced analytical modules and the need for qualified data specialists
Integration with other systems	Integration with ERP and MES, creation of a unified information environment, and support for ESG reporting	Costs of adapting and configuring integration interfaces, as well as risks of incompatibility with legacy systems
Economic efficiency	Reduction of operating costs, prevention of energy losses, and increased payback of energy-saving measures	High initial investments in equipment, software, and staff training
Managerial decision-making	Increased process transparency, faster decision-making, and support for strategic planning and decarbonization	Dependence on the quality of source data and the stability of communication infrastructure

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov based on [5; 6].

Роль цифрового мониторинга энергопотребления в декарбонизации промышленности

Цифровой мониторинг энергопотребления является одним из ключевых инструментов снижения углеродного следа промышленных предприятий и служит основой для перехода к управлению на основе данных. Внедрение ЦСМ позволяет не только фиксировать фактическое потребление ресурсов, но и оперативно выявлять неэффективные режимы работы оборудования, регистрировать аномальные скачки нагрузки и устранять энергетические потери [7]. Это повышает управляемость технологических процессов и приводит к сокращению избыточных выбросов, связанных с утечками энергоресурсов и нерегламентированными режимами эксплуатации.

Актуальность цифровизации подтверждается результатами исследования Deloitte (2024), охватившего 600 руководителей крупных производственных компаний в США. Более половины респондентов отметили, что уже применяют цифровые технологии для мониторинга энергопотребления (рис. 3) [8].

Полученные данные показывают, что предприятия рассматривают мониторинг не как вспомогательный инструмент, а как основу для системных изменений в области энергоэффективности. Такой подход обеспечивает основу для расчета углеродного следа по протоколам GHG и стандартам ISO 14064, а также для моделирования сценариев декарбонизации. Применение ЦСМ облегчает интеграцию с программами энергоэффективности и корпоративными инициативами по ESG, делая процесс снижения выбросов управляемым и воспроизводимым [8].

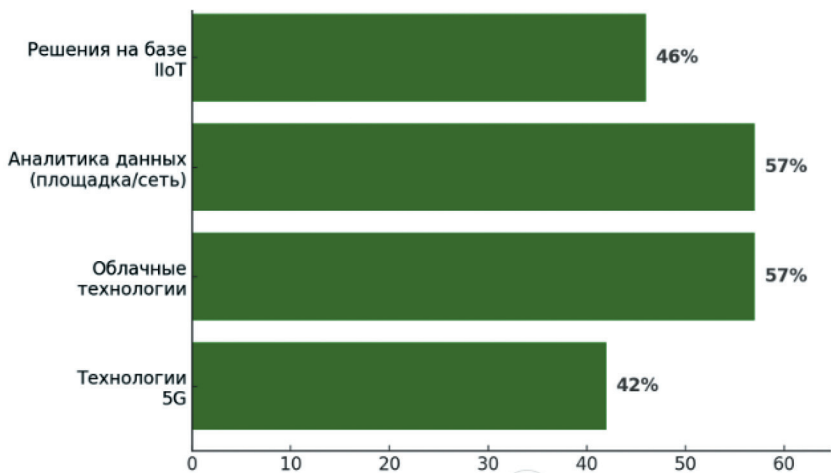


Рис. 3. Использование цифровых технологий мониторинга энергопотребления на производственных предприятиях, %

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

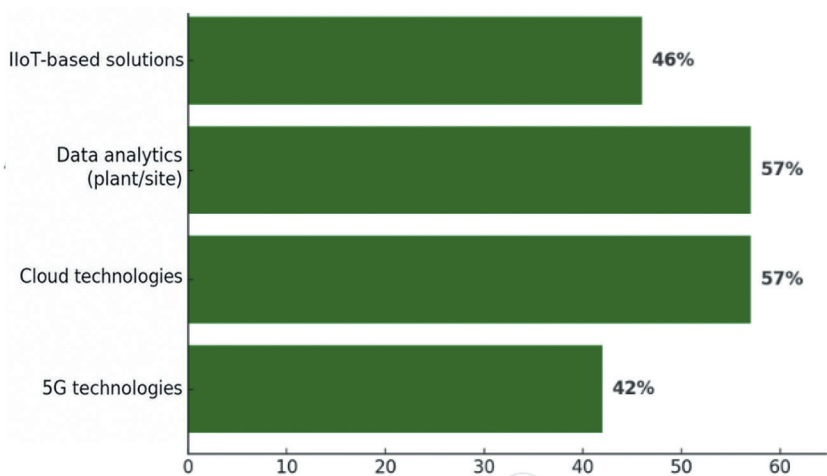


Figure 3. Use of digital technologies for energy consumption monitoring in industrial enterprises, %

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Эмпирические исследования демонстрируют, что систематический мониторинг энергопотребления оказывает существенное влияние на показатели предприятий и целых отраслей. По оценкам IEA, реализация программ энергетического менеджмента, включающих цифровой мониторинг и контроль, позволяет добиться экономии энергии на уровне около 11 % в первые годы после внедрения, что напрямую способствует снижению углеродного следа и повышению общей энергоэффективности производства.

Экономическая значимость цифрового мониторинга энергопотребления также подтверждается анализом затрат: по данным IEA, электроэнергия может составлять до 50 % совокупных издержек предприятия (особенно в наиболее энергоемких отраслях, например в металлургии), поэтому даже незна-

чительное повышение энергоэффективности приводит к существенному росту финансовых результатов. Для компаний с низкой рентабельностью эффект особенно ощутим: при норме прибыли 5 % экономия 500 долл. США на электроэнергии эквивалентна дополнительным продажам на 10 000 долл. США. Таким образом, энергомониторинг становится не только экологическим, но и стратегическим экономическим инструментом.

Понимая эту взаимосвязь, Международная организация по стандартизации (ISO) разрабатывает стандарт ISO 50100, который должен объединить управление энергопотреблением и сокращение выбросов парниковых газов в единую систему. Публикация стандарта ожидается в 2026 г., и его внедрение станет важным шагом к формированию международной нормативной базы для поддержки программ декарбонизации.

**Влияние на экологическую отчетность и стратегию
УР компаний**

Как было сказано ранее, цифровой мониторинг энергопотребления играет важную роль в повышении качества нефинансовой отчетности, так как обеспечивает полноту, точность и актуальность данных, необходимых для расчета показателей по международным стандартам УР. Системы непрерывного измерения позволяют детализировать данные по площадкам и процессам, а также сокращать риск ошибок при пересчете выбросов парниковых газов. Это особенно важно для подготовки отчетов по GRI, CDP, SASB и IFRS S2, где требуется сопоставимость периодов и прозрачность методологии расчетов (табл. 2).

Таблица 2. Роль ЦСМ в повышении достоверности данных отчетов об энергопотреблении

Стандарт	Индикаторы	Роль ЦСМ
GRI (например, GRI 302 «Энергия», GRI 305 «Выбросы»)	Потребление энергии, энергоинтенсивность; выбросы ПГ Scope 1/2, интенсивность выбросов	Непрерывные измерения и автоагрегация; раздельный учет по площадкам/процессам; снижение ошибок
CDP (Climate Change Questionnaire)	Годовые выбросы Scope 1/2/3; структура энергопортфеля; метрики интенсивности; цели и прогресс	Автоматический сбор данных и трассируемость; формирование аудиторского следа; сопоставимость периодов и сценарное моделирование
ESG-отчетность (корпоративные нефинансовые отчеты)	KPI энергоэффективности и декарбонизации (энерго- и углеродоемкость, % ВИЭ, экономия энергии)	Доказательная база для KPI; регулярные дашборды; быстрая верификация и подготовка материалов для рейтингов
SASB/IFRS S2 (Climate-related Disclosures)	Отраслевые климатические и энерго-KPI (интенсивность выбросов на ед. продукции, энергоемкость процесса и т.п.)	Глубокая детализация на уровне процесса/единицы продукции; сопоставимость с отраслевыми бенчмарками

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым по [9; 10].

Table 2. The role of digital monitoring systems in improving the reliability of energy consumption reporting data

Standard	Indicators	Role of digital monitoring systems
GRI, for example GRI 302 «Energy», GRI 305 «Emissions»	Energy consumption, energy intensity; Scope 1/2 greenhouse gas emissions, emission intensity.	Continuous measurements and automatic aggregation; separate accounting by sites/processes; error reduction.
CDP, Climate Change Questionnaire	Annual Scope 1/2/3 emissions; energy portfolio structure; intensity metrics; targets and progress.	Automatic data collection and traceability; creation of an audit trail; comparability of reporting periods and scenario modeling.
ESG reporting, corporate non-financial reports	Energy efficiency and decarbonization KPIs: energy and carbon intensity, share of renewable energy sources, energy savings.	Evidence base for KPIs; regular dashboards; rapid verification and preparation of materials for ratings.
SASB/IFRS S2, Climate-related Disclosures	Sector-specific climate and energy KPIs: emissions intensity per unit of output, process energy intensity, etc.	Detailed breakdown at the process/unit-of-output level; comparability with sectoral benchmarks.

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov based on [9; 10].

Указанные стандарты и их индикаторы демонстрируют, что цифровой мониторинг является необходимым условием для формирования корректной и сопоставимой нефинансовой отчетности. Однако практическая ценность этих систем проявляется не только в улучшении качества раскрываемых данных, но и в их влиянии на стратегию УР компаний.

Одним из примеров успешного применения ЦСМ энергопотребления в промышленности является участие американских предприятий в программе **Better Plants**, реализуемой Министерством энергетики США. В рамках этой инициативы компании внедряют ЦСМ. Согласно данным, опубликованным в отчете Oak Ridge National Laboratory в 2024 г., участие в программе позволило предприятиям добиться существенного снижения энергопотребления и сопутствующих затрат (рис. 4).



Рис. 4. Основные результаты внедрения цифрового энергомониторинга компаниями-участниками Better Plants

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

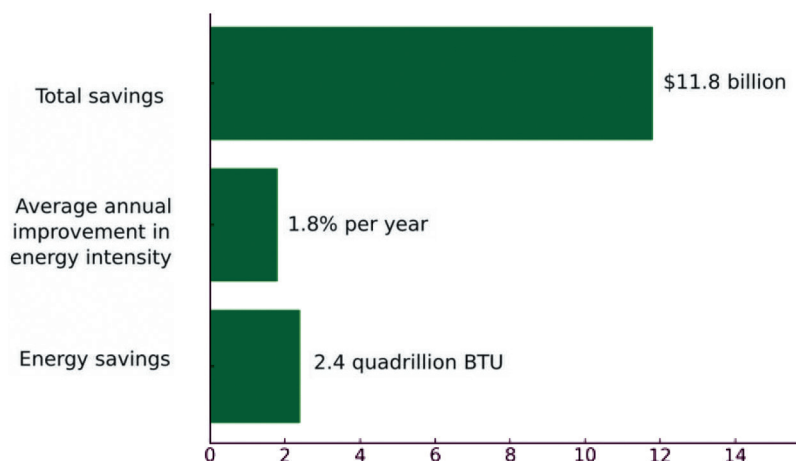


Figure 4. Main results of digital energy monitoring implementation by Better Plants participating companies

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Кроме того, достигнутые результаты эквивалентны сокращению выбросов углекислого газа на 147 млн т CO₂. Полученный опыт показывает, что внедрение ЦСМ способствует системной модернизации производственных процессов и повышению энергоэффективности, а также формирует условия для достижения долгосрочных целей по снижению углеродного следа.

Еще одним примером является опыт **U.S. Steel**. В рамках стратегии декарбонизации компания создала подразделение Digital Studio, применяющее аналитику и методы ИИ для оптимизации процессов. Цифровые решения позволяют в реальном времени отслеживать энергопотребление, моделировать технологические цепочки и выявлять наиболее энергоемкие участки, что обеспечивает точную настройку доменных печей, повышение эффективности обработки и сокращение расхода сырья. Цифровой мониторинг способствовал снижению энергоемкости производства (рис. 5).

После внедрения цифровых решений на основе моделирования и прогнозной аналитики компания смогла добиться ощутимых улучшений: оптимизировать закупки сырья, снизить общее потребление энергии на всех производственных площадках и минимизировать углеродные выбросы. Например, подразделение USSK планирует сократить выбросы CO₂ на 90 000 т за счет модернизации оборудования, а объект BR1 достиг снижения интенсивности выбросов на 15 % по сравнению с 2021 г. Стратегическая цель компании — снижение интенсивности выбросов на 20 % к 2030 г. по сравнению с базовым уровнем 2018 г. — подтверждает комплексный подход к экологической ответственности и эффективности производства.

Таким образом, цифровой мониторинг энергопотребления перестает быть исключительно инструментом контроля и постепенно превращается в стратегический элемент корпоративного управления [11]. Его внедрение позволяет предприятиям не только обеспечивать достоверность и полноту ESG-отчетно-

сти, но и интегрировать цели по декарбонизации в операционное и инвестиционное планирование. Наличие прозрачной системы учета и анализа энергопотребления облегчает постановку амбициозных климатических целей, обоснование проектов модернизации и участие в международных инициативах по снижению выбросов.

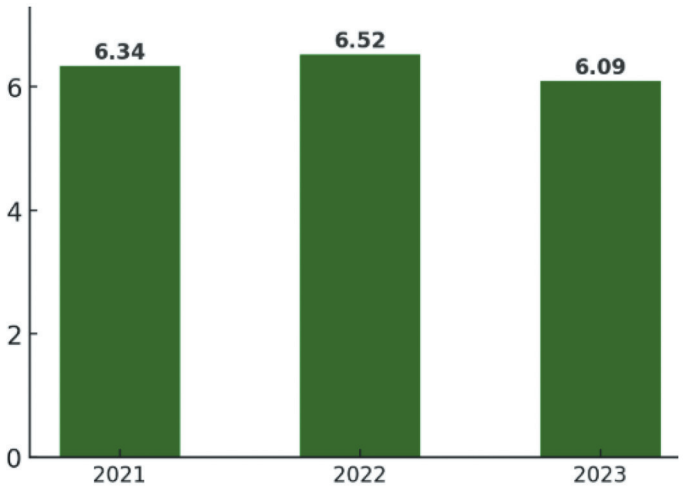


Рис. 5. Динамика энергоемкости производства стали в компании U.S. Steel, МВт·ч на тонну

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

Figure 5. Dynamics of energy intensity in steel production at U.S. Steel, MWh per ton

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Сценарное моделирование влияния цифрового мониторинга на декарбонизацию предприятий

С целью количественной оценки потенциального диапазона изменения выбросов CO₂ при внедрении ЦСМ энергопотребления выполнено параметрическое сценарное моделирование, основанное на сопоставлении базового и оптимизированных режимов энергопотребления предприятия при фиксированных объемах производства. В качестве исходных данных использованы типовые показатели годового потребления электроэнергии и топлива, а также удельные коэффициенты эмиссии CO₂ для расчета выбросов Score 1 и Score 2 по методике GHG Protocol.

Для построения сценариев применен параметрический подход, предусматривающий три уровня сокращения энергопотребления, интерпретируемых как уровни организационно-технологической зрелости использования данных мониторинга в энергоменеджменте: консервативный (базовый мониторинг и регламентное реагирование), реалистичный (расширенная аналитика отклонений и регулярные корректирующие воздействия), амбициозный (встроенность мониторинга в контуры планирования и управления режимами).

Выбор реперных значений 5, 10 и 15 % обоснован эмпирическими диапазонами улучшения энергоемкости, зафиксированными в программах промышленной энергоэффективности и энергоменеджмента, а также в практиках внедрения цифрового мониторинга. Для международных инициатив и корпоративных кейсов характерны как умеренные, так и более выраженные улучшения энергетической результативности в зависимости от зрелости системы энергоменеджмента, глубины организационных изменений и степени интеграции мониторинговых данных в управленческие контуры.

Следует отметить, что диапазон 5–15 % в настоящей работе рассматривается как умеренно-консервативный ориентир для сценарной оценки эффекта цифрового мониторинга на этапе внедрения и развития энергоменеджмента. Верхняя граница 15 % отражает уровень, который может быть достигнут при более зрелом использовании данных мониторинга в контуре планирования и управления режимами, однако без моделирования глубокой технологической модернизации и без объектной каузальной верификации. В отдельных успешных практиках и программах энергоменеджмента могут фиксироваться и более высокие значения (вплоть до 20 % и выше), однако такие результаты, как правило, связаны с сочетанием цифрового мониторинга, организационных изменений и дополнительных технологических мероприятий. По этой причине в рамках настоящей статьи они не принимаются в качестве базового сценарного диапазона и рассматриваются как верхняя граница потенциального эффекта, требующая отдельной эмпирической проверки на данных конкретного предприятия.

Предлагаемая расчетная схема не предназначена для замены корпоративных систем учета и отчетности выбросов, реализуемых в рамках GHG Protocol, ISO 50001 и ESG-раскрытия, а дополняет их на этапе предварительного анализа. Ее назначение состоит в том, чтобы обеспечить воспроизводимую оценку диапазона потенциального эффекта цифрового мониторинга в условиях ограниченности исходных данных и до проведения объектно-ориентированной каузальной оценки.

Моделирование алгоритмов ЦСМ и их воздействия на конкретные технологические процессы не выполнялось, поскольку такая постановка требует объектно-специфичных данных телеметрии, параметров контуров управления и регламентов принятия решений.

Расчеты выполнены по формуле

$$\Delta CO_2 = (E_{\text{base}} - E_{\text{opt}}) \times EF, \quad (1)$$

где E_{base} и E_{opt} — энергопотребление соответствующего энергоресурса (электроэнергия или природный газ) в базовом и оптимизированном сценариях; EF — коэффициент эмиссии для данного энергоресурса. Расчет выполнялся отдельно для Score 2 (электроэнергия) и Score 1 (природный газ), после чего результаты суммировались.

Поскольку расчеты носят детерминированный характер и основаны на заданных предположениях, результаты интерпретируются как оценочный диапазон эффекта. Устойчивость выводов обсуждается с учетом чувствительности результатов к величине сценарного снижения энергопотребления и принятым коэффициентам эмиссии.

В качестве исходных данных для моделирования приняты:

- тип предприятия: среднее промышленное предприятие химико-металлургического профиля с численностью 500–700 сотрудников и непрерывным производственным циклом;
- годовое энергопотребление: 60 000 МВт·ч, включая 20 000 МВт·ч электроэнергии, 40 000 МВт·ч в пересчете на потребление природного газа;
- коэффициенты выбросов:
 - 0,40 т CO₂/МВт·ч для электроэнергии;
 - 0,202 т CO₂/МВт·ч для природного газа (по национальному кадастру и GHG Protocol);
- допущения: неизменность объемов производства, технологической структуры и коэффициентов эмиссии в расчетном периоде.

Параметры сценариев отражают эффект, который может быть достигнут за счет внедрения ЦСМ энергопотребления и связанных с ними инструментов аналитики и автоматизации управления. В результате становится возможным снизить фактическое энергопотребление и, как следствие, углеродный след предприятия.

В расчетах указанные значения применены одинаково к электроэнергии и природному газу, что соответствует трактовке сценариев как изменения энергоемкости при фиксированном выпуске продукции (табл. 3).

Результаты сценарного анализа показывают оценочный диапазон потенциального снижения совокупных выбросов CO₂ при заданных предположениях: порядка 5 % в консервативном сценарии, 10 % — в реалистичном и 15 % — в амбициозном. Полученные значения интерпретируются как диапазон эффекта при фиксированном выпуске продукции и неизменных коэффициентах эмиссии и предназначены для количественной калибровки возможного вклада ЦСМ в снижение Score 1 и Score 2 при различных уровнях зрелости энергоменеджмента. Строгая каузальная оценка эффекта внедрения ЦСМ требует объектно-специфичных данных «до/после» и/или квазиэкспериментального дизайна (например, сопоставимой контрольной группы), что выходит за рамки настоящей постановки и рассматривается как направление дальнейших исследований. Таким образом, цифровой мониторинг в рамках энергоменеджмента следует рассматривать как инструмент, потенциально повышающий эффективность управленческих воздействий на энергопотребление и позволяющий количественно оценивать вклад в снижение Score 1 и Score 2 при различных сценарных предположениях.

Таблица 3. Результаты сценарного моделирования влияния цифрового мониторинга на энергопотребление и углеродный след

Показатель	Базовый сценарий	Консервативный	Реалистичный	Амбициозный
Электроэнергия, МВт·ч/год	20 000	19 000	18 000	17 000
Природный газ, МВт·ч/год	40 000	38 000	36 000	34 000
Выбросы Scope 2, т CO	8 000,0	7 600,0	7 200,0	6 800,0
Выбросы Scope 1, т CO	8 080,0	7 676,0	7 272,0	6 868,0
Суммарные выбросы, т CO	16 080,0	15 276,0	14 472,0	13 668,0
Снижение к базе, %	–	–5	–10	–15

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

Table 3. Results of scenario modeling of the impact of digital monitoring on energy consumption and carbon footprint

Indicator	Baseline scenario	Conservative	Realistic	Ambitious
Electricity, MWh/year	20 000	19 000	18 000	17 000
Natural gas, MWh/year	40 000	38 000	36 000	34 000
Scope 2 emissions, t CO	8 000.0	7 600.0	7 200.0	6 800.0
Scope 1 emissions, t CO	8 080.0	7 676.0	7 272.0	6 868.0
Total emissions, t CO	16 080.0	15 276.0	14 472.0	13 668.0
Reduction compared to baseline, %	–	–5	–10	–15

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

В дополнение к базовому сценарию выполнен простой анализ чувствительности результатов к изменению коэффициентов эмиссии, поскольку их выбор влияет на абсолютные значения рассчитываемых выбросов CO₂ (табл. 4). Для проверки устойчивости выводов в модели рассмотрено варьирование коэффициентов эмиссии для электроэнергии и природного газа в диапазоне $\pm 20\%$ относительно базовых значений при сохранении остальных расчетных предпосылок.

Таблица 4. Анализ чувствительности результатов сценарного моделирования к изменению коэффициентов эмиссии ($\pm 20\%$)

Сценарий	Коэффициенты эмиссии -20% , т CO ₂	Базовые коэффициенты эмиссии, т CO ₂	Коэффициенты эмиссии $+20\%$, т CO ₂
Базовый	12 864,0	16 080,0	19 296,0
Консервативный (-5%)	12 220,8	15 276,0	18 331,2
Реалистичный (-10%)	11 577,6	14 472,0	17 366,4
Амбициозный (-15%)	10 934,4	13 668,0	16 401,6

Источник: составлено Л.Р. Абдуллиной, В.С. Смирновым.

Table 4. Sensitivity analysis of scenario modeling results to changes in emission factors ($\pm 20\%$)

Scenario	Emission factors –20%, t CO ₂	Baseline emission factors, t CO ₂	Emission factors +20%, t CO ₂
Baseline	12 864.0	16 080.0	19 296.0
Conservative (–5%)	12 220.8	15 276.0	18 331.2
Realistic (–10%)	11 577.6	14 472.0	17 366.4
Ambitious (–15%)	10 934.4	13 668.0	16 401.6

Source: compiled by L.R. Abdullina, V.S. Smirnov.

Результаты анализа чувствительности показывают, что при изменении коэффициентов эмиссии на $\pm 20\%$ изменяется абсолютный уровень рассчитанных выбросов CO₂, однако относительные различия между сценариями сохраняются. Это подтверждает устойчивость качественных выводов исследования в рамках принятой линейной постановки модели.

Обсуждение

Полученные результаты сценарного анализа свидетельствуют о потенциальной значимости ЦСМ энергопотребления как инструмента декарбонизации промышленности. Показано, что в рамках сценарной постановки внедрение ЦСМ может способствовать снижению энергопотребления при условии интеграции мониторинговых данных в контур энергоменеджмента. Этот вывод согласуется с результатами международных исследований, подчеркивающих роль энергоуправления и цифровизации в достижении климатических целей [12–14].

При этом предложенная в работе схема не конкурирует с типовыми подходами IEA, ISO 50001, GHG Protocol, а также с корпоративными практиками CDP/GRI, поскольку указанные рамки выполняют преимущественно нормативно-учетную и отчетную функции. Отличительной особенностью предложенного подхода является включение уровня зрелости использования данных мониторинга в контуре энергоменеджмента в расчетную схему, что позволяет на раннем этапе получить количественный диапазон ожидаемого эффекта в терминах Score 1 и Score 2 при фиксированных производственных предположениях. Иными словами, схема ориентирована не на верификацию уже достигнутых результатов, а на предварительное обоснование и сценарное сопоставление ожидаемого эффекта цифрового мониторинга до формирования полного контура измерений и накопления объектной статистики.

Устойчивость выводов к выбору диапазона снижения энергоемкости оценивается в рамках линейной постановки модели. При использовании принятого в работе интервала 5–15 % изменяется прежде всего абсолютная величина эффекта, масштабируемая пропорционально заданному снижению, тогда как направленность результата и принципы отдельной интерпретации вкла-

дов Score 1 и Score 2 сохраняются при фиксированных коэффициентах эмиссии и структуре энергобаланса. Следовательно, ключевые выводы устойчивы по смыслу, а уточнение конкретных границ диапазона следует рассматривать как параметр, подлежащий последующей калибровке по отраслевой эмпирике и данным предприятия.

В рамках настоящего исследования выполнен простой анализ чувствительности к изменению коэффициентов эмиссии ($\pm 20\%$), что позволило оценить устойчивость расчетных выводов при варьировании ключевых эмиссионных предпосылок. Вместе с тем расширенный анализ чувствительности к структуре энергобаланса, сезонности и загрузке производства не проводился, поскольку цель исследования заключалась в описании воспроизводимой параметрической схемы и демонстрации логики перехода от данных мониторинга к оценке эффекта в терминах выбросов при фиксированных производственных предпосылках. Включение сезонных колебаний и изменения загрузки требует объектно-специфичных временных рядов телеметрии и нормализации по выпуску, что выходит за рамки выбранной сценарной постановки. При практическом применении модели абсолютные значения сокращения выбросов следует трактовать как зависящие от принятых коэффициентов эмиссии, структуры энергопотребления и выбранного диапазона экономии. Проведение расширенного анализа чувствительности по указанным параметрам рассматривается как естественное направление дальнейшей калибровки модели для условий конкретного предприятия.

Результаты сценарного анализа целесообразно сопоставить с опубликованными кейсами внедрения энергоменеджмента, основанного на регулярном мониторинге и контроле показателей. Так, в материалах U.S. Department of Energy представлен опыт компании 3M: по пяти производственным площадкам в США за трехлетний период внедрения и развития энергоменеджмента зафиксированы среднее повышение энергетической результативности на 7,7 %, ежегодная экономия затрат на энергоресурсы около 2,4 млн долл. США и сокращение выбросов на 94 800 т CO₂.

Еще одним примером является кейс международной компании Saudi Methanol Company (AR-RAZI) — крупного производителя метанола (природный газ как сырье и топливо). На предприятии была внедрена система энергоменеджмента, а для поддержки управленческого цикла разработана цифровая панель Energy management Dashboard, предназначенная для мониторинга, анализа и отчетности по показателям энергоэффективности и для планирования корректирующих действий по выявленным отклонениям. Согласно отчетам компании, это позволило сократить энергопотребление на 152 232,55 МВт·ч и снизить выбросы примерно на 38 000 т CO₂; экономический эффект составил 2 353 629,48 долл. США при стоимости внедрения системы энергоменеджмента 72 444,44 долл. США. Для оценки эффекта сопоставлялись базовый

период 2022 г. (12 последовательных месяцев с января) и отчетный период 2023 г. (12 последовательных месяцев) после реализации мероприятий.

В качестве иллюстрации применимости полученных выводов к условиям российских промышленных предприятий можно привести пример ПАО «Татнефть», где в рамках развития системы энергоменеджмента (ISO 50001) реализован пилотный цифровой проект автоматизированной системы «Энергопортал», включающий модули мониторинга исполнения мероприятий по энергосбережению, планирования потребления ТЭР, формирования энергобаланса и почасового планирования потребления. Согласно опубликованным материалам компании, в 2022–2024 гг. в рамках технического энергоаудита было обследовано 146 объектов и сформировано 265 рекомендаций с потенциалом экономии 8708 т условного топлива. Применение цифровых инструментов почасового планирования потребления обеспечило рост экономического эффекта с 37,7 млн руб. в 2022 г. до 41,5 млн руб. в 2023 г., при этом доля потребления, охваченная управляемой корректировкой графиков нагрузки, составила 2,2 % в 2023 г. и 3,33 % за 9 месяцев 2024 г.

Еще одним примером внедрения энергоменеджмента, основанного на регулярном мониторинге и контроле показателей энергопотребления, является практика ПАО «Уралкалий». В официальном ESG-отчете компании за 2024 г. показано, что при росте абсолютного энергопотребления вследствие увеличения объемов производства удельное энергопотребление снизилось на 12 % по сравнению с 2023 г. и составило 1,895 ГДж/т продукции. При этом зафиксировано сбережение топливно-энергетических ресурсов в объеме 298 713 ГДж. Одновременно удельные выбросы парниковых газов (Scope 1 и Scope 2) сократились до 0,134 т CO₂-экв./т продукции, что также соответствует снижению на 12 % к предыдущему году. В отчете указывается, что данные улучшения достигнуты в рамках реализации системы энергетического менеджмента и программ повышения энергоэффективности, включающих автоматизированный учет и мониторинг энергоресурсов, анализ режимов работы оборудования и мероприятия по снижению потерь энергии. Представленные показатели демонстрируют, что системное использование инструментов мониторинга и управленческого контроля позволяет достигать количественно фиксируемого снижения энергоемкости и связанных с ней выбросов.

Приведенные примеры подтверждают, что внедрение ЦСМ и интеграция мониторинговых показателей в контур энергоменеджмента обеспечивают количественно фиксируемый эффект в виде снижения энергопотребления и затрат, а в ряде кейсов — также сокращения выбросов. Тем самым подтверждается практическая применимость принятой в работе логики «мониторинг — управленческие решения — эффект в терминах Scope 1 и Scope 2».

Особое значение цифровые решения приобретают в контексте международных требований к нефинансовой отчетности. Точность данных о потреб-

лении энергии и выбросах, обеспечиваемая цифровыми системами, позволяет компаниям формировать достоверные ESG-отчеты, соответствующие стандартам GRI, CDP и IFRS S2. Это повышает прозрачность деятельности предприятий, снижает регуляторные риски и укрепляет доверие со стороны инвесторов и партнеров.

Экономический эффект применения ЦСМ также заслуживает внимания: снижение затрат на энергоресурсы повышает рентабельность производства и формирует основу для интеграции стратегий декарбонизации в бизнес-модели. В долгосрочной перспективе такие решения позволяют предприятиям адаптироваться к ужесточению климатического регулирования, выполнять международные обязательства и повышать устойчивость к рыночным и экологическим рискам.

Ограничением предложенной расчетной схемы является линейная связь между снижением энергопотребления и уменьшением выбросов при фиксированном выпуске и неизменных коэффициентах эмиссии. В реальных условиях при существенных уровнях экономии возможна нелинейность эффекта вследствие изменения структуры энергобаланса (например, замещения топлива электроэнергией или изменения доли собственных источников), возникновения компенсирующего роста энергопотребления, обусловленного увеличением выпуска или загрузки на фоне снижения удельных энергетических затрат, а также влияния сезонности и загрузки производства на энергоемкость. Указанные эффекты не включены в исследование, поскольку работа ориентирована на воспроизводимую параметризацию эффекта на основе агрегированных показателей энергопотребления и не предполагает каузальной идентификации на временных рядах объекта.

Заключение

В целом ЦСМ энергопотребления представляют собой эффективный инструмент повышения прозрачности и управляемости энергетических процессов на промышленных предприятиях. Их внедрение обеспечивает формирование достоверной базы данных для анализа энергоэффективности, расчета выбросов CO₂ и принятия решений по их снижению. Интеграция мониторинга с производственными и управленческими системами позволяет оптимизировать режимы работы оборудования и повысить ресурсную эффективность.

Сценарное моделирование показало потенциал цифровых решений для системного снижения углеродного следа предприятий и достижения климатических целей. Применение такого подхода создает основу для стратегического планирования мероприятий по декарбонизации, оценки их результативности и подготовки отчетности в соответствии с международными стандартами.

Список литературы

- [1] Морзак Г.И., Сидорская Н.В., Мартынюк С.С. Методология снижения углеродного следа для предприятий // Вестник Брестского государственного технического университета. 2025. № 1 (136). С. 159–164. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-159-164> EDN: ICKLFM
- [2] Байрамнельдиева А., Мыратгельдиева А., Бабамырадова А. Влияние зеленой экономики на снижение углеродного следа // Вестник науки. 2024. Т. 1. № 5 (74). С. 13–15. EDN: SFSDUC
- [3] Liu J., Zhang Z. Integrated energy carbon emission monitoring and digital management system for smart cities // Frontiers in Energy Research. 2023. Vol. 11. Article no. 1221345. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1221345> EDN: THVASX
- [4] Сайфуллин А.Б. Цифровые технологии в энергетике // Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов : сб. материалов XI Международной науч.-практ. конф. Москва, 2 июня 2022 года / редкол.: Л.К. Гуриева [и др.]. Москва : ООО «ИРОК», 2022. С. 19–23. EDN: MVVWKH
- [5] Stepanov M. Digitalization of adjustment and maintenance processes for optimizing energy consumption in the oil and gas sector // Bulletin of Science and Practice. 2024. Vol. 10. No. 11. P. 126–132. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/16> EDN: HJNAYP
- [6] Pandey V., Sircar A., Bist N., Solanki K., Yadav K. Accelerating the renewable energy sector through Industry 4.0: Optimization opportunities in the digital revolution // International Journal of Innovation Studies. 2023. Vol. 7. No. 2. P. 171–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2023.03.003> EDN: UZEEHW
- [7] Степанов М.Е., Пишченко Д.В., Сафронов Д.С., Колганов Д.И. Экономическая эффективность интеллектуальных систем электропривода в добывающей промышленности // Экономический вестник. 2024. Т. 3. № 6. P. 23–31. EDN: ZSMZBE
- [8] Gaus T., Schlotterbeck M. 2025 Smart manufacturing and operations survey: navigating challenges to implementation // Deloitte Insights. 2025. URL: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing-industrial-products/2025-smart-manufacturing-survey.html> (accessed: 13.10.2025).
- [9] Eshbayev O., Xursandov K., Pulatovna Kh. U., Sitara A., Jamalova G. Advancing green technology systems through digital economy innovations: a study on sustainable // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2024. Vol. 576. Article no. 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457602009> EDN: AVTJMM
- [10] Жданова Н.Г., Садыкина Р.А. Практические аспекты технологий устойчивого развития промышленных предприятий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2025. № 1 (51). P. 130–138. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-130-138](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-130-138) EDN: DAVAJV
- [11] Yarov Yu. Digital technologies for monitoring and managing construction projects // Norwegian Journal of development of the International Science. 2025. No. 149. P. 80–83. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14766578> EDN: GSSZSC
- [12] Umarov E. Environmental impact indicators in industrial enterprises // Nordic Studies in Academic Research. 2024. Vol. 3. № 0003.
- [13] Dzwigol H., Kwilinski A., Lyulyov O., Pimonenko T. Digitalization and energy in attaining sustainable development: impact on energy consumption, energy structure, and energy intensity // Energies. 2024. Vol. 17. Iss. 5. Article no. 1213. <https://doi.org/10.3390/en17051213> EDN: GEZJRY

- [14] Dekeyrel S., Fessler M. Digitalisation: an enabler for the clean energy transition // *Journal of Energy & Natural Resources Law*. 2024. Vol. 42. Iss. 2. P. 185–209. <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2254103> EDN: CSLOHH

References

- [1] Morzak GI, Sidorskaya NV, Martynyuk SS. Methodology for reducing carbon footprint for enterprises. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2025;(1):159–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-159-164> EDN: ICKLFM
- [2] Bayramneldieva A, Myratgeldieva A, Babamyradova A. The impact of a green economy on reducing carbon. *Bulletin of Science*. 2024;1(5):13–15. (In Russ.). EDN: SFSDUC
- [3] Liu J, Zhang Z. Integrated energy carbon emission monitoring and digital management system for smart cities. *Frontiers in Energy Research*. 2023;(11):1221345. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1221345> EDN: THVASX
- [4] Saifullin AB. Digital technologies in energy. *Current Problems of Society, Economics and Law in the Context of Global Challenges. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Moscow, June 2, 2022*. L.K. Guriev (ed.) et al. Moscow : LLC “IROK”; 2022. p. 19–23. (In Russ.). EDN: MVVWKH
- [5] Stepanov M. Digitalization of adjustment and maintenance processes for optimizing energy consumption in the oil and gas sector. *Bulletin of Science and Practice*. 2024;10(11):126–132. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/16> EDN: HJNAYP
- [6] Pandey V, Sircar A, Bist N, Solanki K, Yadav K. Accelerating the renewable energy sector through Industry 4.0: Optimization opportunities in the digital revolution. *International Journal of Innovation Studies*. 2023;7(2):171–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2023.03.003> EDN: UZEEHW
- [7] Stepanov ME, Pshichenko DV, Safronov DS, Kolganov DI. Economic efficiency of intelligent drive systems in the mining industry. *Economic Bulletin*. 2024;3(6):23–31. (In Russ.). EDN: ZSMZBE
- [8] Gaus T., Schlotterbeck M. 2025 Smart manufacturing and operations survey: navigating challenges to implementation. *Deloitte Insights*. 2025. Available from: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing-industrial-products/2025-smart-manufacturing-survey.html> (accessed: 13.10.2025).
- [9] Eshbayev O, Xursandov K, Pulatovna KhU., Sitora A, Jamalova G. Advancing green technology systems through digital economy innovations: a study on sustainable. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2024;(576):02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457602009> EDN: AVTJMM
- [10] Zhdanova N, Sadykina R. Practical aspects of sustainable industrial development technologies. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;(1):130–138. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-130-138](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-130-138) EDN: DAVAJV
- [11] Yarov Y. Digital technologies for monitoring and managing construction projects. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2025;(149):80–83. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14766578> EDN: GSSZSC
- [12] Umarov E. Environmental impact indicators in industrial enterprises. *Nordic Studies in Academic Research*. 2024;3(0003).
- [13] Dzwigol H, Kwilinski A, Lyulyov O, Pimonenko T. Digitalization and energy in attaining sustainable development: impact on energy consumption, energy structure, and energy intensity. *Energies*. 2024;17(5):1213. <https://doi.org/10.3390/en17051213> EDN: GEZJRY

- [14] Dekeyrel S, Fessler M. Digitalisation: an enabler for the clean energy transition. *Journal of Energy & Natural Resources Law*. 2024;42(2):185–209. <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2254103> EDN: CSLOHH

Сведения об авторах:

Абдуллина Лейла Реналевна, магистр, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-1855-7339; eLIBRARY SPIN-код: 7569-4701. E-mail: chechevitsa@ro.ru

Смирнов Владислав Сергеевич, магистр, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1. ORCID: 0009-0008-5003-1282; eLIBRARY SPIN-код: 4638-6788. E-mail: svs19ea324@student.bmstu.ru

Bio notes:

Leila R. Abdullina, master's degree, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1855-7339; eLIBRARY SPIN-code: 7569-4701. E-mail: chechevitsa@ro.ru

Vladislav S. Smirnov, master's degree, Bauman Moscow State Technical University, 5/1 2 Baumanskaya St, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-5003-1282; eLIBRARY SPIN-code: 4638-6788. E-mail: svs19ea324@student.bmstu.ru