

НИЗКОУГЛЕРОДНОЕ РАЗВИТИЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Естатлев Руслан Муратович¹,
e-mail: estatlev@sfedu.ru

¹Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Статья посвящена приоритизации мер низкоуглеродного развития Российской Федерации через модернизацию промышленности и повышение энергоэффективности. Рассмотрена секторальная структура антропогенных выбросов парниковых газов по материалам Национального доклада о кадастре. При помощи сравнительного анализа технологических решений выявлены доминирующие источники выбросов, требующие первоочередного воздействия. Систематизированы меры сокращения прямых и косвенных выбросов предприятий, включая утилизацию вторичных энергоресурсов, повышение эффективности оборудования, улавливание углекислого газа и снижение утечек в технологических системах. Отмечены ограничения внедрения, связанные с инфраструктурой обращения с выбросами углекислого газа, капиталоемкостью проектов и требованиями к измеримости и верификации результатов. Сформулированы условия реализуемости и предложена логика выбора мер по источникам выбросов. Отмечено, что применение технологий улавливания углекислого газа в ряде случаев оказывается экономически менее предпочтительным, чем сокращение выбросов за счёт повышения энергоэффективности и замещения используемых энергоресурсов. Сделан вывод о необходимости проактивного развития энергетической инфраструктуры для предотвращения роста выбросов.

Ключевые слова: низкоуглеродное развитие, выбросы парниковых газов, модернизация промышленности, энергоэффективность, корпоративный учет выбросов, декарбонизация промышленности, энергетический сектор

LOW-CARBON DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN FEDERATION: ENERGY EFFICIENCY AND INDUSTRIAL MODERNIZATION

Estatlev R.M.¹,
e-mail: estatlev@sfedu.ru

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

The article prioritizes low-carbon development measures for the Russian Federation through industrial modernization and energy efficiency improvements. The sectoral structure of anthropogenic greenhouse gas emissions is examined using the National Inventory Report. Using a comparative analysis of technologies, the dominant emission sources requiring priority action were identified. Measures for reducing emissions from enterprises are systematized, including the utilization of secondary energy resources, improved equipment efficiency, carbon dioxide capture, and the reduction of leaks in systems. Implementation constraints related to carbon dioxide handling infrastructure, the capital intensity of projects, and the requirements for measurability and verification of results are highlighted. Feasibility conditions are formulated and logic for selecting measures by emission sources is proposed. It has been noted that the use of carbon capture technologies is economically less preferable in some cases than reducing emissions by improving energy efficiency and replacing used energy resources. The conclusion is that proactive development of energy infrastructure is necessary to prevent an increase in emissions.

Keywords: low-carbon development, greenhouse gas emissions, industrial modernization, energy efficiency, corporate emissions accounting, industrial decarbonization, energy sector

Введение

Низкоуглеродное развитие трансформировалось из преимущественно экологической повестки в фактор промышленной конкурентоспособности [1]. Углеродоемкость продукции влияет на доступ к внешним рынкам, устойчивость цепочек поставок [2]. Российская Федерация имеет высокую долю энергоёмких отраслей, таких как электро- и теплоэнергетика, металлургия, химическая и строительная промышленность, а особенно чувствителен добывающий сектор [3]. Декарбонизация является одной из обсуждаемых тем в энергетической повестке не только внутри страны, но и за её пределами [4]. Политика по декарбонизации направлена на сокращение выбросов парниковых газов, доли углеводородного топлива в энергетическом балансе. Приоритетным является ускоренное внедрение возобновляемых источников энергии и развитие энергоэффективных технологий. Поскольку Россия обладает значительным экспортным потенциалом в части промышленности, требуется соответствующее юридическое регулирование.

Низкоуглеродный курс Российской Федерации закреплён в нескольких государственных документах: Указ Президента Российской Федерации № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов»¹, а стратегические направления определены до 2050 года в Распоряжении Правительства Российской Федерации². В 2023 году была обновлена Климатическая доктрина³, которая закрепила задачи по реализации политики с учетом изменения климата и его последствий.

Международная повестка по декарбонизации промышленности имеет четкую структуризацию. В докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) рассматриваются вопросы электрификации и замещения топлива, использования низкоуглеродного водорода, активное внедрение политики улавливания, использования и хранения углекислого газа. Международное энергетическое агентство в качестве ключевых мер для быстрого снижения выбросов рассматривает развертывание наилучших доступных технологий (НДТ), технологию повторного использования тепловой энергии удаляемого воздуха или газов для подогрева холодного воздуха в системах промышленности, и совместную выработку электрической и тепловой энергии [5]. Когенерация часто применяется на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ)⁴. Впервые ядерная энергия как экологически чистый источник энергии была определена в 2023 году в рамках Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. К 2050 году участники обязались утроить мощность мировой ядерной энергетики, однако этих объемов едва ли хватит для удовлетворения нужд одной лишь отрасли черной металлургии⁵.

Несмотря на наличие значительного количества работ, сохраняется методологическая неполнота на уровне разработки мер принятия решений. В прикладных работах недостаточно проработан вопрос приоритизации: какие меры рационально использовать в первом эшелоне для ключевых источников выбросов в Российской Федерации и по каким критериям оценивать эффективность работы.

Задачи исследования заключаются в определении ключевых источников выбросов по структуре эмиссии, систематизации технологических мер снижения выбросов, формировании схемы приоритизации мер низкоуглеродной модернизации для ключевых источников выбросов в Российской Федерации с учетом реализуемости. Цель работы – обосновать приоритет энергоэффективности и технологической модернизации промышленности как базового направления низкоуглеродного развития.

¹ Указ Президента Российской Федерации «О сокращении выбросов парниковых газов» от 04.11.2020 № 666 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (дата обращения: 25.02.2026). – Текст: электронный.

² Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» от 29.10.2021 № 3052-р // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657/ (дата обращения: 25.02.2026). – Текст: электронный.

³ Указ Президента Российской Федерации «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации» от 26.10.2023 № 812 // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_460556/ (дата обращения: 25.02.2026). – Текст: электронный.

⁴ Energy Efficiency 2023 // IEA. – URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023> (дата обращения: 25.02.2026). – Текст: электронный.

⁵ Энергетический переход и декарбонизация промышленности // IEA. – URL: <https://www.iaea.org/ru/bulletin/energeticheskiy-perehod-i-dekarbonizaciya-promyshlennosti> (дата обращения: 26.02.2026). – Текст: электронный.

Структура и динамика выбросов парниковых газов в Российской Федерации

На рисунке 1 отмечается волнообразный характер в динамике общих выбросов углекислого газа. После умеренного колебания в начале 2000-х происходит резкий спад к минимуму 1440,66 млн тонн в 2009 году. Прирост от минимума 2009 года к максимуму 2023 года составляет более 17 %. В национальном докладе указаны следующие драйверы динамики выбросов: изменение ВВП и структуры экономики, изменение энергоэффективности и структуры топливного баланса Российской Федерации.

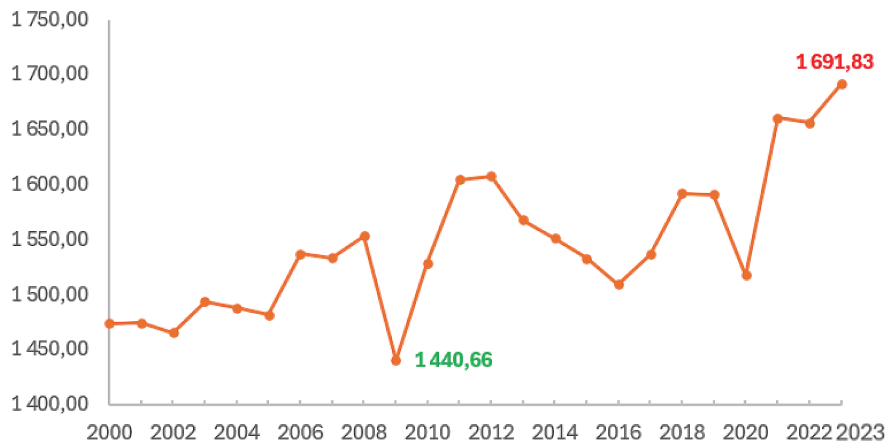


Рисунок 1 – Общие выбросы CO₂ в Российской Федерации с 2000 по 2023 г., млн тонн⁶

Демонстрируется доминирование в структуре выбросов сектора энергетики на протяжении рассматриваемых годов (таблица 1). За 2023 год объем достигает порядка 79 % от совокупных выбросов.

Таблица 1 – Выбросы парниковых газов в Российской Федерации по секторам (млн тонн CO₂-экв.)⁷

Сектор	Годы							
	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Энергетика	1536,4	1589,2	1624,9	1570,4	1547,7	1592,4	1596,6	1649,5
Промышленные процессы и использование продукции	191,6	206	197,7	219	239,3	247,3	238,7	244,3
Сельское хозяйство	103,1	89,6	89,1	93,2	100,5	101,2	101,7	101,2
Отходы	59,6	66,9	75,9	85,5	88,5	88,3	88	87,9

Это означает, что основные усилия для снижения углеродоемкости экономики необходимо прилагать в контуре энергопотребления и энергообеспечения. Например, обеспечение энергоэффективности, снижения потерь, повышения эффективности генерации и теплообеспечения необходимо рассматривать как системообразующие меры в осуществлении низкоуглеродного перехода. Часть промышленных выбросов генерируется в процессе производства строительных материалов, ряда химических процессов и не устраняется снижением энергопотребления, а требует многоступенчатого подхода в решении.

Сектор «отходы» демонстрирует устойчивый рост по сравнению с 2000 годом, с 59,6 млн тонн до 87,9 млн тонн в 2023 году. Одной из причин является рост образования отходов и увеличение полигонного размещения, провоцирующего выбросы метана. Однако, несмотря на рост доли отходов, основная масса выбросов остаётся в секторе энергетики и промышленности, что доказывает приоритетный фокус на энергоэффективности и модернизации промышленности как ключевого направления низкоуглеродного развития [6].

В промышленности существуют следующие классы выбросов: энергетически связанные, которые обусловлены сжиганием топлива и потреблением электроэнергии и тепла, процессные, возникаю-

⁶ Составлено автором.

⁷ Источник: Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990–2023 гг. // UNFCCC (https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RUS_NIR_2025_v1_rev_2025-04-18.pdf).

щие из природы технологического маршрута при производстве. Энергоэффективность и модернизация энергопотребления дают быстрый эффект там, где доминируют выбросы, связанные с сектором энергетики [7]. Для процессных выбросов необходимо или изменение технологии, или применение мер глубокой декарбонизации (CCUS) [8].

Детализация по сектору «Энергетика» представлена на рисунке 2. На протяжении рассматриваемого периода основной вклад в выбросы энергетического сектора формируется за счет сжигания топлива. Его доля в совокупных выбросах составляет порядка 85–90 %. Следовательно, приоритетным для низкоуглеродного развития становятся меры, направленные на снижение потерь тепла и пара, повышение энергоэффективности топливосжигающих установок. Относительно заметное снижение выбросов наблюдается в 2020 году, что предположительно связано с временным сокращением экономической активности и снижением спроса на энергетические ресурсы вследствие пандемии COVID-19.



Рисунок 2 – Выбросы парниковых газов от категорий источников сектора «Энергетика» (Тг. CO₂-экв.)⁸

Структура выбросов показывает, что основной потенциал их сокращения связан с технологическими изменениями в сфере использования топлива. Концентрация значительных объемов углекислого газа на установках открывает возможности не только для его улавливания, но и для дальнейшего промышленного использования. При этом энергетический комплекс целесообразно совмещать с химическим производством, поскольку вырабатываемый углекислый газ может использоваться в качестве сырья для синтеза химической продукции.

Декарбонизация энергетического и промышленного секторов и ограничения внедрения низкоуглеродных технологий в России

Существуют следующие технологии декарбонизации промышленности: абсорбция, адсорбция, мембранные технологии, криогенное разделение углекислого газа, биологическое улавливание, цепочка «улавливание – использование и хранение углерода», цикл с углекислым газом сверхкритических параметров, утилизация в цикле топливного элемента [9].

Абсорбция представляет собой процесс, в ходе которого газ после котла или печи очищают от пыли и примесей, охлаждают и затем пропускают через амины/пиперазин, где углекислый газ связывается с жидкостью. Главными ограничениями являются высокие энергозатраты, необходимость соответствующей инфраструктуры для последующего использования уловленного углекислого газа (например, в химическом синтезе). При этом не существует ограничивающего фактора для увеличения

⁸ Составлено автором по: Информационно-аналитический бюллетень // ПАО «Мосэнерго» (<https://www.mosenergo.ru/d/textpage/45/837/03-uglekislyj-gaz.pdf>).

степени улавливания при данной технологии. Однако увеличиваются капитальные затраты из-за необходимости колонны абсорбера/десорбера, теплообменников и компрессора углекислого газа. С ростом степени улавливания увеличивается потребление энергии. При повышении уровня улавливания углекислого газа на угольной электростанции с 90 до 99,7 % стоимость улавливания 1 тонны увеличивается с 62 до 64,5 доллара на тонну углекислого газа⁹. При этом более выгодной оказывается замена десятой части угля биомассой, и производство электроэнергии становится более выгодным, нежели при попытке увеличить степень улавливания.

При помощи адсорбции углекислый газ извлекается на поверхности твёрдого сорбента: газ проходит через колонну, затем происходит регенерация сорбента. Сложностью является то, что сорбенты чувствительны к влажности, примесям, а также сильна зависимость от концентрации и перепада давления. При низком давлении требуется компрессия или вакуум, что увеличивает энергозатраты.

Использование полимерных/неорганических мембран предполагает многоступенчатые схемы, в ходе которых используется принцип высокой селективности по углекислому газу (мембраны могут сохранять или, наоборот, пропускать его, действуя как барьеры для других газов в газовом потоке). На данном этапе в Российской Федерации существуют свидетельства о нацеленности на данную технологию в качестве пилотной и перспективной¹⁰.

Криогенное разделение представляет собой сжатие газа и охлаждение до температур, при которых двуокись азота конденсируется и может быть отделена как жидкая/твёрдая фракция. Технология характеризуется высокими требованиями к концентрации углекислого газа и поэтому потенциально применима для потоков с их высокой долей. При низкой концентрации актуальна как часть гибридного решения после предварительного обогащения (например, при использовании мембран).

Перспективной технологией также являются окси-технологии, при которых после сжигания топлива в кислородной среде получают водяной пар и практически чистый углекислый газ. Получившиеся подаются на турбину в сверхкритическом состоянии, после чего углекислый газ охлаждается и вновь участвует в цикле, а вода сбрасывается в сточные воды или используется повторно.

В зависимости от используемых технологий улавливания углекислого газа капитальные затраты увеличиваются примерно на 20 %. При этом внедрение технологий улавливания, обезвреживания и утилизации требует государственной поддержки проектов по улавливанию углерода или организации механизма налоговых льгот. Важно подчеркнуть, что улавливающие углекислый газ установки должны работать на углеродно-нейтральной энергии, поскольку сама по себе установка может приводить к увеличению выбросов. Предлагаются способы геологического захоронения при помощи закачки газа в угольные пласты, истощенные нефтяные и газовые месторождения, пористый базальт. Существует также захоронение углерода в океан, однако на этапе транспортировки существует риск утечки, а также неопределенность касательно влияния на океаническую экосистему. Одним из углеродно-нейтральных способов является переработка углекислого газа в синтетическое топливо¹¹.

Учёт выбросов необходимо проводить последовательно и тщательно, поскольку его отсутствие приводит к увеличению количества серьезных стихийных бедствий. Для этого в корпоративной практике компаний существует учет выбросов (таблица 2).

Таблица 2 – Классификация выбросов и меры их снижения¹²

Группа выбросов	Что включает	Меры для снижения
Score 1 (прямые)	Сжигание топлива транспорта и техники, процессные выбросы, утечки хладагентов и газов	Энергоэффективность оборудования; рекуперация, когенерация; замещение топлива (уголь-газ-биотопливо/водород); снижение утечек

⁹ Информационно-аналитический бюллетень // ПАО «Мосэнерго». – URL: <https://www.mosenergo.ru/d/textpage/45/837/03-uglekislyj-gaz.pdf> (дата обращения: 27.02.2026). – Текст: электронный.

¹⁰ Создана полимерная мембрана для быстрого извлечения CO₂ из выхлопов // Российский научный фонд. – URL: <https://rscf.ru/news/chemistry/cozdana-polimernaya-membrana-dlya-bystrogo-izvlecheniya-co2-iz-vykhlopov/> (дата обращения: 27.02.2026). – Текст: электронный.

¹¹ Хан С.А. Анализ мировых проектов по захоронению углекислого газа // Георесурсы. – 2010. – № 4 (36). – С. 55–62.

¹² Составлено автором по: Что такое выбросы групп 1, 2 и 3? // SAP (<https://www.sap.com/central-asia-caucasus/resources/what-are-score-1-2-3-emissions>).

Score 2 (покупная энергия)	Покупные электричество, тепло, пар, охлаждение	Снижение потребления энергии (цифровой мониторинг, модернизация оборудования); переход на низкоуглеродную электроэнергию; собственная низкоуглеродная генерация
Score 3 (цепочка стоимости)	Прочие косвенные выбросы: 15 категорий (командировки, использование/утилизация продукции)	Замещение материалов на менее углеродоёмкие, рост доли использования вторичного сырья; оптимизация логистических цепочек; сокращение образования отходов; сотрудничество с поставщиками низкоуглеродных материалов

К выбросам 1-й группы относят прямые выбросы, производимые непосредственно источниками, которыми владеет компания. Сюда относятся выбросы от топлива, потребляемого активами компании, включены утечки парниковых газов из оборудования. Для коммунальных предприятий также включают сжигание топлива для электросетей (в частности, производящих электроэнергию через уголь, газ или при работе на масле). Выбросы 2-й группы не производятся непосредственно компанией, это косвенные выбросы в результате закупок электроэнергии у поставщиков коммунальных услуг. Они считаются в общей структуре выбросов предприятия, поскольку за счет изменения поставщиков и структуры поставок подлежат изменению непосредственно компанией, которая потребляет энергию. Все остальные выбросы учитываются в 3-й группе, они генерируются за счет приобретенных товаров, командировок, образования отходов от франшиз, утилизации проданных продуктов.

Наиболее управляемыми с точки зрения технологической модернизации являются прямые выбросы, поскольку они связаны непосредственно с деятельностью конкретной организации и состоянием оборудования. Сокращение выбросов данной группы возможно за счет внедрения низкоуглеродного топлива, повышения энергоэффективности и модернизации производственных мощностей. Косвенные выбросы 2-й группы определяются в большей части структурой энергетического баланса. В данном случае играет роль развитие собственной энергетической инфраструктуры, использование когенерационных установок. Наиболее сложной для управления является 3-я группа, поскольку включает в себя широкий спектр процессов, связанных с изменением логистических цепочек, координации действий между участниками поставок. Представленная классификация позволяет определить приоритетные направления сокращения выбросов в промышленности и энергетике. В Российской Федерации отмечается высокий потенциал снижения выбросов на первых этапах за счет модернизации энергоёмких отраслей, внедрения энергоэффективных технологий, а в дальнейшем – постепенного перехода к низкоуглеродным источникам энергии.

Заключение

Сопоставление данных национального доклада о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов за 1990–2023 годы с технологическими решениями показывает, что задача низкоуглеродного развития в Российской Федерации не сводится к выбору «наиболее продвинутой» технологии. Меры модернизации определяются системными условиями: переход на электрификацию дает климатический и экологический эффект при достаточно развитой низкоуглеродной генерации и наличии достаточной мощности, в противном случае происходит перераспределение выбросов между площадками предприятия и энергосистемой без снижения суммарной углеродоемкости.

Анализ технологий улавливания углекислого газа подтверждает, что решения в области декарбонизации требуют заранее спроектированной мощной системы логистики углерода, поскольку вопросы его хранения даже после решения вопроса об улавливании остаются нерешенными, если на предприятии не установлена инфраструктура по вовлечению углеродов в повторный цикл. Улавливание углекислого газа без заранее установленных мощностей может быть менее рациональным и капиталоемким, нежели меры по сокращению выбросов на этапе образования. Наличие множества технологий по работе с выбросами ограничивается требованиями к качеству исходного потока, потребностью в инфраструктуре, необходимости общей методологии для измерения и подтверждения результатов, энергетическими штрафами. Ключевой принцип – смещение фокуса от реактивной логики «сначала произ-

вести выбросы, а затем решать вопрос по их утилизации» к проактивным мерам по предотвращению выбросов через энергоэффективность и модернизацию оборудования.

Практическая ценность исследования заключается в формировании рамки принятия решений. При выборе технологии обращения с выбросами стоит анализировать ожидаемый эффект (иногда выгоднее сократить выбросы, а не пытаться их уловить по максимуму), готовность инфраструктуры и измеримость результата. Перспективой для дальнейшей работы является переход к отраслевым проектам с количественным измерением мер по предотвращению и улавливанию выбросов по стоимости, требованиям к инфраструктуре и потенциальным энергетическим штрафам.

Список литературы

1. Башмаков И.А. Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики // Вопросы экономики. – 2020. – № 7. – С. 51–74.
2. Попова И.М., Колмар О.И. Низкоуглеродное развитие России: вызовы и возможности в новых условиях // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. – 2023. – Т. 18, № 4. – С. 62–95.
3. Любарская М.А. Теоретические и практические аспекты низкоуглеродного развития экономики // Экономический вектор. – 2021. – № 2 (25). – С. 100–104.
4. Moreno J., Van de Ven D.-J., Sampedro J., Gambhir A., Woods J., Gonzalez-Eguino M. Assessing synergies and trade-offs of diverging Paris-compliant mitigation strategies with long-term SDG objectives // Global Environmental Change. – 2023. – Vol. 78. – P. 1–14.
5. Hasan A.S.M.M., Trianni A. A review of energy management assessment models for industrial energy efficiency // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 21. – P. 1–21.
6. Клименко А.В., Терёшин А.Г., Прун О.Е. Перспективы России в снижении выбросов парниковых газов // Энергосбережение – теория и практика: сборник трудов Одиннадцатой Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 10–14 октября 2022 года. – Москва, 2022. – С. 322–326.
7. Филиппов С.П. Экономические характеристики технологий улавливания и захоронения диоксида углерода (обзор) // Теплоэнергетика. – 2022. – № 10. – С. 17–31.
8. Дорожкина И.П., Череповицына А.А. Комплекс технологий улавливания, хранения и использования CO₂: теория и практика организационных форм реализации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2023. – № 3 (47). – С. 38–52.
9. Филимонова А.А., Власова А.Ю., Чичирова Н.Д., Камалиева Р.Ф. Обзор технологий декарбонизации производства тепловой и электрической энергии // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 149–174.

References

1. Bashmakov I.A. Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya rossijskoj ekonomiki // Voprosy ekonomiki. – 2020. – № 7. – S. 51–74.
2. Popova I.M., Kolmar O.I. Nizkouglerodnoe razvitie Rossii: vyzovy i vozmozhnosti v novyh usloviyah // Vestnik mezhdunarodnyh organizacij: obrazovanie, nauka, novaya ekonomika. – 2023. – T. 18, № 4. – S. 62–95.
3. Lyubarskaya M.A. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty nizkouglerodnogo razvitiya ekonomiki // Ekonomicheskij vektor. – 2021. – № 2 (25). – S. 100–104.
4. Moreno J., Van de Ven D.-J., Sampedro J., Gambhir A., Woods J., Gonzalez-Eguino M. Assessing synergies and trade-offs of diverging Paris-compliant mitigation strategies with long-term SDG objectives // Global Environmental Change. – 2023. – Vol. 78. – P. 1–14.
5. Hasan A.S.M.M., Trianni A. A review of energy management assessment models for industrial energy efficiency // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 21. – P. 1–21.
6. Klimenko A.V., Teryoshin A.G., Prun O.E. Perspektivy Rossii v snizhenii vybrosov parnikovyh gazov // Energoberezhenie – teoriya i praktika: sbornik trudov Odinnadcatoy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Moskva, 10–14 oktyabrya 2022 goda. – Moskva, 2022. – S. 322–326.
7. Filippov S.P. Ekonomicheskie harakteristiki tekhnologij ulavlivaniya i zahoroneniya dioksida ugleroda (obzor) // Teploenergetika. – 2022. – № 10. – S. 17–31.

8. *Dorozhkina I.P., Cherepovitsyna A.A.* Kompleks tekhnologij ulavlivaniya, hraneniya i ispol'zovaniya SO₂: teoriya i praktika organizacionnyh form realizacii // Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve. – 2023. – № 3 (47). – S. 38–52.

9. *Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Chichirova N.D., Kamalieva R.F.* Obzor tekhnologij dekarbonizacii proizvodstva teplovoj i elektricheskoy energii // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii. – 2023. – T. 16, № 2. – S. 149–174.

Статья поступила в редакцию: 02.03.2026

Received: 02.03.2026

Статья принята к публикации: 04.03.2026

Accepted: 04.03.2026