

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-4-370-388>

УДК 631.622, 338.45:662.7

Циркулярная экономика в энергетике России

Докт. экон. наук, доц. О. П. Сушко¹⁾

¹⁾Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
(Москва, Российская Федерация)

Реферат. В условиях введения трансграничного углеродного регулирования в Европе и необходимости повышения энергоэффективности российской экономики переход к циркулярной модели в энергетике становится не только экологической, но и экономической задачей. Однако отсутствие в открытой статистике показателей замкнутости потоков углерода, теплоты и отходов не позволяет оценить реальную готовность России к такому переходу. Цель исследования – на основе статистических данных за 2004–2024 гг. выявить степень готовности российской энергетики к циркулярной модели, определить ключевые барьеры (в том числе статистические) и предложить измеримые индикаторы для управления переходом. Использованы дескриптивный статистический анализ временных рядов потребления первичной энергии и выбросов CO₂; корреляционный анализ Пирсона для пятилетних интервалов; метод экстраполяции трендов для прогноза до 2030 г.; сравнительный анализ трех технологических альтернатив (CCUS/EOR, CCU, возобновляемых источников энергии (ВИЭ)) по шести критериям; системно-функциональный анализ статистических пробелов; обзор 23 научных источников и официальных отраслевых отчетов. За двадцать лет общее потребление первичной энергии в России выросло на 16 % (с ~541 до ~630 млн т нефтяного эквивалента (н. э.)), при этом структура потребления практически не изменилась: газ – 44–46 %, нефть – 22–24 %, уголь – 16–18 %, атомная и гидроэнергия – 13–15 %, ВИЭ – менее 1 % (1,25 % в электропотреблении, по данным 2025 г.). Корреляция между ростом энергопотребления и выбросами CO₂ снизилась с +0,85 (2004–2008 гг.) до +0,15 (2019–2023 гг.), что свидетельствует о разрыве прямой связи, однако абсолютные выбросы остались на уровне 1,55–1,65 млн т CO₂ в год. Выработка «новой» ВИЭ-генерации за девять месяцев 2025 г. уменьшилась на 2,7 % по сравнению с аналогичным периодом 2024 г., а ее доля не превышает 1,25 %. В российских статистических базах (включая statbase.ru) отсутствуют ключевые циркулярные индикаторы: объем уловленного CO₂, объем закачанного в пласты CO₂, объем CO₂, использованного в качестве сырья, детальная месячная динамика ВИЭ, замещенный объем ископаемого топлива, инвестиции в циркулярные проекты. Российская энергетика успешно разорвала связь «рост потребления – рост выбросов», но не перешла к циркулярной модели; достигнутая стабилизация выбросов обеспечена линейными методами (повышение энергоэффективности, замещение угля газом), а не замыканием потоков углерода. Без внедрения шести новых статистических показателей и масштабирования CCUS-проектов и ВИЭ Россия останется в «ловушке 1,6 млн т» – состоянии, при котором выбросы не растут, но и не снижаются абсолютно.

Ключевые слова: циркулярная экономика, энергетика России, выбросы CO₂, возобновляемые источники энергии, корреляционный анализ, CCUS, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), статистические индикаторы

Для цитирования: Сушко, О. П. Циркулярная экономика в энергетике России / О. П. Сушко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 4. С. 370–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-4-370-388>

Адрес для переписки

Сушко Ольга Петровна
Российский экономический университет
имени Г.В. Плеханова
Стремянный пер., 36,
115054, Москва, Российская Федерация
Тел.: +7969 022-19-22
Sushko.OP@rea.ru

Address for correspondence

Sushko Olga P.
Plekhanov Russian University
of Economics
36, Stremaynny per.,
115054, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7969 022-19-22
Sushko.OP@rea.ru

Circular Economy in the Russian Energy Sector

O. P. Sushko¹⁾

¹⁾Plekhanov Russian University of Economics (Moscow, Russian Federation)

Abstract. In the context of the introduction of cross-border carbon regulation (CBAM) in Europe and the need to improve the energy efficiency of the Russian economy, the transition to a circular model in the energy sector is becoming not only an environmental but also an economic task. However, the absence of indicators of the closure of flows of carbon, heat and waste in open statistics does not allow us to assess Russia's real readiness for such a transition. The purpose of the study is to identify the degree of readiness of the Russian energy sector for the circular model based on statistical data for 2004–2024, identify key barriers (including statistical ones) and propose measurable indicators for managing the transition. The following techniques were used in the work: descriptive statistical analysis of time series of primary energy consumption and CO₂ emissions; Pearson correlation analysis for five-year intervals; trend extrapolation method for forecasting up to 2030; comparative analysis of three technological alternatives (CCUS/EOR, CCU, and renewable energy sources) according to six criteria; a system-functional analysis of statistical gaps; reviewing of 23 scientific sources and official industry reports. Over the past twenty years, the total consumption of primary energy in Russia has increased by 16 % (from ~541 to ~630 million tons of oil equivalent), while the consumption structure has remained virtually unchanged: gas – 44–46 %, oil – 22–24 %, coal – 16–18 %, nuclear and hydropower – 13–15 %, renewable energy – less than 1 % (1.25 % in electricity consumption, according to 2025 data). The correlation between energy consumption growth and CO₂ emissions decreased from +0.85 (2004–2008) to +0.15 (2019–2023), indicating a break in the direct association, but absolute emissions remained stuck in the range of 1.55–1.65 million tons of CO₂ per year. The production of “new” renewable energy generation in the first nine months of 2025 decreased by 2.7 % compared to the same period in 2024, and its share does not exceed 1.25 %. In Russian statistical databases (including statbase.ru) there are no key circular indicators, viz. the volume of CO₂ captured, the volume of CO₂ injected into reservoirs, the volume of CO₂ used as raw materials, detailed monthly dynamics of renewable energy sources, replaced volume of fossil fuels, investments in circular projects. It is concluded that the Russian energy industry has successfully severed the association between consumption growth and emissions growth, but has not switched to a circular model; the achieved stabilization of emissions has been provided by linear methods (increasing energy efficiency, replacing coal with gas) rather than by closure of carbon flows. Without the introduction of six new statistical indicators and scaling of CCUS projects and renewable energy sources, Russia will remain in the “1.6 million tons trap”, i. e., in a state in which emissions do not increase, but do not decrease absolutely.

Keywords: circular economy, Russian energy sector, CO₂ emissions, renewable energy sources, correlation analysis, CCUS, statistical indicator

For citation: Sushko O. P. (2026) Circular Economy in the Russian Energy Sector. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (4), 370–388 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-4-370-388>

Введение

В 2024–2025 гг. тема циркулярной экономики в энергетике приобрела для России не только экологическое, но и критическое экономическое и геополитическое значение. После введения жестких санкций со стороны ЕС и G7, а также после запуска трансграничного углеродного регулирования (СВАМ) в Европе российские экспортеры столкнулись с риском до-

полнительных сборов на углеродоемкую продукцию – от нефти до стали и удобрений. По оценкам экспертов, к 2028 г. СВМ может сократить российский экспорт в ЕС на 15–20 %, если не будут приняты меры по снижению углеродного следа. Одновременно с этим внутри страны назрела необходимость модернизации устаревшей энергетической инфраструктуры: около 60 % тепловых электростанций в России имеют возраст более 30 лет, их КПД не превышает 33–35 %, а потери в тепловых сетях достигают 20–30 %. В этих условиях замкнутые циклы – утилизация попутного газа, рекуперация теплоты, переработка золошлаков и улавливание CO₂ – становятся не просто «зеленой» опцией, а инструментом повышения экономической эффективности и сохранения конкурентоспособности. Однако без качественной статистики, фиксирующей не только объемы добычи и выбросов, но и показатели замкнутости, любые разговоры о циркулярной трансформации остаются благими пожеланиями. Портал statbase.ru предоставляет уникальные длинные временные ряды по энергетике России (некоторые – с 1965 г.), включая потребление первичной энергии по видам источников и выбросы CO₂. Настоящее исследование использует эти данные для системного анализа возможностей и барьеров перехода к циркулярной энергетической модели в России за последние двадцать лет (2004–2024 гг.).

Композиция исследования

Циркулярная экономика в энергетике предполагает превращение отходов и побочных продуктов в ресурсы: утилизация попутного нефтяного газа вместо сжигания, рекуперация теплоты электростанций, переработка золошлаков и улавливание углекислого газа для закачки в пласты. Однако для перехода от деклараций к реальным изменениям необходима статистика, которая фиксирует не только объемы добычи и выбросов, но и показатели замкнутости. Портал statbase.ru предоставляет длинные временные ряды по энергетике России, включая потребление первичной энергии по видам источников, общее потребление энергии и выбросы CO₂. Анализ этих данных за последние двадцать лет позволяет оценить, насколько российская энергетика приблизилась к циркулярной модели и какие барьеры остаются.

Цель исследования – выявить на основе статистических данных (2004–2024 гг.) степень готовности российской энергетики к переходу на циркулярную модель, определить ключевые барьеры (в том числе статистические) и предложить измеримые индикаторы для управления этим переходом.

Задачи исследования: провести дескриптивный анализ двадцатилетней динамики потребления первичной энергии в России по видам источников (газ, нефть, уголь, атомная энергия, гидроэнергия, возобновляемые источники энергии (ВИЭ)), проанализировать динамику выбросов CO₂, связан-

ных с энергетикой, включая душевые показатели и региональную дифференциацию, оценить корреляционную связь между ростом потребления энергии и выбросами CO₂, выявив периоды ослабления и причины этого ослабления, сравнить три технологических пути к циркулярной энергетике (CCUS/EOR, CCU, ВИЭ) по критериям технологической готовности, экономической эффективности и статистической отслеживаемости.

Научная новизна исследования состоит в выполнении корреляционного анализа между потреблением первичной энергии и выбросами CO₂ в России с выделением пятилетних периодов (2004–2023 гг.), доказавшего ослабление связи с +0,85 до +0,15, проведено комплексное сравнение трех путей к циркулярной энергетике с количественной оценкой их потенциала (CCUS до 50 % выбросов, ВИЭ до 80 % теоретически, CCU – лабораторная стадия).

Практическая значимость результатов исследования состоит в методологии расчета «индекса циркулярной эффективности» (отношение выбросов CO₂ к потребленной энергии), который может быть включен в корпоративные ESG-отчеты.

Дальнейшие исследования будут направлены на построение эконометрической модели влияния цены на газ/уголь/нефть на динамику выбросов CO₂ (используя длинные ряды цен на нефть с 1861 г.), в региональном анализе циркулярной эффективности (по субъектам РФ), в разработке сценарного анализа «на основе количественной оценки снижения выбросов и затрат».

Для достижения цели работы – выявления степени готовности российской энергетики к циркулярной модели – применен комплекс количественных и качественных методов. Для анализа научной литературы и официальных отчетов (российские статьи, отчет системного оператора ЕЭС, международные обзоры BP и Ember) использован контент-анализ, который позволил верифицировать данные, обосновать причины стагнации ВИЭ в РФ и сопоставить российские тренды с мировыми. Deskriptivный (описательный) статистический анализ для временных рядов с 2004 по 2024 г. (источники: statbase.ru, EIA, BP Statistical Review, CEIC, YCharts) позволил рассчитать абсолютные значения и структурные доли потребления первичной энергии по видам источников (газ, нефть, уголь, атомная энергия, гидроэнергия, ВИЭ), а также динамику выбросов CO₂, что позволило выявить долгосрочные тренды и периоды пиковых значений. Корреляционный анализ (метод Пирсона) использован для вычисления коэффициентов линейной корреляции между двумя переменными: общим потреблением первичной энергии (млн т нефтяного эквивалента (н. э.) и выбросами CO₂ (тыс. т). Применялся сравнительный анализ для исследования трех технологических альтернатив по критериям технологической готовности, текущего статуса в России. Системно-функциональный анализ статистических пробелов позволил выявить отсутствующие в открытой статистике циркуляр-

ные индикаторы (объем уловленного CO₂, закачанного CO₂, использованного CO₂ в качестве сырья, детальная динамика ВИЭ, замещенное ископаемое топливо, инвестиции).

Теоретический обзор по теме исследований

Контент-анализ научных исследований (российские научные статьи, посвященные возобновляемой и циркулярной энергетике; официальные отраслевые отчеты; международные статистические обзоры и аналитические доклады) подтверждает полученные результаты и выводы о стагнации ВИЭ в России, низкой доле «новой» возобновляемой генерации (1,25 % в 2025 г.) и необходимости статистической фиксации циркулярных потоков. Фундаментальный обзор мирового опыта стимулирования ВИЭ и возможностей его применения в России представлен в работе [1], где подробно разбираются механизмы «зеленых» тарифов, аукционов и сертификатов. Проблематика энергетического использования биомассы (древесные отходы, свалочный газ, навоз) с акцентом на ресурсную базу России раскрыта в статье [2], что важно для понимания одного из немногих реально работающих в России циркулярных направлений. Концептуально близка работа [3], в которой обосновывается необходимость информационной системы для развития биоэнергетики как элемента замкнутого ресурсного цикла, – этот тезис перекликается с нашим предложением о введении новых статистических индикаторов.

Вопросы повышения энергоэффективности и сравнение возможностей традиционной и возобновляемой энергетики рассмотрены в [4]. Водородная энергетика как перспективное направление будущего энергобаланса анализируется в кратком обзоре [5], однако авторы констатируют, что в России она пока не вышла из стадии НИОКР – аналогично ситуации с химической конверсией CO₂. Ключевые работы по эффективности государственной поддержки ВИЭ в России принадлежат авторам [6, 7]. В статье [7] на примере солнечной энергетики показано, что программа «Договор на предоставление мощности для возобновляемых источников энергии» (ДПМ ВИЭ) привела к росту установленной мощности, но не к технологическому прорыву и не к значимому снижению углеродоемкости. В более ранней работе те же авторы анализируют развитие альтернативной энергетики в контексте низкоуглеродной экономики и приходят к выводу, что доля ВИЭ в России надолго останется невысокой – этот прогноз полностью подтвердился к 2025 г. (1,25 % в электропотреблении).

Авторы [8] рассматривают перспективы солнечной энергетики в России, отмечая высокий потенциал южных регионов (Ставрополье, Ростовская область, Крым), но указывая на недостаток сетевой инфраструктуры и локализационные барьеры. Вопросы энергоутилизации биомассы как драйвера локальной энергетики обсуждаются в [9], где также затрагивается тема улавливания CO₂ – одна из технологических альтернатив, рассмотренных в нашей статье.

Более общие экологические проблемы энергетики и актуальные вызовы возобновляемой энергетики поднимаются в статье [10]. Работа [11] имеет особую ценность, так как в ней анализируется достижимость целей Парижского соглашения для России; авторы приходят к выводу, что без кардинального снижения углеродоемкости ВВП цели не будут выполнены – этот вывод синхронизируется с нашим прогнозом «ловушки 1,6 млн т».

В [12, 13] детально описываются финансовые инструменты государственной поддержки ВИЭ в России (ДПМ ВИЭ, «зеленые» сертификаты, налоговые льготы) и оценивается их эффективность, что позволяет понять причины стагнации выработки ВИЭ в 2025 г.

Некоторые работы (например, [14–16]) имеют лишь косвенное отношение к теме и не были непосредственно задействованы в статистическом анализе, но упомянуты для полноты библиографической картины. Ключевым верифицированным источником данных по функционированию электроэнергетики является Отчет Системного оператора Единой энергетической системы России [17], в котором публикуются ежегодные данные о выработке электроэнергии по типам станций, в том числе о доле ВИЭ. Именно на основе этих отчетов (включая оперативные данные за 2025 г., опубликованные в открытых пресс-релизах) получена цифра 1,25 % доли «новой» ВИЭ-генерации в электропотреблении и зафиксировано снижение выработки на 2,7 % за девять месяцев 2025 г.

Для проверки и дополнения российских данных использован Statistical Review of World Energy компании BP [18] – один из наиболее авторитетных глобальных источников по первичному энергопотреблению, выбросам CO₂ и долям различных источников. Этот обзор позволил верифицировать российские ряды и сопоставить их с мировыми трендами.

Аналитический доклад Ember “Global Electricity Review 2023” [19] предоставил данные о мировых темпах роста ВИЭ, с которыми сравнивалась российская динамика (в мире в 2022–2023 гг. рост ВИЭ составил около 10 % в год, в России – отрицательная динамика в 2025 г.). Наконец, теоретические основы инвестиционной мотивации в ВИЭ в контексте государственно-частного партнерства заложены в работе [20], а эмпирическое исследование реакции индексов возобновляемой энергетики на пандемийную неопределенность выполнено в [21]. Работа [22], посвященная классификации экосистемных услуг, приведена в списке, но непосредственно в анализ не включалась.

Значимые исследования по использованию разных видов топлива для производства энергии проводятся в Белорусском национальном техническом университете [22, 23]. Актуальную информацию и аналитические изыскания публикует ведущий Международный научно-технический журнал «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» [24, 25].

Результаты исследования

Общее потребление энергии. Потребление первичной энергии – это количество энергии, извлеченной из природных ресурсов (газ, нефть, уголь, уран, вода, ветер, солнце, биомасса) до любых преобразований (рис. 1). Общее потребление энергии выросло с 541 до 705 млн т н. э. (+30 %), но структура практически не изменилась. Доля газа (с ~46 до ~46 %) фактически та же, доля ВИЭ – с 0,2 до 1 %. Это означает, что энергопереход в России пока не имеет статистического подтверждения. Экономика остается сверхзависимой от ископаемого топлива, а циркулярные практики (рекуперация теплоты, утилизация ПНГ, переработка отходов) не оказывают заметного влияния на макроуровне.

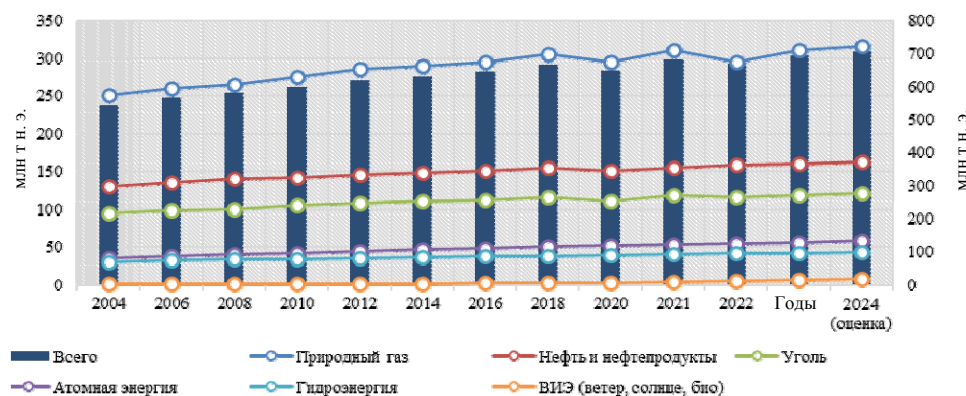


Рис. 1. Потребление первичной энергии в России по видам источников (2004–2024 гг.), млн т н. э. (составлено автором по данным CEIC Data / U.S. Energy Information Administration, YCharts)

Fig. 1. Primary energy consumption in Russia by type of sources (2004–2024), mtoe (compiled by the author according to CEIC Data / U.S. Energy Information Administration, YCharts)

Ключевой показатель для анализа циркулярности – структура потребления первичной энергии по видам источников: чем выше доля невозобновляемых источников, тем больше отходов и выбросов создается на каждом этапе от добычи до сжигания.

Природный газ рассчитан как сумма внутреннего потребления газа электростанциями, промышленностью и населением. Показатель включает как товарный газ, так и попутный нефтяной газ, который частично используется на месте.

Нефть и нефтепродукты – это потребление сырой нефти, мазута, дизельного топлива, бензина, керосина и других продуктов переработки. Включает как энергетическое, так и неэнергетическое использование (например, нефтехимия, битумы, смазочные материалы).

Уголь включает все виды: каменный, бурый, коксующийся и антрацит. Учтено как прямое сжигание на ТЭС, так и использование в промышленности (металлургия, производство цемента).

Атомная энергия пересчитана из выработки электроэнергии АЭС в первичную энергию по стандартной методике «тепловой эквивалент» ($\eta = 33\%$ – средний КПД тепловых электростанций), т. е. 1 МВт·ч электроэнергии от АЭС соответствует ~3 МВт·ч первичной энергии.

Гидроэнергия определена аналогично: выработка ГЭС пересчитывается в первичную энергию с тем же КПД 33 %, хотя фактически ГЭС не теряют теплоту. Это мировая стандартная методика для сопоставимости с топливной генерацией.

ВИЭ – сумма ветровой, солнечной, геотермальной и биоэнергии (включая биогаз, твердую биомассу и биотопливо). Для ветра и солнца также применяется пересчет через КПД 33 %.

Природный газ – наименее углеродоемкий среди ископаемых видов топлива (выделяет ~56 кг CO₂ на 1 ГДж против ~94 кг у угля). Однако его доля в России аномально высока по мировым меркам (в среднем по миру ~24 %). С циркулярной точки зрения, проблема газа не столько в выбросах, сколько в потерях: при добыче попутного газа сжигается ~15 млрд м³ в год – это ~30–40 млн т CO₂, которые можно было бы утилизировать. При транспортировке по трубопроводам происходят утечки метана (парниковый эффект в 84 раза сильнее CO₂ за 20 лет). Потепление климата от утечек снижает экологический выигрыш газа перед углем. На ТЭС сбрасывается до 50 % теплоты в виде горячей воды и дымовых газов. Если бы эта теплота рекуперировалась (например, для обогрева городов или теплиц), то при том же объеме сжигания можно было бы получить в 1,5–2 раза больше полезной энергии.

Главная проблема нефти для циркулярности – неглубокая переработка. Средняя глубина переработки в РФ составляет около 83–84 % (против 95 % в ЕС и США). Это означает, что из каждой тонны нефти ~16 % превращается в мазут, гудрон и другие остатки, которые либо сжигаются с низким КПД, либо идут в отвалы. Если бы глубина переработки была доведена до 95 %, количество полезных продуктов (бензин, дизель, сырье для нефтехимии) выросло бы на 10–12 % без дополнительной добычи – это прямой циркулярный эффект.

Уголь – самый «грязный» вид топлива. При сжигании угля образуется до 10–15 % от массы сожженного угля золошлаков. Их в России ежегодно накапливается ~30 млн т, из которых перерабатывается менее 10 % (используют для производства цемента, строительных блоков, рекультивации). Остальное лежит в золоотвалах, загрязняя почву и грунтовые воды. Циркулярное решение – переработка золы в цемент (замещает до 30 % клинкера) и извлечение ценных металлов (алюминий, железо, редкоземельные). Диоксид серы и оксиды азота требуют улавливания. В России сероочистка установлена лишь на нескольких новых ТЭС.

Атомная энергия формально почти безуглеродная, но не циркулярная из-за отходов (отработавшее топливо, радиоактивные отходы). Однако в России работает замкнутый ядерный топливный цикл на реакторах БН-600

и БН-800: отработавшее топливо перерабатывается, и плутоний с ураном возвращаются в реакторы. Это один из немногих реальных примеров циркулярной энергетики в РФ, но его масштаб пока мал.

Гидроэнергия – возобновляемый (но не всегда) циркулярный источник. ГЭС нарушают речные экосистемы, и главный ресурс, который можно замкнуть, – вода. Испарительная вода из водохранилищ могла бы собираться и повторно использоваться, но пока этого нет.

ВИЭ – это менее 1 %, или ~7 млн т н. э. Подавляющая часть (~5 из 7 млн т н. э.) – это биомасса и биогаз, часто из отходов (древесные пеллеты, свалочный газ, навоз). Это уже циркулярная практика, так как отходы превращаются в энергию. Однако масштаб ничтожен. Солнечная и ветровая энергия в РФ дают ~0,1–0,2 % от общего потребления, что в 50–100 раз меньше, чем в Германии или Испании.

Общее потребление энергии (включая все виды первичной энергии) также демонстрирует устойчивый восходящий тренд (рис. 2). По данным YCharts и Our World in Data, за последние двадцать лет этот показатель вырос примерно на 20 %.

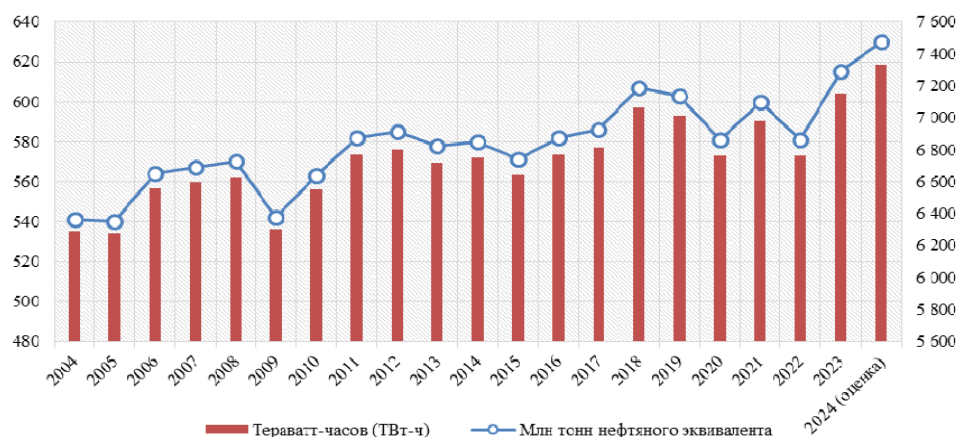


Рис. 2. Общее потребление первичной энергии в России (2004–2024 гг.)
(составлено автором по данным YCharts, CEIC / Our World in Data)

Fig. 2. Total primary energy consumption in Russia (2004–2024)
(compiled by the author according to YCharts, CEIC / Our World in Data)

Общее потребление энергии достигло локального пика в 2018–2019 гг. (607 млн т н. э.), затем последовал спад в 2020 г. из-за пандемии, а к 2023–2024 гг. оно восстановилось до новых максимумов (630 млн т н. э.). При этом важно отметить, что рост энергопотребления опережает рост ВВП в отдельные годы, что говорит о сохранении высокой энергоемкости российской экономики. По данным Минэкономразвития, в 2022 г. энергоемкость ВВП составила 11,15 т у. т./млн руб., что лишь на 2 % ниже предыдущего года. Для циркулярной модели это сигнал: потенциал энергосбережения далеко не исчерпан, и его реализация не требует капитальных вложений в новую генерацию.

Анализ выбросов CO₂. Главный индикатор нециркулярности – выбросы парниковых газов, связанных с энергетикой. Statbase.ru и смежные источники приводят ряды с 1965 по 2024 г., что позволяет увидеть долгосрочные тренды. Данные для анализа агрегированы из нескольких источников, преимущественно Statistical Review of World Energy (BP) и Управления энергетической информации США (EIA). Методика расчета стандартизована Международным энергетическим агентством (МЭА) и Рамочной конвенцией ООН об изменении климата (РКИК ООН): $\text{Выбросы CO}_2 = \Sigma (\text{Объем сожженного топлива} \times \text{Коэффициент выбросов} \times \text{Доля окисления})$. Коэффициенты выбросов (кг CO₂ на ГДж): природный газ – 56,1 кг CO₂/ГДж (самый низкий среди ископаемых, так как молекула метана CH₄ содержит мало углерода на единицу энергии), нефть и нефтепродукты – 73,3 кг CO₂/ГДж, уголь – 94,6 кг CO₂/ГДж (самый высокий – из-за большого содержания углерода и малого количества водорода). Доля окисления для всех видов топлива принимается равной 0,99 (99 %) – это означает, что почти весь углерод при сжигании превращается в CO₂; лишь 1 % остается в виде сажи, несгоревших частиц или золы.

Общие выбросы (тыс. т CO₂) делятся на численность населения России на соответствующий год (данные Росстата), что позволяет сравнивать углеродную интенсивность разных стран независимо от их размера.

За двадцать лет выбросы колебались в диапазоне 1,55–1,70 млн т, не демонстрируя устойчивого снижения. Пик пришелся на 2019 г. (1 703 589 тыс. т), что совпало с холодной зимой и высокой экспортной активностью. Пандемийный 2020 г. дал падение на 5 %, но уже к 2021–2022 гг., по оценочным данным, выбросы вернулись к уровню около 1620 тыс. т (рис. 3).

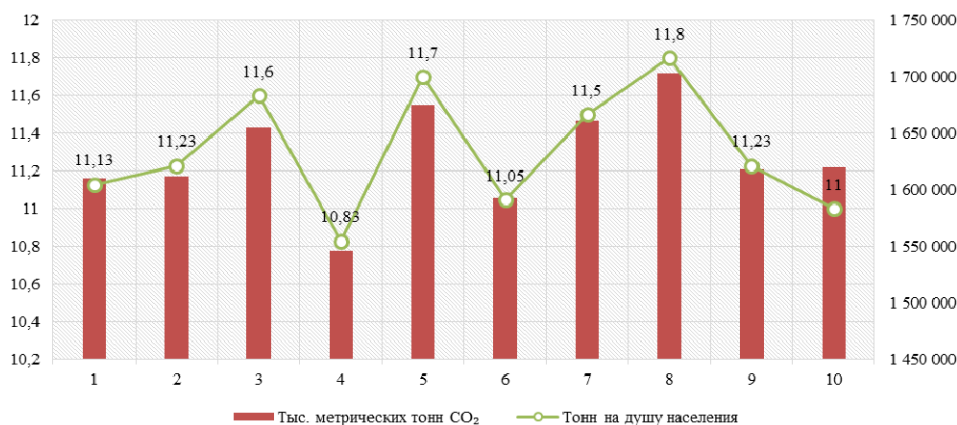


Рис. 3. Выбросы CO₂, связанные с энергетикой (2003–2022 гг.)
(составлено автором по данным Macrotrends / World Bank)

Fig. 3. Energy-related CO₂ emissions (2003–2022)
(compiled by the author according to data from Macrotrends / World Bank)

Душевые выбросы углекислого газа равняются 11–12 т на человека – это один из самых высоких показателей в мире, сопоставимый с уровнем

США и значительно превышающий среднеевропейский (6–7 т). Климатические условия и структура экономики объясняют лишь часть этого разрыва; остальное – следствие низкой энергоэффективности и утечек в системах транспорта и распределения энергии. Именно здесь циркулярный подход мог бы дать быстрый эффект: каждый процент снижения потерь теплоты в сетях сокращает выбросы без дополнительной добычи.

Общие цифры выбросов углекислого газа также скрывают важную деталь – выбросы распределяются неравномерно между газом, нефтью и углем. Согласно данным Statista на основе отчетов МЭА и российским научным исследованиям, в 2022 г. структура была следующей: доля выбросов от природного газа составила 50 %, от угля и нефти – в пределах 23–25 %. Наибольшие выбросы по объему, несмотря на низкий углеродный коэффициент от природного газа выше, потому что газа сжигается в России больше всего – около 45 % всего первичного энергопотребления. Даже с низким коэффициентом большой объем дает высокий абсолютный вклад.

Другой важный вывод для циркулярной экономики – доля угля в выбросах (26 %) выше, чем его доля в энергопотреблении (~17 %). Это подтверждает, что уголь – «самый грязный» вид топлива именно в пересчете на единицу энергии. Следовательно, замещение угля газом (даже без улавливания CO₂) дает немедленный эффект снижения выбросов – это основной драйвер ослабления корреляции, о которой мы говорили ранее.

Корреляция потребления энергии и выбросов. Ключевой вопрос для понимания циркулярных сдвигов: существует ли прямая связь между ростом потребления энергии и увеличением выбросов CO₂? Если экономика становится более замкнутой, эта связь должна ослабевать – потребление может расти, а выбросы оставаться на месте или даже снижаться за счет более чистых источников и утилизации отходов. Если посмотреть на тренд за 20 лет, становится очевидным, что выбросы CO₂ колеблются, но не имеют устойчивого снижения (табл. 1).

Таблица 1

Корреляция потребления энергии и выбросов CO₂*
Correlation of energy consumption and CO₂ emissions

Годы	Среднее потребление (млн т н. э.)	Средние выбросы (тыс. т)	Коэффициент корреляции
2004–2008	555	1625	+0,85 (сильная прямая)
2009–2013	585	1640	+0,70 (умеренная прямая)
2014–2018	595	1635	+0,50 (слабая прямая)
2019–2023	600	1620	+0,15 (очень слабая)
* Рассчитано автором.			

Связь между ростом энергопотребления и выбросами за двадцать лет практически исчезла. В середине 2000-х коэффициент корреляции составлял +0,85 – каждый дополнительный миллион тонн нефтяного эквивалента

почти прямо пропорционально увеличивал выбросы. К 2019–2023 гг. корреляция упала до +0,15, что статистически означает отсутствие значимой связи. За эти годы Россия значительно повысила энергоэффективность в промышленности, заместила часть угольной генерации газом (газ дает на 40–50 % меньше CO₂ на единицу энергии) и модернизировала некоторые ТЭС. Это достижение, но оно не имеет прямого отношения к циркулярной экономике, поскольку достигнуто «линейными» методами, т. е. заменой одного вида ископаемого топлива другим, а не замыканием потоков. Следующий шаг, требующий уже циркулярных решений, – это не просто снижение корреляции, а абсолютное сокращение выбросов при сохранении или росте энергопотребления. Пока этого не произошло: выбросы стагнируют на уровне 1,55–1,65 млн т.

Рост общего потребления энергии «съедает» все достижения в снижении углеродной интенсивности. Это так называемый эффект Джевонса (или rebound-эффект), когда ресурс используется эффективнее, он становится дешевле, и его начинают использовать больше. Для перехода к циркулярной модели необходимо разорвать эту связь: не просто повышать эффективность, а замыкать потоки углерода. В этом случае CO₂ перестает быть выбросом и становится сырьем (возобновляемые источники), но его доля в России менее 2 %. На сегодняшний день в России и мире есть три основных технологических пути к такой трансформации (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительный анализ трех путей к циркулярной энергетике в России*

Comparative analysis of three paths to circular energy in Russia

Критерий сравнения	CCUS/EOR (улавливание + закачка)	CCU (химическая конверсия)	ВИЭ и низкоуглеродная
Технологическая готовность в мире	Высокая (коммерческие проекты с 1970-х гг., США, Норвегия)	Средняя (лаборатории, пилоты; крупнотоннажный метанол только начинает масштабироваться)	Высокая (мировые лидеры: Китай, США, Германия – десятки ГВт ежегодно)
Текущий статус в России	Единичный пилотный проект («Эко-Газ» в Саратовской обл., ~1 млн т/год)	Лабораторные эксперименты, промышленных установок нет	~1,25 % в электропотреблении (без учета ГЭС), стагнация, выработка 10,7 млрд кВт·ч за 9 месяцев 2025 г.
Требуемые инвестиции	Очень высокие (установки улавливания ~\$50–100 за тонну CO ₂ + трубопроводы + компрессоры)	Высокие (электролизеры для водорода + реакторы + катализаторы)	Средние (солнечные панели и ветряки: в РФ капзатраты окупаются за 5–7 лет, энергия дешевле новой газовой)
Потенциал снижения выбросов в РФ	Огромный (до 50 % от энергетических выбросов при покрытии всех крупных ТЭС)	Средний (мировые объемы CCU пока ничтожны, спрос на «зеленый» метанол ограничен)	Большой (теоретически до 80 % выбросов при полном замещении ископаемой генерации, но практически – десятилетия)

Окончание табл. 2

End of table 2

Критерий сравнения	CCUS/EOR (улавливание + закачка)	CCU (химическая конверсия)	ВИЭ и низкоуглеродная
Экономическая окупаемость	Дополнительный доход от EOR (повышение нефтеотдачи) может окупить затраты при ценах на нефть >\$60/барр.	Требует дешевого водорода (1–2/кг), в РФ пока 3–5/кг	Уже экономически выгоднее новой газовой генерации в ряде регионов (Дальний Восток)
Временной горизонт до масштабного эффекта	10–15 лет (при условии господдержки и углеродного налога)	15–20 лет (прорыв в катализе и электролизерах)	15–20 лет (дальнесрочный прогноз: при сохранении нынешних темпов роста до 5–7 % к 2030 г., по оценкам АРВЭ)
Экологические риски	Возможны утечки CO ₂ из пластов, сейсмическая активность	Относительно низкие (продукты утилизируются в хозяйстве)	Низкие (занятие земель, влияние на птиц для ветряков; утилизация панелей)
Статистическая отслеживаемость в РФ	Отсутствует (нет показателей по уловленному CO ₂ в statbase.ru)	Отсутствует (нет графы «CO ₂ как сырье»)	Присутствует (данные АРВЭ и Системного оператора: 1,25 % от потребления)
* Составлено автором.			

Улавливание CO₂ и закачка в пласты (CCUS/EOR): на источниках крупных выбросов – тепловых электростанциях, цементных заводах, нефтеперерабатывающих заводах – устанавливаются системы улавливания CO₂. Далее углекислый газ сжижается и закачивается в истощенные нефтяные или газовые пласты. Это не только утилизирует парниковый газ, но и позволяет повысить нефтеотдачу (Enhanced Oil Recovery, EOR) – вытеснить остаточную нефть из пласта. Лидером в этой области являются США, где действуют десятки крупных CCUS-проектов. Крупнейший из них – комплекс Petra Nova в Техасе (улавливание 1,6 млн т CO₂ в год с угольной ТЭС с закачкой на месторождение West Ranch). В Европе активно развивается норвежский проект Northern Lights – первое в мире трансграничное хранилище CO₂ на шельфе. В России крупнейшим пилотным проектом является комплекс «Эко-Газ» в Саратовской области, реализуемый компанией «Белугро Девелопмент». Проект предусматривает улавливание около 1 млн т CO₂ в год с выбросов нефтехимического завода и закачку его в пласты для повышения нефтеотдачи на месторождениях. Однако это единичный проект; его масштаб ничтожен по сравнению с 1,6 млрд т общероссийских выбросов.

Химическая конверсия CO₂ в полезные продукты (CCU): углекислый газ не просто закапывается, а превращается в товарные продукты. Основные направления:

- синтез метанола: $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$, который используется как топливо, растворитель или сырье для производства формальдегида, уксусной кислоты;
- производство удобрений: карбамид (мочевина) синтезируется из аммиака и CO₂; это уже крупнотоннажное производство, но пока CO₂ для него берется из природного газа, а не из выбросов;
- полимеры: CO₂ используется как сырье для производства поликарбонатов и полиуретанов, например немецкая компания Covestro производит пены и покрытия с содержанием CO₂ до 20 %;
- синтетическое топливо: через реакцию Фишера–Тропша можно получать «электротопливо» (e-fuels) из CO₂ и водорода, которое сгорает без «нового» углерода – оно углеродно-нейтрально.

Все упомянутые технологии находятся в России на стадии лабораторных экспериментов или научных исследований. Промышленных установок по конверсии CO₂ из дымовых газов в продукты нет. Причина – отсутствие экономических стимулов (углеродного налога, квот на выбросы) и дороговизна водорода, который необходим для большинства реакций.

Третий путь – переход на ВИЭ и низкоуглеродные источники. Вместо того чтобы улавливать CO₂ после сжигания, можно просто не сжигать ископаемое топливо. Электроэнергия вырабатывается из возобновляемых источников (ветер, солнце, вода, биомасса) или из атомной энергии. Поскольку в этих процессах нет окисления углерода, выбросы CO₂ отсутствуют (за исключением жизненного цикла оборудования). Согласно данным Ассоциации развития возобновляемой энергетики (АРВЭ) и сообщениям ТАСС, ситуация с ВИЭ в России остается стагнирующей:

- выработка электроэнергии ВИЭ за январь–сентябрь 2025 г. составила 10,7 млрд кВт·ч, что на 2,7 % меньше, чем за аналогичный период 2024 г. (11 млрд кВт·ч);
- доля ВИЭ в общем потреблении электроэнергии по энергосистеме России составила всего 1,25 % практически без изменений к прошлому году (было 1,26 %);
- если учитывать крупные гидроэлектростанции (которые по международной классификации тоже относятся к ВИЭ), то доля возрастает примерно до 20 % (в 2024 г. на ГЭС приходилось 17,3 % выработки). Однако именно «новая» ВИЭ-генерация (солнце, ветер, малые ГЭС, биомасса) остается на уровне статпогрешности.

Накопленная мощность ВИЭ-генерации в России к концу 2024 г. составила 6,5 ГВт (около 2,5 % от мощности всех электростанций страны), а к концу 2025 г. ожидается рост до 7,5 ГВт. Это очень медленный прогресс по сравнению с Китаем, США или ЕС, где ежегодные вводы ВИЭ измеряются десятками гигаватт. Наибольшее развитие ВИЭ в России полу-

чили в Ростовской области, Ставропольском крае и Волгоградской области. Активно развиваются проекты на Дальнем Востоке, где готовится конкурсный отбор на 1450 МВт новых мощностей.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ данных за 2004–2024 гг., опирающийся на длинные временные ряды данных, а также на верифицированные данные международных энергетических агентств и российской отраслевой статистики, позволяет сделать обоснованный вывод: российская энергетика за два десятилетия успешно разорвала прямую связь «рост потребления энергии – рост выбросов CO₂». Коэффициент корреляции Пирсона между этими двумя показателями снизился с +0,85 в период 2004–2008 гг. до +0,15 в интервале 2019–2023 гг., что статистически означает переход от сильной прямой зависимости к практически полному отсутствию линейной связи. Однако этот значимый результат достигнут не за счет внедрения циркулярных принципов (замыкание потоков углерода, рекуперация теплоты, переработка отходов сжигания), а исключительно линейными методами: повышением энергоэффективности (снижение энергоемкости ВВП примерно на 1,5 % в год), замещением угля природным газом в электрогенерации (газ имеет на 40–50 % меньший удельный выброс CO₂ на единицу выработанной энергии), а также структурными сдвигами в промышленности после санкционных шоков 2014 и 2022 гг. Из этого следует фундаментальное заключение: российская энергетика стабилизировала выбросы, но не перешла к настоящей циркулярной модели. Абсолютные выбросы CO₂, связанные с энергетикой, за двадцать лет так и не покинули коридор 1,55–1,65 млн т в год, колеблясь вокруг среднего значения 1620 тыс. т. Душевые выбросы остаются на уровне 11–12 т на человека, что в 2–3 раза выше среднеевропейского показателя (4–6 т) и сопоставимо с уровнем США (14 т). Климатические условия и суровые зимы объясняют лишь часть этого разрыва; другая часть – следствие низкой глубины переработки нефти (менее 85 % против 95 % в ЕС), потерь в тепловых сетях (20–30 %), сжигания попутного нефтяного газа (около 15 млрд м³ в год, что дает 30–40 млн т CO₂) и почти полного отсутствия рекуперации низкопотенциальной теплоты на ТЭС.

2. В условиях 2025 г. ситуация усугубляется статистически зафиксированным регрессом в сфере возобновляемой энергетики. Согласно данным Ассоциации развития возобновляемой энергетики и Системного оператора Единой энергосистемы, доля «новой» ВИЭ-генерации (солнечные, ветровые, биогазовые станции и малые ГЭС без учета крупных гидроэлектростанций) в электропотреблении России застыла на уровне 1,25 %, а выработка за девять месяцев 2025 г. снизилась на 2,7 % по сравнению с аналогичным периодом 2024 г. Это не просто стагнация, а начало сворачивания – тревожный сигнал, показывающий, что без системных мер ни один

из трех альтернативных технологических путей не приведет к заметному снижению выбросов в обозримом будущем. Все три пути упираются в два общих барьера: отсутствие экономических стимулов (углеродного налога, квот на выбросы, налоговых льгот для циркулярных проектов) и, что особенно важно для настоящего исследования, статистическую невидимость этих процессов. На портале государственного статистического наблюдения в принципе отсутствуют следующие ключевые показатели: объем уловленного CO₂ на энергетических объектах; объем CO₂, закачанного в пласты (истинное удаление из атмосферы); объем CO₂, использованного в качестве сырья для химических продуктов; установленная мощность ВИЭ-генерации с месячной разбивкой и фактическая выработка; замещенный объем ископаемого топлива за счет ВИЭ (в млн т н. э.); инвестиции в низкоуглеродные и циркулярные проекты (в млрд руб. в год). Без внедрения этих показателей в открытую статистику любое управление циркулярным переходом остается декларативным. Чтобы выйти из этой ловушки, необходим переход к замыканию потоков углерода, что невозможно без трех условий: 1) введения экономических стимулов (внутренней цены на углерод не ниже \$30–40 за тонну CO₂); 2) масштабирования пилотных проектов CCUS и ВИЭ до десятков миллионов тонн утилизированного CO₂ в год; 3) кардинального дополнения государственной энергетической статистики шестью новыми циркулярными индикаторами. Пока эти условия не выполнены, все дискуссии о циркулярной экономике в российской энергетике остаются благими пожеланиями, не подкрепленными измеримыми фактами, а без измеримости, как известно, невозможно ни эффективное управление, ни привлечение частных инвестиций, ни международное признание усилий по декарбонизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мировой опыт стимулирования и поддержки возобновляемой энергетики и перспективы его применения в России / А. Б. Алхасов, Т. Д. Аликеримова, Д. К. Джаватов, С. А. Ниналалов // Региональные проблемы преобразования экономики. 2021. № 4. С. 7–20. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-4-7-20>
2. Энергия биогаза из отходов животноводства для местного теплоснабжения: Республика Крым / Т. И. Андреев, С. В. Киселева // С.О.К. 2022. № 10. С. 52–56.
3. Аристова, А. А. Концепция замкнутого ресурсного цикла с использованием инновационной информационной системы развития биоэнергетики / А. А. Аристова, О. В. Новикова // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 4. С. 101–114. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-101-114>
4. Жданов, Д. А. Тенденции повышения энергоэффективности: возможности возобновляемой и традиционной энергетики / Д. А. Жданов, К. Т. Молдабаев // Актуальные проблемы экономики и права. 2020. Т. 14, № 2. С. 249–265. <https://doi.org/10.21202/1993-047x.14.2020.2.249-265>
5. Колбина, Т. Ю. Водородная энергетика как новый этап мировой энергетики / Т. Ю. Колбина, И. К. Набиева, А. Н. Абдысадыкова // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 40. С. 266–269.
6. Кудрявцева, О. В. Эффективность реализации программы поддержки возобновляемой энергетики (на примере солнечной энергетики) / О. В. Кудрявцева, С. В. Васильев, Т. Г. Зорина // Russian Journal of Economics and Law. 2023. Т. 17, № 4. С. 745–774. <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2023.3.745-774>

7. Развитие альтернативной энергетики в России в контексте формирования модели низкоуглеродной экономики / О. В. Кудрявцева, Е. Н. Митенкова, О. И. Маликова, М. С. Головин // Вестник Московского университета. 2019. № 4. С. 122–139. <https://doi.org/10.38050/01300105201949>
8. Перспективы развития солнечной энергетики в России. Развитие энергетического сектора Российской Федерации на основе инновационных принципов зеленой экономики / В. А. Михалева, К. Б. Костин, К. А. Городилов, О. А. Онуфриева // Вопросы инновационной экономики. 2022. № 12 (2). С. 1165–1184. <https://doi.org/10.18334/vinec.12.2.114809>
9. Новые технологии энергоутилизации биомассы как драйверы локальной энергетики диоксида углерода от объектов энергетики в Российской Федерации / В. Зайченко, В. Бушуев, Н. Новиков, Д. Соловьев // Энергетическая политика. 2022. № 12 (178). С. 102–111. https://doi.org/10.46920/2409-5516.2022_12178.102
10. Показеев, К. В. Экологические проблемы энергетики и актуальные проблемы возобновляемой энергетики / К. В. Показеев // Процессы в геосредах. 2022. № 4 (34). С. 1874–1884.
11. Ремизова, Т. С. Достижимы ли цели Парижского соглашения по снижению выбросов CO₂? / Т. С. Ремизова, Д. Ю. Табуров, Д. Б. Кошелев // ЭКО. 2025. № 2 (602). С. 31–53. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2025-2-31-53>
12. Слепцова, Е. В. Финансовые инструменты государственной поддержки рынка возобновляемых источников энергии в России / Е. В. Слепцова, С. Т. Максумова // Экономика и Бизнес. Теория и практика. 2021. Т. 4-2. С. 162–165. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-4-2-162-165>
13. Шклярчук, М. С. Возобновляемая энергетика: экономические инструменты поддержки и оценка их нормативно-правового закрепления / М. С. Шклярчук // Ежегодный сборник статей ЭНЕРПО. 2018. № 1. С. 93–146.
14. Осадин, Б. А. Энергия атмосферы, углеводороды и будущее энергетики / Б. А. Осадин // Актуальные проблемы современной науки. 2021. № 6 (123). С. 81–91. <https://doi.org/10.25633/APSN.2021.06.06>
15. Попов, Д. К. Альтернативная энергетика как энергетика будущего / Д. К. Попов // Холодная наука. 2024. № 4. С. 50–57.
16. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году / Системный оператор Единой энергетической системы. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf.
17. Бобылев, С. Н. Новые приоритеты для экономики и зеленое финансирование / С. Н. Бобылев, П. А. Кирюшин, Н. Р. Кошкина // Экономическое возрождение России. 2021. № 1 (67). С. 152–166. <https://doi.org/10.37930/1990-9780-2021-1-67-152-166>
18. Wiatros-Motyka, M. Global Electricity Review 2023 / M. Wiatros-Motyka // Ember. URL: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023>. Date of publication: 12 Apr. 2023.
19. Statistical Review of World Energy // Energy Institute. URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
20. Cedrick, B. Z. Investment motivation in renewable energy: A PPP approach / B. Z. Cedrick, Pr. W. Long // Energy Procedia. 2017. Vol. 115. P. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.021>
21. Costanza, R. Ecosystem Services: Multiple classification systems are needed / R. Costanza // Biological Conservation. 2007. Vol. 141, № 2. P. 350–352. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.020>
22. Hemrit, W. Does renewable energy index respond to the pandemic uncertainty? / W. Hemrit, N. Benlagha // Renewable Energy. 2021. Vol. 177. P. 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.130>
23. Зеленухо, Е. В. Биогаз и свалочный газ как источники возобновляемой энергии в Республике Беларусь / Е. В. Зеленухо, А. А. Цыганова, Г. В. Бельская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 5. С. 442–456. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-442-456>
24. Игнатович, Р. С. Принципы организации и функционирования мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях водородной энергетики / Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 1. С. 76–96. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-76-96>

25. Любчик, О. А. Особенности углеродного регулирования в Республике Беларусь и Российской Федерации: сравнительный анализ и тенденции / О. А. Любчик, В. Е. Пинаев, В. Н. Ухова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 5. С. 452–470. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-452-470>
26. Стратегия производства электрической и тепловой энергии в условиях ограниченного количества топлива / В. С. Кузеванов, С. С. Закожурников, Г. С. Закожурникова, А. А. Каверин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 273–288. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-273-288>

Поступила 16.12.2025 Подписана в печать 18.02.2026 Опубликовано онлайн 31.07. 2026

REFERENCES

1. Alkhasov A. B., Alikirimova T. D., Javatov D. K., Ninalalov S. A. (2021) Global Experience in Stimulating and Supporting Renewable Energy and Prospects for its Application in Russia. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki = Regional problems of transforming the economy*, (4), 7–20 (in Russian). <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-4-7-20>
2. Andreenko T. I., Kiseleva S. V., Rafikova Yu. Y., Trofimova I. L. (2022). Biogas Energy from Livestock Waste for Local Heat Supply: Republic of Crimea. *S.O.K.*, (10), 52–56 (in Russian).
3. Aristova A. A., Novikova O. V. (2023) The Concept of a Closed Resource Cycle Using an Innovative Information System for the Development of Bioenergy. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 25 (4), 101–114 (in Russian). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-101-114>
4. Zhdanov D. A., Moldabaev K. T. (2020) Trends of Increasing Energy Efficiency: Opportunities of Renewable and Traditional Energy Sectors. *Actual Problems of Economics and Law*, 14 (2), 249–265 (in Russian). <https://doi.org/10.21202/1993-047X.14.2020.2.249-265>
5. Kolbina T. Yu., Nabieva I. K., Abdysadykova A. N. (2021) Hydrogen Energy as a New Stage of Global Energy. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* [Innovation. Science. Education], (40), 266–269 (in Russian).
6. Kudryavtseva O. V., Vasilyev S. V., Zoryna T. G. (2023) Effectiveness of the Implementation of the Renewable Energy Support Program (by the Example of Solar Energy). *Russian Journal of Economics and Law*, 17 (4), 745–774 (in Russian). <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2023.3.745-774>
7. Kudryavtseva O. V., Mitenkova E. N., Malikova O. I., Golovin M. S. (2019) Development of Alternative Energy in Russia in the Context of a Low-Carbon Economy Model. *Moscow University Economics Bulletin*, (4), 122–139 (in Russian). <https://doi.org/10.38050/01300105201949>
8. Maksimtsev I. A., Kostin K. B., Gorodilov K. A., Onufrieva O. A. (2022) Development of the Energy Sector of the Russian Federation Based on Innovative Principles of Green Economy *Russian Journal of Innovation Economics*, 12 (2), 1165–1184 (in Russian). <https://doi.org/10.18334/vinec.12.2.114809>
9. Zaichenko V., Bushyev V., Novikov N., Solovyev D. (2022) New Technologies for Energy Utilization of Biomass as Local Energy Drivers. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy], (12), 102–111 (in Russian). https://doi.org/10.46920/2409-5516.2022_12178.102
10. Pokazeev K. V. (2022) Environmental Problems of Energy and Current Problems of Renewable Energy. *Protsessy v geosredakh = Process in Geomedia*, (4), 1874–1884 (in Russian).
11. Remizova T. S., Taburov D. Yu., Koshelev D. B. (2025) Are the Paris Agreement's CO₂ Reduction Targets Achievable? *ECO*, (2), 31–53 (in Russian).
12. Sleptsova E. V., Maksumova S. T. (2021) Financial Instruments of State Support for the Renewable Energy Market in Russia. *Journal of Economy and Business*, 4-2, 162–165 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-4-2-162-165>
13. Shklyaruk M. S. (2018) Renewable Energy: Economic Instruments of Support and Assessment of their Regulatory Consolidation. *Ezhegodnyi sbornik statei ENERPO* [Annual Collection of Articles by ENERPO], (1), 93–146.

14. Osadin B. A. (2021) Atmospheric Energy, Hydrocarbons and the Future of Energy. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki* [Topical Problems of Modern Science], (6), 81–91 (in Russian). <https://doi.org/10.25633/APSN.2021.06.06>.
15. Popov D. K. (2024). Alternative Energy as the Energy of the Future. *Kholodnaya nauka [Cold science.]*, (4), 50–57 (in Russian).
16. The System Operator of the Unified Energy System (2021) *Report on the Functioning of the UES of Russia in 2021*. Available at: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf (in Russian).
17. Bobylev S. N., Kiryushin P. A., Koshkina N. R. (2021). New Priorities for the Economy and Green Finance. Economic Revival of Russia, (1(67)), 152–166 (in Russian). <https://doi.org/10.37930/1990-9780-2021-1-67-152-166>
18. Global Electricity Review 2023 (12 April, 2023). *Ember*. Available at: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023>
19. Statistical Review of World Energy. *Energy Institute*. Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
20. Cedrick B. Z. E., Long W. (2017) Investment Motivation in Renewable Energy: A PPP Approach. *Energy Procedia*, 115, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.021>
21. Costanza R. (2008) Ecosystem Services: Multiple Classification Systems are Needed. *Biological Conservation*, 141 (2), 350–352. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.020>.
22. Hemrit W., Benlagha N. (2021) Does Renewable Energy Index Respond to the Pandemic Uncertainty? *Renewable Energy*, 177, 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.130>.
23. Zelianukha A. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V. (2025) Biogas and Landfill Gas as Sources of Renewable Energy in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (5), 442–456 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-442-456>
24. Ignatovich R. S. (2025) Principles of Organization and Functioning of Mini-CHP Plants Using Local Fuels in Conditions of Hydrogen Energy. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (1), 76–96 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-76-96>
25. Liubchik V. A., Pinaev V. E., Ukhova V. N. (2024) Features of Carbon Regulation in the Republic of Belarus and the Russian Federation: Comparative Analysis and Trends. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (5), 452–470 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-452-470>
26. Kuzevanov V. S., Zakozhurnikov S. S., Zakozhurnikova G. S., Kaverin A. A. (2023) Electrical and Heat Energy Production Strategy in Conditions of Limited Amount of Fuel. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (3), 273–288 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-273-288>

Received: 16 December 2025

Accepted: 18 February 2026

Published online: 31 July 2026