

УДК 621.311.1

DOI: 10.18799/26584956/2025/3/1979

Шифр специальности ВАК: 2.4.5

Оценка эффективности строительства солнечных электростанций в региональном разрезе

П.Е. Мезенцев¹, К.Б. Кожов², И.К. Кожов³✉

¹ Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
Россия, г. Екатеринбург

² Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук,
Россия, г. Екатеринбург

³ ООО «Авеон», Россия, г. Екатеринбург

✉ jefytt11@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* связана с тем, что развитие энергетической инфраструктуры и, в частности, солнечной энергетики является важным фактором социально-экономического развития регионов страны. В рамках энергетического перехода, при котором предполагается замена существующих энерготехнологий на низкоуглеродное производство электроэнергии, весьма важно определить место солнечных электростанций в структуре электрогенерирующего комплекса России. Данное исследование позволит получить информацию об экономической эффективности солнечных электростанций, включенных в региональные энергосистемы РФ с различной степенью централизации электроснабжения на основе подходов, использующих имитационное моделирование. **Цель:** анализ развития солнечной энергетики в системе общего и регионального производства электроэнергии России; разработка моделей оценки эффективности применения солнечных электростанций в различных регионах Российской Федерации с учетом региональных и технологических аспектов при их работе как в зоне централизованного, так и децентрализованного электроснабжения. **Методы:** методы имитационного моделирования, используемые для получения разделяющей поверхности и на ее основе определения целесообразности и эффективности внедрения солнечных электростанций в регионах, относящихся к различным зонам централизации электроснабжения. **Результаты:** на основе анализа структуры электрогенерирующего комплекса страны, социально-экономических аспектов с учетом концепции энергетического перехода и нормативно-правовой базы электроэнергетики показано, что для России в области развития солнечной энергетики наиболее важны показатели экономии топлива и снижения выбросов CO₂, получаемые за счет использования высокотехнологичных солнечных электростанций или их комплексов в региональных энергосистемах. С применением имитационных подходов построены модели разделяющих поверхностей для оценки эффективности региональных солнечных электростанций, расположенных в субъектах РФ с различной степенью централизации электроснабжения в условиях неопределенности исходной информации. Полученные модели позволили оценить эффективность сооружения солнечных электростанций, расположенных как в зоне централизованного, так и децентрализованного электроснабжения потребителей страны. Оценка эффективности солнечных электростанций в регионах централизованной зоны Единой энергетической системы проведена на примере Артинской солнечной электростанции в Свердловской области (Артинская СЭС), а в децентрализованной зоне – на примере комплекса солнечных электростанций на территории Камчатского края (Камчатские СЭС).

Ключевые слова: электроэнергетика, инфраструктура, солнечная электростанция, энергетический переход, централизованное и децентрализованное электроснабжение, энергоэффективность, регрессионный анализ, имитационное моделирование

Благодарности: статья подготовлена в соответствии с Планом НИР Института экономики УрО РАН на 2025 г.

Для цитирования: Мезенцев П.Е., Кожов К.Б., Кожов И.К. Оценка эффективности строительства солнечных электростанций в региональном разрезе // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2025. – Т. 53. – № 3. – С. 110–127. DOI: 10.18799/26584956/2025/3/1979

UDC 621.311.1

DOI: 10.18799/26584956/2025/3/1979

Assessment of the effectiveness of constructing solar power plants in the regional context

P.E. Mezentsev¹, K.B. Kozhov², I.K. Kozhov³✉

¹ *Institute of Thermophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russian Federation*

² *Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russian Federation*

³ *LLC "Aveon", Ekaterinburg, Russian Federation*

✉ jefytt11@mail.ru

Abstract. Relevance. Development of energy infrastructure and, in particular, solar energy is an important factor in the socio-economic development of the country regions. As part of the energy transition, which involves replacing existing energy technologies with low-carbon electricity generation, it is very important to determine the place of solar power plants in the structure of the Russian electricity generation complex. This study will provide information on the economic efficiency of solar power plants included in the regional energy systems of the Russian Federation with varying degrees of centralization of electricity supply based on approaches using simulation modeling. **Aim.** To analyze solar energy development in the system of general and regional electricity production in Russia; to develop models for evaluating the effectiveness of solar power plants in various regions of the Russian Federation, taking into account regional and technological aspects when operating in both centralized and decentralized power supply areas. **Methods.** Simulation modeling methods used to obtain a separation surface and, based on it, determine the feasibility and effectiveness of the introduction of solar power plants in regions belonging to different zones of centralization of electricity supply. **Results.** Based on the analysis of the structure of the country power generation complex, socio-economic aspects, taking into account the concept of energy transition and the regulatory framework of the electric power industry, it is shown that for Russia in the field of solar energy development, the most important indicators of fuel economy and reduction of CO₂ emissions are obtained through the use of high-tech solar power plants or their complexes in regional energy systems. Using simulation approaches, models of separating surfaces have been constructed to evaluate the effectiveness of regional solar power plants located in the subjects of the Russian Federation with varying degrees of centralization of power supply in conditions of uncertainty of the initial information. The obtained models made it possible to evaluate the efficiency of the construction of solar power plants located both in the zone of centralized and decentralized power supply to consumers of the country. The efficiency of solar power plants for supplying electricity to consumers in the regions of the centralized zone of the Unified Energy System was assessed using the example of the Artinskaya solar power plant in the Sverdlovsk Region (Artinskaya SPP), and in the decentralized zone – using the example of a complex of solar power plants in the Kamchatka Territory (Kamchatka SPP).

Keywords: electric power industry, infrastructure, solar power plant, energy transition, centralized and decentralized power supply, energy efficiency, regression analysis, simulation modeling

Acknowledgments. The article was prepared in accordance with the Research Plan of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for 2025.

For citation: Mezentsev P.E., Kozhov K.B., Kozhov I.K. Assessment of the effectiveness of constructing solar power plants in the regional context. *Journal of Wellbeing Technologies*, 2025, vol. 53, no. 3, pp. 110–127. DOI: 10.18799/26584956/2025/3/1979

Введение

Социально-экономическое развитие регионов определяется комплексом факторов. На первый план выходят не только предприятия, функционирующие в различных отраслях экономики, но и доступность трудовых ресурсов и инвестиционная привлекательность территории. Однако не менее важным аспектом является развитая инфраструктура, которая создает необходимые условия для устойчивого роста. Особую роль здесь играет энергетическая инфраструктура, обеспечивающая бесперебойное функционирование производственных процессов и социальных объектов. Без современной и эффективной системы энергоснабжения обеспечения невозможно реализовать масштабные экономические проекты, привлечь новых инвесторов и обеспечить комфортную среду проживания. Таким образом, именно наличие качественной энергетической базы становится одним из ключевых драйверов прогрессивного развития территорий. Поэтому вопросы развития инфраструктурных систем в регионах Российской Федерации и усиления связанности территории России включены в число основных приоритетов развития страны [1, 2].

Необходимо также отметить, что просматриваемые перспективные тенденции развития экономики тесно взаимосвязаны с увеличением потребления энергетических ресурсов и это негативно сказывается как в виде все более возрастающего антропогенного воздействия на окружающую среду, так и на истощение природных ресурсов, используемых в энергетической сфере. Как следствие, это приводит к повышению стоимости топливно-энергетических ресурсов и, в частности, электроэнергии, а также необходимости искать способы выхода из создавшейся ситуации путем разработки и внедрения технологий производства электроэнергии без применения ископаемого топлива и наносящих минимальный вред окружающей среде [3]. К таким технологиям производства электроэнергии, несомненно, можно отнести солнечную энергетику. В доступных публикациях недостаточно изучен аспект эффективности функционирования региональных солнечных электростанций (СЭС) в зонах различной централизации электроснабжения. В связи с этим цель исследования – на основе анализа структуры электрогенерирующего комплекса РФ и региональных социально-экономических аспектов с учетом концепции энергетического перехода (ЭП) и нормативно-правовой базы электроэнергетики и на модельном уровне дать оценку эффективности применения солнечных электростанций в регионах с различной степенью централизации электроснабжения и показать наиболее важные факторы, способствующие скорейшему внедрению таких электростанций. Исходя из этого выдвигается гипотеза о неэффективности солнечных электростанций в регионах централизованной зоны Единой энергетической системы РФ и их эффективности – в регионах децентрализованной зоны. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: проанализировать развитие солнечной энергетики РФ и построить модели оценки эффективности СЭС для регионов с различной степенью централизации электроснабжения, а также с их помощью проверить выдвинутую гипотезу.

Электроэнергетическая сфера на территории Российской Федерации по степени централизации делится на зоны централизованного и децентрализованного электроснабжения [4, 5]. Зона централизованного электроснабжения РФ охватывает регионы страны в сфере действия Единой энергетической системы России (ЕЭС России). Зона децентрализованного электроснабжения страны включает зону функционирования технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем (ТИТЭС) Сибири и Дальнего Востока и зону функционирования небольших изолированных энергоузлов. Эти изолированные энергоузлы размещены на территориях преимущественно сельских населенных пунктов, не охваченных централизованным электроснабжением, удалены от топливных баз, имеют сложные и затратные схемы доставки топлива и используют дизельные электростанции (ДЭС) в качестве генераторов электроэнергии и автономные системы энергоснабжения на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В зоне децентрализованного электроснабжения внедрение

солнечных электростанций (СЭС) позволит перейти к созданию солнечно-дизельных систем генерации с аккумулярованием электроэнергии [6, 7]. Рассматриваемый в статье комплекс солнечных электростанций на территории Камчатского края входит в ТИТЭС децентрализованной зоны электроснабжения. Региональные энергосистемы, входящие в зону централизованного электроснабжения и ТИТЭС, показаны в документе стратегического планирования – Схеме и программе развития электроэнергетических систем России на 2025–2030 гг.¹

В структурно-функциональном отношении ЕЭС России состоит из 75 региональных энергосистем, которые, в свою очередь, образуют семь объединенных энергетических систем (ОЭС): Востока, Сибири, Урала, Средней Волги, Юга, Центра и Северо-Запада. Все энергосистемы соединены межсистемными высоковольтными линиями электропередачи напряжением 220–500 кВ и функционируют в синхронном режиме (параллельно). На Большом Урале, включая автономные округа севера УрФО, абсолютно преобладают территории, включенные в ОЭС Урала, их энергетика работает в зоне централизованного электроснабжения. В этих энергосистемах для решения проблем негативного влияния потребления органического топлива при производстве электроэнергии реализовываются решения по созданию многокомпонентных солнечно-энергетических комплексов [8]. В проведенных в статье исследованиях рассмотрены солнечные электростанции, работающие в различных зонах (централизованное и децентрализованное электроснабжение), и получены их оценки по технико-экономическим показателям (экономический критерий). По этим оценкам определяются эффективность и целесообразность их сооружения и эксплуатации в различных регионах с привязкой к зоне централизации с учетом сложившихся пропорций между затратами на солнечные электростанции и тарифной политикой, проводимой в рассматриваемом регионе.

Установленная мощность электростанций ЕЭС России и ТИТЭС на начало 2024 г. составила 253535,1 МВт, из них 29649,0 МВт (11,69 %) – на атомных электростанциях, 52 839,9 МВт (20,84 %) – на гидравлических, 166356,4 МВт (65,61 %) – на тепловых, 4689,8 МВт (1,85 %) – на электростанциях, функционирующих на базе возобновляемых источников энергии – солнечных и ветровых электростанциях². При рассмотрении структурных составляющих электроэнергетики можно отметить, что в настоящее время лидерами по производству электроэнергии являются тепловые электростанции (ТЭС), но их большой недостаток – значительное загрязнение окружающей среды. Наиболее прогрессивный способ генерации электроэнергии с применением высоких технологий осуществляется на атомных электростанциях (АЭС), но сдерживающим фактором их внедрения являются высокие капиталовложения в строительство. В России в последнее время в сфере электроэнергетики большое внимание уделяется развитию альтернативных способов производства электроэнергии с применением возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что приводит к увеличению доли низкоуглеродного производства электроэнергии (НПЭ), которое использует неисчерпаемые природные источники энергии [9].

Мировой опыт показывает, что развитие солнечной энергетики как альтернативного вида энергетики уже идет во многих странах и, в частности, в Китае³, США и странах Европы. В 2023 г. совокупная мощность китайских СЭС вышла на уровень примерно 500 ГВт (40 %

¹ Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2025–2030 годы. URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/808/Prikaz-ME-ot-29.11.2024-_2328-ob-utverzhenii-SiPR-EES-na-2025_2030-PUBLIKATSIYA.pdf (дата обращения 05.03.2025).

² Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2025 – 2030 годы. Утв. Приказом Минэнерго России от 25.11.2024 № 2328. URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/808/Prikaz-ME-ot-29.11.2024-_2328-ob-utverzhenii-SiPR-EES-na-2025_2030-PUBLIKATSIYA.pdf (дата обращения: 05.03.2025).

³ Общая мощность солнечных электростанций в Китае к 2027 г. превысит 1 ТВт. URL: <https://www.interfax.ru/business/920376> (дата обращения 05.03.2025).

мировых мощностей СЭС) [10]. На втором месте по этому показателю США – 145 ГВт. В Германии, по данным немецкой ассоциации солнечной промышленности (BSW-Solar), идет рост установленной мощности солнечной энергетики [11], которая занимает третье место в мире по установленной электрической мощности на душу населения⁴.

По данным системного оператора единой энергосистемы России⁵ в России в 2023 г. установленная мощность 70 действующих солнечных электростанций составила приблизительно 2,1 ГВт, что равно 0,85 % от суммарной мощности всех электростанций страны, а в 2025 г. мощность СЭС увеличится до 2,56 ГВт. Для стимулирования строительства СЭС на период 2025–2035 гг. по программе ДПМ (договор о предоставлении мощности) ВИЭ 2.0 Правительство РФ утвердило правила новой программы поддержки ВИЭ⁶. Нужно также учесть, что для более продуктивного использования солнечной энергетики и достижения технологического суверенитета должны быть внедрены новые технологические решения – применение кремниевых пластин, фотоэлектрических преобразователей мощности и др.⁷ Поэтому важна разработка методов и моделей оценки эффективности сооружения солнечных электростанций в различных регионах Российской Федерации, учитывающих технологические аспекты и зону централизации энергосистем в местах их размещения.

Теоретический обзор исследований

В современных условиях научное сообщество активно изучает перспективы развития инфраструктурных систем, включая альтернативные источники энергии. Особое внимание уделяется солнечной энергетике и другим технологиям возобновляемой энергетики (ВИЭ), которые рассматриваются как важнейшие элементы глобального энергетического перехода (Energy Transition). Этот процесс представляет собой масштабную трансформацию энергетической системы человечества, направленную на замену традиционных ископаемых видов топлива экологически чистыми технологиями. Солнечная энергетика, как одна из наиболее перспективных отраслей, демонстрирует высокие темпы роста благодаря снижению стоимости фотоэлектрических модулей и развитию новых технологий накопления энергии [12]. Научные исследования фокусируются на совершенствовании эффективности солнечных панелей, увеличении их срока службы и адаптации к различным климатическим условиям. Параллельно развивается инфраструктура для интеграции солнечной энергии в существующие электросети, что позволяет сделать ее использование более надежным и доступным [13].

Современные научные изыскания направлены на повышение производительности солнечных элементов, продление их эксплуатационного периода и обеспечение работоспособности в разнообразных климатических зонах. Отказ от жестких рамок климатической политики допустим, поскольку полная или даже частичная замена традиционных методов генерации электроэнергии альтернативными пока не осуществима. Поэтому в контексте низкоуглеродной трансформации отказ от классических методов производства энергии пока не планируется. Это сопряжено с существенными инвестициями в создание и применение новых способов получения энергии. Прекращение развития возобновляемой энергетики (ВИЭ) и техно-

⁴ Количество солнечных электростанций в ФРГ достигло трех миллионов. URL: https://www.c-o-k.ru/market_news/kolichestvo-solnechnyh-elektrostanciy-v-frg-dostiglo-treh-millionov (дата обращения 05.03.2025).

⁵ Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/Rwf9Akjf5FwAnustDEL2m7PEvZ26i7k3.pdf> (дата обращения 05.03.2025).

⁶ О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности. URL: <http://government.ru/docs/all/133132/> (дата обращения 05.03.2025).

⁷ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013> (дата обращения 05.03.2025).

логий, связанных с энергетическим переходом, может привести к отставанию России от передовых стран в этой области [14].

В работе [3] отмечается, что для экономик многих стран основным критерием перехода на новые технологии НПЭ является встраивание мировой энергетики в концепцию энергетического перехода. ЭП представляет собой одну из ключевых глобальных проблем, от решения которой зависят экологическая безопасность, устойчивое развитие экономики и благополучие общества [15]. Этот процесс требует учета множества факторов, включая местные особенности, внешние угрозы и риски. Оптимальной формой организации региональной электроэнергетики считается гибкая модель, объединяющая системный и региональный подходы. Такая модель предполагает создание энергоустановок с широким диапазоном генерирующих мощностей. Для успешного осуществления ЭП необходимо идти от относительно простых и малозатратных мер по управлению спросом на энергию к масштабным преобразованиям, включающим модернизацию угольных тепловых электростанций (ТЭС) и строительство генерирующих комплексов малой распределенной генерации, которая включает установки СЭС, оснащенные системами накопления энергии, что позволяет повысить устойчивость энергосистем и снизить зависимость от централизованных источников энергии. При этом солнечные электростанции отличаются отсутствием выбросов парниковых газов и токсичных веществ, однако их эффективность зависит от природных условий, что ограничивает их гарантированную мощность и режим работы в базисной зоне графика электрических нагрузок энергосистемы [16, 17]. Для покрытия пиковых нагрузок этого графика в ОЭС используют газотурбинные установки и в дальнейшем при переходе на технологии НПЭ их предполагается заменить на гидроаккумулирующие электростанции и накопители электроэнергии большой мощности (НЭБМ) [12].

Основными объектами ЭП являются объединенные электроэнергетические системы и децентрализованные генерирующие установки. Как показано в работе [1], в состав электроэнергетических систем входят два сегмента. Основной сегмент – системная, или сетевая, энергетика, поставляющая на рынок значительный объем электроэнергии (централизованная зона электроснабжения). Распределенная энергетика, являющаяся вторым сегментом, и представлена энергоисточниками, не выведенными через единую электросетевую инфраструктуру в большую энергосистему и с меньшим производством электроэнергии, но имеющая тенденцию к росту доли в электроэнергетике (децентрализованная зона электроснабжения). В изолированных энергоузлах РФ (ТИТЭС) находят широкое применение солнечные электростанции, относящиеся к сфере распределенной энергетики на базе НПЭ [18].

В работе [19] предложена методология сравнительной оценки банков на основе многомерного вероятностного анализа для принятия управленческих решений в условиях неопределенности и на основе этого построена разделяющая гиперплоскость (определены коэффициенты уравнения этой гиперплоскости). С помощью гиперплоскости проведено разделение изучаемой совокупности банков на два класса, что позволило выявить эффективные банки, которым удалось сохранить место в «положительном» кластере. Базис данной методологии возможно распространить и на производственно-экономические системы энергетики. В отличие от [19] авторами статьи предложено использовать имитационное моделирование. Его суть состоит в применении расчетных значений для построения моделей и получения уравнения разделяющей поверхности, позволяющей выявить эффективные солнечные электростанции для различных зон централизации электроснабжения. Алгоритм этого методического подхода более подробно описан в следующем разделе.

Материалы и методы

С учетом изложенного для оценки эффективности сооружения возобновляемых источников энергии и, в частности, солнечных электростанций в качестве вариантов электроснабжения потребителей может быть использована методология сравнительной оценки вариантов с применением многомерного вероятностного анализа в условиях неопределенности исходных

данных, позволяющая разбить обучающую выборку на два кластера (эффективных и неэффективных вариантов СЭС). В рамках этого подхода строится уравнение разделяющей гиперплоскости и с его помощью рассматриваемая солнечная электростанция относится к одному из кластеров, показывающих степень эффективности применения данного энергообъекта при заданных исходных данных [20]. Далее эта методика описана более подробно для определения эффективности сооружения солнечных электростанций, которые работают в региональных энергосистемах РФ с различной степенью централизации электроснабжения.

Предлагаемый метод моделирования построен на оценке экономической эффективности по затратам и эффекту за расчетный период эксплуатации. При этом оценивается разница в дисконтированных затратах между приобретением электроэнергии от существующей системы генерации электроэнергии в регионе и от СЭС. Существующая система представлена отпусковой ценой за киловатт-час электроэнергии в рассматриваемом субъекте РФ.

В качестве критерия экономической эффективности солнечных электростанций применены дисконтированные затраты за расчетный период. Для расчетов используются 14 величин, которые по смыслу разделяются на внешние, характеризующие условия функционирования СЭС, и внутренние, которые описывают показатели самой СЭС.

Внешние переменные:

- цена внешней электроэнергии, руб/кВт·ч;
- ставка налога на прибыль, %;
- ставка суммарных отчислений на ФОТ, %;
- ставка налога на имущество, %;
- коэффициент дисконтирования, %;
- ставка НДС, %.

Внутренние переменные:

- мощность станции, МВт;
- коэффициент использования установленной мощности, %;
- потребление электроэнергии на собственные нужды станции, %;
- удельные капиталовложения, тыс. руб/кВт;
- расчетный срок эксплуатации, лет;
- численность персонала, чел.;
- средняя зарплата, тыс. руб.;
- срок сооружения, лет.

Исходя из предложенной гипотезы исследования по расчетной части проводятся в два этапа. На первом этапе проверяется эффективность солнечных электростанций в регионах централизованной зоны электроснабжения, на втором – для децентрализованной зоны. Примером для расчетов по этапу 1 выбрана Артинская СЭС в Свердловской энергосистеме, относящейся к объединенной энергосистеме Урала, для этапа 2 – комплекс солнечных электростанций на территории Камчатского края (Камчатские СЭС).

При решении задачи учитывается достаточно высокая неопределенность характеристик генерирующего оборудования и внешних условий его функционирования, от которых зависит эффективность работы солнечной электростанции. Неопределенности характеристик обусловлены тем, что в регионах России наблюдается значительное разнообразие цен на электроэнергию⁸. Кроме того, широкое разнообразие технологий производства электроэнергии и типов оборудования объективно приводит к неопределенности их технико-экономических характеристик, таких как удельные капиталовложения, потребление электроэнергии на собственные нужды, численность обслуживающего персонала⁹.

⁸ АО «Администратор торговой системы». URL: www.atsenergo.ru (дата обращения 05.03.2025).

⁹ АО «Системный оператор ЕЭС». URL: www.so-ups.ru (дата обращения 05.03.2025).

Затраты на сооружение электростанции оцениваются на основе удельных капитальных вложений и величины предполагаемой электрической мощности электростанции. Затраты на оплату труда рассчитываются как произведение средней заработной платы в электроэнергетике на предполагаемое число работников.

Изменение затрат на выработку электроэнергии, несомненно, приведет к изменению прибыли, что в предлагаемой методике учитывается через произведение ставки налога на прибыль и величины разницы между затратами на покупку и выработку электроэнергии. Таким же образом учитывается изменение налога на добавленную стоимость: для каждого года оценивается разница на приобретение товаров и услуг и умножается на ставку налога. Налог на основные фонды начисляется на остаточную стоимость, исходя из 25-летнего срока службы электростанции (амортизация 4 % в год).

В предлагаемой методике исследования неопределенность учитывается через проведение многовариантных расчетов и построение регрессионной модели критерия экономической эффективности. Модель критерия экономической эффективности формируется в зависимости от внешних условий функционирования и технико-экономических характеристик электростанции и позволяет выявить диапазоны эффективности применения солнечной электростанции.

В основу моделирования экономической эффективности сооружения солнечной генерации положены идеи полного факторного эксперимента [21]. Выборочная совокупность для расчета коэффициентов регрессионной модели, созданная с использованием полного факторного эксперимента, обладает свойством ортогональности независимых переменных. Это свойство выборки повышает адекватность модели и уменьшает доверительные интервалы коэффициентов регрессии.

При использовании полного факторного эксперимента все независимые переменные варьируются на необходимом числе уровней. Для каждого их сочетания рассчитывается значение зависимой переменной, часто называемой откликом. Таким образом, будет получена выборка численного эксперимента в рамках имитационного моделирования. По этой выборке определяется характер зависимости отклика от каждой независимой переменной. Например, по графику отклика при изменении одной независимой переменной можно определить вид зависимости. При решении поставленной в статье задачи выявлена линейная зависимость отклика от всех переменных, кроме переменной «коэффициент дисконтирования», которая влияет на эффективность применения солнечной электростанции обратно пропорционально. Далее, приравняв к нулю отклик полученной модели, записывается уравнение разделяющей поверхности в координатах независимых переменных.

Рассмотрим пример малоразмерной задачи. Пусть необходимо построить зависимость y от трех переменных x_1 , x_2 и x_3 . Независимые переменные будем варьировать на трех уровнях в интервалах от 1 до 3. Для демонстрационной задачи расчет отклика выполнен по простой формуле. План-матрица полного факторного эксперимента для такой задачи представлена в табл. 1.

Изучение вида зависимостей отклика от отдельных независимых переменных показало линейный характер для x_2 и x_3 , для x_1 – квадратичный. Для построения модели в столбце x_1 плана-матрицы эксперимента значения 2 и 3 заменяются на 4 и 9 соответственно.

Корреляционная матрица представлена в табл. 2.

Как и ожидалось, при полном факторном эксперименте независимые переменные статистически между собой не связаны, но имеют значимую связь с откликом.

Далее проведен регрессионный анализ. Коэффициент детерминации равен единице, что для демонстрационной задачи вполне естественно. Полученная формула полностью совпадает с зависимостью, использованной для получения отклика в демонстрационной выборке. Значения коэффициентов и ошибки их расчета представлены в табл. 3.

Таблица 1. План-матрица полного факторного эксперимента демонстрационной задачи
Table 1. Matrix plan of the complete factor experiment of the demonstration task

Номер плана Plan no.	x_1	x_2	x_3	y
1	1	1	1	19
2	2	1	1	25
3	3	1	1	35
4	1	2	1	32
5	2	2	1	38
6	3	2	1	48
7	1	3	1	45
8	2	3	1	51
9	3	3	1	61
10	1	1	2	15
11	2	1	2	21
12	3	1	2	31
13	1	2	2	28
14	2	2	2	34
15	3	2	2	44
16	1	3	2	41
17	2	3	2	47
18	3	3	2	57
19	1	1	3	11
20	2	1	3	17
21	3	1	3	27
22	1	2	3	24
23	2	2	3	30
24	3	2	3	40
25	1	3	3	37
26	2	3	3	43
27	3	3	3	53

Таблица 2. Корреляционная матрица полного факторного эксперимента демонстрационной задачи

Table 2. Correlation matrix of the complete factor experiment of the demonstration task

	x_1	x_2	x_3	y
x_1	1			
x_2	0	1		
x_3	0	0	1	
y	0,511	0,822	-0,253	1

Таблица 3. Результат регрессионного анализа демонстрационной задачи
Table 3. Result of the regression analysis of the demonstration task

Переменная Variable	Коэффициенты Coefficients	Стандартная ошибка Standard error
y -пересечение/ y -intersection	8	3,15032E-15
x_1	2	2,465E-16
x_2	13	9,96218E-16
x_3	-4	9,96218E-16

На основе этой таблицы зависимость отклика от независимых переменных, с учетом практически нулевых значений ошибок коэффициентов, может быть записана так:

$$y = 2x_1^2 + 13x_2 - 4x_3 + 8.$$

Для реализации полного факторного эксперимента и расчета дисконтированного накопленного эффекта авторами применена программа, написанная на языке FORTRAN. Таким образом создана выборка расчетных эффектов по планам полного факторного эксперимента. Далее эта выборка обрабатывается средствами EXCEL [22] с целью получения значений коэффициентов линейной многомерной модели. Следует отметить, что предыдущие исследования [20] показали линейную зависимость эффекта от всех исходных величин за исключением коэффициента дисконтирования. Для него определено линейное влияние обратного значения ($1/x$) на величину эффекта.

Результаты исследования

Проведенные исследования выполнены на основе предложенных методов имитационного моделирования и построения разделяющей поверхности, которые применены для оценки эффективности сооружения солнечных электростанций, расположенных в зонах централизованного электроснабжения (Артинская СЭС) и децентрализованного электроснабжения (Камчатские СЭС). Апробация построенных моделей проведена на этих солнечных электростанциях.

Как отмечалось в методической части, исследования по оценке эффективности СЭС при разном уровне централизации проводились в два этапа. Рассмотрим более подробно основные характеристики объектов исследования – Артинская СЭС (этап 1) и Камчатские СЭС (этап 2).

На первом этапе были собраны показатели Артинской СЭС. Эта электростанция является возобновляемым источником энергии централизованной зоны электроснабжения и относится к классу региональной энергетики на базе НПЭ. Проект «Артинская СЭС» реализован группой компаний «Хевел» с выходом на установленную электрическую мощность электростанции 37,9 МВт в конце 2024 г. Артинская солнечная электростанция была построена в соответствии с региональной схемой развития электроэнергетики Свердловской области¹⁰. В дальнейшем при получении положительного опыта эксплуатации Артинской СЭС, включающего оценку ее эффективности, появляется возможность реализовать планы пятилетнего строительства на Среднем Урале еще 28 солнечных электростанций суммарной мощностью 137 МВт. Артинская СЭС – это первый и самый масштабный в Уральском федеральном округе пилотный проект создания источника возобновляемой энергии, работу которого будут оценивать и в соседних субъектах России, чтобы в дальнейшем его использовать.

Артинская СЭС находится в деревне Чекмаш в Артинском городском округе Свердловской области. Общая площадь земли, занимаемая электростанцией, – около 90 га. В технологическом плане Артинская СЭС перспективнее предшественников, так как реализована на высокотехнологичных гетероструктурных фотоэлектрических модулях (численность модулей – 116 тыс. шт.), которые отличаются высокой эффективностью выработки электроэнергии как в ясную, так и в пасмурную погоду, а также в условиях экстремальных температур (от –40 до +85 °С). Электростанция будет выступать одним из способов улучшения экологических условий в регионе, а именно при выработке приблизительно 40 млн кВт·ч электроэнергии в год она позволит снизить выбросы в размере 14 тыс. т в годовом выражении. При этом важным фактором, влияющим на объем вырабатываемой электроэнергии, является сол-

¹⁰ Схема и программа развития электроэнергетики Свердловской области на период 2023–2027 годов. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6600202205060001?index=2> (дата обращения 06.03.2025).

нечное излучение (инсоляция) принимаемое фотоэлектрическими панелями СЭС. Инсоляция показывает суммарный объём солнечной радиации, падающий на поверхность панели за определенный период времени, и измеряется в кВт·ч/м². Таким образом, чем выше показатель инсоляции в регионе, тем больше электроэнергии смогут генерировать солнечные панели. На площадке Артинской СЭС инсоляция составляет примерно 1033 кВт·ч.¹¹ При этом для эффективной работы СЭС достаточным является уровень требуемой освещенности на метр квадратный в год – 1000 кВт·ч. Однако ввиду того, что уровень инсоляции по Свердловской области все же достаточно близок к указанному граничному значению, возникает необходимость более детального исследования оценки эффективности возможного применения Артинской СЭС, которая и была проведена в данной статье.

На втором этапе были рассмотрены Камчатские СЭС. Эти электростанции являются возобновляемыми источниками энергии децентрализованной зоны электроснабжения (зоны ТИТЭС). Камчатские СЭС – это комплекс небольших солнечных электростанций в Камчатском крае, включающий электростанции, расположенные в населенных пунктах: п. Атласово (403 кВт), п. Таёжный (91 кВт), с. Долиновка (1 327 кВт), с. Эссо (3 139 кВт). Их суммарная годовая выработка равна примерно 5 млн кВт·ч. На площадках Камчатских СЭС инсоляция составляет около 1098,4 кВт·ч¹². Камчатские солнечные электростанции построены компанией «Камчатскэнерго» (основной владелец ПАО «РусГидро»). Эти СЭС работают совместно с действующими ДЭС и обеспечивают частичное замещение выработки дизель-генераторов за счет возобновляемой энергии. В 2024 г. на базе существующих ДЭС и построенных СЭС создан автоматизированный гибридный энергокомплекс (АГЭК) с системой накопления энергии и единой системой автоматизированного управления, обеспечивающей минимальное потребление топлива. Создание АГЭК является новым стандартом технологического развития ПАО «РусГидро» для объектов локальной генерации Дальнего Востока. Это акционерное общество реализует проекты модернизации локальной генерации в рамках исполнения положений Указа Президента РФ¹³. Высокая эффективность функционирования Камчатских СЭС объясняется высокой стоимостью привозного дизельного топлива на Камчатке, которая, в свою очередь, приводит к росту цен внешней электроэнергии для потребителей, так как другие источники электроэнергии в этом изолированном энергорайоне отсутствуют. В этом энергорайоне высокие тарифы на электроэнергию во многом обусловлены применением дизельных электростанций (ДЭС), работающих на дорогостоящем привозном топливе. Так, например, по данным ПАО «Камчатскэнерго»¹⁴ цены (тарифы) на электрическую энергию для Центрального энергоузла Камчатского края покупателям на розничных рынках, расположенных в зоне ТИТЭС на второе полугодие 2024 года: для одноставочного тарифа пиковой зоны графика изменяются в диапазоне от 12,717 руб/кВт·ч. (на высоком напряжении) до 17,590 руб/ кВт·ч. (на низком напряжении), а для тарифов, дифференцированным по трем зонам суток в пиковой зоне они еще выше и составляют соответственно 24,413–33,766 руб/кВт·ч. По опубликованной статистике Камчатстата стоимость литра диз-

¹¹ Мощность солнечного излучения по регионам. URL: <http://www.power.elteho.ru/pages/2222.html> (дата обращения 06.03.2025).

¹² Мощность солнечного излучения по регионам. URL: <http://www.power.elteho.ru/pages/2222.html> (дата обращения 06.03.2025).

¹³ Указ Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf> (дата обращения 06.03.2025).

¹⁴ Постановление Региональной службы по тарифам и ценам Камчатского края «Об утверждении тарифов на электрическую энергию, поставляемую энергоснабжающими организациями Камчатского края потребителям Центрального энергоузла Камчатского края в 2024 году». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/4101202312220033?index=1> (дата обращения 06.03.2025).

топлива в мае 2024 года составляла 81,42 руб.¹⁵ Камчатка занимает третье место в стране по дороговизне дизтоплива. Для повышения надежности электроснабжения в изолированных энергоузлах предполагается строить дизель-солнечные электростанции или СЭС, работающие в системе с промышленными накопителями электроэнергии большой мощности [23].

В рамках проведенных исследований были определены технико-экономические показатели солнечных электростанций для централизованной (Артинская СЭС) и децентрализованной (Камчатские СЭС) зон электроснабжения (табл. 4).

Таблица 4. Технико-экономические показатели солнечных электростанций с различной степенью централизации зон электроснабжения
Table 4. Technical and economic indicators of solar power plants with varying degrees of centralization of power supply zones

Наименование Name	Единица измерения Units of measurement	Артинская СЭС (централизованная зона) Artinskaya SES (centralized zone)	Камчатские СЭС (децентрализованная зона) Kamchatka SES (decentralized zone)
Накопленный эффект Cumulative effect	млрд руб. bln rub	0,1	1,6
Установленная электрическая мощность Installed electrical power	МВт/MW	37,9	4,95
Годовое число часов использования установленной мощности Annual number of hours of use of installed power	ч/год hour/year	1055	1013
Годовая выработка электроэнергии Annual electricity production	млн кВт·ч million kWh	40	5,013
Удельный эффект по мощности Specific effect by power	тыс. руб/кВт thousand rubles/kW	2,639	323,232
Удельный эффект по электроэнергии Specific effect on electricity	руб/кВт·ч rub/kWh	1,25	15,46

Источник: рассчитано и составлено авторами.

Source: calculated and compiled by the authors.

Для построения регрессионной модели с использованием полного факторного эксперимента составлен перечень переменных этой модели (табл. 5). Курсивом выделен накопленный дисконтированный эффект при сооружении солнечной электростанции за расчетный период. Остальные десять величин, применяемые для расчета дисконтированных затрат, приняты условно постоянными.

В соответствии с методикой полного факторного эксперимента при варьировании семи независимых переменных на пяти уровнях проведено 78125 (5⁷) расчетов накопленного эффекта (NV), что позволило рассчитать коэффициенты модели с высокой достоверностью в системе электронных таблиц MS Office Excel. Для расчетных интервалов значений переменных, выступающих в качестве исходных данных, при проведении эксперимента (табл. 1) был определен диапазон изменения накопленного эффекта от –6,437 до 3,628 и построена кривая распределения для 78125 наблюдений (N_{nabl}) накопленных эффектов (за 20 лет эксплуатации солнечных электростанций) (рис. 1).

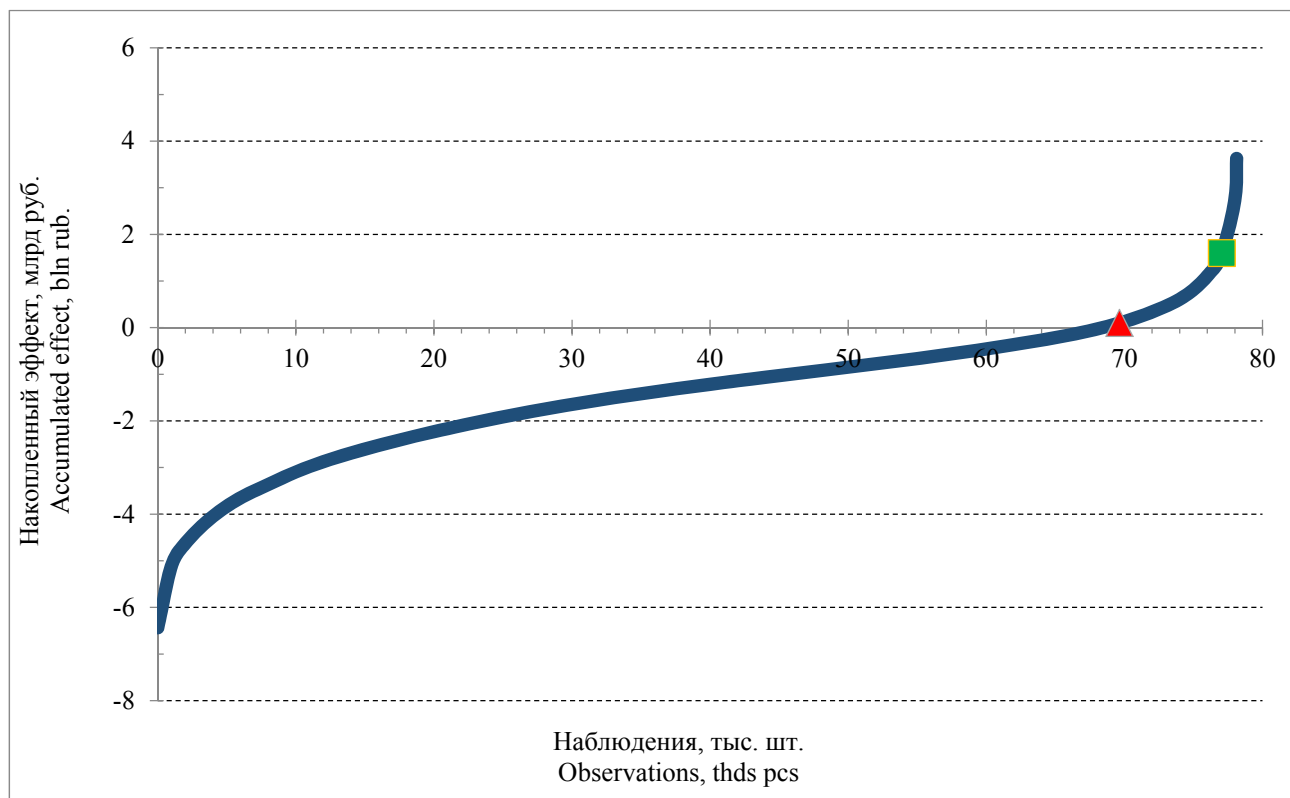
¹⁵ На Камчатке стоимость литра дизтоплива выросла на 30 копеек. URL: <https://news.ati.su/news/2024/05/14/nakamchatke-stoimost-litra-diztopliva-vyroslo-na-30-kopeek-903059/> (дата обращения 06.03.2025).

Таблица 5. Список переменных регрессионной модели
Table 5. List of regression model variables

Наименование Name	Обозначение Designation	Интервал Interval
Цена внешней электроэнергии, руб/кВт·ч Price of external electricity, rub/kWh	x_1	4...8
Мощность солнечной электростанции, МВт Solar power plant capacity, MW	x_2	10...40
Коэффициент использования установленной мощности, % Installed capacity utilization factor, %	x_3	10...40
Потребление электроэнергии на собственные нужды, % Electricity consumption for own needs, %	x_4	5...15
Удельные капиталовложения, тыс. руб/кВт Specific capital investment, thousand rubles/kW	x_5	100...200
Численность персонала, чел. Number of staff, people	x_6	10...40
Средняя заработная плата, тыс. руб. Average salary, thousand rubles.	x_7	60...120
Накопленный дисконтированный эффект, млрд руб. Accumulated discounted effect, billion rubles	y	нет/no

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.



Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Рис. 1. Определение зависимости $NV=f(N_{nabl})$
Fig. 1. Determination of the dependence $NV=f(N_{nabl})$

Результат регрессионного моделирования представлен в табл. 6. Переменная x_0 обозначает свободный член модели или, другими словами, у-пересечение.

Анализ погрешности показал удовлетворительное качество полученной регрессионной модели.

Таблица 6. Результат регрессионного анализа
Table 6. Result of regression analysis

Переменная/Variable	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
Коэффициент/Coefficient	-0,3022	0,3254	-0,0471	0,0781	-0,0217	-0,0209	-0,0103	-0,0029
Доверительный интервал ($\pm$) Confidence interval ($\pm$)	0,0177	0,0014	0,0002	0,0002	0,0006	0,0001	0,0002	0,0001

Источник: рассчитано и составлено авторами.

Source: calculated and compiled by the authors.

Как видно из рис. 1, по обеим рассматриваемым солнечным электростанциям выявлена положительную эффективность. При этом Артинская СЭС имеет координаты (0,1; 69650), а Камчатские СЭС (1,6; 77096), что относится к 69650 и 77096 наблюдениям на графике. Это соответствует рассчитанному эксплуатационному 20-летнему накопленному эффекту Артинской СЭС в размере 0,1 млрд руб. Эффект по Камчатским СЭС составил 1,6 млрд руб. Точка перехода линии графика через горизонтальную ось (срок окупаемости) по Артинской СЭС – 8 лет, по Камчатским СЭС – 15 лет (рис. 2). Проведенные исследования показали, что выдвинутая гипотеза о неэффективности солнечных электростанций в регионах централизованной зоны Единой энергетической системы РФ не подтвердилась и показатели по эффективности Артинской СЭС оказались положительными, хотя и близкими к разделяющей поверхности. Для децентрализованной зоны на примере Камчатских СЭС гипотеза полностью подтвердилась.



Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Рис. 2. Определение зависимости $NV=f(\text{годы})$
Fig. 2. Determination of the dependence $NV=f(\text{Years})$

Таким образом, развитие солнечной энергетики в России необходимо, но требует дальнейшей проработки вопросов технологического совершенствования, оптимизации экономических механизмов и адаптации к региональным особенностям. Это направление имеет стратегическое значение для повышения энергетической безопасности страны и соответствия международным экологическим обязательствам в условиях глобального энергетического перехода¹⁶.

Заключение

Анализ рассматриваемых энергоисточников показал, что солнечная энергетика представляет собой перспективное направление для проведения преобразования современной энергетической системы России, особенно в условиях глобального энергетического перехода. В ходе исследования были рассмотрены ключевые аспекты развития солнечной энергетики как одного из важнейших направлений в системе региональных источников низкоуглеродного производства электроэнергии. Мировой опыт демонстрирует значительные успехи в развитии солнечной энергетики, заменяя ими электростанции на органическом топливе для снижения углеродного следа и перехода к углеродной нейтральности. В России же установленная мощность солнечных электростанций составляет примерно 1 % от общей мощности электростанций страны, что указывает на существенный потенциал роста данного типа электростанций. Предложена методология сравнительной оценки эффективности СЭС, работающих в регионах с различной степенью централизации электроснабжения с применением многомерного вероятностного анализа в условиях неопределенности исходных данных, которая позволила разделить обучающую выборку на два кластера (эффективных и неэффективных вариантов СЭС). В рамках этого подхода построено уравнение разделяющей гиперплоскости и с его помощью рассматриваемые солнечные электростанции (Артинская СЭС и Камчатские СЭС) были отнесены к одному из кластеров. Использование имитационного моделирования позволило оценить экономическую эффективность солнечных электростанций, работающих в регионах, относящихся к различным зонам централизации электроснабжения. С учетом этого выдвинутая гипотеза о неэффективности солнечных электростанций в регионах централизованной зоны Единой энергетической системы РФ не подтвердилась, так как в результате проведенных исследований показатели по эффективности Артинской СЭС оказались положительными, а для децентрализованной зоны (Камчатские СЭС) полностью подтвердилась. В работе показано, что для России в области развития солнечной энергетики наиболее важны показатели экономии топлива и снижения выбросов CO₂ и в большей степени это актуально для децентрализованной зоны электроснабжения. Таким образом, можно сделать вывод, что развитие солнечной энергетики в России необходимо, но требует дальнейшей проработки вопросов технологического совершенствования, оптимизации экономических механизмов внедрения СЭС и адаптации их к региональным особенностям. Это направление имеет стратегическое значение для повышения энергетической безопасности страны и соответствия международным экологическим обязательствам в условиях глобального энергетического перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большие инфраструктурные системы срединного макрорегиона: современная эволюция и стратегическая перспектива / под ред. М.Б. Петрова. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2023. – 278 с.
2. Наумов Е.В., Никулина Н.Л. Оценка влияния особенностей размещения производительных сил, инфраструктуры и объектов социальной сферы на результативность экономической деятельности

¹⁶ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013> (дата обращения 05.03.2025).

- предприятий в муниципальных образованиях УрФО // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2024. – Т. 52. – № 4. – С. 234–252. DOI: 10.18799/26584956/2024/4/1928. EDN: RPBANL.
3. Гительман Л.Д., Кожевников М.В. Концептуальное представление энергетического перехода в электроэнергетике региона в новых реалиях // Экономика региона. – Т. 19. – № 3. – С. 844–859. DOI: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-3-17>. EDN: OCZPUR.
 4. Стенников В.А., Славин Г.Б. Структуризация уровней централизации энергоснабжения // Энергетическая политика. – 2015. – № 2. – С. 55–63.
 5. Суржикова О.А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малонаселенных потребителей России // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 3 (4). – С. 103–108.
 6. Тремясов В.А., Зограф Я.Е., Кривенко Т.В. Оптимальное планирование солнечно-дизельной системы генерации с аккумулярованием электроэнергии // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 42–54. DOI: 10.17516/1999-494X-0287. EDN: IGISQN.
 7. Rout K., Sahu J. K. Various optimization techniques of hybrid renewable energy systems for power generation: a review // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 5. – № 7. – P. 1173–1176.
 8. Большой Урал: социально-экономические и пространственные изменения в первые десятилетия XXI века / под ред. Ю.Г. Лавриковой. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2024. – 607 с.
 9. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. – New York: IEEE Press, 2000. – 452 p.
 10. Chien J.C.L., Lior N. Concentrating solar thermal power as a viable alternative in China's electricity supply // Energy Policy. – 2011. – Vol. 39. – Iss. 12. – P. 7622–7636. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.08.034.
 11. Decarbonizing the German industrial thermal energy use with solar, hydrogen, and other options – recommendations for the world / R. Pitz-Paal, J. Krüger, J. Hinsch et al. // Solar Compass. – 2022. – Vol. 3–4. – article number 100029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2022.100029>. EDN: VPMSU.
 12. Бушуев В.В., Новиков Н.Л. Инфраструктурные накопители в энергетике // Энергетическая политика. – 2020. – № 10 (152). – С. 74–89. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_10152_74. EDN: OLLPZX.
 13. York R., Bell S.E. Energy transitions or additions? Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy // Energy Research & Social Science. – 2019. – Vol. 51. – P. 40–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.008>.
 14. Никулина Н.Л. Особенности устойчивого развития регионов в условиях низкоуглеродной и ESG-трансформации // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2024. – Т. 52. – № 1. – С. 13–25. DOI: 10.18799/26584956/2024/1/1690. EDN: REVEDN.
 15. Blazquez J., Fuentes R., Manzano B. On some economic principles of the energy transition // Energy Policy. – 2020. – Vol. 147. – article number 111807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111807>. EDN: JBUHNY.
 16. Дзюба А.П., Соловьёва И.А. Ценовые параметры поставки электроэнергии как базис управления спросом на электропотребление в регионе // Экономика региона. – 2023. – Т. 19. – № 4. – С. 1177–1193. DOI: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-4-17>. EDN: EDSZVN.
 17. Петров М.Б., Кожов К.Б. Модель выравнивания суточного графика нагрузки потребителями электроэнергии // Вестник Гуманитарного университета. – 2023. – № 4 (43). – С. 124–134. DOI: 10.35853/vestnik.gu.2023.4(43).12. EDN: EXFFU.
 18. Белов О.А., Федоров О.В. Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления в Средне-Камчатском изолированном энергоузле // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 5. – С. 120–135. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-120-135. EDN: ENFIQC.
 19. Корнуков И.И., Домников А.Ю. Сравнительная оценка результатов деятельности коммерческих банков России на основе многомерного анализа финансовых показателей // Journal of Applied Economic Research. – 2023. – Т. 22. – № 1. – С. 142–164. DOI: <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.1.007>. EDN: VXTAQC.
 20. Мезенцев П.Е., Костин А.А., Ананичева С.С. Моделирование эффективности применения автономной электростанции // Промышленная энергетика. – 2017. – № 12. – С. 9–13. EDN: YMSEKI.
 21. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
 22. Петрова В.А. Программирование и решение сложных задач в Excel: учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. – 88 с.
 23. Joint EASE/EERA Recommendation for a European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030, Final Report. – March 2013. – 225 p.

Информация об авторах

Петр Евгеньевич Мезенцев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107А; <https://orcid.org/0000-0002-9837-1410>, hb@itpuran.ru

Константин Борисович Кожов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; <https://orcid.org/0000-0003-3694-564X>, kozhov.kb@uiec.ru

Игорь Константинович Кожов, инженер ООО «Авеон», Россия, 620133, г. Екатеринбург, ул. Короленко, 5; <https://orcid.org/0009-0009-5140-3700>, jefytt11@mail.ru

Поступила в редакцию: 23.03.2025

Поступила после рецензирования: 30.07.2025

Принята к публикации: 24.09.2025

REFERENCES

1. *Large infrastructure systems of the Middle macroregion: modern evolution and strategic perspective*. Ed. by M.B. Petrov. Ekaterinburg, Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Press, 2023. 278 p. (In Russ.)
2. Naumov I.V., Nikulina N.L. Assessment of the impact of productive forces, infrastructure and social sphere facilities location features on the efficiency of economic activities of enterprises in Ural Federal District municipalities. *Journal of wellbeing technologies*, 2024, vol. 52, no. 4, pp. 234–252. (In Russ.) DOI: 10.18799/26584956/2024/4/1928. EDN: RPBANL.
3. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V. Conceptual Vision of the Energy Transition in the Regional Electric Power System in New Realities. *Economy of regions*, 2023, vol. 19, no. 3, pp. 844–859. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-3-17>. EDN: OCZPUR.
4. Stennikov V.A., Slavin G.B. Structuring the levels of energy supply centralization. *Energy policy*, 2015, no. 2, pp. 55–63. (In Russ.)
5. Surzhikova O.A. Problems and main directions of development of electricity supply to remote and sparsely populated consumers in Russia. *Siberian Journal of Science*, 2012, vol. 4, no. 3, pp. 103–108.
6. Tremyasov V.A., Zograf Ya.E., Krivenko T.V. Optimal planning of solar-diesel generation system with energy storage. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 42–54. (In Russ.) DOI: 10.17516/1999-494X-0287. EDN: IGISQN.
7. Rout K., Sahu J.K. Various optimization techniques of hybrid renewable energy systems for power generation: a review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 5, no. 7, pp. 1173–1176.
8. *The Greater Urals: socio-economic and spatial changes in the first decades of the 21st century*. Ed. by Yu.G. Lavrikova. Ekaterinburg, Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2024. 607 p. (In Russ.)
9. Hingorani N.G., Gyugyi L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York, IEEE Press, 2000. 452 p.
10. Chien J.C.L., Lior N. Concentrating solar thermal power as a viable alternative in China's electricity supply. *Energy Policy*, 2011, vol. 39, Iss. 12, pp. 7622–7636. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.08.034.
11. Pitz-Paal R., Krüger J., Hinsch J. Decarbonizing the German industrial thermal energy use with solar, hydrogen, and other options – recommendations for the world. *Solar Compass*, 2022, vol. 3–4, article number 100029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2022.100029>. EDN: VPESMU.
12. Bushuev V.V., Novikov N.L. Infrastructural storage in the energy sector. *Energy policy*, 2020, no. 10 (152), pp. 74–89. (In Russ.) DOI: 10.46920/2409-5516_2020_10152_74. EDN: OLLPZX.
13. York R., Bell S.E. Energy transitions or additions? Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. *Energy Research & Social Science*, 2019, vol. 51, pp. 40–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.008>.
14. Nikulina N.L. Features of sustainable development of regions in the conditions of low-carbon and ESG economy transformations. *Journal of wellbeing technologies*, 2024, no. 1 (52), pp. 13–25. (In Russ.) DOI: 10.18799/26584956/2024/1/1690. EDN: REVEDN.
15. Blazquez J., Fuentes R., Manzano B. On some economic principles of the energy transition. *Energy Policy*, 2020, vol. 147, 111807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111807>. EDN: JBUIHY.
16. Dzyuba A.P., Soloveva I.A. Electricity price parameters as a basis for energy demand management in regions. *Economy of regions*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 1177–1193. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-4-17>. EDN: EDSZVH.
17. Petrov M.B., Kozhov K.B. A model for the balancing of the daily load plan by the consumers of electricity. *Bulletin of Liberal Arts University – University for Humanities*, 2023, no. 4 (43), pp. 124–134. (In Russ.) DOI: 10.35853/vestnik.gu.2023.4(43).12. EDN: EXFFU.
18. Belov O.A., Fedorov O.V. Analysis of the structure of generating capacity and dynamics of electricity consumption in the Sredne-Kamchatsky isolated power hub. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2022, vol. 24, no. 5, pp. 120–135. (In Russ.) DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-120-135. EDN: ENFIQC.

19. Kornukov I.I., Domnikov A.Yu. Comparative assessment of the performance of commercial banks in Russia based on a multidimensional analysis of financial indicators. *Journal of Applied Economic Research*, 2023, vol. 22, no. 1, pp. 142–164. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.1.007>. EDN: VXTAQC.
20. Mezentsev P.E., Kostin A.A., Ananicheva S.S. Modeling the efficiency of using an autonomous power plant. *Industrial power engineering*, 2017, no. 12, pp. 9–13. (In Russ.) EDN: YMSEKI.
21. *Experimental planning and data analysis*. Translated from English by D.K. Montgomery. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1980. 384 p. (In Russ.)
22. Petrova V.A. *Programming and solving complex problems in Excel*. Ekaterinburg, Ural University Press, 2016. 88 p. (In Russ.)
23. *Joint EASE/EERA Recommendation for a European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030*. Final Report. March 2013. 225 p.

Information about the authors

Petr E. Mezentsev, Cand. Sc., Researcher, Institute of Thermal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 107A, Amundsen street, Ekaterinburg, 620016, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9837-1410>, hb@itpuran.ru

Konstantin B. Kozhov, Cand. Sc., Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 29, Moskovskaya street, Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3694-564X>, kozhov.kb@uiec.ru;

Igor K. Kozhov, Engineer, LLC «Aveon», 5, Korolenko street, Ekaterinburg, 620133, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0009-5140-3700>, jefytt11@mail.ru

Received: 23.03.2025

Revised: 30.07.2025

Accepted: 24.09.2025