

РЕСУРСНАЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕТЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В РЕГИОНАХ РОССИИ

А.И. Скафарик¹, С.В. Киселева²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

¹ *Кафедра рационального природопользования, аспирант; e-mail: skafarik@mail.ru*

² *НИЛ ВИЭ, вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: k_sophia_v@mail.ru*

В связи с введением в Российской Федерации мер поддержки генерации электроэнергии на станциях малой мощности, работающих в том числе с использованием возобновляемых источников энергии, актуальным является задача оценки эффективности этих законодательных инициатив. В работе представлена и апробирована методика оценки производительности и экономической эффективности использования сетевых фотоэлектрических станций в зависимости от физико-географических и социально-экономических факторов. Представлены результаты оценки потенциальной производительности станций в различных регионах России, полученные на основе архивов данных о приходящей солнечной радиации за период с 2010 по 2020 г. с часовым разрешением. Показано, что экономическая эффективность ССМ в выбранных районах исследования варьирует в широких пределах в зависимости от сочетания таких факторов, как уровень солнечной радиации, розничный и оптовые тарифы на электроэнергию и график собственного потребления электроэнергии владельцем станции. Несмотря на значительные ресурсы солнечной энергии, срок окупаемости фотоэлектрических станций в районах Южной Сибири (Иркутск, Улан-Удэ) оказался максимальным среди всех районов исследований в связи с принятыми тарифами на продажу-покупку электроэнергии. Оптимальными условиями для эксплуатации таких станций характеризуются лишь регионы России, относящиеся к неценовым зонам и территориально-изолированным энергосистемам оптового рынка (Магаданская, Калининградская области, Камчатский, Приморский края), где может быть достигнута окупаемость в пределах гарантированного срока эксплуатации оборудования станций (20 лет) вследствие высоких оптовых цен на электроэнергию.

Ключевые слова: солнечная энергетика, микрогенерация, производительность станции, тарифы на электроэнергию, графики нагрузки потребителей

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.4

ВВЕДЕНИЕ

Развитие возобновляемой энергетики является одним из ведущих инструментов декарбонизации мировой экономики в соответствии с актуальной повесткой устойчивого развития. Однако важен реалистичный подход к оценкам возможностей и необходимости развивать возобновляемую энергетику, особенно в странах со значительными запасами углеводородных ресурсов. Вклад солнечной энергетики в мировое производство электроэнергии в 2020 г. составил 3,2% (855 ТВтч), причем годовой прирост по отношению к 2019 г. достиг 20% [BP Statistical Review..., 2021]. Возобновляемая энергетика в РФ как отрасль находится на этапе становления, в том числе и с точки зрения нормативно-правовых механизмов поддержки. Доля солнечных электростанций (СЭС) в общем производстве электрической энергии в России является незначительной, хотя характеризуется приростом за последние годы. По данным Системного оператора Единой

энергетической системы России (СО ЕЭС России), в 2021 г. выработка электроэнергии на СЭС составила 0,20% при доле установленной мощности 0,79% [Отчет о функционировании ЕЭС России..., 2022].

Помимо крупных сетевых станций, в ряде стран широко распространено использование СЭС малой мощности для частных домовладений [Renewables..., 2020]. К несомненным плюсам такого рода станций относятся: простота эксплуатации, безопасность для окружающей среды, полная или частичная независимость от централизованных источников электроснабжения и возможность продавать избыток электроэнергии, вырабатываемой СЭС, в случае присоединения такой станции к сети. К сдерживающим факторам использования малых СЭС относятся достаточно высокая стоимость приобретения и установки оборудования, неравномерность выработки электроэнергии в зависимости от погодных условий. Развитию энергообеспечения с использованием ВИЭ в Российской Федерации дол-

жен способствовать Федеральным законам № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон „Об электроэнергетике“ в части развития микрогенерации» от 27 декабря 2019 г.» [Федеральный закон № 471-ФЗ..., 2019]. Объект микрогенерации определяется в нем как объект по производству электрической энергии, в том числе на основе использования возобновляемых источников энергии, мощностью не более 15 кВт, принадлежащий на праве собственности или ином законном основании потребителю электрической энергии. Объект микрогенерации используется для производства электрической энергии для собственных нужд, а также в целях продажи в порядке, установленном основными положениями функционирования розничных рынков. Таким образом, с принятием этого закона владельцы объектов микрогенерации, которые одновременно являются потребителями и производителями электроэнергии (просьюмеры, от англ. production и consume), получили возможность продавать гарантирующим поставщикам и иным энергосбытовым компаниям не потребленные на собственные нужды излишки электроэнергии. Гарантирующие поставщики, в свою очередь, обязаны такие излишки покупать по ценам, не превышающим цены на электрическую энергию и мощность, приобретаемые гарантирующими поставщиками на оптовом рынке. Покупка электроэнергии просьюмером из сети проводится по ценам розничного рынка.

Введение новых инструментов стимулирования возобновляемой энергетики в части объектов микрогенерации требует анализа результативности тех мер поддержки, которые в настоящее время предложены государством. Экономическая эффективность и целесообразность использования солнечной энергетики в частных домохозяйствах определяется рядом факторов, в том числе потенциальной производительностью станций (в среднем по году и в различные сезоны), экономическими факторами (ценой продажи электроэнергии на оптовом рынке, тарифами на электроэнергию для населения, особенностями потребления энергии домохозяйствами просьюмеров), а также стоимостными и техническими характеристиками современных фотоэлектрических установок.

Основой оценок производительности солнечных фотоэлектрических станций и установок малой мощности являются данные о приходящей суммарной солнечной радиации в точке локализации объекта, причем следует учитывать угол наклона приемной поверхности. До недавнего времени источником информации для такого рода исследований на территории России являлись климатические справочники [Справочник по климату СССР..., 1966; Научно-прикладной справочник по климату

СССР..., 1990], которые содержат обобщение многолетних наблюдений на сети актинометрических станций России. Незначительное количество актинометрических станций усложняет территориальные оценки гелиоэнергетических климатических ресурсов, однако в 1990-х гг. такое обобщающее исследование было проведено ГГО им. А.И. Воейкова и представлено в виде Атласов ветрового и солнечного климатов России, которые содержат карты компонентов приходящей солнечной радиации (средние за год, по месяцам и сезонам), а также карты ряда практически востребованных характеристик (производительность фотоэлектродгенераторов и солнечных коллекторов, уровень технического совершенства которых соответствовал периоду подготовки Атласа) [Борисенко, Стадник, 1997]. Важным для оценки потенциала солнечной энергии и прогноза его изменения является изучение трендов актинометрических величин. Такого рода исследования для Московского региона были предприняты в работах [Климатические ресурсы..., 2012; Gorbarenko, 2019]. На основании многолетних актинометрических наблюдений (1954–2012) метеообсерваторией МГУ были выявлены периоды наиболее эффективного использования гелиоэнергетических ресурсов в Московском регионе [Горбаренко, Шиловцева, 2013]. Необходимость оценки приходящей радиации в регионах, не охваченных наземными наблюдениями, определяет в последние годы широкое использование в расчетах ресурсов и потенциалов солнечной энергии – как в России, так и в мире в целом – реанализов (ERA5, MERRA-2), тематических баз данных, включающих данные реанализов и расчетные характеристики, соответствующие задачам солнечной энергетики (METEONORM, NASAPOWER, RETScreen и др.). На основе реанализов и тематических баз данных для территории Российской Федерации в ряде работ были проведены оценки как ресурсов, так и потенциальной производительности типовых солнечных фотоэнергетических установок и станций единичной мощности в регулярной пространственной сетке (так называемый технический потенциал солнечной энергии в точке) [Атлас ресурсов солнечной..., 2010]. Для целей региональных оценок были проведены расчеты суммарного технического потенциала административно-территориальных единиц Российской Федерации при различных допущениях относительно ограничивающих территориальных факторов [Справочник по ресурсам..., 2007; Атлас ресурсов возобновляемой энергии..., 2015].

Для решения задач расчета производительности и оптимизации фотоэлектрических солнечных станций и установок в настоящее время используется целый ряд различных программных

средств (TRNSYS, MATLAB, HOMER, PVSyst и др.), причем как отдельно, так и в комбинации друг с другом. Программные средства отличаются степенью детализации математических моделей, широтой охвата конфигураций систем, гибкостью, стоимостью и сложностью освоения [Rashad et al., 2022; Kumar et al., 2021; Navamani et al., 2019]. Для частных исследовательских задач отдельными научными группами разрабатываются собственные программные продукты. Обзоры характеристик и анализ применения различных расчетных инструментов для климатических условий России приведены в работах [Tarasenko et al., 2020, Габдерахманова, 2019].

В связи с принятым законом РФ о поддержке микрогенерации [Федеральный закон № 471-ФЗ..., 2019], актуальной является не только задача определения годовой производительности фотоэлектрической станции заданной мощности, но и оценка экономической эффективности этих станций, что определяет перспективы внедрения в России данного направления возобновляемой энергетики. Для решения этой задачи в представленной работе предложена методика оценки ресурсной обеспеченности и экономической эффективности использования станций солнечной микрогенерации (ССМ) с учетом комплекса физико-географических и экономических факторов, в том числе типовых графиков нагрузки потребителей и тарифов на покупку-продажу электроэнергии в сеть. Проведены расчеты для ряда регионов РФ, находящихся в различных природно-климатических условиях и ценовых зонах оптового рынка электроэнергии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика оценки ресурсной обеспеченности и расчета производительности станций солнечной микрогенерации. Для решения поставленной задачи необходимо с учетом типовых графиков нагрузки потребителей рассчитать балансы производства энергии станциями солнечной микрогенерации и потребления ее хозяйствами просьюмеров в выбранных регионах. Производительность солнечных фотоэлектрических модулей (ФЭМ), входящих в состав ССМ, определяется величинами входящей солнечной радиации и температурой окружающей среды. Для оценки производительности (выработки электроэнергии) в качестве базового объекта микрогенерации в данной работе была выбрана солнечная сетевая электростанция мощностью 15 кВт. Предполагалось, что станции расположены в ячейках пространственной сетки $1 \times 1^\circ$, в которых находятся следующие населенные пункты: Москва, Санкт-Петербург, Краснодар, Дербент, Астрахань, Оренбург, Новокузнецк, Иркутск, Улан-Удэ, Чита,

Калининград, Усинск, Владивосток, Якутск, Магадан, Петропавловск-Камчатский.

Расчеты средней многолетней производительности ССМ с часовым временным разрешением были проведены на основе специализированной базы данных NASA [The Power Project, 2022]. В ней представлена широкая номенклатура данных, адаптированных для нужд солнечной энергетики, с территориальным разрешением 1° , в том числе часовые суммы суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, температура воздуха на высоте 2 м над уровнем земли за период с 1983 г. по настоящее время и другие метеорологические характеристики. Верификация базы данных NASA на основе наземных актинометрических измерений на территории России была проведена в наших ранних работах, в том числе для Московского региона, например [Коломиец и др., 2016]. Для получения статистически обоснованных результатов и оценки вариаций производительности ССМ, связанных с изменчивостью природных факторов, для каждого района исследования были проведены расчеты на основе данных базы за 2010–2020 гг. Поскольку для увеличения производительности фотоэлектрические модули в абсолютном большинстве случаев располагают наклонно к горизонту, в наших исследованиях был проведен пересчет часовых сумм суммарной солнечной радиации с горизонтальной плоскости на угол, равный широте места, в предположении изотропного рассеяния на основе методики, приведенной в [Даффи, Бекман, 2013, с. 112–118]. Расчеты производительности ССМ с почасовым разрешением проводились с учетом средних технических характеристик современных ССМ, в том числе КПД модулей, температурной зависимости мощности фотоэлектрического модуля, количества инверторов в составе электрической станции и др. Мощность единичного фотоэлектрического модуля P_{mod} (Вт) при температуре воздуха T ($^\circ\text{C}$) и потоке приходящей солнечной радиации A ($\text{Вт}/\text{м}^2$) определялась как:

$$P_{mod} = P_{STC}(A/1000)(1 - g(T_{op} - 25)), \quad (1)$$

где P_{STC} – номинальная мощность модуля, Вт, g – температурный коэффициент мощности модуля, $^\circ\text{C}^{-1}$, $T_{op} = T + (A/800)(N_{oct} - 20)$ – рабочая температура фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в составе модуля, N_{oct} – равновесная температура ФЭП (паспортная характеристика). Алгоритм расчета был верифицирован на основе фактической производительности солнечных сетевых станций РФ в работе [Tarasenko et al., 2020].

Для верификации результатов расчета были использованы данные о выработке энергии на экс-

периментальной сетевой фотоэлектрической установке малой мощности (3 кВт), расположенной на площадке НИЛ ВИЭ географического факультета, за период с 01.04.2019 по 31.03.2020 г. Сравнение результатов расчетов на основе часовых данных базы [The Power Project, 2022] и фактической производительности установки за единый период времени демонстрирует хорошую сходимость и идентичную динамику суммарной месячной производительности: в апреле – мае достигались максимальные значения производительности, а с ноября по февраль – минимальные значения (рис. 1). Наблюдаемое систематическое завышение расчетных значений (от 14 до 108 кВтч/месяц) относительно фактической производительности установки, особенно в зимний и весенне-осенний периоды, объясняются существенным влиянием на производительность установки затенения, которое особенно возрастает в указанные сезоны. Сравнение

результатов измерения приходящей солнечной радиации в плоскости приемной поверхности фотоэлектрических модулей (пиранометр QMS101 фирмы Kipp&Zonen) с данными базы NASA с часовой детализацией подтвердили это предположение, а также правомерность использования этих данных для оценки производительности ССМ в различных регионах РФ.

Методика оценки экономической эффективности использования ССМ с учетом уровня потребления и тарифов на электроэнергию. Под экономической эффективностью понимают величину, характеризующую соотношение между приобретенными результатами деятельности (доход) и затратами на их производство (расход средств, труда и т. д.) [Современная экономическая теория..., 2022]. В данной работе экономическая эффективность ССМ характеризуется годовым доходом от использования станции и сроком ее окупаемости.

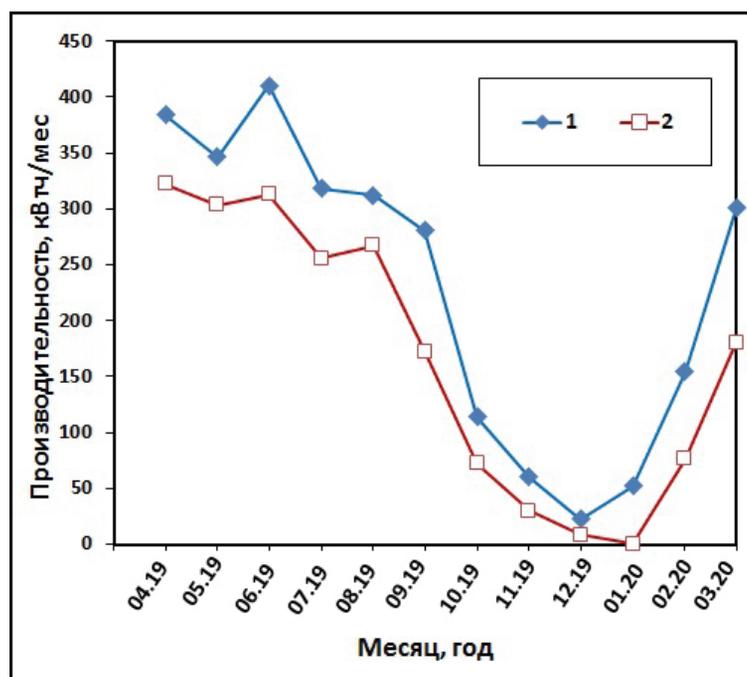


Рис. 1. Производительность экспериментальной сетевой фотоэлектрической установки: 1 – расчетная; 2 – фактическая

Fig. 1. Performance of the experimental network photovoltaic installation: 1 – calculated; 2 – actual

Для расчетов этих характеристик в регионах РФ использовались следующие параметры:

А (руб.) – капитальные затраты на создание ССМ принимались равными 500 тыс. руб., согласно предложений наиболее крупных отечественных производителей и поставщиков фотоэлектрических модулей [Сетевая солнечная..., 2022; Мосэнергосбыт..., 2022]. Комплектация базовой ССМ включала в себя набор ФЭМ общей мощностью 15 кВт и инвертор.

Такая комплектация может быть обеспечена, например, 50 гетероструктурными фотоэлектрическими модулями HVL-300/HJT с заявленной эффективностью 19,0% (производство компании Хевел, <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/>) и сетевым солнечным инвертором SOFAR 15000TL-G2 (3-фазный, мощностью 15 кВт) (<https://gws-energy.ru/setevoy-solnechnyyu-invertor-sofar-15000tl-g2-3-fazy/>). Установка ССМ возможна как на крыше

частного дома, так и на прилегающей территории. Стоимость ССМ может варьировать в зависимости от экономической ситуации в стране, поэтому сроки окупаемости, приведенные в настоящей работе, могут корректироваться введением дополнительного коэффициента, отражающего изменения в стоимости комплектующих на момент оценки.

T (руб./кВтч) – тариф на электроэнергию (ЭЭ) для населения, значение которого варьирует между регионами (табл. 1). В настоящее время в РФ существуют разные виды тарификации электроэнергии на розничном рынке для населения: одноставочные тарифы с постоянной ценой на ЭЭ в течение суток и тариф, дифференцированный по зонам суток. Расчеты были проведены для двух вариантов: одноставочный тариф ($T1$) и двухтарифная система ($T2$) с разделением на пиковую (с 7.00 до 23.00) и ночную (с 23.00 до 7.00) зоны суток. Были выбраны значения тарифов в городских населенных пунктах в домах, оборудованных газовыми плитами [Тарифы..., 2022].

R (руб./кВтч) – цена (тариф) на электроэнергию, выработанную с использованием объекта микрогенерации (ССМ), которую просьюмер может продать гарантирующему поставщику. Этот тариф не должен превышать цену на электрическую энергию и мощность, приобретаемые гарантирующими поставщиками на оптовом рынке. В соответствии с законодательством, механизм расчета стоимости поставленной электроэнергии зависит от принадлежности к ценовой или неценовой зоне оптового рынка, от ценовой категории осуществления расчетов за электроэнергию (от первой до шестой), а также от тарифа на электроэнергию (одноставочный или дифференцируемый в течение суток), используемых владельцем объекта микрогенерации [Постановление..., 2022].

В данной работе в расчетах для населенных пунктов, относящихся к ценовым зонам оптового рынка энергии и мощности (ОРЭМ), использовалась дифференцированная по часам расчетного периода нерегулируемая цена на ЭЭ на оптовом рынке, определяемая по результатам конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед и конкурентного отбора заявок для балансирования энергосистемы по данным [Составляющие..., 2022]. Для населенных пунктов, относящихся к неценовым зонам, использовались фиксированные значения оптовых цен на электроэнергию, устанавливаемые приказами Федеральной антимонопольной службы (ФАС) для конкретных генерирующих компаний. Средние годовые значения оптовых цен на электроэнергию, используемые в расчетах, приведены в таблице 1.

C (кВтч) – уровень потребления электроэнергии объектом (в расчетах рассматривались жилой дом и офис) в заданный промежуток времени. Почасовые

значения потребления электроэнергии (C_i) определяются графиком нагрузки потребителя и могут варьировать в зависимости от природно-климатических условий (длина светового дня, температура окружающей среды) и социальных условий (время нахождения людей на территории объекта, время подъема, отхода ко сну, ухода на работу и возвращения с нее). В данном исследовании использовались два типа графиков нагрузки, построенные на основании статистических исследований, приведенных, в частности, в [Габдерахманова, 2019] (рис. 2):

«ДОМ» – типовой график нагрузки для жилых помещений с небольшим пиком потребления в утренние часы и вторым, более значительным пиком потребления в вечернее время, с достижением пиковой нагрузки в 18 часов. В работе учтено различие величины нагрузки (потребления ЭЭ) между зимним (октябрь – март) и летним (апрель – сентябрь) сезонами;

«ОФИС» – график нагрузки имеет растянутый однородный пик с 8.00 до 19.00 ч, одинаковый во все сезоны года.

Было принято, что суммарное годовое потребление электроэнергии объектом каждого типа (просьюмером) составляет 5,5 МВтч, что соответствует оценкам годового потребления среднего домохозяйства [Габдерахманова, 2019].

P (кВтч) – производительность (выработка) электроэнергии ССМ в заданный промежуток времени, рассчитанная исходя из технических характеристик ССМ, часовых сумм приходящей суммарной солнечной радиации и температуры воздуха для выбранного района исследования (P_i – производительность ССМ за 1 ч).

Δ_i (кВтч) – баланс между производительностью ССМ (P) и уровнем потребления электроэнергии домохозяйством (C) за 1 ч.

Экономическая эффективность использования ССМ определяется суммой за год часовых значений дохода (D_i , руб.), который рассчитывается как разность между суммами, полученными от продажи электроэнергии ($S2_i$) и экономии на покупке ЭЭ ($S1_i$ или $S3_i$) у сетевых поставщиков, с одной стороны, и расходами на покупку недостающей ЭЭ у сетевых поставщиков ($S4_i$), с другой, за каждый час в течение года. При $\Delta > 0$ вся требуемая энергия в данный час вырабатывается солнечной станцией, и экономия на покупке ЭЭ рассчитывается по формуле $S1_i = C_i T$. Кроме того, при $\Delta > 0$ может быть получен дополнительный доход ($S2_i$) от использования ССМ за счет продажи излишка ЭЭ гарантирующему поставщику по цене R : $S2_i = \Delta_i R$. Тогда суммарный доход равен $S1_i + S2_i$ (руб.). При $\Delta_i < 0$ в данный час только часть ЭЭ выработана ССМ, и экономия на покупке ЭЭ рассчитывается по формуле $S3_i = P_i T$.

Таблица 1

Физико-географические и экономические характеристики, определяющие эффективность использования ССМ в районах РФ, выбранных для исследования

Город	Широта (град. с. ш.)	Долгота (град. в. д.)	Угол наклона панели ССМ, ис-пользуемый в расчетах (град.)	Среднегодовая приходящая солнечная энергия при оптимальном угле наклона приемной поверхности (кВтч/(м ² ×день))	Принадлежность к ценовой зоне оптового рынка электроэнергии РФ	Среднегодовая цена закупки электроэнергии на оптовом рынке ЕЭС РФ (руб./кВтч)	Одноставочный тариф для населения (цена с НДС, руб./кВтч)		Многотарифный учет с применением тарифа, дифференцированного по зонам суток (цена с НДС, руб./кВтч)			
							С 01.01.2020 г.	С 01.07.2020 г.	С 01.01.2020 г.		С 01.07.2020 г.	
									«День»	«Ночь»	«День»	«Ночь»
Москва	55,8	37,6	55	3,57	I	1,28	5,47	5,66	6,29	2,13	6,51	2,32
Санкт-Петербург	59,9	30,3	59	3,4	I	1,14	4,75	4,82	5,13	2,96	5,42	3,12
Астрахань	46,3	48,0	46	4,21	I	1,14	4,84	5,01	5,52	3,56	5,76	3,67
Дербент	42,1	48,3	42	4,37	I	0,96	2,58	2,70	2,97	2,06	3,11	2,16
Краснодар	45,0	39,0	45	4,02	I	1,37	4,81	5,02	5,38	2,89	5,62	3,02
Оренбург	51,8	55,1	51	3,98	I	1,19	3,08	3,19	3,54	2,21	3,67	2,28
Улан-Удэ	51,8	107,6	51	3,99	II	0,43	4,04	4,21	4,65	2,42	4,84	2,53
Чита	52,0	113,5	52	4,3	II	0,85	3,08	3,22	3,54	2,31	3,70	2,41
Иркутск	52,3	104,3	52	3,75	II	0,81	1,11	1,17	1,28	0,74	1,35	0,78
Новокузнецк	53,8	87,1	53	3,84	II	0,91	3,43	3,59	3,94	2,23	4,13	2,33
Калининград	54,7	20,5	54	3,28	A	2,87	4,20	4,36	4,83	3,36	5,01	3,49
Усинск	66,0	57,6	65	2,84	B	2,41	4,72	4,90	5,43	2,84	5,64	2,94
Владивосток	43,1	131,9	43	4,47	B	1,43	3,80	3,97	4,37	1,64	4,57	1,71
Якутск	62,0	129,7	62	3,38	B	1,08	6,19	6,50	6,23	4,03	6,54	4,23
Магадан	59,6	150,8	59	3,5	ТИЭС	3,71	7,62	7,46	8,25	5,74	8,58	5,97
Петропавловск-Камчатский	53,0	158,6	53	3,57	ТИЭС	3,37	6,80	6,69	7,69	5,35	7,69	5,35

Примечание: А – неценовая зона Калининградской области; Б – неценовая зона Республики Коми; В – неценовая зона Дальнего Востока; ТИЭС – технологически изолированная энергосистема.

Однако в этом случае выработка ЭЭ ниже заданного уровня потребления, следовательно, необходимо докупать ЭЭ у гарантирующего поставщика по тарифу T , что приводит к появлению расхода $S4_i = \Delta_i T$ (руб.). В итоге в случае $\Delta_i > 0$, доход за час рассчитывается как $(S1_i + S2_i)$, а при $\Delta_i < 0$ – как $(S3_i - S4_i)$.

Суммарный годовой доход (D) рассчитывается как сумма почасовых значений D_i за 8760 часов года.

Срок окупаемости ССМ (N , лет) рассчитывается как делением капитальных затрат при строительстве

объекта микрогенерации (A) на суммарный годовой доход (D). Принимается, что операционные затраты равны нулю.

Для каждого района исследования были выполнены четыре варианта расчетов: для каждого из двух типов потребления «ДОМ» и «ОФИС» по одноставочному ($T1$) и двухставочному ($T2$) розничному тарифам на электроэнергию для населения. Алгоритм расчета экономической эффективности приведен на рис. 3.

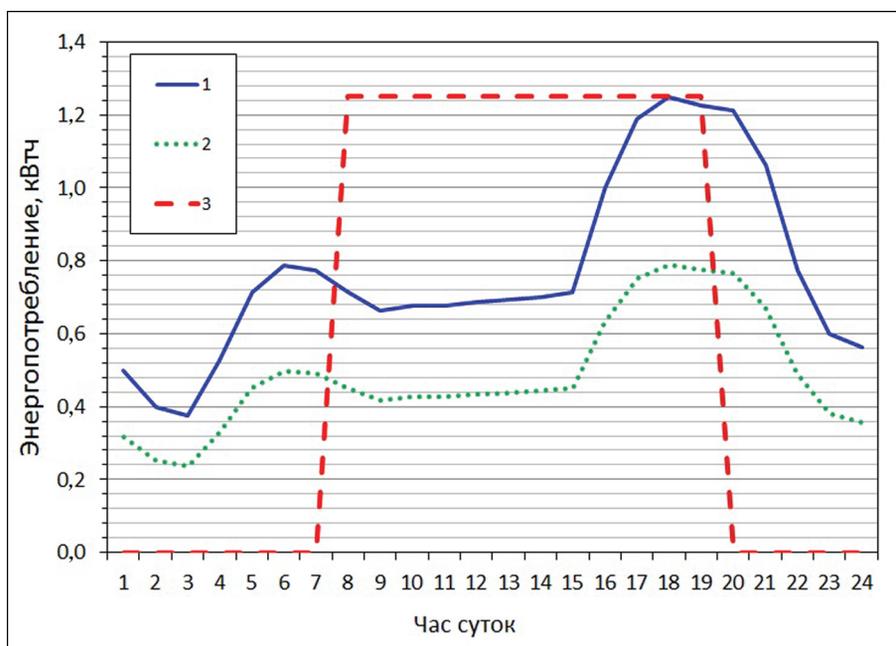


Рис. 2. Графики нагрузки потребителей электроэнергии, используемые для расчетов (построены на основе статистических исследований [Габдерахманова, 2019]): 1 – дом (зима); 2 – дом (лето); 3 – офис

Fig. 2. Graphs of the load of electricity consumers, used for calculations (based on statistical studies in [Gabderakhmanova, 2019]): 1 – house (winter); 2 – house (summer); 3 – office

Выбор регионов для исследования. Экономическая эффективность использования ССМ в частных домохозяйствах может значительно варьировать между разными регионами страны – даже при условии использования станций одинаковой мощности и стоимости – в зависимости от природных и социально-экономических факторов.

Для проведения анализа факторов, влияющих на эффективность использования объектов солнечной микрогенерации на территории РФ, как указано выше, был выбран ряд районов вблизи населенных пунктов (обычно центров административных образований РФ), различающихся по физико-географическим и экономическим характеристикам (см. табл. 1). Термин «район» в данном случае означает ячейку пространственной сетки размером $(1 \times 1^\circ)$. Такой подход связан с использованием в качестве

источника необходимой для расчетов метеорологической и актинометрической информации базы данных NASA, имеющей пространственную детализацию до градуса. Безусловно, в пределах территории района могут наблюдаться локальные вариации в приходе солнечной радиации, которые на данном уровне исследований не учитываются. Ранее проведенные оценки [Tarasenko et al., 2020] показывают, что пространственные вариации производительности станций в указанных границах ячейки сетки не превышают 10%.

При выборе районов ставилась задача рассмотреть влияние на экономическую эффективность ССМ следующих факторов (см. табл. 1):

Экономических:

– принадлежность к «ценовой» / «неценовой» зоне ОРЭМ РФ;

- цена закупки электроэнергии на оптовом рынке ЕЭС РФ;
 - розничные тарифы на электроэнергию.
- Физико-географических:

- уровень приходящей солнечной радиации и характер ее распределения в течение года;
- температура воздуха в течение расчетного периода (год) с почасовой детализацией.

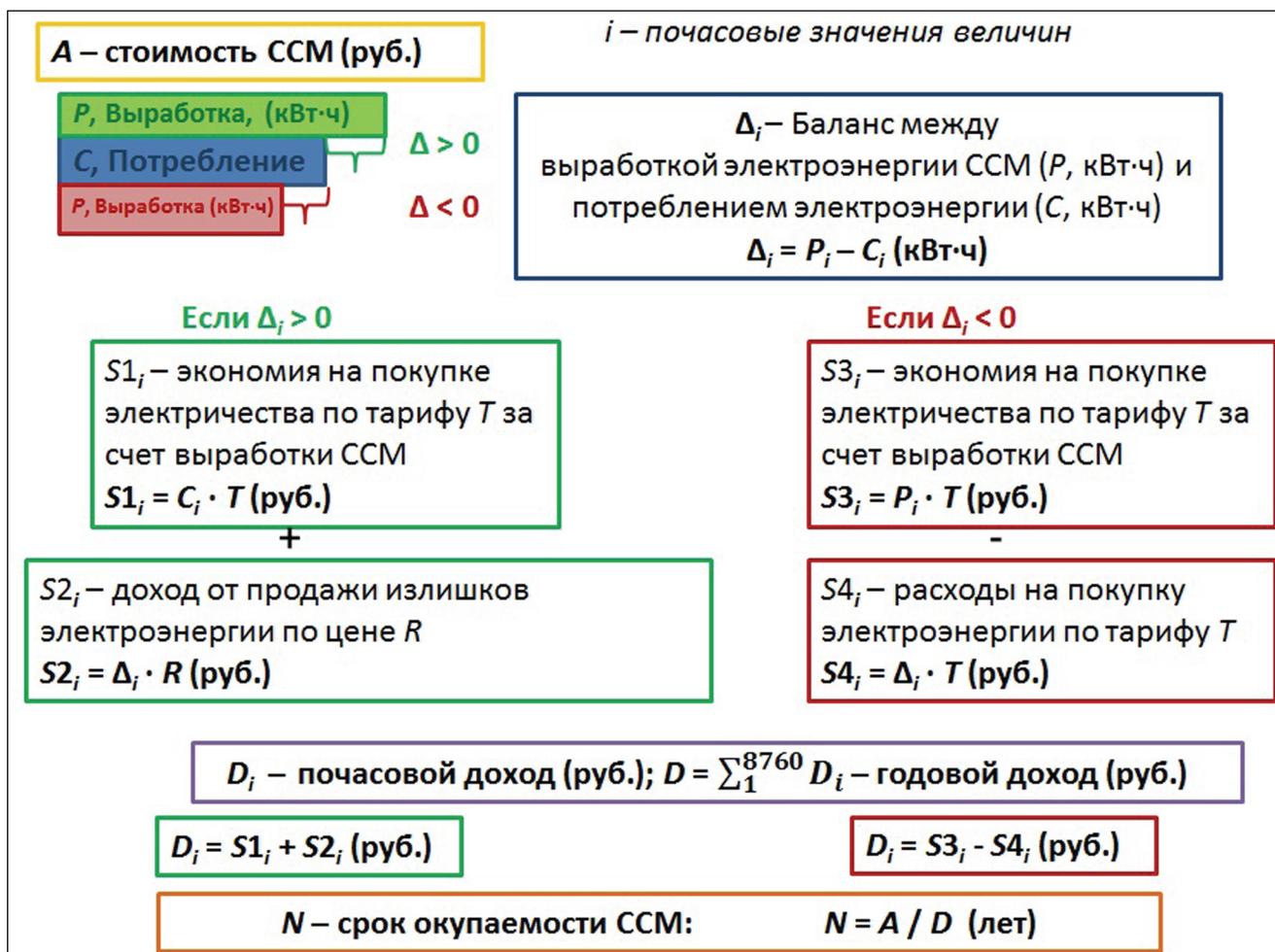


Рис. 3. Алгоритм расчета экономической эффективности использования ССМ.

Параметры Δ , P , C , $S1$, $S2$, $S3$, $S4$ и D_i рассчитываются для каждого часа и далее могут суммироваться для необходимого отрезка времени; D – годовой доход (руб.) рассчитывается как сумма почасовых значений D_i за 8760 часов года

Fig. 3. Algorithm for calculating the economic efficiency of using SMS.

Parameters Δ , P , C , $S1$, $S2$, $S3$, $S4$ and D_i are calculated for each hour and could be summed up for the required period of time; D – annual income (rubles) is calculated as a sum of hourly D_i values for 8760 hours of the year

Принадлежность к разным зонам оптового рынка электрической энергии и мощности РФ [Оптовый рынок..., 2022], неценовым зонам и технически изолированным энергорайонам (ТИЭС) определяет вариации тарифов на продажу электроэнергии для населения. Значения среднего годового уровня приходящей солнечной радиации (суточных сумм суммарной солнечной радиации, поверхность с углом наклона к горизонту, равном широте) для выбранных районов варьируют от ~4,5 кВтч/м² в сутки (Туапсе/Сочи, Дербент/Махачкала, Владивосток) до менее 3 кВтч/м² в сутки (Архангельск, Усинск/Сыктывкар) [Атлас ресурсов солнечной...,

2010; The Power Project, 2022] (см. табл. 1). Помимо суммарной годовой производительности большое влияние на эффективность использования ССМ оказывают вариации выработки ЭЭ в течение года. В большинстве выбранных регионов приход радиации (и, следовательно, производительность ССМ) имеет значительную сезонную амплитуду вариаций. Стоит отметить, что ряд районов исследования со сходными физико-географическими условиями значительно отличаются по величинам тарифов на ЭЭ для населения. В результате удалось подобрать районы, которые, имея сходную среднюю годовую приходящую радиацию, существенно отличаются

по экономическим факторам (например, Москва – Якутск; Иркутск – Улан-Удэ – Чита).

Таким образом, выбор районов для проведения оценок и сравнительного анализа достаточно полно отражает картину возможных диапазонов эффективности использования ССМ на территории РФ с точки зрения сочетания физико-географических и экономических факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных расчетов производительности ССМ мощностью 15 кВт для периода с

2010 по 2020 г. в выбранных районах Российской Федерации представлены в таблице 2. Значения годовой выработки электроэнергии варьируют в среднем от 12 750 кВтч/год в Усинске до 23 076 кВтч/год в Чите. Коэффициент использования установленной мощности (Киум, %) – параметр, который характеризует эффективность работы оборудования, – изменяется соответственно от 10 до 17%. Относительные отклонения годовых значений производительности от среднего значения за 2010–2020 гг. составили от 4 до 12%. Эти величины могут рассматриваться в качестве погрешности проведенных оценок годового дохода и периода окупаемости ССМ.

Таблица 2

Суммарная годовая выработка электроэнергии (производительность, МВтч/год) ССМ мощностью 15 кВт в районах исследований по данным за 2010–2020 гг.

Район исследований	Среднее за 2010–2020 гг.	Относительное отклонение от среднего за 2010–2020 гг. (%)	КИУМ, среднее за 2010–2020 гг. (%)
Москва	14,7	11,3	11
Санкт-Петербург	13,5	9	10
Астрахань	20,4	5,1	15
Дербент	18,7	9,2	14
Краснодар	18,8	4	14
Оренбург	20,5	8,4	16
Улан-Удэ	22,2	5	17
Чита	23,1	5,2	17
Иркутск	22,6	4,1	17
Новокузнецк	20,6	7,2	16
Калининград	15,2	7,7	12
Усинск	12,8	12,2	10
Владивосток	22,4	5,1	17
Якутск	18,0	4,3	14
Магадан	17,1	6,6	13
Петропавловск-Камчатский	21,2	6,1	16

Были выявлены существенные различия в вариациях суммарной ежемесячной выработки электроэнергии ССМ в течение года для разных районов, которые определяются комплексом локальных физико-географических условий (в первую очередь, приходом солнечной радиации и внутригодовой динамикой температуры воздуха). Можно выделить два типа вариаций:

1. Высокая и относительно стабильная производительность ССМ в течение летнего периода со значительным снижением производительности в остальные сезоны года. Данный тип распределения

производительности характерен для районов европейской части России (Москва, Санкт-Петербург, Краснодар, Калининград, Астрахань, Дербент и др.).

2. Значительный максимум производительности ССМ в феврале – апреле с последующим снижением значений выработки в течение летнего периода (май – сентябрь) и дальнейшим снижением в осенне-зимний период (октябрь – январь). Такое распределение производительности отмечается для Владивостока, Иркутска, Читы, Улан-Удэ, Петропавловска-Камчатского, Новокузнецка, Магадана и Оренбурга.

Результаты, полученные в настоящей работе, согласуются с предыдущими исследованиями распределения солнечных ресурсов на территории России [Пивоварова, Стадник, 1988; Атлас ресурсов солнечной..., 2010]. В частности, характерная внутrigодовая динамика выработки электроэнергии, наблюдаемая в Приморье и Петропавловске-Камчатском с пиком производительности в феврале – апреле по сравнению с летними месяцами также объясняется погодными особенностями: в весенний период в этих регионах устанавливаются антициклоны, способствующие солнечной, малооблачной погоде. Но в летне-осенний период в результате прохождения циклонов и повышенной облачности закономерно снижается уровень приходящей солнечной радиации.

Оценка экономической эффективности, выраженная в виде сроков окупаемости ССМ мощностью 15 кВт для районов исследования с учетом тарифов на электроэнергию за 2020 г., представлена на рисунке 4. Рассчитанные сроки окупаемости значительно варьируют между регионами и зависят – помимо физико-географических условий – от типа тарификации ЭЭ и графиков потребления энергии просьюмерами. В результате годовой доход может составить от 7300 руб. (в Улан-Удэ для потребителей типа «ДОМ-Т1») до 84 600 руб. (в Петропавловске-Камчатском для потребителей типа «ОФИС-Т2»). При этом сроки окупаемости объектов составляют от 68 до 6 лет соответственно.

Было бы логично предположить, что использование ССМ наиболее эффективно в районах с наибольшей выработкой электроэнергии, связанной с обеспеченностью солнечными ресурсами. Однако относительно короткие сроки окупаемости (6–15 лет) наблюдаются в районах с не самой высокой производительностью ССМ, но при этом с высокими ценами на продажу излишков электроэнергии (например, Калининград, Магадан, Петропавловск-Камчатский). Значимость влияния экономических факторов подтверждается более высоким коэффициентом корреляции годового дохода и периода окупаемости со значениями среднегодовых оптовых цен на электроэнергию в районах исследования ($R^2 = 0,79$).

Иркутск, Улан-Удэ и Чита характеризуются близкими значениями производительности солнечной станции (около 22 000 кВтч/год). Однако величины экономической эффективности и срока окупаемости значительно различаются (более 65 лет для Улан-Удэ и около 30 лет для Иркутска и Читы). Данный факт объясняется вариациями и соотношением розничных и оптовых цен на электроэнергию в этих соседних регионах.

Что касается влияния графиков нагрузки потребителей на экономическую эффективность, то

наиболее высокий годовой доход и приемлемый срок окупаемости ССМ могут быть достигнуты в помещениях с преимущественным потреблением электроэнергии в дневное время (тип «ОФИС») при использовании двухставочного тарифа на электроэнергию. Остальные типы потребителей имеют более низкие показатели экономической эффективности.

Для анализа вклада в величину экономической эффективности использования ССМ основных используемых в расчетах физико-географических и экономических факторов было проведено ранжирование и разделение на группы районов по значениям следующих параметров: среднегодовой приход солнечной радиации на наклонную поверхность с углом наклона, равным широте (<3,5; 3,5–4,0; >4,0 кВтч/(м²·день)), одноставочный тариф покупки энергии из сети для населения (2,5–4,0; 4,0–5,0; >5,0 руб./кВтч, отдельно выделен Иркутск с тарифом 1,1 руб./кВтч), среднегодовая цена закупки электроэнергии на оптовом рынке ЕЭС РФ (<1,0; 1,0–2,0; >2,0 руб./кВтч).

На рисунке 4 показано распределение сроков окупаемости ССМ для четырех видов графиков нагрузки в зависимости от указанных выше параметров для исследованных районов. Не наблюдается явной взаимосвязи между значениями сроков окупаемости, с одной стороны, уровнем инсоляции (см. рис. 4А) и розничным тарифом на энергию для населения, с другой (см. рис. 4Б). В то же время группа районов с наибольшими значениями оптовой цены на электроэнергию (>2,0 руб./кВтч) выделяется наименьшими сроками окупаемости ССМ (см. рис. 4В).

В течение года отдельные сезоны (месяцы) являются наиболее продуктивными с точки зрения экономической эффективности в соответствии с динамикой производительности ССМ по месяцам года в данных районах. При этом в зимние и осенние месяцы в некоторых регионах отмечаются отрицательные величины дохода. Это связано с недостатком выработки электроэнергии на ССМ для компенсации собственного потребления и преобладанием закупки электроэнергии из сети над продажей излишков.

Наибольший доход от использования ССМ в летние месяцы отмечается в районах с относительно низким уровнем инсоляции, в которых, однако, установлены наиболее высокие оптовые цены на электроэнергию: Магадан, Петропавловск-Камчатский, Калининград, Усинск, относящиеся к неценовым и территориально-изолированным зонам на рынке ОРЭМ РФ.

На основании данных, полученных для 16 районов методом множественного регрессионного анализа, было получено уравнение зависимости

годового дохода использования ССМ от основных физико-географических и экономических факторов для графика нагрузки «ДОМ-Т1»:

$$Y = -48,9 + 12X_1 + 15,9X_2 + 0,01X_3, \quad (1)$$

где Y – годовой доход от использования ССМ (тыс. руб.); X_1 – среднегодовая инсоляция (кВтч/(м²·день)) при оптимальном угле наклона панели; X_2 – среднегодовая цена закупки электроэнергии на оптовом рынке ЕЭС РФ (руб./кВтч); X_3 – одноставочный тариф для населения (цена с НДС, руб./кВтч).

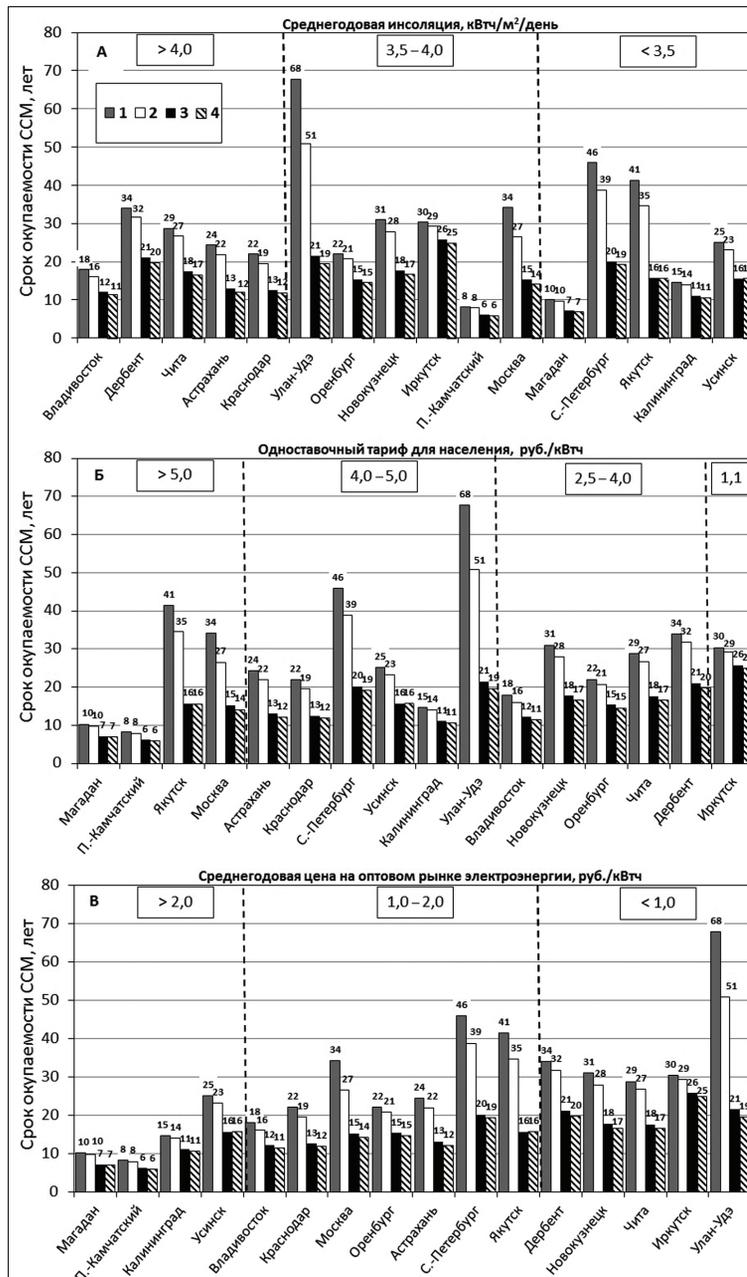


Рис. 4. Сводные диаграммы срока окупаемости ССМ в районах исследований для четырех вариантов расчетов: 1 – ДОМ-Т1; 2 – ДОМ-Т2; 3 – ОФИС-Т1; 4 – ОФИС-Т2. Районы исследований ранжированы и разделены на группы по значениям следующих параметров: А – среднегодовая инсоляция при оптимальном угле наклона панели; Б – одноставочный тариф на покупку электроэнергии населением; В – среднегодовая цена закупки электроэнергии на оптовом рынке ЕЭС РФ, равная цене продажи излишков энергии от ССМ

Fig. 4. Summary diagrams of the payback period of the SMS in the study areas for four calculation options: 1 – HOUSE-T1; 2 – HOUSE-T2; 3 – OFFICE-T1; 4 – OFFICE-T2. The study areas are ranked and divided into groups according to the values of the following parameters: А – average annual insolation at the optimal panel tilt angle; Б – single-rate tariff for the purchase of electricity by population; В – average annual purchase price of electricity at the wholesale market of the UES of the Russian Federation, equal to the price of selling excess energy from the SMS

Для большинства рассмотренных в работе районов отклонение результатов расчета годового дохода по предложенной методике от регрессионного уравнения находится в пределах 15 отн. %.

С помощью уравнения (1) можно провести быструю количественную оценку годового дохода от использования ССМ при заданных параметрах, характеризующих конкретный населенный пункт. Однако для получения более надежных количественных оценок и анализа возможного годового дохода необходимо проведение расчетов по методике, использующей не усредненные, а почасовые значения вводных параметров, варьирующих в течение года, предложенной выше в нашей работе.

ВЫВОДЫ

При проведении расчетов, сравнительного анализа и моделирования в целях предложений более адекватных тарифов для солнечных станций микрогенерации может быть использована методика, основанная на почасовых данных о входящей солнечной радиации, температуре воздуха, текущих тарифах на покупку и продажу электроэнергии на оптовом и розничном рынках, а также графиках нагрузки потребителей для различных районов России.

Экономическая эффективность использования ССМ в районах исследований (годовой доход и срок окупаемости станции) варьирует в широких пределах и определяется комплексом факторов: ресурсами солнечной энергии, тарифами на электро-

энергию, а также графиком нагрузки потребителей. Последний фактор требует управления потреблением и/или объединения просьюмеров в локальную сеть для преимущественного потребления всей выработанной энергии в пределах этого объединения.

Несмотря на значительные ресурсы солнечной энергии в районах Южной Сибири (Иркутск, Улан-Удэ), срок окупаемости ССМ здесь является максимальным: неоптимальные с точки зрения микрогенерации тарифы нивелируют значение физико-географических условий.

В принятых в настоящее время тарифных условиях лишь районы, относящиеся к неценовым зонам и ТИЭС оптового рынка (Магаданская и Калининградская области, Камчатский и Приморский края), могут рассматриваться как перспективные и привлекательные для потенциальных владельцев солнечных станций микрогенерации, поскольку обеспечивают их окупаемость в пределах гарантированного срока эксплуатации (20 лет). Также потенциально перспективными являются южные регионы европейской части России.

Для проведения более точных оценок возможности и целесообразности использования станций солнечной микрогенерации в разных регионах РФ требуется более детальное исследование влияния на их производительность ряда физико-географических факторов: характеристик твердых осадков (уровень снежного покрова), запыленность атмосферы, приводящих к сезонному снижению производительности ССМ, и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России / Т.И. Андреевко, Т.С. Габдрахманова, О.В. Данилова и др. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 160 с.
- Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель и др. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 83 с.
- Борисенко М.М., Стадник В.В. Атласы ветрового и солнечного климатов России. СПб.: Изд-во ГГО им. А.И. Воейкова, 1997. 60 с.
- Габдрахманова Т.С. Исследование энергетической и экономической эффективности фотозлектрических систем микрогенерации в условиях Российской Федерации: дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 152 с.
- Горбаренко Е.В., Шиловцева О.А. Гелиоэнергетические ресурсы Москвы // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 6-2(128). С. 28–35.
- Даффи Д., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики: учебно-справочное руководство / пер. с англ. Долгопрудный: Интеллект, 2013. С. 112–118.
- Климатические ресурсы солнечной энергии московского региона / Г.М. Абакумова и др. М.: Либроком, 2012. 310 с.
- Коломиец Ю.Г., Горбаренко Е.В., Киселева С.В., Мордынский А.В., Фрид С.Е., Шиловцева О.А. Актинометрические данные для проектирования солнечных энергоустановок в Московском регионе // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2016. № 21–22. С. 12–24.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 13. Серия 3: Многолетние данные. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. Ч. 1. С. 70–135.
- Пивоварова З.И., Стадник В.В. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 291 с.
- Справочник по климату СССР. Вып. 8. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. Ч. 1. 79 с.
- Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / под ред. П.П. Безруких. М.: ИАЦ «Энергия», 2007. 270 с.
- Gorbarenko E.V. Sunshine Variability in Moscow in 1955–2017, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, no. 44, p. 384–393, DOI: 10.3103/S1068373919060037.
- Kumar R., Rajoria C.S., Sharma A., Suhag S. Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study, *Materials Today: Pro-*

- ceedings*, 2021, no. 46, p. 5322–5328, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.785.
- Navamani J.D., Lavanya A., Prahadheeshwar C.M. Riyazudeen S.M. Hybrid power system design using Homer Pro, *Int. J. Recent Technol. Eng. (IJRTE)*, 2019, vol. 8, no. 1S4, p. 605–609.
- Rashad M., Zabnienska-Gora A., Norman L., Jouhara H. Analysis of energy demand in a residential building using TRNSYS, *Energy*, 2022, vol. 254, p. 124357, DOI: 10.1016/j.energy.2022.124357.
- Tarasenko A.B., Kiseleva S.V., Popel O.S., Frid S.E., Gabderakhmanova T.S., Avezova N.R., Simonov V.M., Suleimanov M.Zh. Comparative analysis of simulation models for network photovoltaic power plants, *Applied Solar Energy*, 2020, vol. 56, no. 3, p. 212–218.
- Электронные ресурсы*
- Мосэнергосбыт. Акционерное общество. URL: <https://mes-elektrik.ru/catalog/197/setevaya-ses-komplekt-rasshirennyu/> (дата обращения 10.07.2022).
- Оптовый рынок электрической энергии и мощности. Ассоциация «НП Совет рынка». URL: <https://www.npsr.ru/ru/market/wholesale/index.htm> (дата обращения 10.02.2022).
- 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 (дата обращения 17.02.2022).
- Постановление Правительства РФ от 2 марта 2021 года № 299 «О внесении изменений в некоторые акты правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103060015> (дата обращения 17.02.2022).
- Сетевая солнечная электростанция С5, Хевел. Группа компаний. URL: <https://www.hevelsolar.com/catalog/network/setevaya-solnechnaya-elektrostanciya-s5/> (дата обращения 10.07.2022).
- Современная экономическая теория. URL: <http://modern-ecan.ru/vvedenie/problemu/potrebnosti-i-resursy/effektivnost.html> (дата обращения 16.02.2022).
- Составляющие предельных уровней нерегулируемых цен. Администратор торговой системы. URL: <http://www.atsenergo.ru/results/market/svnc> (дата обращения 10.02.2022).
- Тарифы на электроэнергию для населения. URL: <https://energovopros.ru/issledovaniya/2322/2323/34883/#tarif> (дата обращения 16.02.2022).
- Федеральный закон № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон „Об электроэнергетике“ в части развития микрогенерации» от 27 декабря 2019 года. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912280019> (дата обращения 17.02.2022).
- BP Statistical Review of World Energy 2021. 70th edition, URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (дата обращения 10.02.2022).
- The Power Project, *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources*, URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата обращения 16.02.2022).
- Renewables 2020. Analysis and forecast to 2025, International Energy Agency (IEA), 2020, URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020> (дата обращения 12.02.2022).

Поступила в редакцию 02.03.2022

После доработки 16.08.2022

Принята к публикации 22.09.2022

RESOURCES AVAILABILITY FOR SOLAR MICROGENERATION AND ITS ECONOMIC EFFICIENCY IN THE REGIONS OF RUSSIA

A.I. Skafarik¹, S.V. Kiseleva²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Environmental Management, postgraduate student; e-mail: skafarik@mail.ru*

² *Research Laboratory of Renewable Energy Sources, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: k_sophia_v@mail.ru*

Measures to support electricity generation at low-power plants using the renewable energy sources as well, which were introduced in the Russian Federation, actualized the task of assessing the effectiveness of such legislative initiatives. The paper presents and tests a methodology for assessing the performance and economic efficiency of network photovoltaic stations, depending on physical-geographical and socio-economic factors. The results of assessing the potential performance of stations in various regions of Russia, obtained on the basis of archives of data on incoming solar radiation for the period from 2010 to 2020, are presented with one hour resolution. It is shown that economic efficiency of Solar Microgeneration Stations (SMS) in the study areas varies widely depending on the combination of such factors as the amount of solar radiation, retail and wholesale electricity tariffs, and the regime of electricity consumption by SMS owners. Despite significant solar energy resources, the payback period of photovoltaic stations in the regions of Southern Siberia (Irkutsk, Ulan-Ude) turned out to be the longest among all areas under study because of the established tariffs for elec-

tricity sale and purchase. Optimal conditions for the operation of such stations are characteristic only for the regions of Russia that belong to non-price zones and territorially isolated energy systems of the wholesale market (Magadan and Kaliningrad regions, Kamchatka, Primorsky Krai), where high wholesale electricity prices make the payback expectable within the guaranteed life of the station equipment (20 years).

Keywords: solar energy, microgeneration, power plant productivity, electricity tariffs, consumer load curves

REFERENCES

- Atlas resursov solnechnoi energii na territorii Rossii* [Atlas of solar energy resources in Russia], O.S. Popel', S.E. Frid, Yu.G. Kolomiets, S.V. Kiseleva, E.N. Terekhova, Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology Publ., 2010, 83 p. (In Russian)
- Atlas resursov vozobnovlyaemoi energii na territorii Rossii* [Atlas of Renewable Energy Resources in Russia], T.I. Andreenko, T.S. Gabderakhmanova, O.V. Danilova et al., Moscow, Higher School of Economics Publ., 2015, 160 p. (In Russian)
- Borisenko M.M., Stadnik V.V. *Atlasy vetrovogo i solnechnogo klimatov Rossii* [Atlas of wind and solar climates of Russia], Saint-Petersburg, GGO im. A.I. Voikovaya Publ., 1997, 60 p. (In Russian)
- Daffi D., Bekman U. *Osnovy solnechnoi teploenergetiki. Uchebno-spravochnoe rukovodstvo* [Fundamentals of Solar Thermal Energy: A Training and Reference Guide], Dolgoprudny, Intellect Publishing House, 2013, 885 p. (In Russian)
- Gabderakhmanova T.S. *Issledovanie energeticheskoi i ekonomicheskoi effektivnosti fotoelektricheskikh sistem mikrogeneratsii v usloviyakh Rossiiskoi Federatsii* [Study of the energy and economic efficiency of photovoltaic systems of microgeneration in the Russian Federation], Ph.D. Thesis in Technics, Moscow, 2019, 152 p. (In Russian)
- Gorbarenko E.V. Sunshine Variability in Moscow in 1955–2017, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, no. 44, p. 384–393, DOI: 10.3103/S1068373919060037.
- Gorbarenko E.V., Shilovtseva O.A. Gelioenergeticheskie resursy Moskvy [Solar power resources of Moscow], *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, 2013, no. 6-2(128), p. 28–35, (In Russian)
- Klimaticheskie resursy solnechnoi energii moskovskogo regiona* [Climatic solar energy resources of the Moscow region], G.M. Abakumova et al., Moscow, Librokom Publ., 2012, 310 p. (In Russian)
- Kolomiets Yu.G., Gorbarenko E.V., Kiseleva S.V., Mordynskii A.V., Frid S.E., Shilovtseva O.A. Aktinometricheskie dannye dlya proektirovaniya solnechnykh energoustanovok v Moskovskom regione [Actinometric data for the design of solar power plants in the Moscow region], *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* (ISJAE), 2016, no. 21–22, p. 12–24. (In Russian)
- Kumar R., Rajoria C.S., Sharma A., Suhag S. Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study, *Materials Today: Proceedings*, 2021, no. 46, p. 5322–5328, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.785.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR, vyp. 13, seriya 3, Mnogoletnie dannye* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR, is. 13, series 3, Long-term data, part 1], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, ch. 1, p. 70–135. (In Russian)
- Navamani J.D., Lavanya A., Prahadheeshwar C.M., Riyazudeen S.M. Hybrid power system design using Homer Pro, *Int. J. Recent Technol. Eng. (IJRTE)*, 2019, vol. 8, no. 1S4, p. 605–609.
- Pivovarova Z.I., Stadnik V.V. *Klimaticheskie kharakteristiki solnechnoi radiatsii kak istochnika energii na territorii SSSR* [Climatic characteristics of solar radiation as an energy source on the territory of the USSR], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, 291 p. (In Russian)
- Rashad M., Zabnienska-Gora A., Norman L., Jouhara H. Analysis of energy demand in a residential building using TRNSYS, *Energy*, 2022, vol. 254, p. 124357, DOI: 10.1016/j.energy.2022.124357.
- Spravochnik po klimatu SSSR, vyp. 8* [Reference book on the climate of the USSR, iss. 8, part 1], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967, ch. 1, p. 70–135. (In Russian)
- Spravochnik po resursam vozobnovlyaemykh istochnikov energii Rossii i mestnym vidam topliva (pokazateli po territoriyam)* [Handbook on Renewable Energy Resources in Russia and Local Fuels (Indicators by Territories)], P.P. Bezrukikh (ed.), Moscow, IATs Energiya Publ., 2007, 270 p. (In Russian)
- Tarasenko A.B., Kiseleva S.V., Popel O.S., Frid S.E., Gabderakhmanova T.S., Avezova N.R., Simonov V.M., Suleimanov M.Zh. Comparative analysis of simulation models for network photovoltaic power plants, *Applied Solar Energy*, 2020, vol. 56, no. 3, p. 212–218.
- Web-sources*
- BP Statistical Review of World Energy 2021, 70th edition, URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (access date 10.02.2022).
- Federal'nyi zakon no. 471-FZ "O vnesenii izmenenii v Federal'nyi zakon "Ob elektroenergetike" v chasti razvitiya mikrogeneratsii" ot 27 dekabrya 2019 goda [Federal Law no. 471-FZ "On Amendments to the Federal Law "On the Electric Power Industry" in Part of the Development of Microgeneration" of December 27, 2019], URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912280019> (access date 17.02.2022).
- Mosenergosbyt. Aktsionerhoe obshchestvo [Mosenergosbyt. Official website], URL: https://mes-elektrik.ru/catalog/197/?utm_source=email_0521&utm_medium=mes&utm_campaign=hevel_sale_fl (access date 16.02.2022).
- Optoviy rynek elektricheskoi energii I moshchnosti [Wholesale market of electric energy and power], Ofitsial'nyi sait Assotsiatsii "NP Sovetrynka" [Official website of the Association "NP Market Council"], URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm> (access date 10.02.2022).
- Otchet o funktsionirovanii EES Rossii v 2021 godu [Report on the functioning of the UES of Russia in 2021],

- Ofitsial'nyi sait Sistemnogo operatora Edinoi energeticheskoi sistemy [Official website of the System Operator of the Unified Energy System], URL: https://www.sops.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf (access date 17.02.2022).
- Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 2 marta 2021 goda no. 299 "O vnesenii izmenenii v nekotorye akty pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii v chasti opredeleniya osobennosti pravovogo regulirovaniya otnoshenii po funktsionirovaniyu ob"ektov mikrogeneratsii" [Decree of the Government of the Russian Federation of March 2, 2021 no. 299 "On Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation in Part of Determining the Peculiarities of Legal Regulation in Relation to the Operation of Microgeneration Facilities"], URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103060015> (access date 17.02.2022).
- Renewables 2020. Analysis and forecast to 2025, International Energy Agency (IEA), 2020, URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020> (access date 12.02.2022).
- Setevaya solnechnaya elektrostancia C5, Hevel Group, URL: <https://www.hevelsolar.com/catalog/network/setevaya-solnechnaya-elektrostanciya-s5/> (access date 10.07.2022).
- Sostavlyayushchie predel'nykh urovnei nereguliruemyykh tsen [Components of marginal levels of unregulated prices], Ofitsial'nyi sait Administratora trgovoi sistemy [Official website of the Administrator of the trading system.], URL: <http://www.atsenergo.ru/results/market/svnc> (access date 10.02.2022).
- Sovremennaya ekonomicheskaya teoriya [Modern economic theory], URL: <http://modern-econ.ru/vvedenie/problemy/potrebnosti-i-resursy/effektivnost.html> (access date 16.02.2022).
- Tarifny na elektroenergiyu dlya naseleniya [Electricity tariffs for the population], URL: <https://energovopros.ru/issledovaniya/2322/2323/34883/#tarif> (access date 16.02.2022).
- The Power Project, NASA Prediction of Worldwide Energy Resources, URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (access date 16.02.2022).

Received 02.03.2022

Revised 16.08.2022

Accepted 22.09.2022