

УДК 004.942:621.311

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.44.1.008](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.008)

Прогнозирование и оценка выработки энергии на солнечных станциях: состояние проблемы и тенденции развития

И.С. Лоба¹, Д.А. Мачуева², И.М. Ажмухамедов³

¹Армавирский государственный педагогический университет, Армавир,
Краснодарский край, Российская Федерация

²Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад.
М.Д. Миллионщикова, Грозный, Российская Федерация

³Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, Астрахань,
Российская Федерация

Резюме. Рассматриваются актуальные вопросы, связанные с проблемой расчетов и прогнозирования при выработке солнечной электроэнергии как возобновляемого источника энергии. Для обнаружения проблем выявлены исходные данные для моделирования и их источники. Источники исходных данных для моделирования систематизированы, и для каждого приведен пример. Анализ состояния мирового энергетического рынка и положение государственной политики в области энергетики в России показал, что необходимо уделять внимание вопросам солнечной энергии и решать проблемы прогнозирования выработки электроэнергии. Это связано не только с доступностью ресурсов, но и экологичностью. Рассмотрена классификация существующих моделей и методов прогнозирования выработки энергии солнечной электростанции (СЭС). Существующие методики позволяют производить расчеты по прогнозированию мощности выработки электроэнергии, но приводят средние показатели за год. Требуется новые технологические и инновационные методы для решения существующей проблемы. Представлены ключевые факторы и аспекты внедрения и эксплуатации солнечной электростанции. Главной сложностью в прогнозировании является учет множества нелинейных характеристик. Предложена попытка решить данную проблему. Сделан обзор состояния проблемы и тенденций развития солнечной энергетики, среди которых определены основные проблемы и намечены пути решения.

Ключевые слова: солнечная энергия, возобновляемые источники энергии, аспекты и эксплуатация внедрения солнечной электростанции, прогнозирование выработки солнечной энергии, методы прогнозирования.

Для цитирования: Лоба И.С., Мачуева Д.А., Ажмухамедов И.М. Прогнозирование и оценка выработки энергии на солнечных станциях: состояние проблемы и тенденции развития. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1499> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.008

Forecasting and evaluation of energy generation at solar power plants: the state of the problem and development trends

I.S. Loba¹, D.A. Machueva², I.M. Azhmukhamedov³

¹Armavir State Pedagogical University, Armavir, the Russian Federation

²Grozny State Oil Technical University, Grozny, the Russian Federation

³Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, the Russian Federation

Abstract. The paper considers the relevant issues related to the problem of calculations and forecasting in the production of solar electricity as a renewable energy source. To detect problems, the initial data for modeling and their sources have been identified. Renewable energy sources are systematized and an example is given for each. An analysis of the state of the global energy market and the state of

government policy in the field of energy in Russia has underscored the need to address solar energy issues and solve the problems of forecasting electricity generation. This is important not only due to the availability of resources, but also to environmental friendliness. The classification of existing models and methods for forecasting SES energy generation is examined. Existing methods allow calculations to predict the power generation capacity, but they give average figures for the year. New technological and innovative methods are required to solve the existing problem. The key factors and aspects of the introduction and operation of a solar power plant are presented. The main difficulty in forecasting is taking into account a variety of nonlinear characteristics. An attempt to solve this problem is proposed. An overview of the state of the problem and trends in the development of solar energy is made, among which the main problems are identified and solutions are outlined.

Keywords: solar energy, renewable energy sources, aspects and operation of a solar power plant implementation, forecasting solar energy generation, forecasting methods.

For citation: Loba I.S., Machueva D.A., Azhmukhamedov I.M. Forecasting and evaluation of energy generation at solar power plants: the state of the problem and development trends. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1499> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.008 (In Russ.).

Введение

В современном мире новый этап развития энергетики характеризуется распространением и ростом востребованности возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В первую очередь речь идет о ветровых и фотоэлектрических (солнечных) станциях. Их достоинствами являются экологическая чистота и доступность энергии, отсутствие потребности в углеводородном топливе, возможность работы в автоматическом режиме и низкие эксплуатационные расходы.

Солнечная энергия находит практическое применение в самых разных областях человеческой деятельности, предоставляя широкий спектр возможностей для внедрения солнечных панелей: сетевые и мобильные электростанции, крыши и фасады зданий, солнечные навесы и заправочные станции.

Вектор энергетической политики в России и мире направлен на устойчивое развитие инфраструктуры, качественное удовлетворение потребностей каждого потребителя в сочетании с бережным отношением к ресурсам планеты. Для достижения поставленных целей требуются новые технологические решения и инновационные разработки.

Использование солнечной энергии для нужд энергоснабжения должно базироваться на научно обоснованных методиках оценки ресурсов, определения тенденций, масштабов и областей применения.

Целью работы является обзор возобновляемых источников электроэнергии в России и мире.

Задачи: 1) рассмотреть состояние энергетики в России и мире в части возобновляемых источников электроэнергии; 2) изучить проблемы расчета энергии и прогнозирования выработки энергии солнечной электростанции (СЭС); 3) рассмотреть возможности моделирования метеорологических характеристик; 4) изучить и дополнить классификацию существующих моделей и методов прогнозирования выработки энергии СЭС; 5) изучить факторы, влияющие на внедрение и эксплуатацию электростанций на СЭС.

Государственная политика в области энергетики в России

Состояние мирового энергетического рынка сырья характеризуется постепенным истощением и, как следствие, удорожанием невозобновляемых ресурсов. Сложившейся ситуацией продиктован ускоряющийся переход на безуглеродную энергетику [1].

Во многих регионах накоплен опыт, доказывающий возможность и экономическую целесообразность успешного развития ВИЭ как в централизованных, так и в автономных системах электроснабжения, в том числе совместно с традиционными энергетическими установками. Для содействия развитию ВИЭ разрабатываются и вводятся краткосрочные и долгосрочные программы, стратегии и законодательные акты: зеленые сертификаты, налоговые льготы, бесплатные подключения и гарантированные цены.

В России переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике заявлен в списке приоритетов государственной политики согласно утвержденной «Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года». В перспективе до 2035 года ископаемые виды топлива продолжат составлять основу мирового и национального топливно-энергетического баланса, однако прогнозируется устойчивый рост доли энергетики, основанной на использовании ВИЭ.

Возобновляемые источники энергии отнесены к технологиям, «применение которых влечет за собой организационные и технологические изменения в управлении и функционировании электроэнергетических систем и способствует переходу энергетики на новый технологический базис».

Солнечная энергетика должна сыграть важную роль, в первую очередь, для удаленных территорий на северо-востоке России, испытывающих сложности с завозом топлива.

Проблемы расчета и прогнозирования выработки энергии на основе ВИЭ

Распространение фотоэлектрических систем и растущая мощность солнечных станций помогают решить множество проблем в обеспечении потребителей электроэнергией. Однако при использовании этих источников генерации возникает ряд характерных сложностей, в первую очередь, связанных с расчетом и прогнозированием объемов выработки энергии.

Часть энергии Солнца поглощается и отражается атмосферой. Интенсивность солнечной радиации, которая достигает поверхности Земли, зависит от географического положения, времени года, суток и погодных условий. Величина, определяющая поток солнечной радиации, называется инсоляцией и измеряется в $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ – количество энергии, полученное одним квадратным метром поверхности в течение одного часа. Измерения освещенности могут учитывать как прямое излучение, так и диффузное (рассеянное) излучение. Для повышения эффективности фотоэлектрических панелей применяются системы их позиционирования по отношению к Солнцу в течение суток.

В прикладных исследованиях оказалась востребованной так называемая энергетическая метеорология – научная дисциплина о методах и алгоритмах количественной оценки выработки электроэнергии с учетом погодных условий. Изменчивость электрогенерации на основе ВИЭ необходимо прогнозировать для повышения надежности функционирования станций, определения оптимального состава оборудования и его технических характеристик, снижения экономических потерь и следования правилам рынка электроэнергии, принятым в стране [2].

В России действует Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. N 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности», а также Правила оптового рынка

электрической энергии и мощности. В них определяется порядок торговли электроэнергией на оптовом рынке, вводятся требования, предъявляемые к работе солнечных станций в части производительности.

Согласно нормативным актам, при составлении договора о предоставлении мощности оговариваются минимальные и максимальные характеристики генерирующего оборудования. Риск наступления неблагоприятных обстоятельств лежит на компании, занимающейся выработкой солнечной энергии по договору. Таким образом, государство устраняется от регулирования данного вопроса. Отклонение фактического производства энергии от плановых объемов больше установленного предела считается неисполнением договорных обязательств и влечет за собой начисление штрафов.

Таким образом, для обеспечения устойчивого и экономически выгодного функционирования СЭС требуются методики достоверного определения энергетического баланса с высокой временной дискретизацией. Особое внимание необходимо уделять краткосрочным прогнозам выработки энергии, как правило, с часовым разрешением на сутки вперед [3].

Отсутствие нормативных методик прогнозирования, а также нелинейность характеристик СЭС и их зависимость от внешних факторов вызывают необходимость применения методов математического моделирования для решения указанных задач.

Исходные данные для моделирования и их источники

Прогнозы производительности СЭС могут базироваться на различных типах исходных данных. Это могут быть архивные накопленные данные о выработке энергии на станции за предыдущие периоды (в виде временных рядов), либо результаты измерений и моделирования метеорологических характеристик. Метеорологические факторы, как правило, имеют стохастическую природу, а также период колебаний от долей секунды до десятилетий. Поэтому в настоящее время в энергетической метеорологии преимущественное распространение получили вероятностные (статистические) методы расчета.

Источниками исходных данных могут являться:

- тематические базы данных и специальные климатические справочники;
- результаты спутниковых наблюдений за облаками и информация от камер обзора неба;
- непосредственные замеры температуры и влажности воздуха, скорости ветра и других показателей для составления численного прогноза погоды;
- информация о радиационном режиме, полученная на актинометрических станциях [4];
- данные о выработке соседних фотоэлектрических станций.

Источниками актинометрической информации для изучения и использования солнечных ресурсов могут являться специализированные климатические базы данных, хранящие массивы информации, полученной на основе спутниковых наблюдений:

- климатическая база METEONORM, считающаяся одной из наиболее полных по номенклатуре климатических данных;
- база Мирового центра радиационных данных (World Radiation Data Centre);
- климатическая база SARAH (Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat);
- глобальный обновляемый климатологический архив ERA-Interim;
- климатическая база NASA SSE и программа прогноза NASA Power [5].

Первым шагом при использовании ВИЭ в том или ином регионе и составлении прогнозных расчетов является описание внешних климатических факторов, параметров окружающей среды [6]. Можно выделить множество значимых показателей как переменных, так и неизменяющихся:

- географические координаты месторасположения станции, часовой пояс местности;
- время восхода, зенита и заката Солнца, продолжительность дня;
- время года;
- среднесуточная температура воздуха и ее суточная амплитуда, местное время максимума температуры;
- среднесуточная скорость и направление ветра;
- относительная влажность воздуха, запыленность, концентрация аэрозолей в воздухе;
- коэффициент прозрачности атмосферы;
- атмосферная масса с учетом изменяющегося давления и температуры, изменение толщины озонового слоя;
- состав и распределение облаков (нижнего, среднего и верхнего яруса);
- альбедо (отражающая способность) облаков и поверхности Земли;
- высота снежного покрова в зимний период;
- конфигурация застройки вокруг станции (затенение фотоэлектрических модулей).

Однако даже при высокой точности прогноза прихода солнечной радиации можно получить значительную погрешность прогноза выработки энергии, если не учитывать технические характеристики самой СЭС. Мощность генерации массива солнечных панелей определяется в соответствии с их общей площадью, коэффициентом полезного действия, а также рядом других значимых факторов [3]:

- емкость накопительных устройств;
- номинальное напряжение солнечной батареи;
- мощность инвертора;
- температура поверхности фотоэлектрических модулей;
- тип солнечного трекера (комплексной системы для отслеживания положения Солнца);
- режим эксплуатации электростанции (круглогодичный или сезонный);
- длительность эксплуатации модулей и др.

Классификация существующих моделей и методов прогнозирования выработки энергии СЭС

При проектировании систем электроснабжения на солнечной энергии необходим научно обоснованный подход к разработке методики расчета и моделирования инсоляции. Точность расчетов имеет особенно большое значение для экономического прогнозирования – предсказания потерь или прибыли, напрямую зависящей от производительности станции.

В работах отечественных и зарубежных ученых предлагаются различные подходы к оценке солнечной радиации и выработки электроэнергии. Чаще всего выделяют три основных этапа: расчет солнечного излучения (прямого и рассеянного) для горизонтальной поверхности при ясном небе, приведение значений для наклонной поверхности под углом установки фотоэлектрических преобразователей и

непосредственная оценка выработки энергии с помощью моделей солнечных станций и установок.

Отправной точкой в расчетах является величина суммарной солнечной радиации, доступной для преобразования СЭС, определяемая следующим образом [3]:

$$I_{\text{сум}} = I_{\text{прям}} + I_{\text{расс}} + I_{\text{отр}} = I'_{\text{прям}} \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + I'_{\text{расс}} \frac{1+\cos\beta}{2} + \rho I'_{\text{отр}} \frac{1-\cos\beta}{2}, \quad (1)$$

где $I_{\text{сум}}, I_{\text{прям}}, I_{\text{расс}}, I_{\text{отр}}$ – значения суммарной, прямой, рассеянной и отраженной радиации на наклонную поверхность фотоэлектрических панелей, $I'_{\text{прям}}, I'_{\text{расс}}, I'_{\text{отр}}$ – соответственно, значения для горизонтальной поверхности;

θ – угол падения солнечных лучей (с учетом широты местности, угла склонения Солнца и азимутального угла установки солнечных панелей), θ_z – зенитный угол Солнца, β – угол наклона панелей к горизонтальной плоскости;

ρ – альbedo земной поверхности.

Вырабатываемая солнечными батареями энергия зависит, в первую очередь, от значений инсоляции, а также мощности солнечных панелей:

$$E = I_{\text{сред}} \cdot \frac{P_{\text{сп}}}{P_I} \cdot k, \quad (2)$$

где $I_{\text{сред}}$ – среднемесячная инсоляция, $P_{\text{сп}}$ – мощность солнечных панелей, P_I – мощность инсоляции на земной поверхности (на квадратный метр), k – коэффициент потерь (на заряд-разряд аккумуляторов, преобразование постоянного напряжения в переменное).

В зависимости от степени учета влияния различных климатических факторов в расчете поступления энергии на поверхность фотоэлементов различают параметрические и декомпозиционные модели. Параметрические модели обеспечивают наибольшую точность, однако требуют предварительной подготовки множества исходных данных.

Декомпозиционные модели используют более ограниченный набор измерений и известные корреляционные соотношения для выделения из суммарной радиации, поступающей на поверхность, значений прямой и рассеянной составляющих. Такие модели разрабатываются и применяются для определенной территории [5].

Также существующие модели делят на физические, статистические, адаптивные и гибридные. Физические модели описывают соотношения между численными значениями погодных условий и выработкой электроэнергии. Статистические модели используют методы усреднения значений на основе анализа временных рядов ретроспективных данных. Адаптивные модели применяют технологии искусственного интеллекта для определения зависимостей между прогнозом погоды и выходной мощностью электростанции. Гибридные модели представляют какую-либо комбинацию методов из перечисленных, в частности, производят настройку статистических моделей к постоянно меняющимся условиям, которые описывают физические модели.

По данным различных исследований, средняя ошибка прогноза у моделей разных типов может составлять порядка 5–25 % [7].

Выбор используемых методов и исходных данных зависит от горизонта прогнозирования и требуемой детальности по времени. Для получения краткосрочных прогнозов выработки СЭС (от нескольких минут до часа) применяются статистические модели и методы машинного обучения; для среднесрочного прогнозирования (несколько часов) – метеорологические модели, информация от камер обзора неба и спутниковые наблюдения за облаками; для долгосрочных прогнозов (несколько суток) – в основном данные численных прогнозов погоды [8].

В приложении к задачам прогноза выработки энергии применяются методы машинного обучения и искусственного интеллекта [9], к которым относятся:

- линейная регрессия – модель зависимости целевой переменной от одного или нескольких факторов (предикторов);
- метод k-ближайших соседей – метрический классификатор, основанный на оценивании сходства объектов;
- метод опорных векторов – построение гиперплоскости, оптимальным способом разделяющей объекты выборки;
- алгоритм случайного леса – ансамбль решающих деревьев (инструмент предсказательной аналитики, представляющий набор правил принятия решений в виде иерархической структуры);
- искусственные нейронные сети.

В частности, регрессионные методы широко используются в многофакторном анализе, так как позволяют учитывать большое количество параметров, а также оценивать причинно-следственные связи и зависимости в данных.

Уравнение множественной линейной регрессии имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon, \quad (3)$$

где y – результирующее значение, $x_1 \dots x_n$ – влияющие факторы, $b_1 \dots b_n$ – коэффициенты регрессии (степень влияния), ε – случайная ошибка.

При качественно подобранной модели машинного обучения и достоверных исходных данных можно получить предсказания объемов генерации электроэнергии с точностью до 95 % [10].

При этом необходимо учитывать возможные ошибки и погрешности прогноза, которые могут иметь серьезные экономические последствия и приводить к проблемам функционирования энергосетей. Универсальной метрики качества предсказания для различных применяемых методов не существует. Как правило, используются классические статистические характеристики, такие как среднеквадратичная ошибка, средняя абсолютная ошибка, средняя ошибка смещения, стандартное отклонение, коэффициент корреляции Пирсона. Для адекватной оценки возможных экономических потерь в работе станции также полезно учитывать такие показатели, как асимметрия распределения погрешностей прогноза, максимальная абсолютная погрешность [8].

Существуют специальные программные комплексы, позволяющие решать задачи расчета уровня инсоляции на горизонтальную или наклонную поверхность, а также оптимизации состава технического оснащения солнечной станции – соотношения мощностей генерирующего и аккумулирующего оборудования.

Среди программ, предназначенных для проектирования энергетических систем путем компоновки различного состава оборудования, можно упомянуть HOGA (Hybrid optimization by genesis algorithm), HOMER (Hybrid optimization modeling software), HYPORA (Hybrid power optimized for rural/remote areas).

Программа Helioscope предоставляет пользовательский веб-интерфейс с инструментарием для планирования и моделирования энергопотребления на станции. Рассчитать энергетический потенциал фотоэлектрических панелей, установленных в том или ином месте, позволяет специализированная программа Polysun. PV*SOL – инструмент с 3D-визуализацией для проектирования детального трехмерного изображения солнечных панелей на местности.

Для использования архитекторами, инженерами-разработчиками и исследователями предназначен программный пакет Pvsyst. Для моделирования работы фотоэлектрической системы он использует климатические данные из источников

Meteonorm и NASA SSE. При этом Meteonorm для достижения максимальной точности интерполирует значения с трех метеостанций, ближайших к исследуемому району [11].

Также применяется специальная библиотека для проектирования солнечных панелей PVlib для языка программирования Python. Данная библиотека предоставляет набор функций с изменяемыми параметрами для расчета конфигурации СЭС. Для визуализации полученных результатов можно использовать возможности графических библиотек Matplotlib и Seaborn языка Python [12].

Ключевые факторы и аспекты внедрения и эксплуатации электростанций на солнечной энергии

Использование возобновляемых источников энергии имеет ряд преимуществ, среди которых, в первую очередь, можно назвать обеспечение энергетической безопасности (защищенности от дефицита энергетических ресурсов), снижение негативных воздействий на окружающую среду (переход на экологически чистую энергетику).

Развитие новых технологий строительства и интеграции объектов на ВИЭ в существующие энергосистемы способствует постепенному снижению эксплуатационных расходов [10]. Однако по мере увеличения проникновения солнечной энергии на энергетический рынок растет влияние неточности прогнозов выработки на функционирование сети. В результате отклонение объемов произведенной энергии от запланированных показателей приводит к экономическим потерям, в том числе в виде уплаты штрафных санкций по договорам.

Все это стимулирует развитие технологий проектирования и методик прогнозирования производительности станций. Ведутся исследования, разрабатываются математические модели и алгоритмы расчета, применяемые для различных условий или регионов. Наибольшие сложности в прогнозировании выработки электроэнергии связаны с необходимостью учитывать нелинейные зависимости от множества климатических факторов [13].

Резюмируя сказанное, на Рисунке 1 приведено представление предметной области, отражающее взаимосвязь аспектов внедрения и эксплуатации СЭС в современных условиях.



Рисунок 1 – Концептуальная модель сферы энергетики с использованием ВИЭ
Figure 1 – Conceptual framework of energy industry using renewable energy sources

Заключение

Использование возобновляемых источников энергии, в частности энергии Солнца, занимает все большее место среди методов выработки электричества. Согласно энергетической стратегии России, актуальной задачей является увеличение доли объектов ВИЭ в топливно-энергетическом балансе страны. Для этого необходимо достоверное определение энергетического баланса с учетом влияния различных стохастических факторов, изучение фотоэлектрического потенциала, проведение оптимизационных расчетов фотоэлектростанций.

Высокую сложность задачи определения энергетических характеристик солнечных станций представляет наличие множества нетривиальных нелинейных зависимостей от большого набора внешних факторов, при этом связанных с рядом неопределенностей в реальных условиях эксплуатации. В настоящее время собраны базы климатических данных, содержащие результаты многолетних наблюдений, разработаны подходы, основанные на различных технологиях, включая искусственный интеллект, и программные пакеты, помогающие решать задачи проектирования станций. Однако, как правило, предлагаемые решения имеют ограничения, связанные с условиями их применения, охватом территорий, усреднением значений. Задача разработки универсального математического аппарата и соответствующего программного комплекса для прогнозирования, планирования и оценки выработки энергии остается актуальной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yang D. History and trends in solar irradiance and PV power forecasting: A preliminary assessment and review using text mining. *Solar Energy*. 2018;168:60–101. DOI: 10.1016/j.solener.2017.11.023.
2. Iheanetu K.J. Solar photovoltaic power forecasting: a review. *Sustainability*. 2022;14(24).
3. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017;6:38–51.
4. Бабаев Б.Д. Расчет выработки электроэнергии местной солнечной электростанцией при оптимальных параметрах. *Вестник Дагестанского государственного университета*. 2021;3:21–28.
5. Шакиров В.А., Яковкина Т.Н., Курбацкий В.Г. Методика оценки выработки электроэнергии солнечными электростанциями с использованием данных многолетних наблюдений метеостанций. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020;24(4):858–875.
6. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017;6:28–37.
7. Тюньков Д.А., Сапилова А.А., Грицай А.С., Алексеенко Д.А., Хамитов Р.Н. Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация. *Электротехнические системы и комплексы*. 2020;48(3):4–10.
8. Киселева С.В., Лисицкая Н.В., Фрид С.Е. Прогнозирование выработки солнечных станций и фотоэлектрических установок: основные подходы и результативность. *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2020;07-18:24–43.

9. Alrashidi M., Rahman S. Short-term photovoltaic power production forecasting based on novel hybrid data-driven models. *Journal of Big Data*. 2023;10:26.
10. Зацаринная Ю.Н., Реутин Г.В., Курилов С.С., Исаева О.В., Ковалев Г.С. Прогнозирование выработки электроэнергии фотоэлектрической станции методами машинного обучения. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023;3:81–92.
11. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017;5:49–55.
12. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Расчет характеристик солнечных электростанций с применением программного модуля PVlib. *Научное обозрение. Технические науки*. 2020;6:26–30.
13. Marques A. Is renewable energy effective in promoting growth? *Energy Policy*. 2012;46(1):434–442.

REFERENCES

1. Yang D. History and trends in solar irradiance and PV power forecasting: A preliminary assessment and review using text mining. *Solar Energy*. 2018;168:60–101. DOI: 10.1016/j.solener.2017.11.023.
2. Iheanetu K.J. Solar photovoltaic power forecasting: a review. *Sustainability*. 2022;14(24).
3. Obuhov S.G., Plotnikov I.A. Imitatsionnaya model rezhimov raboty avtonomnoi fotoelektricheskoi stantsii s uchetom realnykh uslovii ekspluatatsii. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov=Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;6:38–51. (In Russ.).
4. Babaev B.D. Calculation of electricity generation by a local solar power plant with optimal parameters. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021;3:21–28. (In Russ.).
5. Shakirov V.A., Yakovkina T.N., Kurbatsky V.G. Methodology for assessing electricity generation by solar power plants using data from long-term observations of meteorological stations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2020;24(4):858–875. (In Russ.).
6. Karamov D.N. Matematicheskoe modelirovanie solnechnoi radiatsii s ispolzovaniem mnogoletnikh meteorologicheskikh ryadov, nakhodyashchihся v otkrytom dostupe. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov=Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;6:28–37. (In Russ.).
7. Tyunkov D.A., Sapilova A.A., Gritsay A.S., Alekseenko D.A., Khamitov R.N. Short-term forecast methods of electricity generation by solar power plants and their classification. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy=Electrotechnical Systems and Complexes*. 2020;48(3):4–10. (In Russ.).
8. Kiseleva S.V., Lisitskaya N.V., Frid S.E. Photovoltaic power forecasting: basic approaches and features. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal "Alternativnaya energetika i ekologiya"=International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;07-18:24–43. (In Russ.).
9. Alrashidi M., Rahman S. Short-term photovoltaic power production forecasting based on novel hybrid data-driven models. *Journal of Big Data*. 2023;10:26.
10. Zacarinnyaya Yu.N., Reutin G. V., Kurilov S.S., Isaeva O.V., Kovalev G.S. Prediction of electricity generation from res by machine learning methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2023;3:81–92. (In Russ.).
11. Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. Metodika otsenki energii solnechnogo izlucheniya dlya fotoelektrostantsii. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring*

- georesursov=Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2017;5:49–55. (In Russ.).
12. Iliichev V.Yu., Yurik E.A. Raschet kharakteristik solnechnykh elektrostantsii s primeneniem programmnoho modulya PVlib. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki.* 2020;6:26–30. (In Russ.).
 13. Marques A. Is renewable energy effective in promoting growth? *Energy Policy.* 2012;46(1)434–442.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лоба Инна Сергеевна, старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий Армавирского государственного педагогического университета, Армавир, Российская Федерация.

e-mail: lobainna@mail.ru

ORCID: [0000-0003-3817-5992](https://orcid.org/0000-0003-3817-5992)

Inna S. Loba, Senior Lecturer at the Department of Informatics and Information Technologies of Armavir State Pedagogical University, Armavir, the Russian Federation.

Мачуева Дина Алуевна, кандидат технических наук, доцент Грозненского государственного нефтяного технического университета им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Российская Федерация.

e-mail: ladyd_7@mail.ru

ORCID: [0000-0001-6827-8998](https://orcid.org/0000-0001-6827-8998)

Dina A. Machueva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at Grozny State Oil Technical University, Grozny, the Russian Federation.

Ажмухамедов Искандар Маратович, доктор технических наук, профессор Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева, Астрахань, Российская Федерация.

e-mail: aim_agtu@mail.ru

ORCID: [0000-0001-9058-123X](https://orcid.org/0000-0001-9058-123X)

Iskandar M. Azhmukhamedov, Doctor of Engineering Sciences, Professor at Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 12.01.2024; одобрена после рецензирования 06.02.2024; принята к публикации 13.02.2024.

The article was submitted 12.01.2024; approved after reviewing 06.02.2024; accepted for publication 13.02.2024.