

Анализ перспективных для строительства солнечных электростанций районов России с учетом ресурса солнечной энергии и нестабильности ее поступления

С. Е. Фрид¹, Н. В. Лисицкая¹, О. С. Попель¹ и С. П. Филиппов²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Институт энергетических исследований РАН, Нагорная д.31 корп.2, Москва, Московская область 117186, Россия

E-mail: s_frid@iht.ru

Статья поступила в редакцию 25 октября 2024 г.

Аннотация. На основе использования многолетних часовых последовательностей климатических и актинометрических данных за 2001–2023 гг. выполнен анализ энергетических показателей солнечных электростанций (СЭС), определены ожидаемые значения их коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ) и проведен статистический анализ основных характеристик нестабильности генерации энергии. Расчет выполнен для всей территории Российской Федерации с разбиением ее на 3498 ячеек с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$. Сформулированы критерии выбора перспективных для строительства новых СЭС регионов страны, предполагающих, что регион является перспективным, если на его территории имеются ячейки, для которых КИУМ СЭС ожидается не ниже, чем у заявленных к строительству в России в ближайшие годы СЭС (минимальное заявленное значение КИУМ СЭС — 16%), а максимальная непрерывная и суммарная продолжительности перерывов в генерации энергии — не больше аналогичных расчетных значений для этих СЭС: 260 ч. и 140 тыс. ч., соответственно, за рассмотренные 23 года (в среднем около 70% от продолжительности года). Эти три значения в совокупности выбраны в качестве критерия отбора перспективных для строительства СЭС регионов страны. Установлено, что 40 из 85 субъектов РФ включают территории, удовлетворяющие данному критерию, и могут быть отнесены к перспективным для строительства СЭС. При этом выбор конкретных площадок для принятия решения о строительстве СЭС должен осуществляться с учетом потребностей региона в энергии, особенностей местной энергосистемы, условий подключения к ней СЭС и других факторов. <https://doi.org/10.33849/2024306>

1. ВВЕДЕНИЕ

Возобновляемая энергетика ведущими странами мира рассматривается как одна из ключевых экологически чистых технологий, активное развитие которой позволит решить задачу кардинального снижения загрязнения атмосферы выбросами парниковых газов (прежде всего CO_2) и предотвращения наметившегося потепления климата. В соответствии с разработанными сценариями декарбонизации мировой энергетики [1] вклад возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мировое производство электроэнергии к 2050 г. должен возрасти с сегодняшних 30% до 68–91%, а ежегодный ввод мощностей на ВИЭ увеличиться с 300 ГВт/год до 980–1070 ГВт/год, из которых вклад фотоэлектрической генерации должен увеличиться с 200 ГВт/год до 550–615 ГВт/год.

Развитию возобновляемой энергетики значительное внимание уделяется и в России [2]. Суммарная установленная мощность электростанций на ВИЭ в нашей стране превысила 6 ГВт [2], а выработка электроэнергии на них в 2024 г. превысила 13 млрд кВт·ч, что, правда, составляет немногим более 1% объема электроэнергии, генерируемой всеми электростанциями страны, с ожидаемым ростом до 3% к 2035 г. Существенный вклад в ВИЭ-генерацию вносят фотоэлектрические станции, суммарная установленная мощность которых в России в 2024 г. превысила 2.5 ГВт, а к 2035 г. должна возрасти до 5–6 ГВт. В этой связи поиск и обоснование перспективных площадок для проектирования и строительства солнечных электростанций на громадной терри-

тории страны является актуальной научно-технической проблемой.

Важным показателем эффективности функционирования объектов солнечной генерации является коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), представляющий собой отношение фактической выработки электроэнергии за заданный период (обычно год) к расчетной, в соответствии с установленной мощностью станции. Средний КИУМ российских солнечных электростанций в 2023 г. составил 14.4% [2], а наиболее высокие значения КИУМ зафиксированы для объектов солнечной генерации в Ставропольском крае, Астраханской области и Забайкальском крае (до 15.8%). Достижение высокого значения КИУМ не является обязательным показателем в конкурсах на государственную поддержку строительства солнечных электростанций (СЭС), но оказывает определяющее влияние на экономические показатели их работы и в значительной мере зависит от климатических характеристик места строительства и располагаемого энергетического ресурса солнечной радиации. На выбор места строительства и мощности СЭС большое влияние оказывают также технические условия подключения электростанции к энергосистеме, наличие возможностей регулирования мощности энергосистемы за счет маневренных генераторов и резервных источников, компенсирующих нестабильную суточную и сезонную генерацию СЭС. Последнее становится особенно важным в случае ожидаемой значительной доли генерации СЭС (более 20–30%) в энергобалансе системы.

В статье на основе использования многолетних часовых последовательностей климатических и актинометрических данных за 2001–2023 гг. определяются ожидаемые значения КИУМ и на основе формулируемого критерия выделяются регионы России, перспективные для строительства СЭС. Расчеты выполнены для всей территории Российской Федерации с делением ее на 3498 ячеек с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$.

2. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предпочтительными по точности источниками данных о поступающем на земную поверхность солнечном излучении и климатических характеристиках являются многолетние наземные наблюдения, однако для произвольных географических координат они, как правило, недоступны, что обуславливает целесообразность использования в качестве исходных данных результатов спутниковых наблюдений и реанализа (получения модельных полей метеорологических величин с использованием всех доступных к моменту расчета данных наблюдений с различных платформ, в том числе данных, поступающих с задержкой). Одним из широко используемых массивов исходной актинометрической и климатической информации является база данных проекта NASA POWER [3], а также источник ее актинометрических данных — данные проекта NASA CERES [4]. Анализ актинометрических данных 6 спутниковых баз и двух баз данных реанализа в сравнении с результатами наземных наблюдений метеостанций международной сети BSRN (Baseline Surface Radiation Network), выполненный в [5], показал, что наиболее точными для территории России являются именно данные NASA CERES (часовые суммы солнечного излучения на горизонтальной поверхности: фактические и в ясные дни, а также альбедо земной поверхности). Эти данные, дополненные перемасштабированными на градусную ($1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе) сетку NASA CERES метеорологическими данными (температура окружающего воздуха и скорость ветра на высоте 10 м) реанализа Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (база данных ERA5 [6]), использованы в настоящей работе. При этом вся территория России была разделена на 3498 расчетных ячеек, для которых проводились расчеты характеристик гипотетических СЭС.

В расчетах выработки фотоэлектрических модулей использовалась однодиодная пятипараметрическая модель фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) и модуля в целом [7, 8], хорошо описывающая наиболее распространенные кремниевые ФЭП [9] и реализованная, в частности, в системе динамического моделирования установок возобновляемой энергетики TRNSYS [7, 10], в которой и производился расчет, и Python-библиотеке расчета параметров фотоэлектрических модулей pvlib [11]. Рассматривались несколько вариантов ориентации фотоэлектрических модулей: неподвижный модуль, модуль с южной фронтальной ориентацией, установленный под оптимальным фиксированным углом наклона к горизонту или вертикально, двухосная система слежения, вертикально-осевой трекер, горизонтально-осевой трекер с ориентацией оси «север–юг» и «запад–восток», а также наклонно-осевой

трекер с осью, параллельной оси вращения Земли. В данной работе представлены результаты, относящиеся лишь к неподвижным модулям южной ориентации, установленным под оптимальным фиксированным углом наклона к горизонту. Влияние инверторов и потерь в других элементах СЭС на ее эффективность не учитывалось, поскольку для сетевой электростанции оно составляет 2–3% от выработки. Следует подчеркнуть, что КИУМ от КПД фотоэлектрического модуля, строго говоря, не зависит. Поэтому отличия удельной часовой выработки рассмотренных в данной работе 6 типов современных и перспективных фотоэлектрических модулей с одинаковой ориентацией в пространстве являются незначительными, и расчеты производились для усредненного модуля. Полученный в результате моделирования СЭС массив, состоящий из 201480 часовых последовательностей КИУМ за рассмотренные 23 года, стал основой для дальнейшего статистического анализа нерегулярности генерации энергии солнечными электростанциями на территории России.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета показали, что КИУМ СЭС с неподвижными фотоэлектрическими модулями южной ориентации, установленными под оптимальным для обеспечения наибольшей годовой выработки энергии углом к горизонту, максимальны в юго-восточных регионах страны и могут достигать 20%. В таблице 1 представлены результаты расчетно-теоретического анализа для нескольких перспективных для строительства СЭС площадок в Забайкальском крае, Астраханской и Саратовской областях, а также в Республике Бурятия, территориально близких к выбранным в результате последнего отбора проектов ВИЭ-генерации [2, 12]. Из данных таблицы видно, что на некоторых территориях Забайкальского края и Республики Бурятия КИУМ солнечных энергоустановок может достигать и даже превышать 20%. Следует отметить, что для СЭС, построенных в различных регионах мира со среднегодовым поступлением солнечной радиации на неподвижную поверхность с оптимальным углом наклона к горизонту на уровне 3.5–3.6 кВт·ч/(м²·день), соответствующим российскому Забайкальскому краю [13], значение КИУМ на уровне 20–21% является типичным и реально достижимым на практике, см., например, [14]. Для наиболее солнечных районов мира со среднегодовым поступлением солнечной радиации до 6 кВт·ч/(м²·день) КИУМ СЭС может достигать 33–34%. К сожалению, на территории России такие районы отсутствуют. Суммарная длительность перерывов в генерации энергии СЭС (Δ_{sum}) для приведенных в таблице 1 районов составляет $\delta = 62$ –67% от общей продолжительности работы, а без учета продолжительности ночных периодов — 12–17%. Для других районов страны она может быть существенно больше. В таблице 1 представлены также расчетные данные о максимальной длительности непрерывных перерывов в генерации энергии СЭС (Δ_{max}) в 2001–2023 гг. для различных мест строительства электростанций. В качестве критерия отсутствия генерации использовалось значение часового КИУМ менее 10%. Видно, что с учетом продолжительности ночей и плохих

Таблица 1. КИУМ и характеристики нерегулярности генерации (Δ_{max} , Δ_{sum} , δ) для перспективных для строительства СЭС площадок за период 2001–2023 гг. для неподвижно установленных под оптимальным углом к горизонту фотоэлектрических модулей.

Регион	Широта (° с.ш.)	Долгота (° в.д.)	КИУМ (%)	Δ_{max} (ч.)	Δ_{sum} (тыс. ч.)	δ (%)
Забай- кальский край	51.5	110.5	20.0	45	126	62.7
	51.5	118.5	21.1	64	125	62.2
	54.5	118.5	19.7	68	128	63.3
	57.5	118.5	16.0	92	133	65.9
Астра- ханская область	48.5	46.5	17.5	165	133	65.8
	47.5	47.5	17.4	212	132	65.7
	46.5	48.5	17.7	122	132	65.3
	46.5	49.5	17.8	122	132	65.5
Саратов- ская область	51.5	43.5	16.4	262	136	67.3
	51.5	47.5	17.0	209	135	66.9
	51.5	49.5	17.3	259	134	66.6
	50.5	48.5	17.8	191	132	65.7
Респу- блика Бурятия	52.5	100.5	17.3	69	128	63.5
	52.5	108.5	18.4	46	128	63.5
	53.5	112.5	20.0	45	127	63.0
	55.5	112.5	17.7	48	129	64.2

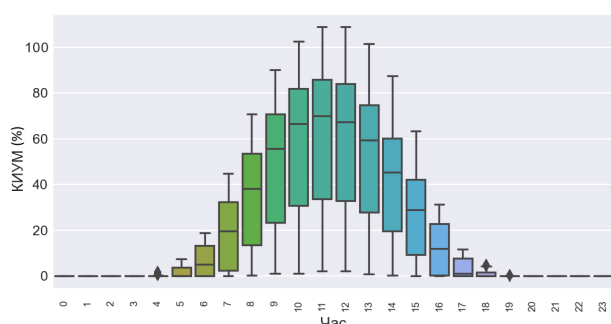


Рисунок 1. Статистические характеристики распределения часовых значений КИУМ СЭС (для географической точки 46.5° с.ш., 48.5° в.д.) в течение суток (пример результатов расчета).

погодных условий длительность непрерывных перерывов в генерации для рассмотренных мест строительства СЭС изменяется в широких пределах: от 2–3 суток до 10 суток и более.

Помимо интегральных среднегодовых показателей генерации энергии СЭС выполнен анализ и более детальных параметров нестабильности. На рисунке 1 в качестве примера для одной из точек Астраханской области с координатами 46.5° с.ш., 48.5° в.д. приведены боксплоты [15] распределения часовых значений КИУМ СЭС за весь рассмотренный 23-летний период.

Наибольшие медианные значения часовых КИУМ (на рисунке — горизонтальные линии внутри боксплотов; верхние и нижние границы прямоугольников представляют первый и третий квартили; горизонтальные линии — минимумы и максимумы), как можно было бы предполагать, реализуются в околополуденные

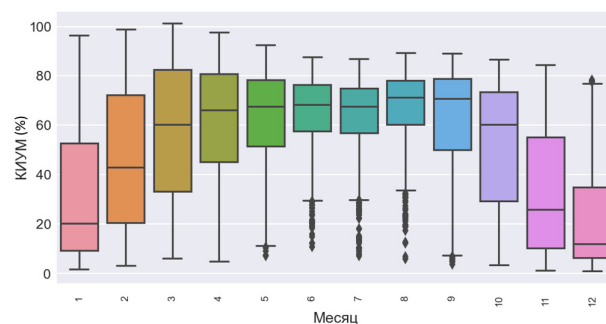


Рисунок 2. Статистические характеристики распределения полуденных значений КИУМ СЭС (для географической точки 46.5° с.ш., 48.5° в.д.) по месяцам (пример результатов расчета).

часы — часы максимального солнечного сияния. В это время возможны отдельные случаи вариаций КИУМ: от нескольких процентов до более 100%, поскольку генерируемая мощность может превышать развиваемую в условиях испытаний, в которых измеряется паспортная мощность. Для отдельных часов медианное значение КИУМ достигает 70%. Среднее же значение КИУМ за год для рассматриваемой географической точки с учетом периодов отсутствия генерации составляет всего 17.7% (см. таблицу 1). Среднемесячные медианные значения КИУМ в полдень составляют более 50% (рисунок 2) и реализуются для приведенной на рисунке точки в период с марта по октябрь, а минимальные медианные полуденные значения КИУМ относятся к зимним месяцам (менее 20%). Обращают на себя внимание более широкие диапазоны изменений полуденных значений КИУМ в весеннее, осеннее и зимнее время по сравнению с летним периодом, что объясняется большей изменчивостью погоды в переходные периоды года.

На рисунке 3 представлена гистограмма распределения часовых значений КИУМ для рассматриваемой в качестве примера географической точки за 23 года. Нулевой КИУМ (полное отсутствие солнечного излучения) реализуется около 50% рассматриваемого периода. Отличие данного показателя от 50%, соответствующего равенству суммарной продолжительности ночей и светлого времени суток за год, может быть объяснено наличием преобразуемого фотоэлектрическими модулями в электроэнергию рассеянного атмосферой солнечного излучения в периоды восхода и захода Солнца. КИУМ в интервале 0–10% (периоды с очень низкими потоками солнечной радиации на поверхности фотоэлектрических модулей из-за погодных и геометрических факторов), наблюдается еще в течение около 15% продолжительности 23-летнего периода. Таким образом, суммарная длительность практического отсутствия генерации для рассмотренной географической точки (при использовании критерия $\text{КИУМ} < 10\%$) составляет около 65% (см. таблицу 1). “Плато” в распределении часовых значений КИУМ в интервале 20–90% показывает, что эти показатели генерации энергии СЭС реализуются с примерно одинаковой вероятностью в течение рассмотренного 23-летнего периода времени.

На рисунке 4 представлен пример результатов расчета распределения часовых значений КИУМ СЭС для рассматриваемой географической точки в полдень

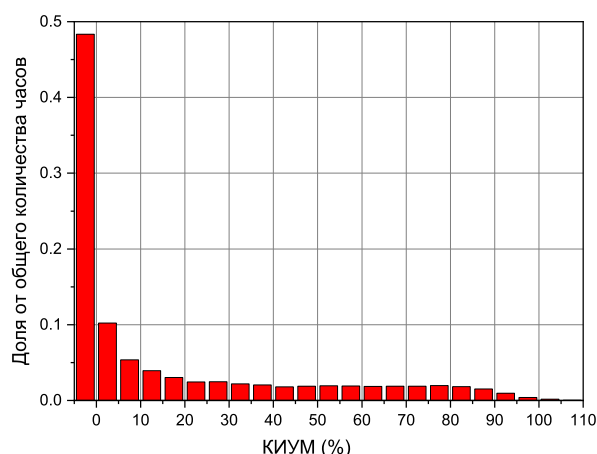


Рисунок 3. Пример результатов расчета распределения часовых значений КИУМ СЭС (46.5° с.ш., 48.5° в.д.) в 2001–2023 гг.

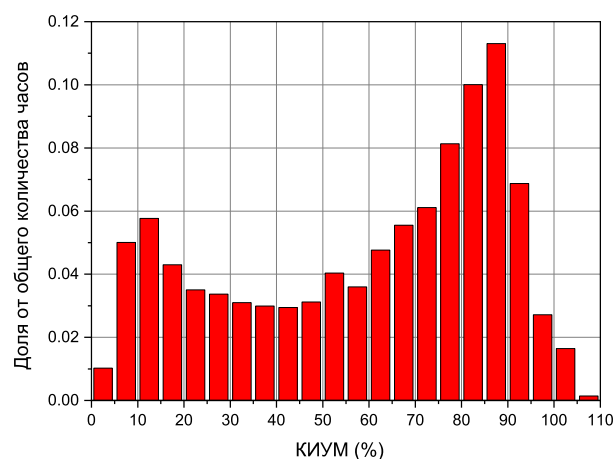


Рисунок 4. Пример результатов расчета распределения часового значения КИУМ СЭС в полдень в течение 2001–2023 гг. для точки 46.5° с.ш., 48.5° в.д.

в 2001–2023 гг. Наибольшее число случаев относится к значениям КИУМ 70–95%. Второй пик распределения приходится на низкие значения КИУМ — менее 30%. Данный факт свидетельствует о том, что ориентироваться на максимальную полуденную генерацию при оценке энергетических показателей СЭС неправомерно. Обращает на себя внимание и то, что в данном случае также имеются значения превышения КИУМ больше 100%. На рисунке 5 представлен пример результатов расчета количества перерывов в генерации энергии СЭС различной продолжительности по критерию КИУМ < 1%. Наибольшее количество таких перерывов приходится на перерывы длительностью 9–16 ч., что связано с длительностью изменяющегося в течение года ночного периода. В отдельных случаях отмечаются перерывы генерации длительностью до 40 ч. и более (на рисунке не отмечены из-за ограниченности горизонтальной оси). Наличие перерывов генерации вне границ продолжительности ночей иллюстрирует рисунок 6, соответствующий выбору критерия наличия перерыва: КИУМ менее 10%. Основная область наблюдаемых длительностей перерывов, соответствующих этому критерию, по сравнению с критерием КИУМ менее 1%, немного сдвигается в область более длительных перерывов. Перерывы в генерации могут составлять как несколько часов, так и десятки и даже сотни часов (последние на рисунке не показаны, но в единичных случаях они имеются). Как отмечено в таблице 1, для рассматриваемой точки за 23-летний период зафиксирован максимальный перерыв в генерации длительностью 122 ч.

Результатом описанных выше детальных расчетно-теоретических исследований, выполненных для всей территории Российской Федерации, стало формирование критерия выделения перспективных для реализации программы строительства солнечных электростанций регионов, на территории которых выявлены площадки, размещение на которых новых СЭС обещает достижение ими энергетических показателей, превышающих показатели уже построенных и проектируемых российских солнечных электростанций. Наряду с естественным ограничением снизу среднегодового КИУМ,

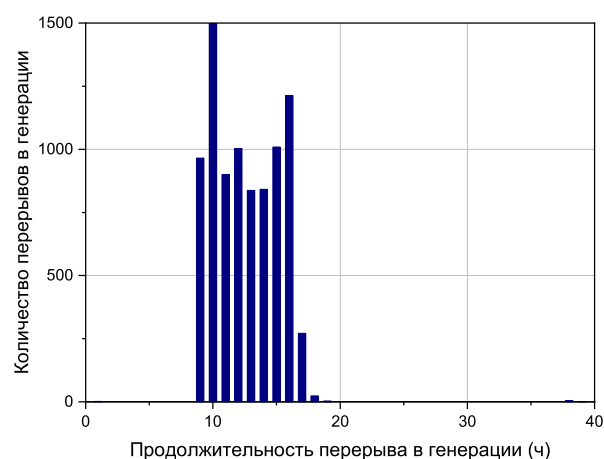


Рисунок 5. Количество перерывов в генерации различной длительности в 2001–2023 гг. для географической точки 46.5° с.ш., 48.5° в.д. (КИУМ менее 1%).

худшим для утвержденных в результате последнего отбора проектов строительства СЭС (16%), он включает в себя требования по верхним границам величины непрерывных перерывов в генерации (260 ч.) и суммарной длительности перерывов в генерации (70% продолжительности рабочего периода, или 20% суммарной продолжительности светлого времени суток). Перечень выявленных регионов представлен в таблице 2 и отражен на карте (рисунок 7). Полученные результаты носят рекомендательный характер для предварительного планирования развития солнечной энергетики в России. Выбор конкретных площадок строительства будущих СЭС должен учитывать особенности функционирования региональных энергетических систем, графиков нагрузки, возможности подключения намечаемых к строительству солнечных электростанций к этим системам, возможности балансирования ожидаемых нерегулярностей в генерации электроэнергии СЭС

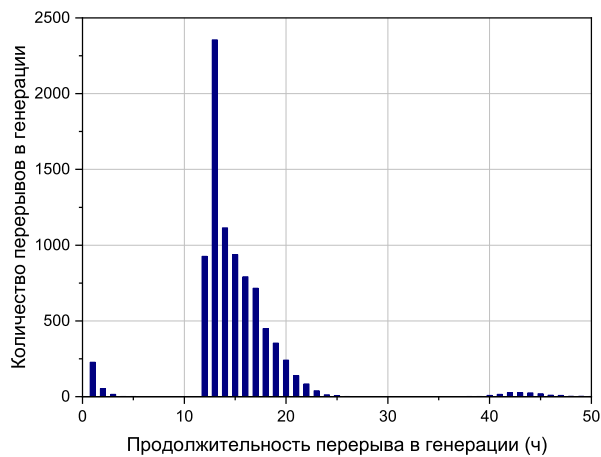


Рисунок 6. Количество перерывов в генерации различной длительности в 2001–2023 гг. для географической точки 46.5° с.ш., 48.5° в.д. (КИУМ менее 10%).

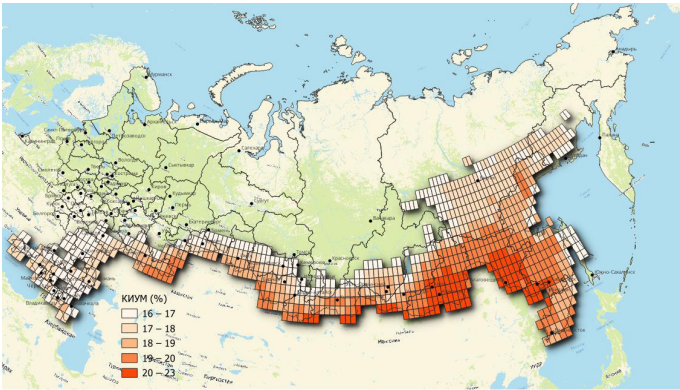


Рисунок 7. Перспективные районы расположения СЭС на территории Российской Федерации.

с помощью маневренных мощностей и резервных источников.

К важному результату выполненного исследования следует отнести и результат анализа трендов изменения среднегодовых значений КИУМ СЭС в течение рассмотренного 23-летнего периода (рисунок 8), который показал, что для большей части территории России эти изменения незначительны. В отдельных районах страны отмечаются изменения расчетного КИУМ как в сторону увеличения, так и уменьшения, но не более, чем на 2–4% за весь период, что лежит в пределах точности их расчета.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе использования многолетних часовых последовательностей климатических и актинометрических данных за 2001–2023 гг. сформулирован критерий выбора перспективных для строительства новых СЭС регионов страны, предполагающий, что регион является перспективным, если на его территории имеются площадки, для которых среднегодовой КИУМ СЭС ожидается не ниже, чем минимальный из заявленных для утвержденных в России к строительству СЭС (16%),

Таблица 2. Регионы перспективных мест строительства СЭС.

Субъект РФ
Алтайский край
Амурская область
Астраханская область
Волгоградская область
Воронежская область
Еврейская АО
Забайкальский край
Иркутская область
Кемеровская область
Краснодарский край
Красноярский край (юг)
Курганская область
Магаданская область
Новосибирская область
Омская область
Оренбургская область
Пензенская область
Приморский край
Республика Адыгея
Республика Алтай
Республика Башкортостан
Республика Бурятия
Республика Дагестан
Республика Ингушетия
Республика Кабардино-Балкария
Республика Калмыкия
Республика Карачаево-Черкесия
Республика Крым
Республика Саха (Якутия, центр и юг)
Республика Северная Осетия – Алания
Республика Тыва
Республика Хакасия
Ростовская область
Самарская область
Саратовская область
Сахалинская область
Ставропольский край
Тюменская область
Хабаровский край
Челябинская область

а максимальная непрерывная и суммарная продолжительности перерывов в генерации энергии — не больше аналогичных максимальных значений для этих СЭС: 260 ч. и 140 тыс. ч. (около 70% от периода работы или с учетом того факта, что продолжительности светлого времени суток и ночей в течение года равны между собой, продолжительность перерывов генерации без учета продолжительности ночей не превышает 20% длительности года). В соответствии со сформулированным критерием произведен отбор перспективных для строительства СЭС регионов страны, условиям критерия удовлетворяют 40 субъектов РФ. За рассмотренный 23-летний период тренда значительных изменений в поступлении солнечной энергии на территории России не выявлено. В отдельных регионах эти изменения находятся в пределах 2–4% как в большую, так и

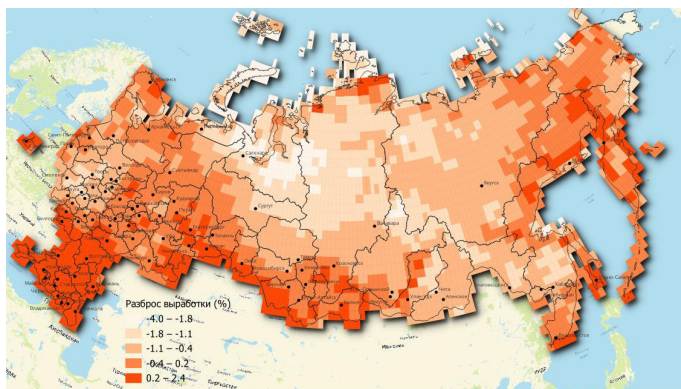


Рисунок 8. Карта тренда изменения КИУМ СЭС за 2001–2023 гг. на территории России.

в меньшую стороны. Разработанный в рамках выполненных исследований аппарат предсказания интегральных энергетических характеристик СЭС и характеристик нестабильности генерации энергии с учетом многолетних рядов статистических актинометрических и климатических данных мог бы стать основой предварительного обоснования выбора перспективных площадок строительства СЭС в кооперации с заинтересованными энергетическими компаниями и Системным оператором ЕЭС России.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства экономического развития Российской Федерации в рамках реализации I этапа важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” (ВИП ГЗ) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-24-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IRENA 2023 World energy transitions outlook 2023 URL <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
2. АРБЭ 2024 Рынок возобновляемой энергетики России. Текущий статус и перспективы развития URL https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065blilscovlumxq02gqvkcx/202408_RREDA_annual_RES_report.pdf
3. NASA 2024 Prediction of worldwide energy resource URL <https://power.larc.nasa.gov>
4. NASA 2024 Clouds and the earth's radiant energy system URL <https://ceres.larc.nasa.gov/data/#syn1deg-level-3>
5. Yang D and Bright J M 2020 *Sol. Energy* **210** 3–19
6. Copernicus 2024 Era5 hourly data on single levels from 1940 to present URL <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
7. Duffie J A and Beckman W A 2013 *Solar Engineering of Thermal Processes* 4th ed (Hoboken: Wiley)
8. De Soto W, Klein S A and Beckman W A 2006 *Sol. Energy* **80** 78–88
9. Cotfas D T, Cotfas P A and Kaplanis S 2013 *Renew. Sustain. Energy Rev.* **28** 588–96
10. TRNSYS 2024 Transient system simulation tool URL <http://www.trnsys.com/>
11. Holmgren W F, Hansen C W and Mikofski M A 2018 *J. Open Source Softw.* **3**(29) 884
12. АТЭС 2023 Результаты отборов проектов URL <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults>
13. МГУ 2024 ГИС ВИЭ России URL <http://gisre.ru/map-sunres/?surface=gor&period=year>
14. NREL 2024 Annual technology baseline. nrel transforming energy URL https://atb.nrel.gov/electricity/2024/utility-scale_pv
15. Bluman A G 2018 *Elementary statistics: a step by step approach* 10th ed (New York: McGraw-Hill Education)