



УДК 551.5, 910.2, 911.5

МРНТИ 37.21.00

DOI 10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.97(1).33

¹Киселева С.В., ¹Шакун В.П., ²Фрид С.Е., ¹Горбаренко Е.В.¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: k_sophia_v@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ РЕАНАЛИЗОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация. Долгосрочное прогнозирование производительности солнечных станций является ключевым звеном для развития солнечной энергетики в целом, а также для проектирования и выбора оптимальных площадок для размещения солнечных электростанций. С 90-х годов XX века, помимо долговременных измерений на актинометрических станциях, источниками данных для прогнозирования становятся глобальные реанализы метеорологических и – особенно – актинометрических характеристик. Реанализы отличаются долговременностью непрерывных рядов в регулярной сетке, что сокращает недостатки и дополняет данные наземной сети актинометрических измерений, которая в таких странах, как Россия и Казахстан является абсолютно недостаточной для развития солнечной энергетики ввиду значительности площади территорий стран и удаленности станций друг от друга. В то же время реанализы, являясь результатом синтеза математического моделирования и спутниковых наблюдений, требуют для своего надежного применения верификации, причем детальной с охватом тех территорий, которые планируются к использованию для размещения солнечных электростанций. В этом случае следует применять процедуры и развивать методологию site adaptation, т.е. подспутниковой верификации данных реанализов – как средних за значительные периоды, так и срочных. В работе рассматриваются подходы и показаны результаты процедуры site adaptation для территории Московского региона, выявлены системные отклонения наземных результатов – не только по приходящей солнечной радиации, но и по удельной производительности солнечных фотоэлектрических установок, что дает практически применимую информацию для дальнейшего использования ее при проектировании солнечных электростанций.

Ключевые слова: солнечная энергетика; мониторинг; верификация; реанализы; адаптация сайта; погрешность данных.

Введение

Оценка ресурсов солнечной энергии является ключевой аналитической задачей при подготовке проектов солнечных электростанций (СЭС). В связи с



редкой сетью актинометрических станций широкое распространение получило использование спутниковых баз данных и реанализов для оценок солнечных ресурсов. Реанализы, результаты которых представлены в базах данных, построены на основе синтеза спутниковых наблюдений солнечной радиации, приходящей на внешнюю границу атмосферы и отраженной от земной поверхности, облачности, содержания аэрозолей, водяного пара и малых газовых примесей в атмосфере. Эти данные позволяют путем математического моделирования распространения солнечной энергии в атмосфере определять все компоненты солнечной радиации, приходящей на поверхность Земли. При этом моделирование обеспечивает массивы данных в регулярной сетке с пространственным разрешением не ниже 1 градуса широты/долготы. Однако, в связи с неизбежными погрешностями моделирования, необходимо проведение уточнения спутниковых данных, особенно в местах предполагаемого строительства солнечных электростанций путем организации здесь кратковременного актинометрического мониторинга. Кроме того, такие наземные измерения, которые можно рассматривать как аналог подспутниковых наблюдений, позволяют обеспечивать параметризацию моделей распространения солнечного излучения в атмосфере для конкретной территории. Таким образом, в результате организации наземных специализированных актинометрических наблюдений решаются следующие задачи:

- уточнение солнечных ресурсов для оценки (прогноза) потенциальной производительности солнечных электростанций (СЭС) в случае их строительства на близлежащих территориях;
- получение временных рядов для обоснованной корректировки реанализов и спутниковых баз данных, т.е. проведение *site adaptation* (в принятой за рубежом терминологии).

Эти задачи во многом совпадают с точки зрения целей (уточнение величины и пространственного распределения солнечных энергетических ресурсов) и методов их достижения (создание станций краткосрочного мониторинга компонентов приходящей солнечной радиации, состояния атмосферы и метеорологических характеристик).

Значительный объем публикаций в зарубежной научной литературе посвящены исследованиям в описанной выше предметной области, что дает основу для предложений состава и инструментальной реализации систем краткосрочного мониторинга актинометрических и метеорологических параметров в регионах возможного строительства солнечных электростанций, а также для разработки методики корректировки спутниковых данных с учетом местных природных факторов.

Анализ терминологии и целей site-adaptation

Термин и понятие «*site-adaptation*» появилось в научной литературе примерно во второй половине 2000-х гг. Обобщения целей, методических подходов и результатов представлены в ряде работ, в том числе в многочисленных исследованиях J. Polo, например, в [1]. Качественная оценка ресурсов солнечной энергии на основе долговременных и точных измерений или моделирования является предпосылкой для коммерчески успешного проекта



солнечной электростанции. При этом востребованы данные о различных компонентах солнечной радиации: для концентраторных тепловых солнечных электростанций наиболее важна прямая радиация на нормальной к лучу поверхности (в англоязычной литературе – direct normal irradiance (DNI)); для проектов фотоэлектрических станций и систем с плоскими тепловыми коллекторами – суммарная солнечная радиация на горизонтальной или наклонной поверхностях (global horizontal solar irradiance (GHI) и global tilted solar irradiance (GTI)). Высококачественные долгосрочные наземные измерения солнечных ресурсов в непосредственной близости к площадке будущей СЭС практически никогда не проводятся, отсюда – широкое использование данных спутниковых наблюдений и моделей распространения солнечной радиации в атмосфере. [1 – 5]. Основные методы для создания баз данных на основе синтеза спутниковых измерений и моделирования развивались в течение последних 30 лет вслед за достижениями в области дистанционного зондирования и вычислительных методов. В литературе описано развитие этих методов от простых моделей баланса солнечной энергии в атмосфере [6, 7] до более сложных современных методов [4].

Несмотря на плотное покрытие поверхности Земли и высокую точность спутниковых баз данных и реанализов, возникают отклонения их от наземных данных, которые рассматриваются как наиболее точные. Анализ этих различий (например, в [8, 9]) показывает, что существует целый ряд источников ошибок, по-разному влияющие на GHI, GTI и DNI [10]. Различие между спутниковыми наблюдениями и наземными измерениями определяется прежде всего тем, что сигнал (приходящая и отраженная солнечная радиация), принимаемый спутниковым радиометром, привязан к конечной площади земной поверхности, тогда как наземная станция обеспечивает точечное измерение [11]. Так, ширина «следа» видимых и инфракрасных каналов спутниковых радиометров около 3,0–4,5 км в полупустынных и пустынных климатических зонах. Этот фактор особенно сказывается на точности моделей приходящей солнечной радиации для следующих типов земной поверхности: местность с высокой степенью расчлененности рельефа (горные районы), прибрежные районы, районы или периоды года с необычными или быстро меняющимися облачными условиями, сильно отражающие поверхности (песчаные или соляные пустыни и заснеженные территории), районы со сложными характеристиками состава атмосферы (аэрозольная оптическая толщина, содержание водяного пара, запыленность атмосферы и др.). На точность спутниковых данных влияет также геометрия обзора: при больших зенитных углах Солнца высокие облака отбрасывают тени на нижние облака, искажая размеры облачности; также возникает эффект параллакса, когда видимое положение облака отличается от фактического положения.

Указанный комплекс факторов приводит, таким образом, к несоответствию результатов спутниковых наблюдений и моделирования одновременным наземным измерениям. В связи с этим оценки компонентов солнечного излучения, полученные на основе спутниковых снимков и моделирования, должны быть проверены и скорректированы в максимально возможной степени с



использованием доступных наземных измерений. Сезонная и межгодовая изменчивость солнечных ресурсов определяет необходимую длительность наземных измерений (не менее года) и их статистических анализ.

Для этого прибегают к сопоставлению краткосрочных локальных наземных измерений компонентов солнечного излучения со спутниковыми измерениями в те же сроки. В последние годы краткосрочный мониторинг солнечных ресурсов – по аналогии с краткосрочным ветровым мониторингом – стал востребован, в том числе, при получении банковских кредитов на строительство солнечных электростанций и становится, таким образом, элементом проектов в солнечной энергетике. Для обозначения мониторинга используются несколько терминов: “*dataset merging*” (слияние наборов данных) [12], “*measured record extension*” (расширение рядов измерений) [13]. Однако, к настоящему времени за процедурой коррекции модельных данных по наземным измерениям закрепился в основном термин “*site adaptation*” (в русском переводе адаптация места) [14].

Важность уточнения спутниковых баз данных (СпБД) и ренализов для целей солнечной энергетики обусловили создание широкой сети станций наблюдений, удовлетворяющих требованиям по составу измеряемых величин, качеству оборудования, регламенту измерений. Организация наземного мониторинга компонентов приходящего солнечного излучения определяется тенденцией к более широкому применению солнечной энергетики, которая поставлена Международным энергетическим агентством (IEA) в качестве одной из задач технологической исследовательской программы по фотоэлектрическим энергетическим системам³. Задача 16 этой программы получила название Солнечные ресурсы для высокой степени проникновения и крупномасштабного применения (Solar Resource for High Penetration and Large Scale Application). В рамках выполнения задачи 16 IEA PVPS организована система наземных наблюдений за приходящим солнечным излучением на 129 глобально распределенных наземных актинометрических станций: 31 станция в Африке, 31 в Азии, 27 в Северной Америке, 20 в Европе, 13 в Австралии, 5 в Южной Америке и 2 в Антарктиде. Большинство станции обеспечивают измерение следующих основных компонентов: суммарная солнечная радиация на горизонтальной поверхности (GHI), прямая солнечная радиация на нормальной к лучу поверхности (DNI), рассеянная солнечная радиация на горизонтальной поверхности (DHI). Актуальный отчет по этому направлению исследований был представлен в 2023 г. [15]. На рис. 1 показано пространственное расположение тестовых станций, откуда видно, что на территории России присутствует только одна станция на побережье Северного Ледовитого океана, что еще раз подтверждает актуальность более широких исследований в области *site adaptation*.

³ Technology Collaboration Programme IEA: Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS)

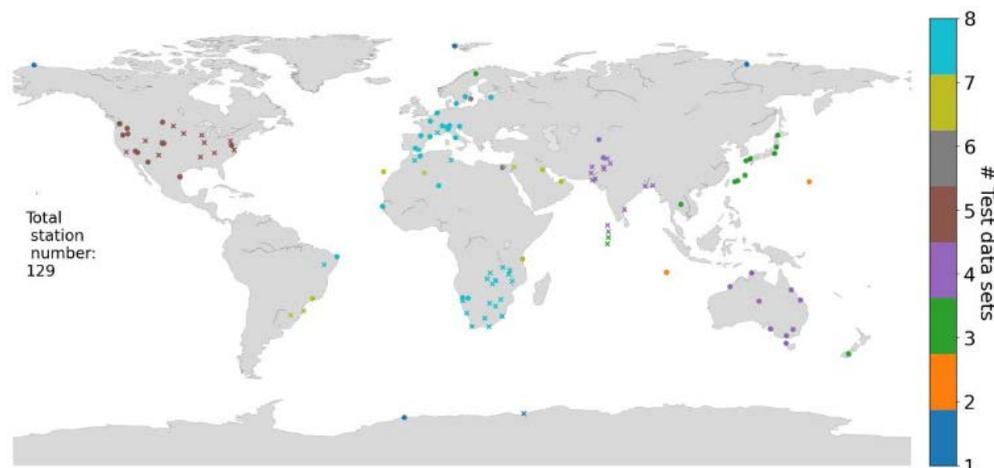


Рисунок 1 – Расположение и количество наборов тестовых данных на станцию мониторинга в рамках IEA Photovoltaic Power Systems Programme [16]

Полный перечень измерений проводится станциями «уровня 1» с помощью трех термоэлектрических радиометров и одного трекера (для измерения прямой радиации на нормальной поверхности). Несколько станций (станции «уровня 2») обеспечивают измерения только двух независимых компонентов (обычно GHI и DNI): либо с помощью двух радиометров с термоэлектрическими датчиками, либо с помощью одного теневого радиометра с трекером. Временное разрешение массивов данных – 1 минута; измерения проводятся с 2015 г. по настоящий период.

Сравнение смоделированных и наблюдаемых значения солнечной радиации проводится с часовым временным разрешением и с дифференциацией по различным регионам и климатическим зонам. В качестве метрик, определяющих точность СпБД и реанализов, рассчитывается ряд статистических характеристик, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Количественные показатели (метрики) отклонений массивов данных наземных наблюдений и спутниковых баз данных или реанализов

Вид показателя	Расчетная формула
Среднее отклонение (Mean bias deviation, aMBD или Mean Bias Error, MBE)	$aMBD = [\sum_i (s_i - r_i)] / N.$
Среднеквадратичное отклонение (Root mean square deviation, aRMSD или Root Mean Square Error, RMSE)	$aRMSD = \sqrt{[\sum_i (s_i - r_i)^2] / N}.$
Стандартное отклонение (Standard deviation, Stddev)	$Stddev = \sqrt{[\sum_i (s_i - r_i - mean(s_i - r_i))^2] / N}.$
Среднее абсолютное отклонение (Mean absolute deviation, aMAD или Mean Absolute Error, MAE)	$aMAD = [\sum_i s_i - r_i] / N.$



В приведенных выше формулах предполагается, что рассматривается выборка данных, содержащая N пар значений фактических (r_i) и модельных (s_i) величин (из наземных измерений и реанализов соответственно) плотности потока солнечного излучения, суточных или часовых сумм солнечной радиации и др. Аналогичные характеристики используются также и при сравнении фактической производительности единичных фотоэлектрических модулей (ФЭМ) или солнечных электростанций и их расчетной производительности на основе данных реанализов. Часто в исследованиях применяются нормировка указанных выше показателей на среднее эталонное (референсное) значение измеряемых величин, что позволяет сравнивать степень отклонений в случае различных по масштабу величин (например, производительности модулей или СЭС различной мощности) и, таким образом, сравнивать результаты различных серий исследований. Помимо детерминистских метрик применяют также вероятностные метрики, которые служат для сравнения статистических характеристик модельных и полученных путем измерений массивов данных, в основном, функций распределения (Критерий Колмогорова-Смирнова или различные комбинированные индексы).

Чаще всего на практике применяются детерминистские метрики, которые более доступны для самостоятельной коррекции СпБД и реанализов локальными пользователями в случае, когда имеются небольшие и стабильные отклонения массивов данных. Наиболее широко в рамках такого подхода используется *метод отношений*, который состоит в определении систематического смещения массивов данных. Метод сводится к коррекции DNI и GHI путем введения корректирующего коэффициента. В дальнейшем это отношение применяется для калибровки набора долгосрочных спутниковых данных. Метод прост в реализации, однако устраняет только среднее смещение, и функция распределения значений будет меняться равномерно по всему диапазону. Разновидностью этого метода является линейная аппроксимация, при которой помимо масштаба (отношения) рассчитывается также смещение данных (систематическая ошибка / систематическое отклонение).

На основе полученных результатов сравнения массивов наземных актинометрических данных, с одной стороны, и СпБД и реанализов, с другой, проектанты солнечных электростанций могут принять обоснованное решение о том, какие модели солнечного излучения и источники данных наиболее подходят для заданного местоположения и целей применения.

Одной из таких целей является долгосрочное прогнозирование выработки электроэнергии солнечными электростанциями, которое проводится путем моделирования их работы в течение 15...25 прошедших лет с использованием имеющихся многолетних временных рядов актинометрических и климатических параметров и экстраполяции результатов в будущее в предположении об отсутствии заметных трендов (изменений) этих параметров.

Одним из важнейших показателей, которые характеризуют выработку энергии объектами 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% [7], 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 в России, 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. Точность определения КИУМ в значительной степени определяется точностью исходных данных, в первую очередь, приходящей солнечной радиацией.

Таким образом, задачами данной работы является:

- анализ отклонений наземных измерений приходящей солнечной радиации в Московском регионе от результатов моделирования, приведенных в широко используемой для целей солнечной энергетики спутниковой базе данных NASA POWER [18];
- оценка погрешностей производительности солнечных электростанций, возникающих в результате отклонения наземных измерений солнечной радиации от данных NASA POWER.

В исследовании были использованы наблюдения метеообсерватории МГУ (МО МГУ) имени М.В. Ломоносова и результаты работы солнечных фотоэлектрических установок на площадке научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ (НИЛ ВИЭ МГУ). Таким образом, в работе показана реализация элементов процедуры *site adaptation* для условий Московского региона. Причем, как видно из формулировки задач, оценки и сравнения проводятся не только в терминах приходящей солнечной радиации (по многолетним наземным измерениям), а в конечных, практически значимых величинах – удельной производительности фотоэлектрических модулей.

Материалы и методы исследований

1. Прямое сравнение суточных сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальной поверхности.

Как указано выше, использование СпБД и реанализов для оценок ресурсов и долгосрочного прогноза производительности солнечных и ветровых станций определяется отсутствием необходимых по номенклатуре и длительности наземных измерений в местах сооружения станций. Для верификации по наземным измерениям следует выбирать те спутниковые базы данных, которые покрывают заданную территорию наиболее плотной пространственной сеткой, закрывают временными рядами интересующий период, имеют достаточное разрешение во



времени и пространстве. В отчетах по программе IEA и научных публикациях рекомендуется использовать в качестве источников модельных данных (СпБД и реанализов) те, которые имеют временное разрешение 15 мин. или 30 мин., пространственное разрешение – 3...5 км, протяженность временных рядов – 10...20 лет. В [19] приведена информация об основных спутниковых БД и реанализах, среди которых по охвату территории, длительности временных рядов и доступности наиболее приемлемыми для использования на территории РФ предложено считать данные NASA «The Clouds and the Earth's Radiant Energy System» Synoptic TOA and surface fluxes and clouds (CERES SYN1deg) [20]. БД NASA POWER [17] предоставляет в открытом доступе средние часовые и суточные суммы суммарной и рассеянной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, а также прямой солнечной радиации на перпендикулярной к лучу поверхность. Временные ряды этой БД охватывают период с 1983 г. по настоящее время. Для наклонных поверхностей южного азимутального направления доступны также средние месячные суммы суммарной солнечной радиации. В рамках задачи *site adaptation* суточные суммы суммарной солнечной радиации для интервала 01.07.1083 – 01.07.2013 г. из БД NASA POWER были сопоставлены с результатами, полученными на сетевых актинометрических станциях России – метеорологической обсерватории МГУ им. М. В. Ломоносова (МО МГУ) (МО МГУ, ID WMO 27617) (www.momsu.ru) и станции Подмосковная (ID WMO 27612) [21].

2. Сравнение расчетных и фактических удельных производительностей солнечных фотоэлектрических станций.

Для верификации долгосрочных прогнозов производительностей станций на основе данных СпБД и реанализов были использованы следующие подходы. Из часовых сумм суммарной солнечной радиации на наклонной поверхности по данным проекта NASA CERES и реанализа ERA5 были рассчитаны значения удельной (на 1 Вт установленной мощности) энергетической производительности фотоэлектрических модулей (ФЭМ), отвечающих современному уровню технологий солнечной энергетики. Расчеты выполнялись для всей территории Российской Федерации с делением ее на 3498 ячеек с пространственным разрешением $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Результаты были представлены в виде массивов средних месячных коэффициентов установленной мощности (КИУМ), которые пропорциональны средней месячной производительности. В расчетах выработки фотоэлектрических модулей использовалась одно-диодная пяти-параметрическая модель. Рассматривались несколько вариантов ориентации ФЭМ, в том числе, неподвижные модули южной ориентации, установленным под оптимальным фиксированным углом наклона к горизонту [22]. Влияние инверторов и потерь в других элементах СЭС на эффективность её работы не учитывалось, поскольку для сетевой электростанции оно составляет 2...3% от выработки. Результаты расчетов КИУМ трех типов фотоэлектрических модулей для территории Российской Федерации были представлены в виде базы данных и размещены в открытом доступе на web-сайте «Геоинформационная система возобновляемые источники энергии России» (ГИС ВИЭ России) [23]. Рассчитанные КИУМ при известной установленной мощности



легко преобразуется в удельную производительность фотоэлектрического модуля или солнечной электростанции.

В рамках проведенного исследования расчетные данные сопоставлялись с фактической производительностью фотоэлектрической солнечной энергоустановки, расположенной на площадке НИЛ ВИЭ МГУ, что позволяет выявить отклонения расчетной и реальной производительности и провести, таким образом, на основе долговременных экспериментов *site adaptation* в терминах производительности станций, что имеет максимальную практическую значимость. На площадке НИЛ ВИЭ располагается демонстрационный образец сетевой солнечной электростанции малой мощности 3,6 кВт, включающей фотоэлектрические модули, аккумуляторы, инверторы и систему сбора данных (рис.2).

Рисунок 2 – Фотоэлектрическая солнечная энергетическая установка «Гибрид» (СЭУ «Гибрид») на территории НИЛ ВИЭ МГУ.

СЭУ состоит из следующих составных частей:

-блок генерации электроэнергии с номинальной мощностью 3,6 кВт, использующий энергию солнечного светового потока, представляющий собой солнечную батарею из 18 фотоэлектрических модулей TSMC 145A (CIGS), которые размещаются на опорных конструкциях, допускающих изменение угла наклона поверхности модулей (рис. 2). Материалы фотоэлектрических преобразователей - селенид меди-индия-галлия производства компании TSMC Solar (Тайвань), КПД 14,7%. Азимутальное расположение модулей – юг; угол наклона к горизонту - 55° (широта места); высота установки модулей порядка 3 м над уровнем земли для минимизации затенения близ расположенными зданиями;



-накопитель электрической энергии, представляющий собой батарею на базе трех гелевых свинцово-кислотных аккумуляторов энергоёмкостью $200\text{А}\times\text{ч}$, снабженную системой балансировки;

-система управления и согласования напряжений и токов заряда, включающая в себя гибридное инвертор-зарядное устройство и группу контакторов, и обеспечивающая подключение энергоустановки параллельно к централизованной энергосети и к потребителю;

-система сбора данных, обеспечивающая контроль и архивирование параметров энергоустановки, в том числе и в режиме удалённого доступа;

-кабельная сеть, обеспечивающая коммутацию элементов энергоустановки;

- нагрузка (потребитель выработанной энергии) – экспериментальная установка по выращиванию микроводорослей, оснащенная лампами ДРЛФ-400 общей мощностью 1,6 кВт.

Таким образом, солнечная энергоустановка и аккумуляторы подключены параллельно с сетью на нагрузку (на потребителя). Инвертор, входящий в состав оборудования СЭУ «Гибрид», позволяет непрерывно обеспечивать необходимую электрическую мощность для потребителя путем переключения подачи энергии от фотоэлектрических модулей, аккумуляторной батареи или от сети – в зависимости от текущей мощности СЭУ. В результате в темное время суток или в период низкой инсоляции потребитель обеспечивается энергией от сети. СЭУ «Гибрид» не позволяет осуществлять продажу/покупку энергии в сеть и в этом смысле не является полноценным просьюмером (сетевым производителем и потребителем энергии). Однако режим ее работы полностью соответствует режиму работы станции микрогенерации, а данные мониторинга ее работы можно использовать для верификации расчетных программ и источников данных (реанализов и СПбД).

Результаты и обсуждение

Результаты сравнений приходящей радиации по данным метобсерватории МГУ (ИО МГУ) и NASA POWER ранее уже были частично изложены в [21]. Сравнения данных были произведены для суточных сумм суммарной солнечной радиации (Q) за тридцатилетний период (1984-2014 гг.). Коэффициенты корреляции массивов данных для обеих станций сравнения близки к 1. Диаграммы рассеяния с регрессиями $R^2=0,977$ (для ИО МГУ) и $R^2=0,982$ (для Подмосквонной) показывают высокую степень корреляции между $Q_{\text{ИО МГУ}}$, $Q_{\text{Подмоск}}$ с одной стороны, и $Q_{\text{NASA POWER}}$ – с другой. Сравнения проводились не только по всему массиву данных за указанный период, но и отдельно по облачным и ясным дням. Известно, что изменчивость суточных сумм солнечной радиации определяется астрономическими факторами (изменение высоты и склонения Солнца) и сменой синоптических процессов, которые определяют изменения в облачном покрове над рассматриваемой территорией, крупномасштабные колебания прозрачности атмосферы [24]. Астрономические факторы легко учитываются в расчетных методах и моделях, что приводит к хорошей корреляции данных NASA POWER и наземных наблюдений при безоблачном небе. Второй фактор требует усвоения спутниковой информации, при этом точность определения фактического значения балла общей облачности



над рассматриваемой территорией существенно влияет на точность расчета суммарной радиации. Станция Подмосковная расположена в 30 км к западу от МО МГУ, поэтому разница в приходе солнечной радиации на двух станциях зависит от фактической облачности в городе и пригороде. Данные NASA POWER, представленные на пространственной сетке $1^\circ \times 1^\circ$, подобных различий не учитывают.

Количественные показатели средних по сезонам отклонений показывают, что данные NASA дают заниженные значения для среднесуточных сумм суммарной солнечной радиации летом и несколько завышенные зимой. Средняя за весь рассмотренный период относительная погрешность для метеообсерватории МГУ

$$d^i \% = \frac{Q_{\text{МОМГУ}} - Q_{\text{NASAPOWER}}}{Q_{\text{МОМГУ}}}$$

составила около 30%, ее значение увеличилось за счет случаев, когда при малых измеренных величинах солнечной радиации (Q) величина d достигает 100%, 300% и даже 500% (рис.3). Надо заметить, что в отличие от разности в потоках, значения относительной погрешности (относительно наблюдений) имеет, в основном, отрицательные значения, т.е. в данных NASA явно не доучтена облачность.

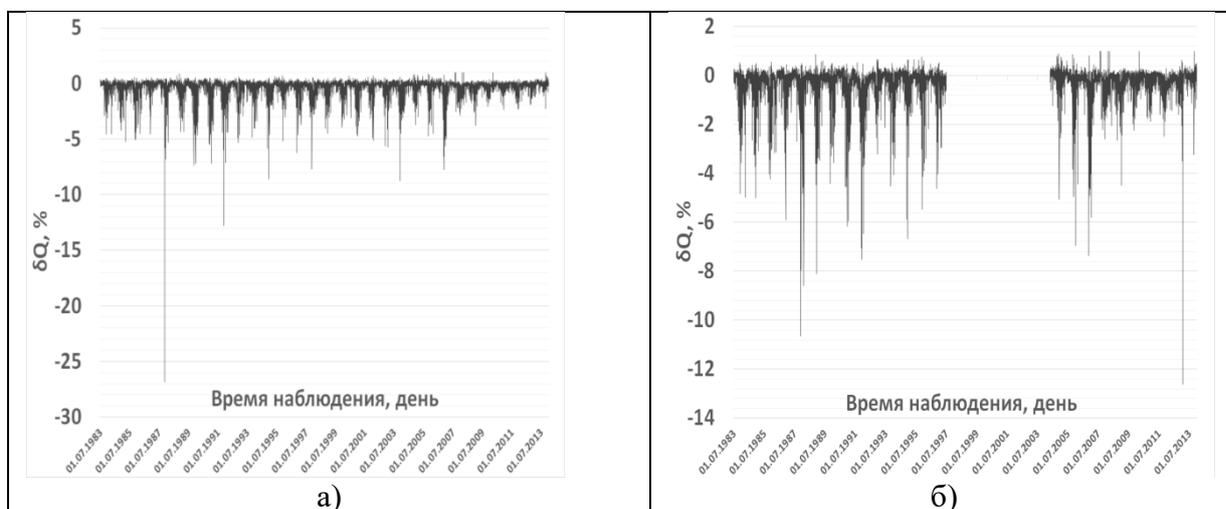


Рисунок 3 – Изменение относительной погрешности данных NASA POWER (δQ) во времени:

а) сравнение с МО МГУ, б) сравнение с метеостанцией Подмосковная

Модальное значение относительной ошибки составляет всего 6%, что в случае сравнения результатов измерений и данных NASA POWER свидетельствует об их хорошей сходимости. Таким образом, для среднесуточных сумм данные БД NASA достаточно адекватно характеризуют значения суммарной радиации. Сходимость результатов можно считать вполне приемлемой для проведения оценок ресурсов и инженерных расчетов.



Как указано выше, помимо сравнения приходящей солнечной радиации, важно в процедуре *site adaptation* провести сравнение производительности солнечных фотоэлектрических установок (или станций), рассчитанных по данным СпБД или реанализов, и фактически работающих. Результаты расчетов коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), который легко преобразуется в производительность солнечных фотоэлектрических модулей различного типа, были проведены ранее для всей территории России по методике, описанной выше. (рис. 4). Величина КИУМ определяет удельную производительность фотоэлектрических модулей или станций в терминах Втч/Вт установленной мощности. Показатели КИУМ для Московского региона (55° с.ш., 37° в.д.) за период 2019 – 2024 гг. были использованы для сравнения с реальной производительностью СЭУ «Гибрид» за тот же период. Предметом анализа стала средняя за месяц удельная суточная производительность фотоэлектрических модулей (Втч/Вт), которая, в экспериментах варьировалась от (0,02... 0,15 Втч/Вт) в ноябре, декабре и январе до максимальных значений (2,15...4,62 Втч/Вт) в июле, (3,17 ... 4,14 Втч/Вт) в августе и (1,41...3,77 Втч/Вт) в сентябре. Следует отметить, что в зимние месяцы не проводилась очистка приемной поверхности фотоэлектрических модулей от снега, поэтому полученные данные отражают более реалистичную картину эксплуатации солнечных энергоустановок в Московском регионе (практически нулевая производительности модулей). Наблюдался локальный максимум производства энергии в марте (1,78 ... 3,0 Втч/Вт), наличие которого подтверждается и теоретическими расчетами.

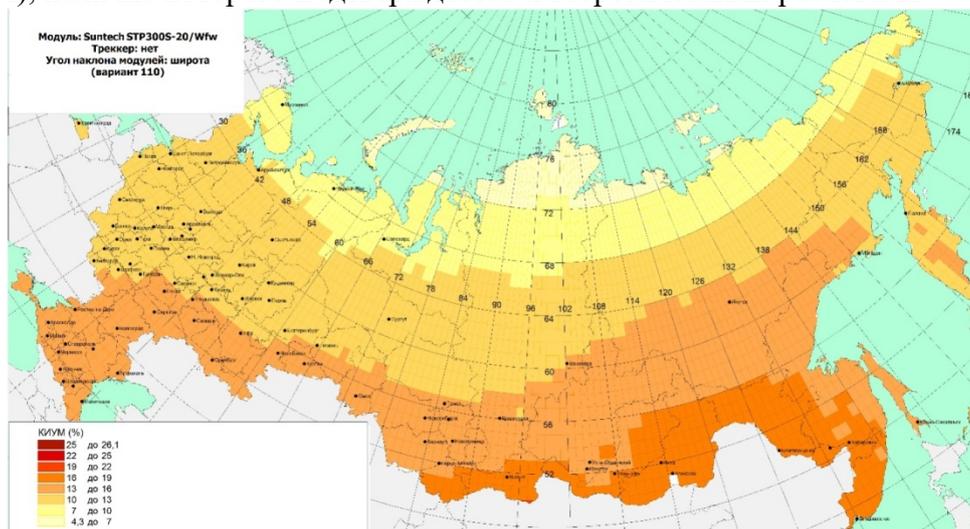
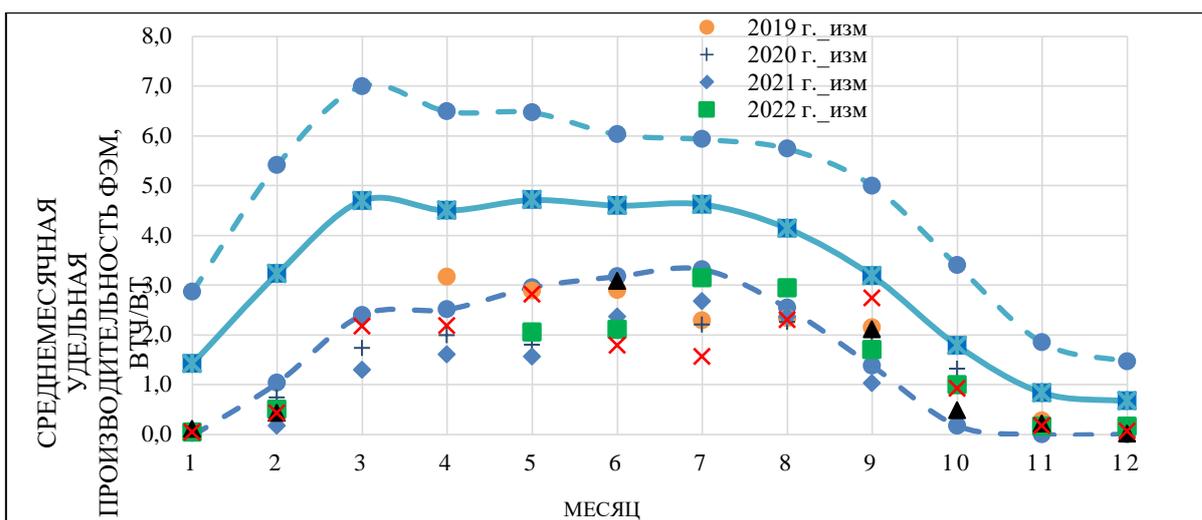


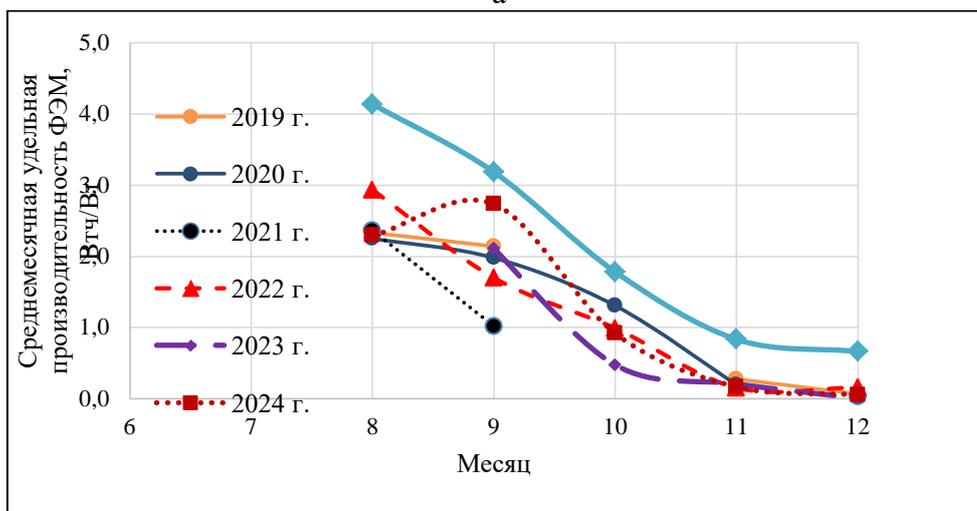
Рисунок 4 – Распределение среднегодового коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) фотоэлектрического модуля для территории России (модуль Suntech STP300S-20/Wfw), без слежения за Солнцем.

На рисунке 5а приведены результаты сравнения среднемесячной удельной производительности, полученной экспериментально в 2019-2024 гг. с расчетными средними производительностями модулей того же типа за период 2000-2022 гг. На рис. 5б выделены результаты сравнения тех же массивов данных в период с августа по декабрь.

Результаты подтверждают завышение данных NASA POWER по приходящей суммарной солнечной радиации. На рисунке 5а показана удельная производительность модулей по средним многолетним приходам солнечной радиации и границы стандартного отклонения от среднего (пунктир). Видно, что экспериментально полученные результаты в основном располагается по границе стандартного отклонения вниз от среднего. Это свидетельствует о том, что результаты, полученные при сравнении наземных актинометрических измерений и СпБД NASA POWER дают по крайней мере верную тенденцию отклонений массивов данных. Однако, относительное отклонение экспериментальных значений производительности СЭУ от расчетных гораздо выше указанных ранее 30%, причем эти отклонения существенно возрастают в летний период времени.



а



б

Рисунок 5 – Результаты измерений удельной производительности фотоэлектрических модулей в сравнении с расчетными значениями за период 2000-2022 гг.:



а – за год; б – в осенне-зимний период [23].

Такие значительные отклонения могут быть вызваны различными причинами и требуют дальнейшего экспериментального исследования, однако, важный практический вывод может быть получен уже на этом этапе:

- экспериментальная установка может затеняться окружающими зданиями (исследования проводятся в условиях городской застройки), причем затенение особенно существенно в зимний период времени в условиях низкого положения Солнца над горизонтом;

- в летний период при значительной производительности солнечных фотоэлектрических модулей установка может быть «недогружена», т.е. иметь недостаточную мощность потребителя, что приводит к частичной не востребованности электрической энергии и ошибкам в определении реальной производительности.

Таким образом, выполнение второго этапа процедуры *site adaptation* путем сравнения реальной производительности станции с расчетной, верифицированной по наземным актинометрическим измерениям, позволяет выявить недовыработку энергии солнечной станцией и, таким образом, определить направления увеличения ее производительности: выбор более выгодного месторасположения станции с минимальным затенением, обеспечение полной передачи выработанной энергии потребителю и т.д.

Заключение

В работе рассмотрена процедура *site adaptation* как инструмент верификации спутниковых баз данных и реанализов о приходящей солнечной радиации и иных метеорологических величинах, необходимых для прогнозов производительности солнечных электростанций. Обоснована необходимость проведения сравнения модельных и наземных измерений вследствие значительных расстояний между актинометрическими станциями, нерегулярностью их в пространственной сетке и сложностью использования наземных данных для удаленных мест эксплуатации солнечных фотоэлектрических станций. Рассмотрена программа Международного энергетического агентства (IEA) мониторинга компонентов солнечной радиации для *site adaptation* (Photovoltaic Power Systems Programme) и приведены основные детерминистские метрики отклонений массивов наземных измерений и модельных данных.

Описана методика экспериментальных исследований, проведенных НИЛ ВИЭ МГУ имени М.В. Ломоносова для сравнения приходящей солнечной радиации по данным метеообсерватории МГУ и БД NASA POWER. Среднее за весь период сравнения (1984-2014 гг.) относительное отклонение суммарной солнечной радиации на метеообсерватории МГУ от модельных данных составила около 30% с завышением данных NASA POWER. Величина завышения возрастала за счет случаев, когда при малых измеренных величинах солнечной радиации величина отклонений массивов данных достигает 100%, 300% и даже 500%. При этом обнаружено занижение значений NASA для среднесуточных сумм суммарной солнечной радиации летом и завышение зимой.



На основе экспериментального мониторинга работы сетевой солнечной энергоустановки проведена верификация теоретических оценок удельной производительности современных типовых фотоэлектрических модулей в условиях Московского региона. Подтверждена обнаруженная актинометрическими наблюдениями тенденция завышения удельной производительности, рассчитанной на основе средних многолетних данных NASA POWER о приходящей солнечной радиации для всех месяцев года. Максимальное отклонение (до 100% от средней расчетной производительности) зафиксированы в зимний период (январь-февраль); экспериментально определен период минимальных отклонений (в область понижения производительности) с июня по сентябрь и проведена оценка этих отклонений. Существенно более высокие отклонения производительности станций от расчетных величин, чем это следует из прямого сравнения актинометрических характеристик, позволяет выявить недовыработку энергии солнечной станцией и, таким образом, определить направления увеличения ее производительности.

Финансирование

Работа выполнена в рамках НИР ГЗ МГУ научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии кафедры экономической и социальной географии России № 121051400082-4 «Географические основы устойчивого развития энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии» и НИР ГЗ лаборатории инженерной теплофизики и возобновляемой энергетики ОИВТ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Polo J., Wilbert S. et. al. Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets / J. Polo, S. Wilbert et. al. // Solar energy. – 2016. – № 132. – P. 25-37.
- [2] Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R., Lorenz, E., Muller, R. et.al. Solar energy assessment using remote sensing technologies. / A. Hammer, D. Heinemann, C. Hoyer, R. Kuhlemann, E. Lorenz, R. Muller, et.al. // Remote Sens. Environ. – 2003. – № 86. – P. 423–432.
- [3] Mueller, R., Dagestad, K., Kuhlemann, R., Olseth, J., Reise, C., Schroedter, M. et.al. Rethinking satellite based solar irradiance modelling. In: Proceedings of: The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference, Weimar, Germany.
- [4] Polo, J., Zarzalejo, L.F., Ramirez, L. Solar radiation derived from satellite images. In: Badescu Viorel (Ed.), Modeling Solar Radiation at the Earth Surface. Springer-Verlag (chapter 18), 2008.
- [5] Perez, R., Cebecauer, T., Suri, M. Semi-empirical satellite models. In: Kleiss Jan (Ed.), Solar Energy Forecasting and Resource Assessment. Elsevier (chapter 2), 2013.
- [6] Gautier, C., Diak, G., Masse, S. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data / C. Gautier, G. Diak, S. Masse // J. Appl. Meteorol. – 1980. – № 19 – P. 1005-1012.



[7] Cano, D., Monget, J.M., Aubuisson, M., Guillard, H., Regas, N., Wald, L. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data / D. Cano, J.M. Monget, M. Aubuisson, H. Guillard, N. Regas, L. Wald, // Sol. Energy. – 1986. – № 37. – P. 31-39.

[8] Gueymard, C.A. Uncertainties in modeled direct irradiance around Sahara as affected by aerosols: are current datasets of bankable quality? / C.A. Gueymard // ASME J. Solar Energy Eng. – 2011. – №133. 03102.

[9] Ineichen, P. Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation / P. Ineichen // EnergyProcedia. – 2014. – № 48. P/ 1586-1596.

[10] Cebecauer, T., Suri, M., Gueymard, C.A. Uncertainty sources in satellite-derived direct normal irradiance: how can prediction accuracy be improved globally. In: Proceedings of: Solar PACES 2011 Conf., Granada, Spain. 2011.

[11] Cebecauer, T. and Suri, M. Site-adaptation of Satellite-based DNI and GHI Time Series: Overview and Solar GIS Approach / AIP Conf. Proc. 1734, 150002. 2016

[12] Thuman, C., Schitzer, M., Johnson, P. Quantifying the accuracy of the use of Measure–Correlate–Predict methodology for long-term solar resource estimates. In: Proceedings of: American Solar Energy Society, Denver CO. 2012.

[13] Gueymard, C.A., Gustafson, W.T., Bender, G., Etringer, A., Storck, P. Evaluation of procedures to improve solar resource assessments: optimum use of short-term data from a local weather station to correct bias in long-term satellite derived solar radiation time series. In: Proceedings of: World Renewable Energy Forum, Denver CO. 2012.

[14] Suri, M., Cebecauer, T., Requirements and standards for bankable DNI data products in CSP projects. In: Proceedings of: Solar PACES 2011 Conf., Granada, Spain. 2011.

[15] Worldwide Benchmark of Modelled Solar Irradiance Data IEA PVPS. Task 16. Solar Resource for High Penetration and Large-Scale Applications. Report IEA-PVPS T16-05:2023. June – 2023. ISBN 978-3-907281-44-44. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iea-pvps.org/key-topics/worldwide-benchmark-of-modelled-solar-irradiance-data/>.

[16] Официальный сайт IEA Photovoltaic Power Systems Programme. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iea-pvps.org/research-tasks/solar-resource-for-high-penetration-and-large-scale-applications/>.

[17] Рынок возобновляемой энергетики России. Текущий статус и перспективы развития. Информационный бюллетень АРВЭ, июль 2024 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://trreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065bliiscovlumxq02gqvkcx/202408_RREDA_annual_RES_report.pdf.

[18] The NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

[19] Yang D., Bright J.M. Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: A preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years / D. Yang, J.M. Bright // Solar Energy. – 2020. – № 210. – P. 3-19.



[20] CERES – Clouds and the Earth’s Radiant Energy System. SYN1deg_Ed4.1 Subsetting and Browsing. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SYN1degEd41Selection.jsp>.

[21] Коломиец Ю.Г., Горбаренко Е.В., Киселева С.В. и др. Актинометрические данные для проектирования солнечных энергоустановок в Московском регионе / Ю.Г. Коломиец, Е.В. Горбаренко, С.В. Киселёва и др. // *Альтернативная энергетика и экология*. — 2016. — № 21-22. — С.12–24.

[22] Frid S.E., Lisitskaya N.V., Muminov Sh.A. On the optimal angle of inclination of photovoltaic modules to the horizon / S.E. Frid, N.V. Lisitskaya, Sh.A. Muminov // *Appl. Sol. Energy*. – 2023. – V. 59. – №. 1. – P. 26-29.

[23] Веб-сайт ГИС ВИЭ России. Раздел Производительность ФЭМ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gisre.ru/map-sunres/photovoltaic/>.

[24] Горбаренко Е.В., Шиловцева О.А. Гелиоэнергетические ресурсы Москвы / Е.В. Горбаренко, О.А. Шиловцева // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2013. – №6, Часть 2. – С.28-35.

REFERENCES

[1] Polo J., Wilbert S. et. al. (2016). Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. *Solar energy*, 132, 25-37.

[2] Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R., Lorenz, E., Muller, R. et.al. (2003). Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sens. Environ*, 86, 423-432.

[3] Mueller, R., Dagestad, K., Kuhlemann, R., Olseth, J., Reise, C., Schroedter, M. et.al. (2003). Rethinking satellite based solar irradiance modelling. In: Proceedings of: The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users’ Conference, Weimar, Germany.

[4] Polo, J., Zarzalejo, L.F., Ramirez, L. Solar radiation derived from satellite images. (2008). In: Badescu Viorel (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*. Springer-Verlag (chapter 18).

[5] Perez, R., Cebecauer, T., Suri, M. (2013). Semi-empirical satellite models. In: Kleiss Jan (Ed.), *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. Elsevier (chapter 2).

[6] Gautier, C., Diak, G., Masse, S. (1980). A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *J. Appl. Meteorol.* 19, 1005-1012.

[7] Cano, D., Monget, J.M., Aubuisson, M., Guillard, H., Regas, N., Wald,L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Sol. Energy*, 37, 31-39.

[8] Gueymard, C.A. (2011). Uncertainties in modeled direct irradiance around Sahara as affected by aerosols: are current datasets of bankable quality? *ASME J. Solar Energy Eng.*, 133, 03102.

[9] Ineichen, P. (2014). Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation. *EnergyProcedia*, 48, 1586-1596.



- [10] Cebecauer, T., Suri, M., Gueymard, C.A. (2011). Uncertainty sources in satellite-derived direct normal irradiance: how can prediction accuracy be improved globally. In: Proceedings of: Solar PACES 2011 Conf., Granada, Spain.
- [11] Cebecauer, T. and Suri, M. (2016). Site-adaptation of Satellite-based DNI and GHI Time Series: Overview and Solar GIS Approach / AIP Conf. Proc. 1734, 150002.
- [12] Thuman, C., Schitzer, M., Johnson, P. (2012). Quantifying the accuracy of the use of Measure–Correlate–Predict methodology for long-term solar resource estimates. In: Proceedings of: American Solar Energy Society, Denver CO.
- [13] Gueymard, C.A., Gustafson, W.T., Bender, G., Etringer, A., Storck, P. (2012). Evaluation of procedures to improve solar resource assessments: optimum use of short-term data from a local weather station to correct bias in long-term satellite derived solar radiation time series. In: Proceedings of: World Renewable Energy Forum, Denver CO.
- [14] Suri, M., Cebecauer, T. (2011) Requirements and standards for bankable DNI data products in CSP projects. In: Proceedings of: Solar PACES 2011 Conf., Granada, Spain.
- [15] Worldwide Benchmark of Modelled Solar Irradiance Data IEA PVPS. Task 16. Solar Resource for High Penetration and Large-Scale Applications. Report IEA-PVPS T16-05:2023. June – 2023. ISBN 978-3-907281-44-44. Retrieved from: <https://iea-pvps.org/key-topics/worldwide-benchmark-of-modelled-solar-irradiance-data/>.
- [16] IEA Photovoltaic Power Systems Programme. Retrieved from: <https://iea-pvps.org/research-tasks/solar-resource-for-high-penetration-and-large-scale-applications/>.
- [17] Rynok vuzobnovlyaemoj energetiki Rossii Tekushchij status i perspektivy razvitiya. Informacionnyj byulleten' ARVE, iyul' 2024 g. [*Renewable Energy Market in Russia. Current Status and Development Prospects. ARVE Newsletter, July 2024*]. Retrieved from: https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065blilscovlumxq02gqvkcx/202408_RREDA_annual_RES_report.pdf. [in Russian].
- [18] The NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. Retrieved from: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [19] Yang D., Bright J.M. (2020). Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: A preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years. *Solar Energy*, 210. 3-19.
- [20] CERES – Clouds and the Earth's Radiant Energy System. SYN1deg_Ed4.1 Subsetting and Browsing. Retrieved from: https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SYN1degEd41_Selection.jsp.
- [21] Kolomic Yu.G., Gorbarenko E.V., Kiseleva S.V. i dr. (2016). Aktinometricheskie dannye dlya proektirovaniya solnechnyh energoustanovok v Moskovskom regione [Actinometric data for designing solar power plants in the Moscow region] *Alternativnaya energetika i ekologiya. – Alternative energy and ecology*, 21-22, 12–24. [in Russian].
- [22] Frid S.E., Lisitskaya N.V., Muminov Sh.A. (2023). On the optimal angle of inclination of photovoltaic modules to the horizon. *Appl. Sol. Energy*, 59, 1, 26-29.



[23] Veb-sajt GIS VIE Rossii. Razdel Proizvoditel'nost' FEM. [*Website of GIS RES of Russia. Section Performance of FEM.*]. Retrieved from: <https://gisre.ru/map-sunres/photovoltaic/>. [in Russian].

[24] Gorbarenko E.V., Shilovceva O.A. (2013). Gelioenergeticheskie resursy Moskvyy [Solar energy resources of Moscow] *Al'ternativnaya energetika i ekologiya. – Alternative energy and ecology*, 6, 2, 28-35. [in Russian].

**Киселева С.В., Шакун В.П., Фрид С.Е., Горбаренко Е.В.
КҮН ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ МАҚСАТЫНДАҒЫ МЕТЕОРОЛОГИЯЛЫҚ
ШАМДАРДЫ ҚАЙТА ТАЛДАУДЫҢ ТЕКСЕРУ НӘТИЖЕЛЕРІ.**

Аңдатпа. Күн электр станцияларының өнімділігін ұзақ мерзімді болжау жалпы күн энергетикасын дамытудың, сондай-ақ күн электр станцияларын орналастырудың оңтайлы учаскелерін жобалау мен таңдаудың негізгі буыны болып табылады. 1990 жылдардан бастап актинометриялық станциялардағы ұзақ мерзімді өлшеулерден басқа, метеорологиялық және әсіресе актинометриялық сипаттамалардың жаһандық қайта талдаулары болжау үшін деректер көздеріне айналды. Қайта талдаулар тұрақты тордағы үздіксіз қатарлардың ұзақ мерзімді сипатымен ерекшеленеді, бұл кемшіліктерді азайтады және жерүсті актинометриялық өлшеу желісінің деректерін толықтырады, Ресей және Қазақстан сияқты елдерде бұл жүйені дамыту үшін мүлдем жеткіліксіз. елдердің үлкен аумағына және станциялардың бір-бірінен қашықтығына байланысты күн энергиясы. Сонымен қатар, қайта талдаулар математикалық модельдеу және спутниктік бақылаулар синтезінің нәтижесі бола отырып, оларды сенімді қолдану үшін тексеруді және күн электр станцияларын орналастыру үшін пайдалану жоспарланған аумақтарды қамтитын егжей-тегжейлі тексеруді талап етеді. Бұл жағдайда процедураларды қолдану және сайтты бейімдеу әдістемесін әзірлеу қажет, яғни. қайта талдау деректерін субспутниктік тексеру – маңызды кезеңдер үшін де, шұғыл кезеңдерде де орташа. Бұл мақалада Мәскеу облысының аумағына учаскені бейімдеу процедурасының тәсілдері қарастырылады және нәтижелері көрсетіледі, жер бетіндегі нәтижелердің жүйелік ауытқулары - тек түсетін күн радиациясы үшін ғана емес, сонымен қатар күн фотоэлектрлік қондырғыларының ерекше өнімділігі үшін де анықталған. күн электр станцияларын жобалауда оны одан әрі пайдалану үшін іс жүзінде қолданылатын ақпарат.

Кілт сөздер: күн энергиясы; мониторинг; тексеру; қайта талдау; сайтты бейімдеу; деректер қатесі.

**Kiseleva Sofia, Shakun Vladimir, Frid Semen, Gorbarenko Ekaterina.
RESULTS OF VERIFICATION OF REANALYSES OF METEOROLOGICAL
QUANTITIES FOR SOLAR ENERGY PURPOSES**

Annotation. Long-term forecasting of solar power plants' productivity is a key link for the development of solar energy in general, as well as for the design and selection of optimal sites for the placement of solar power plants. Since the 90s of the 20th century, in addition to long-term measurements at actinometric stations, global reanalyses of meteorological and - especially - actinometric characteristics have become



sources of data for forecasting. Reanalyses are distinguished by the long-term nature of continuous series in a regular grid, which reduces the shortcomings and complements the data of the ground-based actinometric measurement network, which in countries such as Russia and Kazakhstan is absolutely insufficient for the development of solar energy due to the significant area of the countries' territories and the remoteness of the stations from each other. At the same time, reanalyses, being the result of the synthesis of mathematical modeling and satellite observations, require verification for their reliable application, and detailed verification covering those territories that are planned to be used for the placement of solar power plants. In this case, it is necessary to apply procedures and develop a site adaptation methodology, i.e. sub-satellite verification of reanalysis data - both average for significant periods and urgent. The paper considers approaches and shows the results of the site adaptation procedure for the territory of the Moscow region, reveals systemic deviations of ground-based results - not only for incoming solar radiation, but also for the specific productivity of solar photovoltaic installations, which provides practically applicable information for its further use in the design of solar power plants. **Keywords:** solar energy, monitoring, verification, reanalyses, site adaptation, data error.

Key words: solar energy; monitoring; verification; reanalysis; site adaptation; data error.