

И.Ю. ИВАНОВА, В.А. ШАКИРОВ, Н.А. ХАЛГАЕВА

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия,
nord@isem.irk.ru, shakirov@isem.irk.ru, khalgaeva@isem.irk.ru

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОЦЕНОК БАЗ ДАННЫХ И РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Для эффективного использования солнечной энергии необходима точная оценка поступающего потока солнечной радиации. Проводится сравнение точности среднемесячных оценок потока суммарной солнечной радиации базы данных реанализа ERA5, базы данных на основе спутниковых наблюдений SYN1deg, данных климатических справочников и регрессионных моделей по семи населенным пунктам востока России. В исследовании участвуют две известные регрессионные модели, включающие параметры внеатмосферной солнечной радиации, общей облачности, влажности воздуха, минимальной и максимальной температуры воздуха, атмосферного давления, а также новая регрессионная модель, включающая дополнительно параметры нижней облачности и высоты солнца. Сравнение баз данных и регрессионных моделей по точности проводится путем сопоставления с данными наземных измерений метеостанций. Выполнен расчет показателей средней абсолютной, среднеквадратичной ошибки и средней ошибки смещения. Результаты сравнения показали, что данные климатических справочников за период с 1937–1957 гг. по 1980 г. имеют наименьшее отклонение от оценок среднемесячного потока суммарной солнечной радиации за 2006–2020 гг. в большинстве из рассмотренных пунктов. Среднемесячные оценки потока суммарной солнечной радиации ERA5 имеют большую точность в сравнении с данными SYN1deg в пяти из семи рассматриваемых пунктов. Предложенная в исследовании новая регрессионная модель позволяет обеспечить большую точность месячных оценок потока суммарной солнечной радиации в сравнении с данными SYN1deg, а также в сравнении с данными ERA5 для большинства рассмотренных пунктов.

Ключевые слова: солнечная радиация, регрессионная модель, данные спутниковых наблюдений, реанализ, сравнение точности.

I.Yu. IVANOVA, V.A. SHAKIROV, N.A. KHALGAEVA

Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 130, Russia,
nord@isem.irk.ru, shakirov@isem.irk.ru, khalgaeva@isem.irk.ru

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF ASSESSING DATABASES AND REGRESSION MODELS OF GLOBAL SOLAR RADIATION FOR THE EASTERN PART OF RUSSIA

The efficient use of solar energy requires an accurate assessment of the incoming solar radiation. The study involves comparing the accuracy of monthly means of the global solar radiation flux from the ERA5 reanalysis database, the SYN1deg satellite-based observation database, climate reference data, and data of regression models for seven settlements in the east of Russia. The study employs two well-known regression models, including parameters of extraterrestrial solar radiation, total cloudiness, air humidity, minimum and maximum air temperature, atmospheric pressure, and a new regression model, which additionally includes parameters of low-level cloudiness and sun elevation angle. The accuracy of databases and regression models is evaluated by comparing their data with ground measurements of weather stations. The indices of the mean absolute error, root-mean-square error, and mean bias error are calculated. The comparison shows that the data of climate reference books for the period from 1937–1957 to 1980 have the smallest deviation from the estimates of the monthly mean flux of global solar radiation for 2006–2020 at most of the points discussed. The ERA5 monthly mean estimates of the global solar radiation flux are more accurate than the SYN1deg data at five of the seven points considered. The new regression model proposed in the study makes it possible to provide greater accuracy of monthly estimates of the global solar radiation flux compared to the data of SYN1deg and ERA5 for most of the points considered.

Keywords: solar radiation, regression model, satellite-based data, reanalysis, accuracy comparison.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная энергия — один из наиболее перспективных возобновляемых источников благодаря ее повсеместной доступности, а также сравнительно высокой экономической эффективности технологий ее использования [1, 2]. Во многих регионах мира технологии преобразования солнечной энергии занимают все более прочные позиции при энергоснабжении городов, удаленных поселений, объектов сельского хозяйства [3–5]. Солнечная энергия должна сыграть ключевую роль в достижении углеродной нейтральности, обеспечив частичное замещение электростанций на органическом топливе [6].

Для эффективного применения технологий преобразования солнечной энергии необходима точная оценка поступающего потока солнечной радиации. Сеть метеостанций, ведущих в России актинометрические наблюдения, характеризуется низкой плотностью [7, 8], особенно в азиатской части России [9]. Эта проблема, существующая во многих регионах мира, связана с высокой стоимостью оборудования, сложностью его обслуживания [10, 11].

В условиях ограниченности данных наземных измерений солнечной радиации используются базы данных на основе спутниковых наблюдений и реанализа [12]. В качестве альтернативы применяются регрессионные модели, определяющие функциональную зависимость потока солнечной радиации от метеорологических или географических параметров [13]. Выбор базы данных или регрессионной модели неоднозначен, поскольку в различных регионах мира их точность может различаться [12, 14]. Это связано с влиянием на точность применяемых моделей различных антропогенных [14] и природно-климатических факторов, таких как горный рельеф местности, крупные водоемы, северные территории [15, 16].

Целью исследования является ранжирование по точности источников данных о суммарной солнечной радиации для востока России. В исследовании проводится сравнение точности среднемесячных оценок потока суммарной солнечной радиации базы данных реанализа ERA5 [17], базы данных на основе спутниковых наблюдений SYN1deg [18], данных справочника по климату [19] и регрессионных моделей. Включение в сравнительный анализ справочников по климату связано с необходимостью оценить возможность и целесообразность использования данных о солнечной радиации, полученных 40–70 лет назад. Климатические изменения последних десятилетий повышают актуальность этого вопроса [20].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Сравнение по точности баз данных и регрессионных моделей проводится посредством сопоставления с данными наземных измерений метеостанций, представленных в открытом доступе Мировым центром радиационных данных (МЦРД) [21]. Для восточной части России в базе МЦРД оценки суммарной солнечной радиации доступны по 16 метеостанциям. Однако база МЦРД имеет пропуски данных протяженностью от суток до нескольких лет. Оценки солнечной радиации на востоке России с 2000 г. доступны только по семи населенным пунктам: Иркутск, Чита, Оймякон, Якутск, Петропавловск-Камчатский, Южно-Сахалинск, Владивосток. Малое количество пунктов для сопоставления данных несколько компенсируется их разнообразием по природно-климатическим условиям и уровню антропогенного загрязнения атмосферы.

В таблицах приведены характеристики баз данных и климатических справочников (табл. 1) и рассматриваемых в исследовании регрессионных моделей (табл. 2). Модель М1 представляет собой

Таблица 1

Характеристика баз данных и климатических справочников с оценками суммарной солнечной радиации

Источник данных	Способ получения данных	Пространственное разрешение данных	Осреднение и период данных
ERA5	Реанализ	0,25° × 0,25°	1959 г. — настоящее время; часовые значения
CERES SYN1deg	Спутниковые наблюдения	1° × 1°	1984 г. — настоящее время; часовые значения
Научно-прикладной справочник по климату СССР [19]	Наземные измерения	Сеть метеостанций	1937–1980 гг. (Якутск), с 1953–1957 гг. до 1980 г. (остальные пункты); среднемесячные значения за весь период
Мировой центр радиационных данных	Наземные измерения	Сеть метеостанций	1964 г. — настоящее время; суточные значения солнечной радиации

Таблица 2

Выбранные регрессионные модели для оценки суммарной солнечной радиации

Модель	Регрессионная зависимость	Источник
M1	$H_g = H_0 (a_1 + a_2 \cdot C + a_3 \cdot C^2 + a_4 \cdot C^3)$	[13]
M2	$H_g = H_0 (a_5 + a_6 (T_{\max} - T_{\min+})^{0.5} + a_7 \cdot RH + a_8 \cdot P)$	[14]
M3	$H_g = H_0 (a_9 + a_{10} \cdot C + a_{11} \cdot C_l + a_{12} \cdot RH + a_{13} \cdot \sin \alpha + a_{14} \cdot T_{\min} + a_{15} \cdot T_{\max})$	Новая регрессионная модель

зависимость потока суммарной солнечной радиации H_g от потока внеатмосферной солнечной радиации H_0 и общей облачности C . Модель M2 включает в себя параметры внеатмосферной солнечной радиации H_0 , минимальной $T_{\min}$ и максимальной температуры воздуха $T_{\max}$, влажности воздуха RH , атмосферного давления P . Выбор моделей обусловлен набором доступных данных измерений метеорологических параметров за длительный период и сравнительно высокой точностью, показанной в исследованиях [13, 14]. Новая регрессионная модель M3 получена на основе комбинации известных моделей [13, 14] с дополнительным включением параметров нижней облачности C_l и высоты солнца $\sin \alpha$.

Среднемесячная суточная внеатмосферная солнечная радиация рассчитывается по формуле [22]

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[1 + 0,33 \cdot \cos \left(\frac{360D}{365} \right) \right] \cdot [\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta], \quad (1)$$

где I_{sc} — солнечная постоянная, 1367 Вт/м²; D — порядковый номер дня года; φ — широта местности, рад.; δ — среднемесячный угол склонения солнца, рад.; ω_s — среднемесячный часовой угол солнца при закате, рад.

Высота солнца определяется для полудня среднего дня месяца [22]:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega. \quad (2)$$

Данные об измеренных параметрах C , C_l , RH , $T_{\max}$, $T_{\min}$ получены из базы «Расписание погоды» [23] за 2007–2019 гг. Так как измерения на метеостанциях проводятся от 8 до 24 раз в сутки, была выполнена обработка архива данных с использованием разработанного программного обеспечения Sun-MCA [24] и получены значения с суточной детализацией.

Определение коэффициентов моделей M1–M3 проводится по массиву измерений, сформированному путем включения метеорологических данных трех лет каждого рассматриваемого пункта. Выбор трех лет из периода 2007–2019 гг. для каждого пункта сделан на основании минимального пропуска данных в базах «Расписание погоды» и МЦРД. Расчет коэффициентов моделей выполнен средствами Microsoft Excel. Регрессионные модели, определенные таким образом, позволяют рассматривать возможность их применения для оценки потока суммарной солнечной радиации на территории востока России.

Сравнение по точности баз данных о солнечной радиации и регрессионных моделей проводилось с использованием трех показателей.

1. Средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_{gis} - H_{gim}|, \quad (3)$$

где H_{gis} , H_{gim} — рассчитанная и измеренная оценки потока суммарной солнечной радиации соответственно, МДж/м²; n — количество сопоставляемых значений.

2. Средняя ошибка смещения (MBE):

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{gis} - H_{gim}). \quad (4)$$

3. Среднеквадратичная ошибка (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{gis} - H_{gim})^2}{n}}. \quad (5)$$

Большее значение MAE и RMSE характеризует меньшую точность оценок потока солнечной радиации в сравнении с измеренными значениями. Положительное значение MBE показывает, что источник данных завышает оценки в сравнении с наземными измерениями и наоборот.

Сравнение источников данных о солнечной радиации включает два этапа. На первом этапе проводится сопоставление среднемесячных оценок суммарной солнечной радиации за 2006–2019 гг. баз данных ERA5, CERES SYN1deg и МЦРД с привлечением справочников по климату с данными о солнечной радиации за периоды, указанные в табл. 1. На втором этапе проводится сравнительный анализ месячных оценок суммарной солнечной радиации, полученных регрессионными моделями М1–М3, а также из баз данных ERA5 и SYN1deg. Анализ проводится для отдельных лет, выбранных по критерию полноты данных в базе МЦРД.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 3 представлены оценки погрешности различных источников данных при сравнении с данными МЦРД за 2006–2019 гг. На рис. 1 показан график отклонения среднемесячных значений

Таблица 3

Результаты сравнения среднемесячных оценок суммарной солнечной радиации, МДж/м²/мес.

Пункт	ERA5			SYN1deg			Справочник [19]		
	MAE	MBE	RMSE	MAE	MBE	RMSE	MAE	MBE	RMSE
Иркутск	42,2	42,2	47,8	34,8	34,8	37,7	15,3	8,1	17,3
Чита	15,0	13,0	20,2	11,4	8,3	17,3	21,6	–15,9	25,5
Оймякон	10,8	–1,2	14,3	10,8	3,1	14,5	25,4	25,4	32,6
Якутск	14,5	14,5	18,5	21,3	19,2	25,8	13,8	12,7	15,4
Петропавловск-Камчатский	13,2	12,0	21,2	19,7	–12,1	27,6	12,0	8,1	16,3
Южно-Сахалинск	11,0	1,31	13,1	41,2	–41,0	47,4	17,9	–17,9	22,2
Владивосток	20,0	20,0	22,7	17,0	14,3	24,7	15,2	13,7	23,3
По всем пунктам	18,1	14,5	25	22,3	3,8	29,8	17,3	4,9	22,5

Примечание. Здесь и в табл. 4, 5: MAE, MBE, RMSE – см. текст.

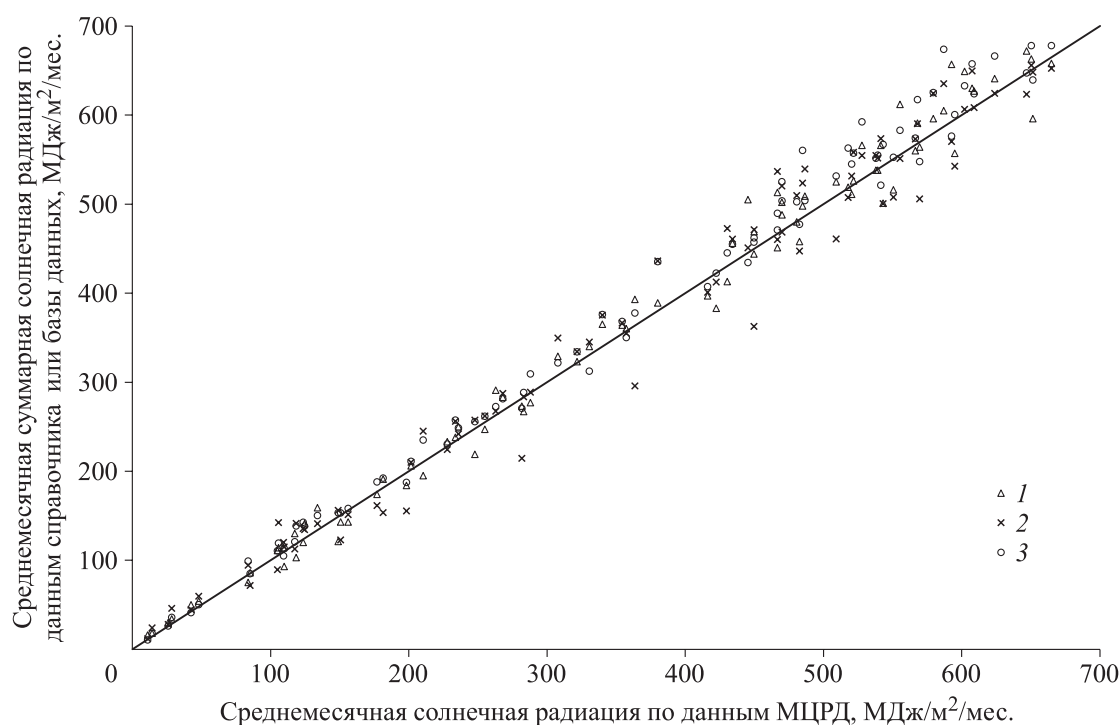


Рис. 1. Разброс среднемесячных значений суммарной солнечной радиации баз данных и справочника по климату [19] относительно данных измерений базы МЦРД в семи пунктах на Востоке России.

1 — справочник; 2 — SYN1deg; 3 — ERA5.

суммарной солнечной радиации по ERA5, SYN1deg и справочнику по климату [19] от значений МЦРД. Более близкое расположение точек графика к прямой линии говорит о большей точности оценок этого источника данных. Проведенное сравнение показывает следующее.

1. Оценки среднемесячной суммарной солнечной радиации по данным справочника по климату в четырех из семи пунктов имеют наименьшее отклонение от наземных измерений за 2006–2019 гг. по сравнению с данными ERA5 и SYN1deg и характеризуются в целом по всем пунктам малой ошибкой.

2. Оценки базы данных ERA5 в большинстве рассматриваемых пунктов имеют показатели MAE, MBE, RMSE лучше, чем оценки SYN1deg.

На втором этапе исследования были определены коэффициенты регрессионных моделей М1–М3:

$$H_g = H_0 (0,410717 + 0,140414 \cdot C - 0,0272 \cdot C^2 + 0,00133 \cdot C^3);$$

$$H_g = H_0 (0,30943 + 0,030307 (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} - 0,0011 \cdot RH + 0,00019 \cdot P);$$

$$H_g = H_0 (0,7 - 0,03 \cdot C - 0,005 \cdot C_l - 0,0024 \cdot RH + 0,1 \cdot \sin \alpha + 0,0006 \cdot T_{\min} - 0,0006 \cdot T_{\max}).$$

В табл. 4 представлены результаты расчета показателей MAE, MBE, RMSE при сравнении с данными измерений суммарной солнечной радиации МЦРД. Предложенная модель М3 точнее для пяти из семи рассматриваемых пунктов по сравнению с моделями М1 и М2. Это связано с большим набором параметров регрессионной модели М3.

Выполнено сравнение точности месячных оценок суммарной солнечной радиации баз данных ERA5 и SYN1deg за тот же период и определен наиболее точный источник данных (табл. 5). Модель М3 точнее для четырех из семи рассматриваемых пунктов. Максимальная оценка MAE составила 36,2 МДж/м²/мес. (Южно-Сахалинск). Оценки базы данных ERA5 также имеют высокую точность с максимальным значением MAE 36,9 МДж/м²/мес. (Иркутск).

Отклонение оценок солнечной радиации, полученных расчетным путем, от данных наземных измерений МЦРД показано на рис. 2. Оценки ERA5 имеют преимущественно положительные значения MBE, расположены выше прямой линии, что говорит о переоценке суммарной солнечной радиации и позволяет ввести поправочные коэффициенты для повышения точности.

Таблица 4

Результаты сравнения регрессионных моделей М1–М3 по точности, МДж/м²/мес.

Пункт	М1			М2			М3		
	MAE	MBE	RMSE	MAE	MBE	RMSE	MAE	MBE	RMSE
Иркутск	24,9	5,78	33,5	29,6	22,8	35,8	13,8	7,4	21,4
Чита	31,9	–27,1	37,7	43,7	–36,4	49,3	29,3	–24,9	34,9
Оймякон	19,3	1,6	27,9	30,5	–0,5	45,4	14,3	0,1	22,7
Якутск	25,0	–15,4	33,6	31,9	18,0	43,6	17,2	–9,0	22,6
Петропавловск-Камчатский	24,9	15,3	29,3	23,5	12,9	27,2	14,5	2,0	16,7
Южно-Сахалинск	30,2	–29,7	43,7	23,9	–13,7	33,7	36,2	–36,2	44,1
Владивосток	22,8	12,3	25,8	39,9	–13,6	50,0	23,3	7,9	27,3
По всем пунктам	26,6	–0,6	35,2	30,9	–6,3	40,1	21,2	–7,5	28,5

Таблица 5

Результаты сравнения модели М3, баз данных ERA5 и SYN1deg по точности, МДж/м²/мес.

Пункт	ERA5			SYN1deg			Наиболее точный источник данных
	MAE	MBE	RMSE	MAE	MBE	RMSE	
Иркутск	36,9	36,9	42,5	31,6	31,6	36,3	Модель М3
Чита	10,6	9,6	14,3	17,2	–4,0	23,2	ERA5
Оймякон	13,7	10,9	25,2	19,3	19,3	24,9	Модель М3, ERA5
Якутск	21,8	18,5	27,9	33,9	31,9	38,8	Модель М3
Петропавловск-Камчатский	19,7	6,2	24,5	18,4	–16,6	24,3	Модель М3
Южно-Сахалинск	27,5	–17,6	35,0	59,2	–59,2	65,2	ERA5
Владивосток	17,1	7,6	20,3	16,8	–1,7	20,3	SYN1deg
По всем пунктам	21,0	10,3	28,4	28,4	0,2	36,3	Модель М3

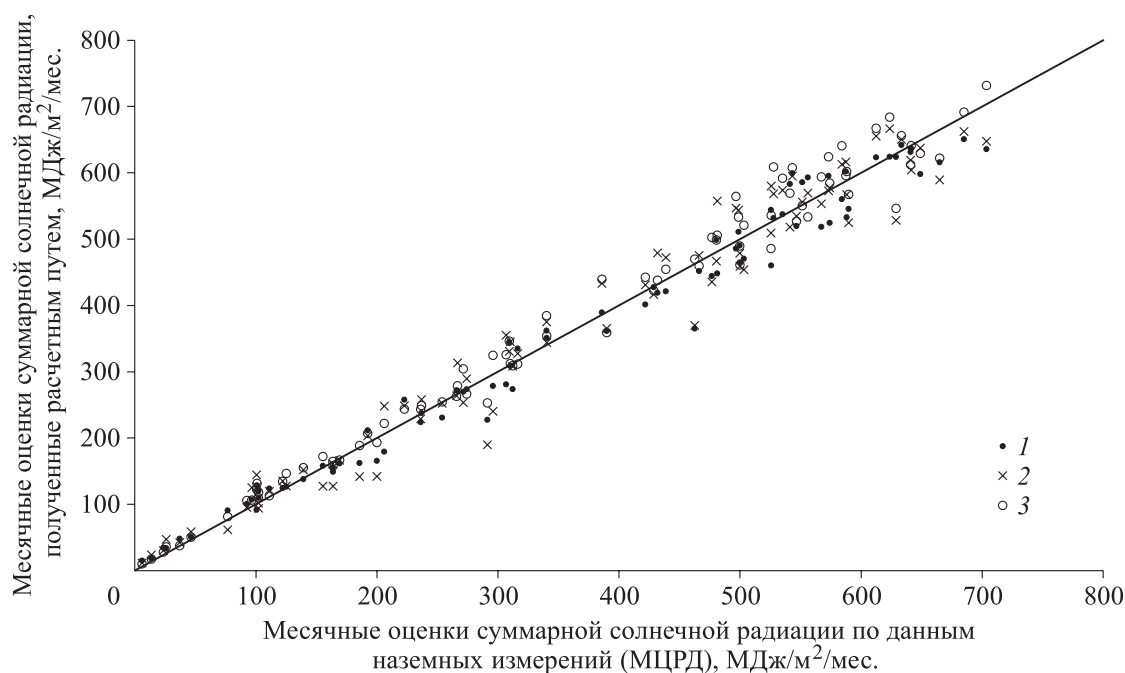


Рис. 2. Разброс месячных значений суммарной солнечной радиации баз данных ERA5, SYN1deg и регрессионной модели М3 относительно данных наземных измерений базы МЦРД в семи пунктах на востоке России.

1 — модель М3; 2 — ERA5; 3 — SYN1deg.

ВЫВОДЫ

Выполненное сравнение точности баз данных и регрессионных моделей суммарной солнечной радиации для востока России позволяет сделать следующие выводы:

1. Среднемесячные оценки суммарной солнечной радиации справочников по климату СССР за 1937–1980 гг. могут характеризовать с более высокой точностью современный гелиоэнергетический потенциал на востоке России в сравнении с данными баз ERA5 и SYN1deg.
2. Среднемесячные оценки потока суммарной солнечной радиации за 2006–2020 гг. базы данных реанализа ERA5 показали большую точность в сравнении с базой данных на основе спутниковых наблюдений SYN1deg в пяти из семи рассматриваемых пунктов.
3. Предложенная в исследовании новая регрессионная модель показала большую точность месячных оценок потока суммарной солнечной радиации в сравнении с SYN1deg, а также в сравнении с ERA5 для большинства рассмотренных районов. Это позволяет рассматривать данную модель как инструмент для оценки суммарной солнечной радиации на востоке России.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (FWEU–2021–0004) по программе фундаментальных исследований Российской Федерации на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект 13.ЦКП.21.0038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anam Md.Z., Bari A.B.M.M., Paul S.K., Ali S.M., Kabir G. Modelling the drivers of solar energy development in an emerging economy: Implications for sustainable development goals. Resources, Conservation & Recycling Advances [Электронный ресурс]. — <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200068> (дата обращения 20.09.2021).
2. Li J., Huang J. The expansion of China's solar energy: Challenges and policy options // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2020. — Vol. 132 [Электронный ресурс]. — <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110002> (дата обращения 20.09.2021).

3. **Hoang A.T., Pham V.V., Nguyen X.P.** Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process // Journ. of Cleaner Production. — 2021. — Vol. 305 [Электронный ресурс]. — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127161> (дата обращения 20.09.2021).
4. **Miravet-Sanchez B.L., Garcia-Rivero A.E., Yuli-Posadas R.A., Inostroza-Ruiz L.A., Fernandez-Guzman V., Chavez-Juanito Y.A., Rutti-Marinf J.M., Apesteguia-Infantes J.A.** Solar photovoltaic technology in isolated rural communities in Latin America and the Caribbean // Energy Reports. — 2022. — Vol. 8 (6). — P. 1238–1248.
5. **Rahman M.M., Khan I., Field D.L., Techato K., Alameh K.** Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications // Renewable Energy. — 2022. — Vol. 188. — P. 731–749.
6. **Renne D.S.** Progress, opportunities and challenges of achieving net-zero emissions and 100 % renewable // Solar Compass. — 2022. — Vol. 1. — Article 100007. — DOI: 10.1016/j.solcom.2022
7. **Нейштадт Я.А., Червяков М.Ю.** Оценка климатического потенциала для развития гелиоэнергетики на юго-востоке европейской территории России по данным спутниковых и наземных наблюдений // Труды Междунар. Байкал. молодеж. науч. школы по фундаментальной физике и XVI Конференции молодых ученых. — Иркутск: Изд-во Ин-та солнечно-земной физики СО РАН, 2019. — С. 354–356.
8. **Луцько Л.В., Махоткина Е.Л.** О модернизации метеорологической сети // Труды Глав. геофиз. обсерватории им. А.И. Воейкова. — 2011. — № 564. — С. 51–65.
9. **Луцько Л.В., Ерохина А.Е., Бычкова А.П., Махоткина Е.Л., Махоткин А.Н., Бекенева О.Б.** Актинометрическая сеть Росгидромета: текущее состояние // Труды Глав. геофиз. обсерватории им. А.И. Воейкова. — 2018. — № 589. — С. 125–152.
10. **Nematchoua M.K., Orosa J.A., Afaifa M.** Prediction of daily global solar radiation and air temperature using six machine learning algorithms; a case of 27 European countries // Ecological Informatics. — 2022. — Vol. 69. — Article 101643. — DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101643
11. **Cao Q., Liu Y., Sun X., Yang L.** Country-level evaluation of solar radiation data sets using ground measurements in China // Energy. — 2022. — Vol. 241. — Article 122938. — DOI: 10.1016/j.energy.2021.122938
12. **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 // Solar Energy. — 2020. — Vol. 210. — P. 3–19.
13. **Mirzabe A.H., Hajiahmad A., Keyhani A., Mirzaei N.** Approximation of daily solar radiation: A comprehensive review on employing of regression models // Renewable Energy Focus. — 2022. — Vol. 41. — P. 143–59.
14. **Chen J.L., He L., Yang H., Ma M., Chen Q., Wu S.J., Xiao Z.** Empirical models for estimating monthly global solar radiation: A most comprehensive review and comparative case study in China // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2019. — Vol. 108. — P. 91–111.
15. **Babar B., Graversen R., Bostrum T.** Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5 // Solar Energy. — 2019. — Vol. 82. — P. 397–411.
16. **Huang G., Li Z., Li X., Liang S., Yang K., Wang D., Zhang Y.** Estimating surface solar irradiance from satellites: Past, present, and future perspectives // Remote Sensing of Environment. — 2019. — Vol. 233. — Article 111371. — DOI:10.1016/j.rse.2019.111371
17. **European Centre for Medium-Range Weather Forecasts** [Электронный ресурс]. — <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (дата обращения 12.07.2022).
18. **CERES Data Products** [Электронный ресурс]. — <https://ceres.larc.nasa.gov/data/> (дата обращения 12.07.2022).
19. **Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние наблюдения. Вып. 24: Якутская АССР** / Под. ред. Н.В. Кобышевой. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — Кн. 1. — 607 с.
20. **Хлебникова Е.И., Махоткина Е.Л., Салль И.А.** Облачность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения // Труды Глав. геофиз. обсерватории им. А.И. Воейкова. — 2014. — № 573. — С. 65–91.
21. **Мировой центр радиационных данных** [Электронный ресурс]. — <http://wrdc-mgo.rssi.ru/> (дата обращения 12.07.2022).
22. **Soulouknga M.H., Coulibaly O., Doka S.Y., Kofane T.C.** Evaluation of global solar radiation from meteorological data in the Sahelian zone of Chad // Renewables: Wind, Water, and Solar. — 2017. — Vol. 4 [Электронный ресурс]. — <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0041-0> (дата обращения 20.11.2021).
23. **Расписание погоды** [Электронный ресурс]. — <https://gr5.ru/> (дата обращения 12.07.2022).
24. **Шакиров В.А., Яковкина Т.Н., Курбацкий В.Г.** Методика оценки выработки электроэнергии солнечными электростанциями с использованием данных многолетних наблюдений метеостанций // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. — 2020. — Т. 24, № 4 (153). — С. 858–875.

Поступила в редакцию 01.07.2022

После доработки 22.11.2022

Принята к публикации 05.04.2023