

Оценка величины $k_{эф}$ – коэффициента эффективности крепления показала, что наиболее высокие значения имеют крепления типа «искусственная самоотмотка» ($k_{эф} = 0,9$) и «шпунтовая стена» ($k_{эф} = 1,0$). Наиболее низкой эффективностью обладает тип «георешетка» ($k_{эф} = 0,43$) и «гибкий бетон» ($k_{эф} = 0,5$).

УДК 621.311.243(476)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова, К. О. Мешик

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,
omeshyk@gmail.com

Аннотация

В статье представлена методика расчета суммарной солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния, которая позволяет оценить количество и продолжительность солнечного сияния как основной фактор, формирующий потенциальные энергетические ресурсы климата Республики Беларусь. Сделан вывод о том, что гелиоэнергетических ресурсов в Беларуси достаточно для развития гелиоэнергетики, однако они распределены в течение года неравномерно.

Ключевые слова: интенсивность солнечной радиации, продолжительность солнечного сияния, облачность.

A METHOD TO ASSESS SOLAR RADIATION AND SOLAR DURATION IN BELARUS

A. P. Meshyk, M. V. Barushka, V. A. Marozava, K. A. Meshyk

Abstract

The aim of this study is to assess the amount and duration of sunshine over the territory of Belarus. It is considered to be the main factor that shapes solar power resources of a climate. This paper presents a method to calculate solar radiation. The authors make a conclusion that there is enough sunshine in Belarus to develop solar power industry although its duration is uneven within the year.

Keywords: solar radiation, sunshine duration, cloudiness.

Введение. В последние годы в Республике Беларусь уделяется большое внимание развитию солнечной энергетики. Согласно Государственному кадастру возобновляемых источников энергии Республики Беларусь на сегодняшний день на территории Беларуси установлено 110 солнечных электростанций различной мощности (от 1,3 до 17 МВт) [1].

Существует необходимость оценить потенциальные энергетические ресурсы климата, которые включают в себя определенные характеристики радиационного режима и облачности. Большинство исследовательских работ, в которых оцениваются гелиоэнергетические ресурсы климата Беларуси, регионов России и других стран, объединяют выполненные статистические обобщения парамет-

ров радиационного режима. Однако пространственно-временная изменчивость оцениваемых показателей нуждается в детализации, требуется более широкое привлечение методов аналитических расчетов в виду ограниченности данных актинометрических наблюдений [2].

Материалы и методы. В настоящем исследовании использованы материалы государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», характеризующие радиационный режим территории Беларуси [3]. Временные ряды за 41-летний период 1979–2019 гг. приняты по 46 метеостанциям в соответствии с данными климатического кадастра Республики Беларусь, публикуемыми в соответствующих метеорологических ежемесячниках [4]. Также использованы материалы Государственного кадастра возобновляемых источников энергии [1]. В работе реализованы методы статистической обработки экспериментальных данных, в частности: регрессионный анализ, анализ временных рядов, пространственное обобщение метеорологической информации [2].

Результаты и обсуждение. Обоснование применения гелиоэнергетических устройств, эффективность их работы зависят от ряда метеорологических факторов, основными из которых является интенсивность солнечной радиации и продолжительность солнечного сияния (ПСС).

Данные о солнечной радиации характеризуют различные периоды: год, сезон, месяц, декаду, сутки. В работе [5] отмечается, что разномасштабная изменчивость прихода солнечной радиации в гелиоэнергетических расчетах учитывается неодинаково. Однако мы считаем, что суточная дифференциация является наиболее приемлемой, так как суточные значения позволяют перейти к декадным, месячным и годовым.

Нами предлагается методика моделирования суточных величин суммарной солнечной радиации (Q_i) [6]. Первоначально определяется суточная инсоляция (Q'_i), для случая отсутствия земной атмосферы, по зависимости [2]

$$Q'_i = \frac{2Q_0}{(r_i/r_0)^2} \left[t_{oi} \sin \varphi \sin \delta_i + \frac{\Pi}{2\pi} \cos \varphi \cos \delta_i \sin \left(\frac{2\pi}{\Pi} t_{oi} \right) \right], \quad (1)$$

где $Q_0=1,37 \text{ кВт/м}^2$ – солнечная постоянная; $r_0=149597870 \text{ км}$ – среднегодовое расстояние между Землей и Солнцем; r_i – расстояние между Землей и Солнцем в i -сутки, км; t_{oi} – момент восхода (захода) Солнца в i -сутки, час; $\Pi=24$ часа – продолжительность солнечных суток; φ – географическая широта местности, °; δ_i – геоцентрическое склонение Солнца в i -сутки, °.

Решение уравнения (1) связано с нахождением ряда параметров (r_i), (t_{oi}) и (δ_i), входящих в него и непостоянных во времени. В течение года расстояние между Землей и Солнцем незначительно изменяется ($\pm 1,65 \%$ от (r_0)) и при эксцентриситете земной орбиты (e), равном 0,017, составляет в афелии ($r_a \approx r_0(1+e)$) около 152 млн. км, в перигелии ($r_{\pi} \approx r_0(1-e)$) около 147 млн. км (рисунок 1).

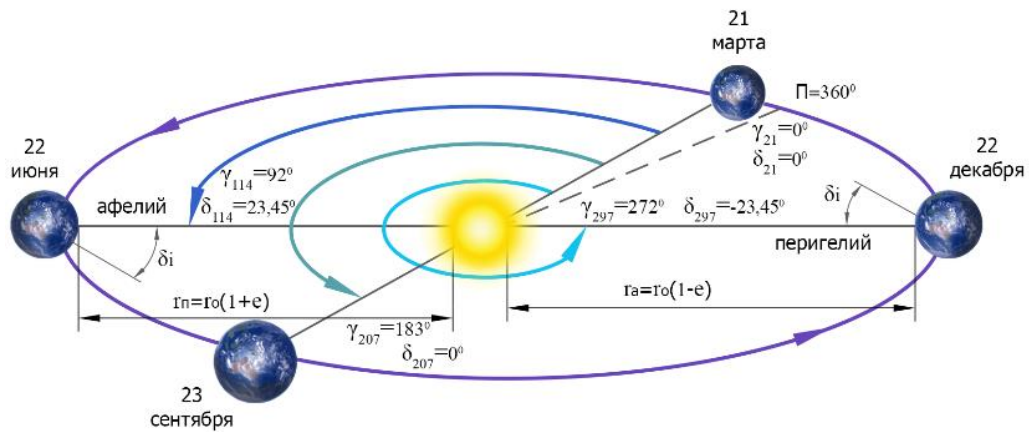


Рисунок 1 – Положение Земли в главные даты «годового движения Солнца»

При установленном эксцентриситете земной орбиты (e), изменение суточной инсоляции может достигать 7 %, т.е. практически значимой величины. В качестве главных дат «годового движения Солнца» нами используются: дни летнего (22 июня) и зимнего (22 декабря) солнцестояния, дни весеннего (21 марта) и осеннего (23 сентября) равноденствий, а расчеты соответствующих расстояний между Землей и Солнцем (r_i) выполняются, согласно законам Кеплера, по уравнениям эллиптической орбиты Земли.

Наиболее весомый вклад в величину суточной инсоляции (Q'_i) вносит изменение во времени геоцентрического склонения Солнца (δ_i) – угла между линией: Солнце – Земля и плоскостью экватора. Расчеты величины (δ_i) нами выполняются по методике, изложенной в работе [7]. При этом, весь процесс моделирования поступающей на земную поверхность суммарной солнечной радиации осуществляется, исходя из того, что полный годовой период составляет 360° , а его начало – 1 марта. Это позволяет обойти проблему високосного года и упростить вычисления. Некоторый годовой угол (Y_i) в сутки (i), исходя из того, что в день весеннего равноденствия (21 марта) $Y_i=0^\circ$, будет определяться как [7]

$$Y_i = \left(i - \frac{21}{365}\right) \cdot 360^\circ \quad (2)$$

С учетом уравнения (1), величину геоцентрического склонения Солнца (δ_i) для любых (i) суток года определяем по эмпирической формуле [7]

$$\begin{aligned} \delta_i = & 0,38092 - 0,76996 \cos Y_i + 23,26500 \sin Y_i + 0,36958 \cos 2Y_i + 0,10868 \sin 2Y_i + \\ & + 0,01834 \cos 3Y_i - 0,16650 \sin 3Y_i - 0,00392 \cos 4Y_i + 0,00072 \sin 4Y_i - \\ & - 0,00051 \cos 5Y_i + 0,00250 \sin 5Y_i + 0,00442 \cos 6Y_i \end{aligned} \quad (3)$$

С использованием схемы, представленной на рисунке 1, и зависимостей (2), (3), можно получить следующие значения геоцентрического склонения Солнца (δ_i) при соответствующей величине годового угла (Y_i): в дни равноденствий – $\delta_{21}=0^\circ$, $Y_{21}=0^\circ$ (весеннего, 21 марта); $\delta_{207}=0^\circ$, $Y_{207} \approx 183^\circ$ (осеннего, 23 сентября); в дни солнцестояний – $\delta_{114}=23,45^\circ$, $Y_{114} \approx 92^\circ$ (летнего, 22 июня); $\delta_{297}=-23,45^\circ$, $Y_{297} \approx 272^\circ$ (зимнего, 22 декабря).

Момент восхода (захода) Солнца нами приурочен к местному полдню и определен из соотношения: $\pm t_{0i} = D/2$, где D – долгота дня, рассчитанная как разность истинного солнечного времени между заходом (З) и восходом (В) Солнца.

Далее осуществляется переход от (Q'_i) к среднесуточным величинам суммарной солнечной радиации

$$Q_i = a + bQ'_i, \quad \text{при } r = 0,997 \pm 0,001, \quad (4)$$

где $a = -1,542$, $b = 0,575$ – коэффициенты уравнения, как комплексные параметры, отражающие в реальных условиях пропускную способность атмосферы.

В таблице 1 приведены данные, характеризующие месячные и годовые суммы суммарной солнечной радиации, рассчитанной по формулам (1–4) и обобщенные по регистрируемым на метеостанциях значениям [3, 4].

Таблица 1 – Суммарная солнечная радиация, МДж/м²

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
Метеостанция													
Минск	58	127	276	420	571	615	608	494	329	190	79	37	3804
Брагин	76	145	294	432	576	617	610	501	343	208	97	54	3953
Брест	73	143	291	431	576	618	610	500	341	206	94	51	3933
Полоцк	43	114	262	402	557	623	610	486	316	175	65	22	3675
Гомель	71	140	288	429	575	618	610	499	389	203	92	49	3912
Гродно	59	129	278	422	573	619	610	494	330	191	80	37	3822
Витебск	46	116	265	414	571	621	610	488	328	177	67	25	3729
Браслав	42	113	262	412	571	623	611	486	316	174	63	22	3694

Большинством авторов суммарная солнечная радиация оценивается с использованием эмпирических и полуэмпирических связей (Q_i) с ПСС ($T_{i \text{ солн.}}$) и баллом облачности (Q_i). Используя экспериментальные данные по суммарной солнечной радиации и ПСС ($T_{i \text{ солн.}}$), мы получили зависимость [7]

$$Q_i = Q_{\min} + 1,649T_{i \text{ солн.}}, \quad \text{при } r = 0,97 \pm 0,01, \quad (5)$$

где $Q_{\min} = 0,207$ МДж/м² – величина суммарной солнечной радиации при отсутствии солнечного сияния ($T_{i \text{ солн.}} = 0$), сформированная, главным образом, за счет рассеянной радиации.

По уравнению (5) можно рассчитывать на территории Беларуси суточные величины суммарной солнечной радиации (Q_i) в реальные годы при наличии данных по ПСС.

На рисунке 2 приведен внутригодовой ход возможной и фактической продолжительности солнечного сияния на территории Беларуси.

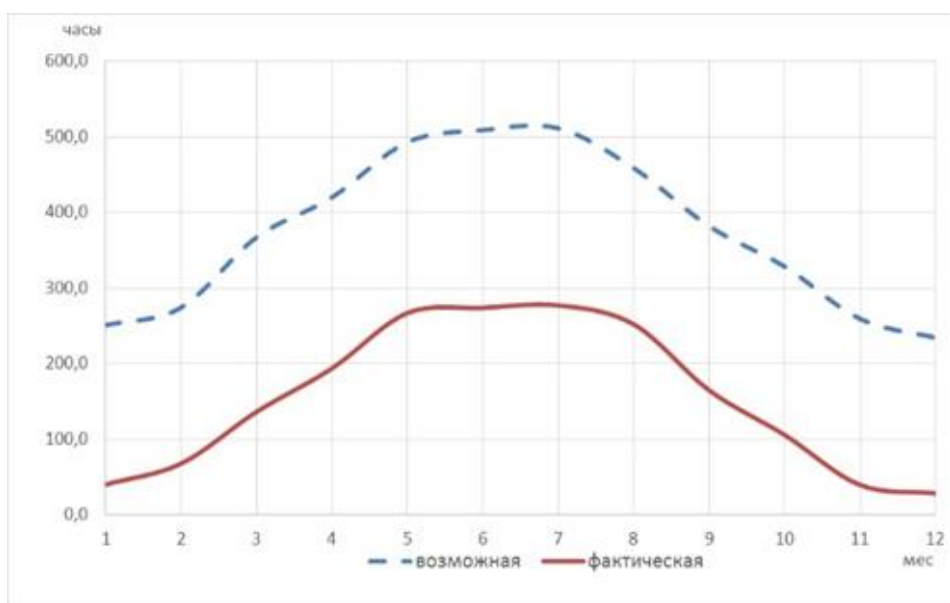


Рисунок 2 – Возможная и фактическая продолжительность солнечного сияния в Беларуси

Кривые (рис. 2) следуют практически синхронно и дают возможность оценить соотношения между фактическими и возможными значениями (таблица 2).

Таблица 2 – Отношение фактической ПСС к возможной, %

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
Метеостанция													
Гомель	18,1	27,8	39,2	46,8	57,5	56,3	56,3	57,5	46,4	34,9	16,2	13,1	43,3
Костюковичи	16,7	26,2	36,9	43,7	53,2	55,1	54,7	54,8	42,8	30,9	13,5	10,9	40,7
Ошмяны	14,9	22,4	36,6	47,4	53,6	52,8	53,2	54,1	41,7	31,6	15,4	11,4	40,4
Горки	17,3	28,0	37,9	47,2	53,1	54,0	54,1	54,3	41,9	30,6	14,6	12,6	41,1
Пинск	15,6	24,4	37,5	47,1	54,4	54,3	55,4	57,8	44,4	36,8	17,0	12,9	47,5

Наибольшая фактическая продолжительность солнечного сияния соответствует летним месяцам и достигает максимума в июле – 277 часов и снижается до 28 часов в декабре. В мае-августе фактическая ПСС превышает 50 % от возможной и составляет менее 15 % в декабре-январе. В среднем за год отношение фактической и возможной ПСС составляет около 40 % и незначительно отличается по территории Беларуси. Возможная продолжительность солнечного сияния на территории Беларуси составляет 4495 ± 10 часов в год. На севере она больше, что обусловлено рефракцией. Поэтому различия в действительной продолжительности солнечного сияния определяются режимом облачности. На рисунке 2 представлена корреляция ПСС и облачности различных категорий в Минске [2].

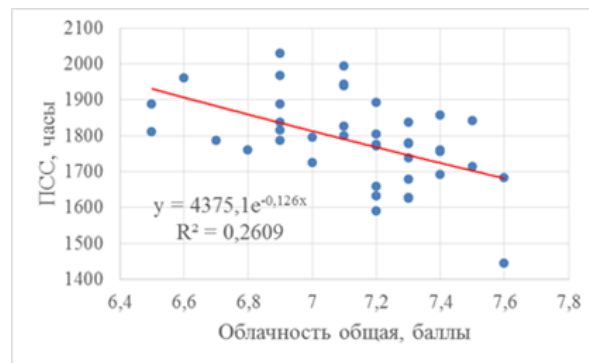
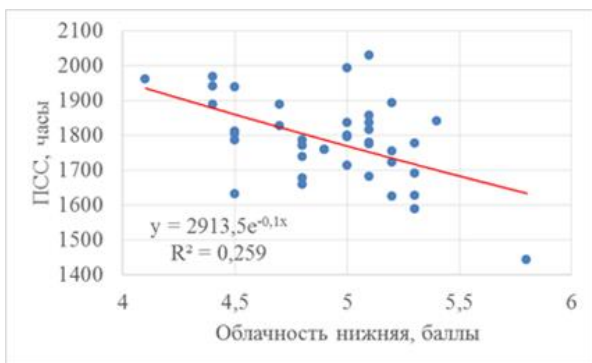


Рисунок 3 – Зависимость ПСС от общей и нижней облачности в Минске

На территории Беларуси имеет место увеличение годовой ПСС в среднем на 46 часов за 10 лет [2] (рисунок 4).

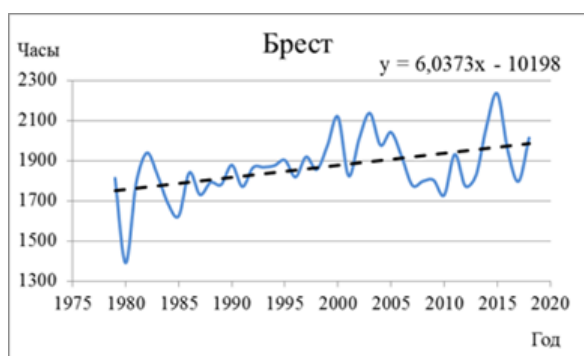


Рисунок 4 – Временная изменчивость ПСС на территории Беларуси

Это говорит о том, что климатические условия становятся более благоприятными для развития гелиоэнергетики. Несмотря на естественную оптимизацию климатических условий в целом, имеет определенная сезонность, когда естественные условия ухудшаются. Так, для территории Беларуси имеет место уменьшение ПСС в феврале, октябре, ноябре, декабре [2].

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что гелиоэнергетических ресурсов в Беларуси достаточно для развития гелиоэнергетики, однако они распределены в течение года неравномерно. В условиях ограниченности пунктов актинометрических наблюдений необходимо привлекать методы аналитических расчетов, основанные на наличии связей между суммарной солнечной радиацией, показателями облачности и другими наблюдаемыми характеристиками.

Список цитированных источников

1. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] / Минприроды Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – Режим доступа: http://www.minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/. – Дата доступа: 25.02.2020.
2. Мешик, О. П. Оценка гелиоэнергетических ресурсов климата Беларуси / О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строи-

- тельство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 93–99.
<https://doi.org/10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-93-99>
3. Справочник по климату Беларуси. Часть 5. Влажность воздуха. Солнечное сияние. Метеорологическая дальность видимости; под. общ. ред. В. И. Мельника. – Минск : Минприроды, 2007. – 48 с.
 4. Климатический кадастр Республики Беларусь. Метеорологический ежемесячник. – Минск : Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 1979–2019 гг.
 5. Пашинский, В. А. Оценка падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность территории в условиях Республики Беларусь / В. А. Пашинский, А. А. Бутько, А. А. Черкасова // Экологический вестник. – 2015. – № 2 (32). – С. 77–82.
 6. Meshyk, A., Barushka, M., Marozava, V., Sarkynov, E., & Meshyk, A. (2020). Climate Resource Potential to Develop Solar Power in Belarus. In E3S Web of Conferences (Vol. 212, p. 01012). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201012>
 7. Франс, Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли ; под ред. Ф. И. Ерешко. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 400 с.
 8. Мешик, О. П. Эффективность работы гелиосистем (на примере климатических условий Беларуси) / О. П. Мешик, К. О. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // ICER – 2021. Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Брестского государственного технического университета и 50-летию факультета инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 октября 2021 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: А. А. Волчек [и др.] ; науч. ред.: А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2021. – С. 235–245.

УДК 551.55 (476)

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова, А. С. Протасевич, К. О. Мешик

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,
omeshyk@gmail.com

Аннотация

Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости характеристик ветрового режима территории Республики Беларусь. Выявлены статически значимые трансформации скоростей и направлений ветра за последний 40-летний период. Развитие ветроэнергетики в Беларуси является целесообразным.