

5. Сайт Global Wind Energy Council – GWEC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gwec.net/>. – Дата доступа : 31.08.2021.
6. Сайт АО «Международный аэропорт Шереметьево» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.svo.aero/ru/main>. – Дата доступа : 31.08.2021.
7. Сайт Яндекс.Погода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yandex.by/pogoda/>. – Дата доступа : 31.08.2021.
8. Engine Thrust – Summary. Glenn Research Center [Электронный ресурс] / National Aeronautics and Space Administration. – Режим доступа: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thsum.html>. – Дата доступа : 31.08.2021.
9. Ветрогенераторы [Электронный ресурс] / ИИК «Альтэнерго». – Режим доступа: <http://altenergo.biz/vetrogenerator/>. – Дата доступа : 31.08.2021.
10. Старченко, А. В. Применение микромасштабной метеорологической модели для исследования структуры течения над взлетно-посадочной полосой аэропорта / А. В. Старченко, Е. А. Данилкин, Р. Б. Нутерман, М. В. Терентьева // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2013. – № 5 (25). – С. 91–101.

УДК 621.311.243(476)

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГЕЛИОСИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БЕЛАРУСИ)**

*О. П. Мешик<sup>1</sup>, К. О. Мешик<sup>1</sup>, М. В. Борушко<sup>1</sup>, В. А. Морозова<sup>1</sup>,  
Е. С. Саркынов<sup>2</sup>, М. М. Мирзоев<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, [omeshik@mail.ru](mailto:omeshik@mail.ru)

<sup>2</sup> Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан, [sarkynov\\_e@mail.ru](mailto:sarkynov_e@mail.ru)

<sup>3</sup> Таджикский аграрный университет имени Шириншох Шотемур, Душанбе, Таджикистан

### **Аннотация**

В работе оценивается целесообразность применения гелиосистем для территории Беларуси. Установлены суммарные значения поступлений солнечного излучения в идеальных климатических условиях при стационарном размещении гелиоустановки, а также с динамическим стремлением к ортогональному закреплению воспринимающей поверхности по отношению к центру солнечного диска на базе одноосевого и двухосевого регулирования. Сделаны выводы о роли географического положения эксплуатируемых гелиосистем.

**Ключевые слова:** гелиосистемы, установленная мощность, Беларусь, солнечное излучение, стационарное расположение, одноосевое регулирование, двухосевое регулирование.

## OPERATIONAL EFFICIENCY OF SOLAR POWER FACILITIES (IN CLIMATIC CONDITIONS OF BELARUS)

*A. P. Meshyk, K. A. Meshyk, M. V. Barushka, V. A. Marozava, E. S. Sarkynov,  
M. M. Mirzoev*

### **Abstract**

The authors of the article estimate feasibility to apply solar power facilities on the territory of Belarus. They calculated total values of solar irradiance in ideal climatic conditions and made conclusions about operational efficiency of fixed and tracking solar power facilities.

**Keywords:** solar power facilities, installed capacity, Belarus, solar irradiance, fixed location, one-axial adjustment, two-axial adjustment.

### **Введение**

Переход к возобновляемым источникам энергии является закономерным постоянному росту населения и количественно-качественному увеличению его потребностей. Популяризация альтернативных энергоресурсов обусловлена их неисчерпаемостью, снижением интенсивности использования невозобновляемого природного потенциала, минимизацией экологического вреда в процессе добычи.

Согласно [1], общемировое потребление электричества составило 23,177 трлн кВт·ч в 2020 году. По прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА) [2], общемировое электропотребление увеличится до 33,4 трлн кВт·ч к 2030 году, до 41,3 трлн кВт·ч – к 2050 году. Несмотря на закономерное развитие энергоэффективности добычи традиционными методами, объемы потребления природных ресурсов находятся в стадии устойчивого роста.

Согласно данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), в 2000 году установленная мощность невозобновляемых энергоресурсов составила 78,2 % от общего эксплуатируемого объема в рамках электроэнергетического рынка, а возобновляемых энергоресурсов – 21,8 % [3, 4].

Среди направлений альтернативной энергетики для Беларуси гелиоэнергетика имеет широкие перспективы, что подчеркивается опытом эксплуатации и темпами внедрения в рамках государств со схожими климатическими чертами. Согласно общемировому распределению солнечного излучения для различных территорий планеты, на территорию нашей страны в рамках пограничного слоя атмосферы и в пределах подстилающей поверхности поступает 2655 кВт·ч/м<sup>2</sup> и 1184 кВт·ч/м<sup>2</sup>, что практически соответствует показателям Германии (2764 кВт·ч/м<sup>2</sup>; 1137 кВт·ч/м<sup>2</sup>) и Великобритании (2655 кВт·ч/м<sup>2</sup>; 1015 кВт·ч/м<sup>2</sup>) и в совокупности с более низкими показателями температуры наружного воздуха свидетельствует о потенциально более высоких показателях эффективности работы фотоэлектрических панелей [5].

В период с 2000 по 2019 г. общемировая установленная мощность в рамках гелионаправления увеличилась в 479 раз и составила 587 134 МВт [3]. В Беларуси в режиме активной эксплуатации на сегодняшний момент находится

108 гелиосистем, работающих по принципу преобразования солнечного излучения в электроэнергию. Установленная мощность гелиосистем ежегодно увеличивается. В 2020 году она составила 159 МВт [6].

Результаты анализа многолетних исследований устанавливают показатель потенциальной эффективности использования гелиосистем в Беларуси на 10% выше, чем в Польше, Нидерландах и более чем на 17 % – чем в Германии, Бельгии, Дании, Ирландии, Великобритании, что исключает климатические ресурсы государства из количественного состава сдерживающих факторов [7, 8, 9]. К последним, прежде всего, относятся: соотношение цены и эффективности актуальных на рынке гелиосистем, тарифная ставка на потребляемую электроэнергию, низкий ценовой показатель, которой приводит к увеличению временного периода окупаемости [10, 11]. Важно учитывать предполагаемую возможность увеличения эффективности за счет внедрения средств автоматизированного управления ориентацией гелиосистемы по отношению к солнечному диску, выполняемого на основе одноосевого или двухосевого регулирования.

**Материалы и методы.** В настоящем исследовании использованы материалы метеорологических наблюдений ГУ «Белгидромет» за 2020–2021 гг., характеризующие ежечасные температурные колебания, ветровой режим в пространственных пределах рассматриваемого географического положения [12]. Использованы функциональности метеоресурса Яндекс.Погода с репрезентацией параметров для расчета солнечного излучения. В качестве универсального критерия оценки выступает суммарное солнечное излучение, полученное в идеальных условиях: ясное небо, с последующим определением преобразуемой доли в результате использования гелиосистемы. В работе реализованы методы статистической обработки экспериментальных данных, в частности: регрессионный анализ, анализ временных рядов, аналитическое обобщение метеорологической информации и др. Автоматизация расчетов выполнялась с использованием библиотеки SunCalc при помощи программы MS Excel.

**Результаты и обсуждение.** Важно обозначить, что суммарные поступления солнечного излучения на наклонную поверхность представляют собой совокупность прямого, рассеянного и отраженного от подстилающей поверхности излучения. При этом в основе энергетической генерации лежит прямое солнечное излучение: рассеянное – до 60 % от прямого, отраженное – до 20 % от прямого.

В общем виде расчет поступающих сумм солнечного излучения может быть интерпретирован в рамках следующей формулы [13]:

$$Q = S_{\text{накл}} + D_{\text{накл}} + R_{\text{накл}}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{накл}}$  – прямое солнечное излучение, направленное на наклонную поверхность гелиосистемы, Вт/м<sup>2</sup>;  $D_{\text{накл}}$  – рассеянное солнечное излучение, направленное на наклонную поверхность гелиосистемы, Вт/м<sup>2</sup>;  $R_{\text{накл}}$  – отраженное от подстилающей поверхности солнечное излучение, направленное на наклонную поверхность гелиосистемы, Вт/м<sup>2</sup>.

Поступления прямого солнечного излучения на наклонную поверхность гелиосистемы зависят от поступлений на ортогонально ориентированную поверхность по отношению к солнечному диску, а также косинуса угла падения, формируемого вследствие отклонения от нормали с течением времени [14]:

$$S_{\text{накл}} = S_{\text{орт}} \cdot \cos\theta, \quad (2)$$

где  $S_{\text{орт}}$  – прямое солнечное излучение на ортогональную лучам поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – угол падения  $S_{\text{накл}}$  на гелиосистему, рад.

Идентификация прямого солнечного излучения, поступающего на ортогонально ориентированную поверхность, нами производилась по адаптированной формуле В. Г. Кастрова [5]:

$$S_{\text{орт}} = S_0 - \frac{S_0 \cdot c}{c + \sin\alpha}, \quad (3)$$

где  $S_0$  – солнечное излучение, поступающее в пространственных пределах верхней границы атмосферного слоя, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол высоты Солнца над горизонтом, рад;  $c$  – индекс прозрачности атмосферы.

Угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность  $\theta$  позволяет оценить интенсивность поступлений прямого солнечного излучения в моменте времени. В зарубежных исследованиях при его расчете используются данные об отклонении солнечного диска в пределах полярной оси на меру угла  $\gamma$ , отсчитываемого с южного направления [15, 16, 17]. Данный угол репрезентует азимутальное отклонение гелиопанели. Нами предполагается внедрение алгоритмического подхода по решению задачи оптимального ориентирования солнечной панели в пространстве. По этим причинам угол  $\gamma$  будет отсчитываться с северного направления в качестве солнечного азимута:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta + \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega - \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega - \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega, \quad (4)$$

где  $\delta$  – угол склонения солнечного диска, рад;  $\varphi$  – широта местности в геоточке, рад;  $\beta$  – угол наклона гелиосистемы по отношению к подстилающей поверхности, рад;  $\gamma$  – солнечный азимут, рад;  $\omega$  – часовой угол, рад.

В качестве географического расположения гелиосистемы были выбраны координатные точки г. Брест и г. Витебск ввиду полноты потребления генерируемой энергии в непосредственной близости, что позволяет исключить потери при транспортировке на значительные расстояния. Также их пространственное отклонение друг от друга позволит установить различия поступлений суммарной солнечной радиации в юго-западном и северо-восточном направлениях Беларуси.

Стационарное размещение в эффективном ключе производится по принципу ортогональности воспринимающей поверхности по отношению к источнику солнечного излучения во время полудня ввиду получения максимально возможной доли прямого излучения в пределах светового дня. Мера данного угла напрямую зависит от геоположения гелиосистемы, пространственных характеристик солнечного светила по отношению к нему. Учитывая высокую периодичность колебаний угла падения солнечных лучей на произвольно

ориентированную поверхность  $\theta$ , условие приравнивания широты местности к углу наклона подстилающей поверхности является наиболее приемлемым во временных пределах орбитального цикла вращения Земли вокруг Солнца. Однако с ростом частотности регулирования возрастает потенциальная возможность увеличения интенсивности прямого солнечного излучения. По этим причинам рассматривается возможность регулирования воспринимающего элемента в рамках горизонтального и горизонтально-вертикального направлений. Нами предполагается регулирование стационарной гелиосистемы на ежегодной основе, что позволяет установить угол наклона гелиосистемы по отношению к подстилающей поверхности  $\beta$  равным широте рассматриваемой местности в конкретной геоточке  $\varphi$ . В рамках одноосевого слежения за солнцем коррекция  $\beta$  целесообразна на ежесуточной основе [16], когда величина угла склонения солнечного диска будет выступать в качестве поправочного фактора:

$$\beta_{\text{сут}}^n = |\varphi - \delta|. \quad (5)$$

В то же время для двухосевой системы слежения за солнцем определение угла наклона гелиосистемы по отношению к подстилающей поверхности не требуется ввиду соблюдения ортогональности поступления прямого солнечного излучения по отношению к подстилающей поверхности ( $\cos\theta = 1$ ).

Рассеянное солнечное излучение на наклонную поверхность нами определено в рамках следующего уравнения [18]:

$$D_{\text{накл}} = D_{\text{гор}} \cdot (0,55 + 0,434 \cdot \cos\theta + 0,313 \cdot \cos^2\theta), \quad (6)$$

где  $D_{\text{гор}}$  – поток рассеянного солнечного излучения на горизонтальную поверхность, Вт/м<sup>2</sup>.

Для определения отраженного солнечного излучения в рамках абсолютного большинства исследований используется изотропная модель [19]:

$$R_{\text{накл}} = Q_{\text{гор}} \cdot A_k \cdot (1 - \cos\beta) \cdot 0,5, \quad (7)$$

где  $Q_{\text{гор}}$  – поток суммарного солнечного излучения на горизонтальную поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;  $A_k$  – альбедо земной поверхности.

В результате установлена интенсивность суммарного солнечного излучения на произвольно ориентированную в пространстве поверхность гелиосистемы. Методика расчета была адаптирована для стационарного размещения, а также для одноосевой и двухосевой систем слежения за солнцем.

Расчет максимальной выходной мощности выполнялся нами по следующей формуле [20]:

$$P_{\text{ст}} = K_{\text{взх}} \cdot N_{\text{ст}} \cdot \eta_{\text{сз}} \cdot Q \cdot \ln 10^6 \cdot Q / T_{\text{ст}}, \quad (8)$$

где  $K_{\text{взх}}$  – коэффициент вольт-амперной характеристики солнечной панели;  $N_{\text{ст}}$  – количество солнечных панелей ( $N_{\text{ст}} \neq 1$  при использовании средних и крупных систем слежения за Солнцем), шт.;  $\eta_{\text{сз}}$  – КПД солнечного элемента;  $Q$  – суммарное солнечное излучение, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{\text{ст}}$  – текущая температура солнечной панели, °С.

Выполнена идентификация суммарных поступлений солнечного излучения в рамках следующих временных периодов:

1. январь 2020–2021 гг. (ежечасно детерминируемый объем вхождения);
2. июль 2020–2021 гг. (ежечасно детерминируемый объем вхождения);
3. 22 июня 2020 г. (ежеминутно детерминируемый объем вхождения).

Применяемые данные о температуре наружного воздуха в пространственных пределах эксплуатации и скорости ветра для определения температурного режима солнечной панели были получены в результате мониторинга архивных данных погоды [12]. Для упрощения расчетов значения принимались в усредненном виде на ежечасной основе. С применением функциональности библиотеки SunCalc установлена реальная длительность светового дня, изменяемая на ежесуточной основе.

Для каждого из рассматриваемых временных периодов полученные ежечасные пики поступающих видов солнечного излучения были установлены в продолжительных диапазонах от времени восхода до времени заката. С целью минимизации репрезентуемых результатов приводятся совокупные объемы для каждого дня, установленные по следующему принципу:

$$Q_m^n = Q_m^1 + Q_m^2 + \dots + Q_m^{31}, \quad (9)$$

где  $Q_m^n$  – суммарное излучение солнечной энергии, собранное на основе детерминированных ежечасных пиков, кВт/м<sup>2</sup>; n – порядковый номер дня; m – идентификатор месяца.

На примере 01.01.2020 длительность светового дня для г. Бреста составила 7 часов 48 минут. Время восхода – 09:35. Время захода – 17:23. Зенитное положение Солнца – 13:29, что представляет собой момент максимальной пиковой доступной мощности на ежечасной основе. Учет остаточной части до целых значений первого и последнего часа выработки в пределах восхода и заката пренебрегается, учитывая малозначительность поступлений солнечного излучения. Таким образом, в общей структуре калькулирования используются данные, начиная с 10:00 и заканчивая в 17:00. По подобной методике выполнен расчет суммарного солнечного излучения в пределах января и июля 2020–2021 гг. для г. Бреста и г. Витебска, результаты которого сведены в таблицу 1.

**Таблица 1** – Суммарное солнечное излучение в месячном периоде

Месяц, год	Суммарное солнечное излучение, кВт/м <sup>2</sup>					
	Стац. СП		Одн. регул.		Дв. регул.	
	г. Брест	г. Витебск	г. Брест	г. Витебск	г. Брест	г. Витебск
Январь, 2020 г.	64,45	48,37	111,88	87,13	127,74	104,70
Январь, 2021 г.	65,30	49,16	112,86	88,11	128,82	105,83
Июль, 2020 г.	348,19	333,65	401,97	400,81	428,47	432,68
Июль, 2021 г.	349,07	334,59	402,06	400,95	428,53	432,79

Следует выделить абсолютное превосходство двухосевой системы слежения за солнцем по сравнению со стационарным размещением гелиосистемы и одноосевой системы слежения. В зимнем периоде при эксплуатации двухосевой системы слежения суммарные поступления возрастают в 1,14–1,2 раза по сравнению с одноосевым регулированием и в 1,97–2,17 по сравнению со стационарной панелью в зависимости от геоположения установки. В летнем периоде – в 1,07–1,08 раза по сравнению с одноосевым регулированием и в 1,23–1,3 раза по сравнению со стационарной панелью.

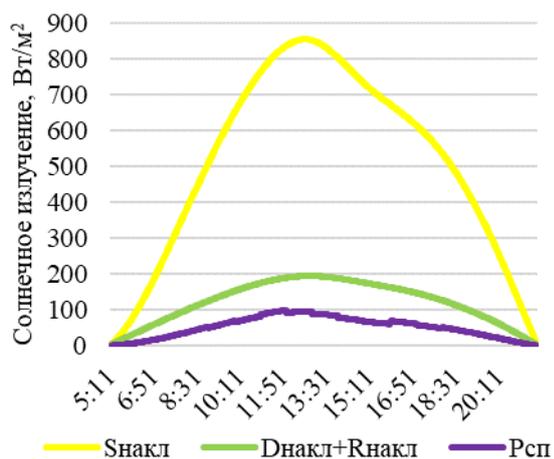
Отклонение результатов, полученных в рамках 2020 и 2021 гг., колеблется в малозначительных пределах, что позволяет заблаговременно учитывать предполагаемую выработку в идеальных условиях. Для выбранной модели гелиосистемы максимальная выходная мощность в рассматриваемых временных диапазонах определена согласно уравнению (8). Результаты расчетов суммарной выработки энергии гелиосистемой для установленных геоположений представлены в таблице 2.

**Таблица 2** – Суммарная выходная мощность гелиосистемы в месячном периоде

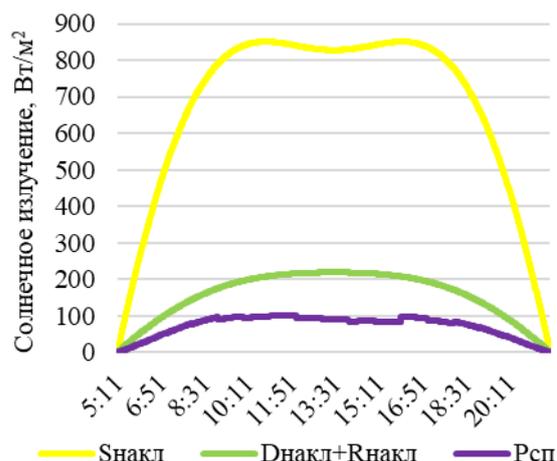
Месяц, год	Суммарное солнечное излучение, кВт/м <sup>2</sup>					
	Стац. СП		Одн. регул.		Дв. регул.	
	г. Брест	г. Витебск	г. Брест	г. Витебск	г. Брест	г. Витебск
Январь, 2020 г.	7,13	5,09	15,30	11,15	18,18	14,17
Январь, 2021 г.	7,24	5,19	15,47	11,31	18,37	14,36
Июль, 2020 г.	33,07	30,81	38,92	38,29	42,96	43,06
Июль, 2021 г.	33,16	30,91	38,92	38,29	42,96	43,06

С целью более наглядной репрезентации характерных черт поступления солнечной радиации в зависимости от вида используемой гелиосистемы выполнен ежеминутный расчет поступлений солнечного излучения с разделением на прямое излучение для наклонной поверхности  $S_{\text{накл}}$ , сумму рассеянного и отраженного от подстилающей поверхности  $D_{\text{накл}} + R_{\text{накл}}$  с дополнительным выделением максимальной мощности преобразователя  $P_{\text{сп}}$ . Временной период расчета – ежеминутные поступления солнечного излучения в рамках наиболее длительного дня в году (22 июня 2020 года). В рамках ежеминутно детерминируемого объема вхождения использовалась фактическая длительность светового дня.

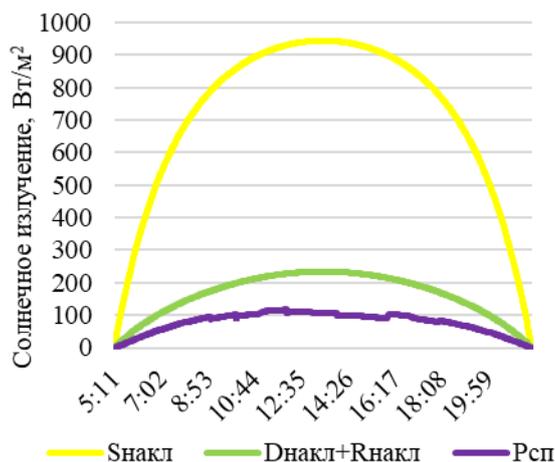
Визуальное представление динамически изменяемых параметров на ежеминутной основе при эксплуатации стационарной, одноосевой и двухосевой гелиосистем отображены на рисунках 1–3. Суммарные показатели в процессе суточной эксплуатации с оценкой в рамках ежеминутной динамики представлены в таблице 3.



**Рисунок 1** – Динамика ежеминутных поступлений солнечного излучения с выделением максимальной мощности для стационарной гелиосистемы



**Рисунок 2** – Динамика ежеминутных поступлений солнечного излучения с выделением максимальной мощности для одноосевой системы слежения



**Рисунок 3** – Динамика ежеминутных поступлений солнечного излучения с выделением максимальной мощности для двухосевой системы слежения

**Таблица 3** – Суммарные показатели в процессе суточной эксплуатации

Вид изм. угла $\beta$	$S_{\text{накл}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$D_{\text{накл}} + R_{\text{накл}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$P_{\text{сп}}$ , Вт/м <sup>2</sup>
стац. положение	506,81	121,56	50,71
1 ось слежения	664,56	155,46	71,18
2 оси слежения	706,36	161,06	77,15

**Заключение.** Климатические условия Беларуси определяются как приемлемые для развития гелиоэнергетического направления. Пространственная удаленность рассматриваемых географических точек показывает малую значимость отклонений, что наиболее характерно отображается в летний период. Зимой эффективность добычи выше в г. Бресте, однако общая полезная выработка в значительной степени снижается за счет изменения угла высоты солнечного диска, сокращения длительности светового дня. Полученные результаты могут быть охарактеризованы достаточным энергетическим потенциалом. Однако необходимо учитывать, что в реальных

условиях в качестве фактора снижения выработки будет выступать облачность. Предопределение данного фактора в эффективном ключе предполагается к рассмотрению в последующих исследованиях, где нами планируется к рассмотрению возможность предиктивного учета реальных показателей облачности в краткосрочной перспективе с использованием алгоритмического подхода управления гелиосистемами в зависимости от прогностических метеоусловий [21].

В рамках сравнительного анализа установлено, что наиболее оптимальным вариантом внедрения гелиоустановок с позиции получаемой эффективности являются двухосевые системы слежения. Ежеминутные поступления суммарного солнечного излучения они воспринимают на 34,27 % более полно в сравнении со стационарными гелиосистемами, на 7,73 % – с одноосевыми системами слежения.

### Список цитированных источников

1. Enerdata. Статистический Ежегодник мировой энергетики 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>. – Дата доступа : 22.08.2021.
2. Мировая энергетика – 2050 (Белая книга) / под ред. Бушуева В. В. (ГУ ИЭС), Каламанова В. А. (МЦУЭР). – М. : ИЦ "Энергия", 2011. – 360 с.
3. Installed Capacity Trends [Электронный ресурс] / IRENA – International Renewable Energy Agency. – Режим доступа: <https://www.irena.org/Statistics> – Дата доступа : 22.08.2021.
4. International Energy Agency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights#highlights>. – Дата доступа : 22.08.2021.
5. Гременок, В. Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В. Ф. Гременок, М. С. Тиванов, В. Б. Залесский. – Минск : Изд. Центр БГУ, 2007. – 222 с.
6. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] / Минприроды Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – Режим доступа: [http://www.minpriroda.gov.by/ru/new\\_url\\_19948904-ru/](http://www.minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/). – Дата доступа : 22.08.2021.
7. Meshyk, A. Thermal Resources of the Climate of West Polesie, Belarus / A. Meshyk, M. Sheshka, M. Barushka // 7th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management (СІЕМ7) : Abstracts Book, Canary Islands, Spain, 17-19 July 2017 ; edited by ScienceKnowconferences. – Las Palmas (Spain), 2017. – P. 94–95.
8. Мешик, О. П. Оценка гелиоэнергетических ресурсов климата Беларуси / О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // Вестник БрГТУ. – 2020. – № 2(120) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 93–99. <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-93-99>.
9. Meshyk, A. Climate Resource Potential to Develop Solar Power in Belarus / A. Meshyk, M. Barushka, V. Marozava, E. Sarkynov and An. Meshyk // E3S Web Conf., 212 (2020) 01012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201012>.

10. Мешик, О. П. Перспективы развития солнечной энергетики в Республике Беларусь / О. П. Мешик, М. В. Борушко // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста, 12–14 сент. 2019 г. / г. Брест; под ред. А. К. Карабанова [и др.]. – Брест: БрГУ, 2019. – Ч. 2 – С. 250–253.
11. Мешик, О. П. Потенциальные климатические ресурсы для развития ге-лиоэнергетики в Беларуси / О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти член-корреспондента РАСХН и НАН КР академика МАЭП и РАВН Бочкарева Я. В. – Часть I. – Рязань : РГАТУ, 2020. – С. 86–91.
12. Архив метеорологических наблюдений [Электронный ресурс] / Белгидромет. – Режим доступа : <http://www.pogoda.by/meteoarchive/#>. – Дата доступа : 22.08.2021.
13. Шакиров, В. А. Методика оценки прихода суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности с использованием многолетних архивов метеорологических данных / В. А. Шакиров. – Системы. Методы. Технологии, 2017. – № 4. – С. 115–121.
14. Назаров, Б. И. Расчёт потока суммарной радиации на наклонную плоскость солнечных приёмников в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы / Б. И. Назаров, М. А. Салиев, А. Н. Махмудов, С. Ф. Абдуллаев // ДАН РТ, 2015. – № 12. – С. 1111–1118.
15. Duffie, J. A. Solar engineering of thermal processes / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013. – 928 p. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
16. Mian, Guo Optimal Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Modules Using HS Algorithm in Different Climates of China / Mian Guo, Haixiang Zang, Shengyu Gao, Tingji Chen, Jing Xiao, Lexiang Cheng, Zhinong Weid Guoqiang Sun. – Appl. Sci., 2017. – № 7 (10). – P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/app7101028>
17. Mousavi Maleki, S. A Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited / S. A. Mousavi Maleki, H. Hizam, C. Gomes. – Energies, 2017. – № 10. – P. 1–28. <https://doi.org/10.3390/en10010134>.
18. Самойлов, Д. В. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Создание и исследование системы термостабилизации парника для условий средней полосы России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://static.freereferats.ru/\\_avtoreferats/01002979840.pdf](https://static.freereferats.ru/_avtoreferats/01002979840.pdf). – Дата доступа : 22.08.2021.
19. Aixue, Hu. Impact of solar panels on global climate / Aixue Hu, Samuel Levis, Gerald A. Meehl et al. – Nature climate change, 2016. – № 6. – P. 290–294. <https://doi.org/10.1038/nclimate2843>.

20. Обухов, С. Г. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за Солнцем / С. Г. Обухов, И. А. Плотников. – Известия ТПУ, 2018. – № 10. – С. 95–106.
21. Северянин, В. С. Метеопрогностическое регулирование температурного режима помещений автоматизированными системами отопления / В.С. Северянин, К.О. Мешик // Вестник Брестского государственного технического университета, 2019. – № 2. – С. 74–77.

УДК 551.578

## РЕЖИМ СНЕЖНОГО ПОКРОВА БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

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

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

### **Аннотация**

Выполнен анализ режима залегания снежного покрова на территории Беларуси в изменяющемся климате. Установлены даты образования снежного покрова, продолжительность его залегания за период 1990–2020 гг. Выявленные трансформации по сравнению с периодом 1945–1990 гг. статистически значимы. Продолжительность залегания снежного покрова за рассматриваемый период уменьшилась в среднем от 10 до 24 дней. При этом образование снежного покрова происходит позднее, в среднем до 8 дней, а его разрушение раньше, до 16 дней.

**Ключевые слова:** снежный покров, Беларусь, образование и разрушение снежного покрова, продолжительность залегания, изменяющийся климат.

### **REGIME OF SNOW COVER IN BELARUS IN CURRENT CLIMATE CHANGE**

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

### **Abstract**

The authors analyze the regime of snow cover in Belarus in current climate change. They determine the dates of snow cover formation and duration of snow lying in 1990–2020. The revealed transformations in the dates compared to those of 1945–1990 are statistically relevant. The duration of snow lying has shortened by 10–24 days on average. The area gets covered with snow 8 days later on average and the snow melts 16 days earlier than it used to.

**Keywords:** snow cover, Belarus, formation and destruction of snow cover, duration of snow lying, climate change.

**Введение.** Снежным покровом называется слой снега на поверхности земли, сформированный снегопадами. Снежный покров – один из основных компонентов ландшафтов умеренных и полярных широт, оказывающих сильное воздействие на функционирование составляющих ландшафта, на условия жизни и