

УДК 551.58+551.55

Л.В. Дмитренко, С.Л. Барандіч

## **ОЦІНКА КЛІМАТИЧНИХ РЕСУРСІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ**

Розглянуто методичні питання оцінювання сонячної енергії в Україні. Наведено показники використання сонячної енергії та районування території України за показниками геліоенергоресурсів.

Обмеженість енергетичних ресурсів, які можуть використовуватись людством, зумовлює велику зацікавленість в проблемі практичного використання відновлювальних джерел енергії, зокрема, сонячної та вітрової.

Ця проблема для народного господарства України надзвичайно актуальна, оскільки ці види енергії характеризуються відсутністю шкідливого впливу на довкілля. У зв'язку з цим реалізація наукових розробок у цьому напрямі є справою надзвичайної державної ваги, а оцінка кліматичного потенціалу сонячної та вітрової енергії, визначення метеорологічних аспектів їх надходження набуває великого практичного значення.

Метою цієї розробки є оцінювання кліматичного потенціалу сонячної енергії в Україні.

### **Оцінювання геліоенергетичних ресурсів**

Необхідною умовою широкого використання енергії сонця є аргументоване оцінювання її потенціалу, кінцевим результатом якого є комплекс об'єктивних кількісних характеристик, які відображають мінливий режим надходження цього виду енергії та межі їх можливих варіацій у просторі і часі. Кліматичне обґрунтування розташування та експлуатації об'єктів геліоенергетики повинне враховувати, в першу чергу, просторові та часові особливості розподілу енергії сонця в конкретному місці і визначити необхідні умови і характеристики оптимального режиму функціонування геліоенергетичних пристроїв.

Для отримання кадастрових оцінок сонячної енергії до вихідної метеорологічної інформації застосовуються загальні вимоги, а саме:

- об'єктивна оцінка їх репрезентативності;

- оцінка точності характеристик як режимних, так і отриманих на їх основі шляхом розрахунку;
- оцінка меж їх можливих варіацій.

Оцінка потенціалу сонячної енергії проводиться на загальних для всіх відновлюваних джерел енергії принципах. Це комплекс закономірно-стохастичних процесів, реалізація яких підлягає закономірній та стохастичній мінливості. Стосовно оцінки потенціалу сонячної енергії у відповідності з природою цього джерела необхідно враховувати закономірні коливання сонячної радіації астрономічного характеру (обертання Землі навколо Сонця, коливання сонячної постійної) та стохастичні зміни геофізичного характеру (варіації хмарності, прозорості атмосфери, вологості, аерозольної мутності).

Саме тому використання в кадастрових оцінках сонячної радіації лише середніх багаторічних характеристик неможливе без урахування її просторово-часової мінливості, оскільки такий підхід призводить до значних помилок. Кліматичні ресурси сонячної енергії повинні оцінюватись з урахуванням принципу ймовірності характеристик сонячної радіації, тобто, максимального наближення даних спостережень до умов геліовикористання [1].

Оцінювання геліоенергетичних ресурсів проводиться за багаторічними спостереженнями характеристик сонячної радіації. Важливими показниками радіаційного режиму, які широко використовуються в геліоенергетиці, є тривалість сонячного сьйва та хмарність, оскільки негативним чинником у роботі геліоустановок є переривчастість у надходженні сонячної радіації, за рахунок чого втрачається значна частина енергії. Не менш важливою характеристикою є хмарність, мінливість якої протягом дня викликає нерівномірність роботи геліоустановок, особливо сонячних концентраторів, що сприймають прямі сонячні промені. У дні з мінливою хмарністю значна кількість сонячної енергії витрачається на подолання інерційності установок, яка коливається в досить широких межах: від кількох десятків хвилин до декількох годин.

Для визначення геліоенергетичних ресурсів використано:

- суми прямої та сумарної радіації, їх мінливість за різні проміжки часу в умовах ясного та хмарного неба;
- тривалість сонячного сьйва (багаторічні показники, просторово-часовий розподіл); її мінливість; безперервна тривалість сонячного сьйва вище

вказаного рівня; можлива, справжня тривалість сонячного сяйва, що дорівнює технічно зазначеному рівню або перевищує його; число днів без сонця;

- повторюваність хмарності різних градацій.

На підставі цих показників отримано:

- можливий (за умов ясного неба) і реальний (за середніх умов хмарності) потенціал сонячної радіації з прямої та сумарної радіації;

- оптимальні кути нахилу, що забезпечують максимальне надходження сонячної радіації на приймальну поверхню геліоустановки та коефіцієнти перерахунку добових сум сумарної радіації на похилу поверхню з оптимальним кутом нахилу;

- оптимальні добові суми прямої та сумарної радіації;

- показники безперервної тривалості сонячного сяйва (понад 6 год.), що забезпечують ефективну роботу геліоустановки.

### **Прикладні характеристики сонячної енергії**

З використанням цих характеристик отримано ряд прикладних показників ресурсів сонячної енергії, а саме:

- тривалість роботи геліоустановок із визначеною добовою сумою сумарної радіації;

- кількість енергії, засвоєної та виробленої геліоустановкою. Ця характеристика включає добові суми сумарної радіації вище зазначеного робочого рівня з урахуванням їх повторюваності;

- об'єм акумулювання сонячної енергії, який визначається за допомогою інтегральних та різницево-інтегральних кривих розподілу добових сум прямої та сумарної радіації.

Одним із важливих елементів методологічних питань оцінювання ресурсів сонячної радіації є визначення характеристик перерозподілу сонячної радіації під час надходження на похилі поверхні.

Перерозподіл потоків прямої, розсіяної та сумарної радіації у процесі надходження на нерухому приймальну поверхню геліоустановок розраховується за формулами сферичної геометрії.

Зокрема, для визначення потоку прямої сонячної радіації на похилу поверхню  $S_s$  використовується залежність [2]:

$$S_s = S_m [\cos \alpha (\sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \cos \theta) + \sin \alpha \{ \cos A_n [ \operatorname{tg} \varphi (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta) - \sin \delta \sin \varphi ] + \sin A_n \cos \delta \sin \theta \} ], \quad (1)$$

де  $S_m$  – пряма радіація, що надходить на нормальну до сонячних променів поверхню;  $\alpha$  – кут нахилу приймальної поверхні;  $\varphi$  – широта місцевості, де розміщується об'єкт;  $\delta$  – схилення сонця;  $\theta$  – часовий кут сонця;  $A_n$  – азимут проекції нормалі на горизонтальну поверхню.

Не менш важливо визначити коефіцієнт переходу  $K_s$  від потоку сонячної радіації на горизонтальну поверхню до її значень на похилій поверхні [2]:

$$K_s = \frac{\sum S_n}{\sum S'}, \quad (2)$$

де  $\sum S_n$  – годинні або добові суми прямої радіації на поверхню, розміщену під кутом до горизонту;  $\sum S'$  – аналогічні значення на горизонтальній поверхні.

Потік розсіяної та відбитої радіації, що надходить на похилу поверхню, визначається за виразом:

$$D_n = D_z \cos^2 \alpha / 2, \quad (3)$$

$$R_n = R_z \sin^2 \alpha / 2, \quad (4)$$

де  $D_n$  та  $R_n$  – розсіяна та відбита радіація на похилій поверхні,  $D_z$  та  $R_z$  – їх значення на горизонтальній поверхні.

Для розрахунку добових сум сумарної радіації на похилу поверхню  $\sum Q_n$  використана формула Б.А.Айзенштата [2]:

$$\sum Q_n = \sum S_n + \cos^2 \alpha / 2 \sum D_z + \sin^2 \alpha / 2 \sum R_z, \quad (5)$$

де  $Q_z$  – сумарна радіація на горизонтальну поверхню.

У табл. 1 наведено середні добові суми сумарної радіації для оптимального кута нахилу приймальної поверхні геліоустановки [3]. З півночі на південь спостерігається їх збільшення (вдвічі у зимові місяці та на 12-20% у літні).

Таблиця 1

Оптимальна добова сума сумарної радіації (МДж/м<sup>2</sup>) на похилу поверхню південної орієнтації за середніх умов хмарності

Станція	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Ковель	14,56	18,77	20,92	19,68	17,82	13,87
Бориспіль	15,30	19,88	22,45	21,34	18,72	15,21
Полтава	14,79	19,24	21,59	10,93	18,54	13,97
Одеса	16,90	20,95	23,96	23,93	21,70	22,29

У табл. 2 наведена тривалість роботи геліоустановок із різною робочою добовою сумою сумарної радіації. З півночі на південь збільшується тривалість роботи геліопристроїв. Так, для установки, яка розташована на Поліссі і починає працювати за добової суми сумарної радіації  $12 \text{ МДж/м}^2$ , тривалість роботи варіює від 9 днів у вересні до 22 днів у червні, а в цілому за період (квітень-вересень) становить 109 днів. На Південному березі Криму цей показник збільшується до 160 днів. Тривалість роботи геліоустановки з робочою добовою сумою сумарної радіації понад  $20 \text{ МДж/м}^2$  зростає від 40 днів на Поліссі до 99 днів на Південному березі Криму.

Таблиця 2

Тривалість (дні) роботи геліоустановок з різною добовою сумою сумарної радіації

Станція	Робоча добова сума сумарної радіації, $\text{МДж/м}^2$	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Ковель	>12	16	21	22	21	20	9
	>20	3	11	10	7	9	
Бориспіль	>12	18	26	27	27	24	16
	>20		16	21	18	11	1
	>32				0,3		
Полтава	>12	12	24	26	26	22	14
	>20	6	13	14	14	6	2
	>32		1	1			
Одеса	>12	22	25	28	29	25	24
	>20	7	16	24	24	18	3
	>32			0,3	0,2		
Карадаг	>12	22	27	28	29	28	26
	>20	9	18	22	22	19	9
	>32			1	1	0,5	

### Розподіл геліоенергетичних характеристик по сезонах

Узимку просторовий розподіл повторюваності безперервної тривалості сонячного сйва понад 6 годин характеризується досить значною мінливістю (менше 16% на півночі та більше 32% на півдні, узбережжі Чорного та Азовського морів, рис. 1).

Кількість сонячної енергії, яка надходить, що є характеристикою загального потенціалу сонячної енергії за цей сезон, варіює також досить суттєво: від  $200\text{-}300 \text{ МДж/м}^2$  на Поліссі до  $400\text{-}500 \text{ МДж/м}^2$  на півдні, узбережжі Чорного та Азовського морів.

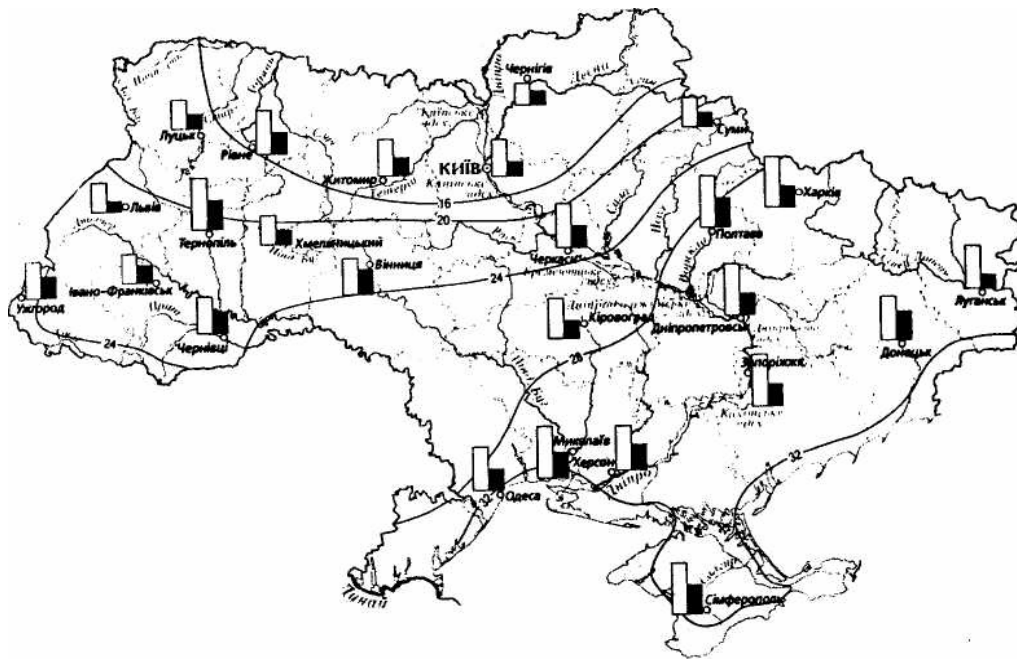


Рис. 1. Геліоенергетичні ресурси (зима): -16- – повторюваність безперервної тривалості сонячного сьйва; □ – кількість сонячної енергії, яка надходить (МДж/м<sup>2</sup>/сезон); ■ – кількість потенційної вироблюваної енергії (МДж/м<sup>2</sup>/сезон)

Улітку енергетичні ресурси сонця найбільші. Повторюваність безперервної тривалості сонячного сьйва понад 6 годин змінюється у межах 27-41% (рис. 2).

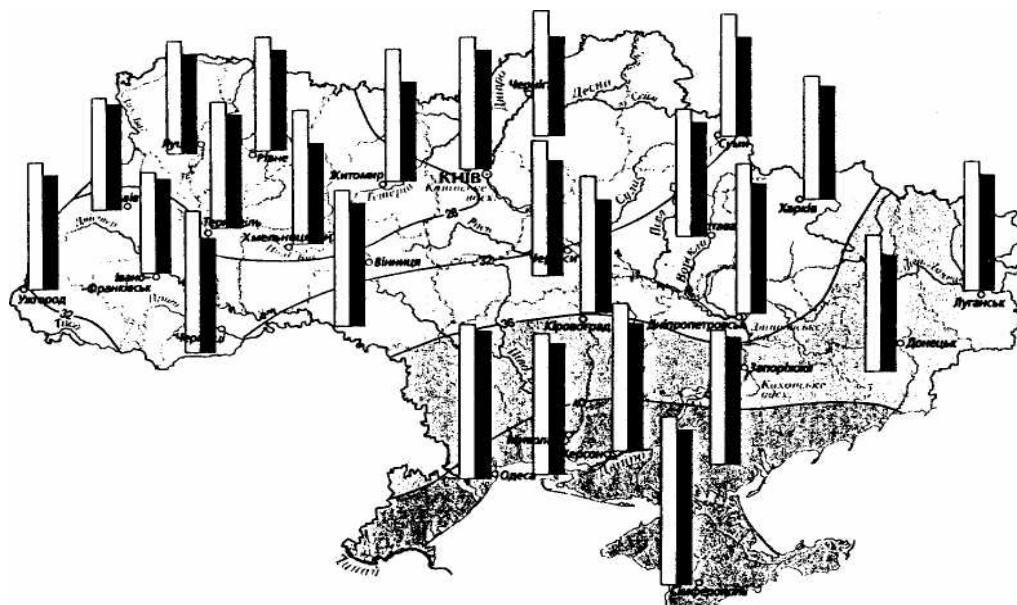


Рис. 2. Геліоенергетичні ресурси (літо): -28- – повторюваність безперервної тривалості сонячного сьйва; □ – кількість сонячної енергії, яка надходить (МДж/м<sup>2</sup>/сезон); ■ – кількість потенційної вироблюваної енергії (МДж/м<sup>2</sup>/сезон)

Її просторовий розподіл наступний: 27-30% у північних районах, 32-36% у центральних, 32-40% у східних та більше 40% на півдні, узбережжі Чорного та Азовського морів.

Кількість сонячної енергії, що надходить влітку, дорівнює 1400-1500 МДж/м<sup>2</sup> у Передкарпатті та Українських Карпатах, 1550-1800 МДж/м<sup>2</sup> на півночі України. У східних та центральних районах загальний потенціал сонячної енергії у цей сезон становить 1850-1950 МДж/м<sup>2</sup>, збільшуючись у південних районах та в Криму до 2000-2150 МДж/м<sup>2</sup>

### **Районування території України за потенціалом сонячної енергії**

Районування проводилось на основі кліматичного узагальнення актинометричних та метеорологічних спостережень із застосуванням статистично-ймовірнісного методу. Комплекс спеціалізованих показників районування розроблявся таким чином, щоб вони відображали як багаторічний режим надходження сонячної радіації, так і її мінливість [3].

Показники районування такі:

- сума прямої та сумарної радіації за квітень-вересень та за рік; їх коефіцієнт варіації;
- показник структури опромінення (співвідношення між прямою та сумарною радіацією);
- структура повторюваності добових сум сумарної радіації.

Крім того, для районування використано ряд критеріїв, що визначають вплив на потенціал сонячної енергії тривалості сонячного саява та хмарності:

- безперервна тривалість сонячного саява (понад 6 год.), яка достатня для рентабельної роботи геліоустановок;
- коефіцієнт стійкості ясної погоди; погода вважається дуже сприятливою, якщо цей коефіцієнт більше 50%;
- критерії доцільності використання сонячної енергії; оптимальність її використання забезпечується у тому випадку, коли річна кількість ясних та напів'ясних днів більше 200).

У табл. 3 наведено результати районування та оцінка потенціалу сонячної енергії. Районування території України за комплексом показників потенціалу сонячної енергії, тривалості сонячного саява та хмарності, а також із врахуванням ландшафтних особливостей перерозподілу сонячної енергії дає підстави для наступних рекомендацій

Таблиця 3

## Районування території України за потенціалом сонячної енергії

Регіон	Потенціал сонячної енергії				Вклад прямої радіації в сумарну, %	Повторюваність безперервної тривалості сонячного сйва понад 6 год, %	Коефіцієнт стійкості ясної погоди, %	Кількість ясних та напів'ясних днів, рік	Оцінка потенціалу сонячної енергії
	пряма радіація на перпендикулярну поверхню, МДж/м <sup>2</sup>		сумарна радіація, МДж/м <sup>2</sup>						
	квітень-вересень	рік	квітень-вересень	рік					
Південний берег Криму	3400-3600	4700-4900	3700-3900	5000-5200	0,53	35,0	50	264	Дуже високий потенціал, найбільш сприятливі умови використання сонячної енергії
Причорноморська та Приазовська низовини	3200-3400	4400-4600	3700-3800	4600-4800	0,49	37,0	48	244	Високий потенціал, сприятливі умови використання сонячної енергії
Донецька та Придніпровська височини	3100-3300	3900-4000	3550-3750	4250-4350	0,44	32,2	47	239	Високий потенціал, сприятливі умови використання сонячної енергії
Закарпатська низовина	2700-2900	3600-3800	3500-3600	4100-4200	0,41	31,0	46	236	Достатній потенціал, досить сприятливі умови використання сонячної енергії
Подільська та Придніпровська височини	2800-3000	3650-3850	3300-3700	4100-4200	0,42	27,2	40	238	Достатній потенціал, сприятливі умови використання сонячної енергії
Поліська низовина	2000-2700	2800-3600	2700-3500	3500-4200	0,41	26,0	39	228	Невисокий потенціал, обмежено сприятливі умови використання сонячної енергії
Українські Карпати та Кримські гори	1500-1700	2150-2250	2600-2700	3250-3350	0,36	18,7	44	203	Низький потенціал, несприятливі умови використання сонячної енергії



щодо її використання та раціонального розміщення об'єктів геліоенергетики:

1. Найбільш доцільне використання сонячної енергії, а отже, і розміщення геліоустановок, на Південному березі Криму, на Причорноморській та Приазовській низовинах, у долинах Закарпаття. Найбільш сприятливий період їх роботи – квітень-вересень, а на Південному березі Криму – квітень-жовтень, коли переважає ясна погода, а добові суми сумарної радіації становлять 13,2-32,5 мДж/м<sup>2</sup>.

2. Велика повторюваність хмарних днів в Українських Карпатах викликає значне послаблення сонячної радіації. Це свідчить про недоцільність розміщення систем сонячного теплопостачання у цих районах. У той же час висока потужність сонячної радіації за ясного неба забезпечує успішну роботу локальних геліоустановок обмеженої дії.

3. Результати досліджень режиму надходження сонячної радіації, тривалості сонячного сьйва та хмарності у виділених районах дають змогу зробити висновок про економічну доцільність використання сонячної енергії у квітні-вересні. Тому на перспективу, щоб забезпечити потреби в енергії протягом року, слід планувати використання геліоенергоустановок у комплексі.

\* \*

*Рассмотрены методические вопросы оценки солнечной энергии в Украине. Приведены показатели солнечной энергии и районирование территории Украины по показателям гелиоэнергоресурсов.*

\* \*

1. *Дмитренко Л.В., Гейко Л.А.* Оцінка кліматичних ресурсів сонячної і вітрової енергії (метод. розробки та результати досліджень) // Вісн. Донецької держ. акад. буд-ва та архіт. – 1999. – №99-6(20). – Т. 2. – С. 6-8.
2. *Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П.* Радиационный режим наклонных поверхностей. – Л.: Гидрометеиздат, 1978, – 216 с.
3. *Дмитренко Л.В.* Геліо- та вітроенергетичні ресурси // Клімат України. – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – С. 267-279.

*Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ*