ЕКОЛОГІЯ І ВИРОБНИЦТВО

УДК 911.9:62-253.7
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.9

КЛІМАТИЧНІ ЧИННИКИ ТА ЇХНЯ РОЛЬ У РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У ЛЬВІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Лопушанська М.Р., Іванов Є.А.
Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Університетська, 1, 79000, м. Львів
mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua, yevhen.ivanov@lnu.edu.ua

Кліматичні чинники відіграють важливу, нерідко вирішальну, роль у розвитку сонячної енергетики у різних природних ландшафтах Львівської області. Серед кліматичних чинників, що впливають на вибір місця будівництва сонячних електростанцій є такі показники як температура атмосферного повітря, інсоляція сонячної радіації, альбедо земної чи техногенної поверхні, затіненість ділянки та хмарність.

Львівська область розташована у межах помірного кліматичного поясу, а клімат регіону визначено як помірно континентальний. Для оптимальної роботи фотомодулів існують фіксовані параметри, які залежать від умов їхнього тестування STC чи NOCT. Середньорічні температури атмосферного повітря у регіоні становлять +4–8 °С, а показники інсоляції – 958–1 141 кВт/м^2. Тривалість снігового періоду коливається від трьох у рівнинній до шести місяців – у гірській місцевостях.

Виробництво електроенергії від сонячних панелей залежать від правильно обраних кутів їх нахилу. Оптимальні кути нахилу фотомодулів для регіону влітку становлять 30°, у весняно-осінній період – 50°, а взимку – 70°. Глобальне опромінення під оптимальним кутом у Львівській області становить 3 640 Вт/м^2, мінімальне – 3 310 Вт/м^2, а максимальне – 3 720 Вт/м^2. Середні значення питомої вихідної фотоелектричної потужності становлять 3,06 кВт·год/кВт, тоді як мінімальні – 2,81 кВт·год/кВт, а максимальні – 3,12 кВт·год/кВт.

Найкращими територіями для розміщення наземних сонячних станцій у Львівській області є відкриті рівнинні місцевості, на яких відсутні лісові масиви та інші природно-господарські об'єкти, що можуть служити джерелами затінення фотомодулів. У гірській місцевості спостерігаємо менш сприятливі умови для розміщення сонячних станцій, зокрема через особливості форм рельєфу та високу хмарність. Оптимальними площами для встановлення фотомодулів вважаємо дахи будинків та інших приміщень з метою ефективного використання територій і мінімізації впливу на довкілля. *Ключові слова:* сонячна енергетика, клімат, температура, інсоляція, альбедо, затіненість, хмарність, фотомодуль.

Climate factors and their role in the solar energy development in the Lviv region. Lopushanska M., Ivanov Ye.

Climate factors play an important, often crucial, role in the solar energy development in different natural landscapes of the Lviv region. Among the climate factors that influence the construction choice of the site of solar power plants, the main factors are such as air temperatures, solar radiation insolation, albedo of the earth or man-made surface, shading of the site and cloudiness.

The Lviv region is located within the temperate climate zone, and the climate of the region is defined as the temperate continental one. In order to obtain some optimal operation of photomodules, there are fixed parameters that depend on the conditions of their STC or NOCT testing. The average annual air temperature in the region is +4–8 °C, and the insolation indicators are 958–1,141 kW/m^2. The snow period duration varies from three months in the plains to six months in the mountainous areas.

Electricity production from solar panels depends on the correct angles of their inclination. The optimal angles of inclination of photomodules for the region in summer are 30°, in spring and autumn – 50°, and in winter – 70°. The global irradiation at the optimal angle in the Lviv region is 3,640 W/m^2, the minimum is 3,310 W/m^2 and the maximum is 3,720 W/m^2. The average values of specific output photovoltaic power are 3.06 kW·h/kW, while the minimum vales are 2.81 kW·h/kW and the maximum ones are 3.12 kW·h/kW.

The best areas for the placement of ground-based solar stations in the Lviv region are open plains, where there are no forests and other natural and economic objects that are able to serve as sources of shading for photomodules. In mountainous areas, we observe less favorable conditions for the placement of solar stations, in particular due to the peculiarities of relief forms and high cloudiness. We consider the roofs of buildings and other premises to be the optimal areas for the placement of photomodules in order to efficiently use the areas and minimize the impact on the environment. *Key words:* solar energy, climate, temperature, insolation, albedo, shading, cloudiness, photomodule.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток людства призвів до зростання потреб в електроенергії, якої у багатьох регіонах світу не вистачає. У зв'язку з глобальними викликами перед суспільством виникла необхідність пошуку нових альтернативних видів енергетики, які б компенсували її нестачу та дозволили мінімізувати негативний вплив на природне середовище. Одним із таких видів відновлюваних джерел є сонячна енергетика. Проте значним недоліком сонячних електростанцій вважається мінливість обсягів виробництва залежно від кліматичних умов певних територій. Тому важливим етапом вже на стадії їхнього проектування вважаємо врахування кліматичних особливостей з метою отримання максимальної ефективності виробництва електроенергії за мінімального впливу на довкілля.

Понад 75 % виробництва електроенергії у Львівській області припадає на Добротвірську теплову електростанцію, яку відносять до традиційної «брудної» енергетики [1]. В останні практично 10 років ситуація змінюється, зокрема у регіоні з'являються й нові сонячні електростанції (СЕС) [2]. Розвиток сонячної енергетики робить актуальним питання оцінювання кліматичних чинників у регіоні та визначення їхньої ролі.

Актуальність дослідження. У процесі планування розміщення сонячних електростанцій слід врахувати не лише економічну доцільність встановлення, а й природні особливості місцевості. Вважаємо недоцільним будівництво сонячних електростанцій у лісових масивах, в яких деревами створюється затінення для фотомодулів та погіршується їхня робота, а у разі відсутності байпас-діоду, призводить до зниження генерації або навіть припинення роботи фотомодулів. Важливо також враховувати інсоляцію у межах місцевостей, де планується будівництво та оптимальний кут нахилу фотомодулів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У 2003 р. прийнято Закон України «Про альтернативні джерела енергії» [3], у якому зазначено, що до цих джерел відноситься й сонячна енергетика. У 2017 р. схвалено Енергетичну стратегію України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [4], в якій зазначається, що важливим пріоритетом держави є стимулювання розвитку сонячної енергетики, зокрема шляхом будівництва дахових колекторів та електростанцій для приватних домогосподарств.

Станом на 2021 р. у Львівській області обліковано понад 1 300 сонячних електростанцій приватних домогосподарств [5]. У межах рівнинної частини регіону спостерігаємо оптимальні кліматичні умови для розміщення сонячних електростанцій. Важливо збільшити частку дахових СЕС, оскільки важливою їх перевагою є можливість використання дахів та звільнення корисних площ земельних ділянок, що необхідні для наземних СЕС. У містах встановлення дахових СЕС допомагає у боротьбі із глобальними кліматичними змінами та забезпечує можливості автономного джерела електроенергії.

У статті проаналізовано вплив кліматичних чинників на можливості розташування сонячних електростанцій у Львівській області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальні проблеми впливу кліматичних умов на розміщення сонячних електростанцій займались науковці Херсонського національного університету [6], НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» [7], Львівського національного університету природокористування [8], Інституту відновлюваної енергетики НАН України [9]. Іноземні дослідники і виробники фотомодулів та інверторів регулярно публікують інформацію щодо нових технологій та прогрес розвитку галузі [10].

Метою роботи є оцінювання впливу кліматичних чинників на розвиток сонячної енергетики у Львівській області, визначення потенційних місць розміщення об'єктів для забезпечення максимальної ефективної роботи станції при мінімальному впливі на природне середовище.

Новизна. Узагальнено геодані з електронних геоінформаційних ресурсів (SolarGIS, Global Solar Atlas, Deutscher Wetterdienst) та визначено ділянки для потенційного розміщення об'єктів сонячної енергетики у Львівській області.

Методологічне значення. Використано геодані Департаменту паливно-енергетичного комплексу та енергозбереження Львівської ОДА [5], SolarGIS [11], Global Solar Atlas [12], Deutscher Wetterdienst [13] та інформацію із сайтів підприємств, які займаються будівництвом та експлуатацією об'єктів сонячної енергетики [14], українських та іноземних фахових видань. Здійснено аналіз та узагальнення зібраних геоданих, розглянуто кліматичні чинники та їхній вплив на розвиток сонячної енергетики у Львівській області. Дослідження є важливими для визначення потенційних ділянок будівництва сонячних електростанцій на шляху до декарбонізації виробництва електроенергії у Львівській області.

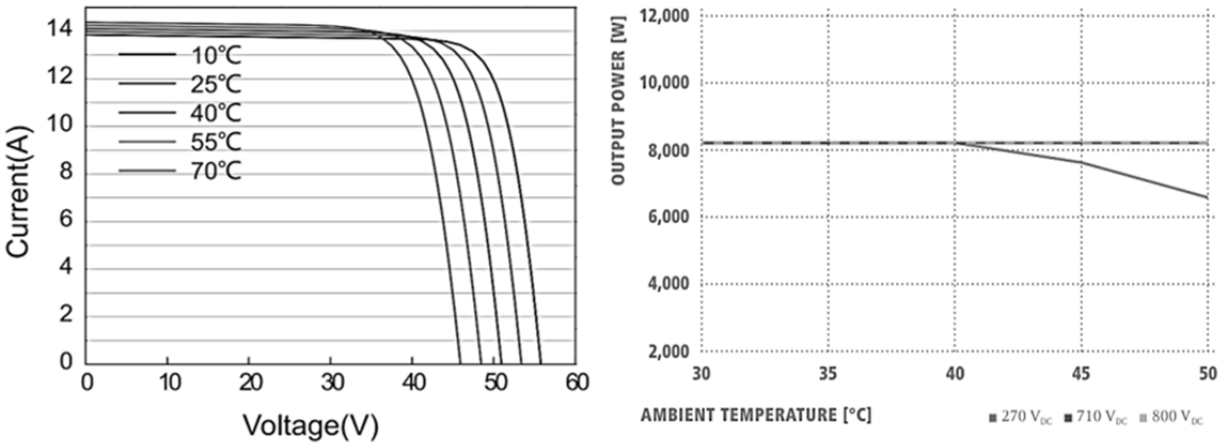
Викладення основного матеріалу. Для розвитку сонячної енергетики головними чинниками виступають температура повітря, інсоляція (глобальне горизонтальне і глобальне нахилене випромінювання), альбедо підстилаючої поверхні, сніговий покрив, хмарність та висота Сонця над горизонтом.

Львівська область розташована у межах помірного кліматичного поясу, а клімат регіону визначено як помірно континентальний. Для оптимальної роботи фотомодуля існують фіксовані параметри, які відображені в його паспорті. Вони залежать від умов тестування фотомодулів.

Умови STC (Standart Test Conditions) є стандартними умовами тестування за ідеальної роботи фотомодуля (інсоляція 1 000 Вт/м^2, температура 25 °С). Ці умови взято для ясного весняного чи осіннього полудня, за умови, що промені падають на поверхню фотомодуля під прямим кутом.

Умови NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) є номінальними умовами роботи фотомодуля за нормальних умов експлуатації (інсоляція 800 Вт/м^2, температура 20 °С, швидкість вітру 1 м/с). Під час випробувань фотомодуль виставлено під кутом 45° з орієнтацією на південь [15].

Температура атмосферного повітря відіграє суттєву роль у роботі СЕС. Зі збільшенням температури фотомодуля зменшується його потужність, що призводить до зниження загальних об'ємів виробництва електроенергії станцією. Розглянемо на прикладі вольт-амперної характеристики для фотомодуля JAM78S30 580-605 MR (рис. 1а). Потужність



а) *б)*

Рис. 1. Залежності параметрів фотомодулів від кліматичних чинників: а) сили струму і напруги від температури фотомодуля JAM78S30 580-605 MR [16]; б) потужності інвертора FroniusPrimo 8.2-1 від температури [17]

фотомодуля за температури комірки 10 °С становить 748 Вт, за температури 25 °С – 737 Вт, за температури 70 °С – 630 Вт [16].

Зі збільшенням температури повітря зменшується потужність інвертора, а для їх охолодження використовують додаткове обладнання. Для оптимальної роботи інвертор ховають у місцях без прямого попадання сонячних променів, а їх перегрів сприяє зменшенню вихідної потужності станції (рис. 1б) [17].

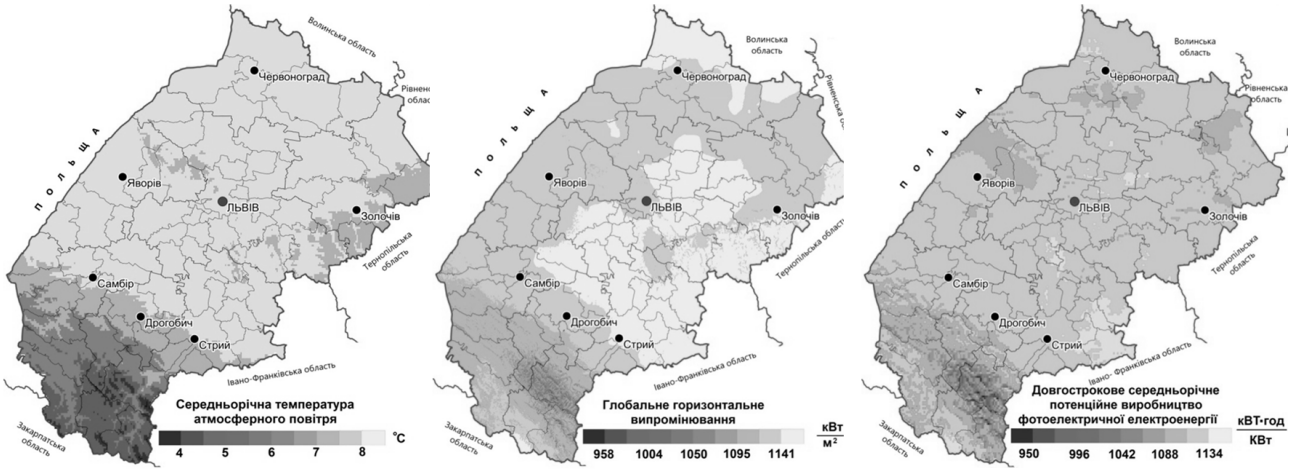
Середньорічні температури атмосферного повітря у Львівській області згідно з даними SolarGIS змінюються від +4 (гірська частина) до 8 °С (рівнинна частина) (рис. 2а). У гірській частині регіону зафіксовано мінімальні значення температури на метеостанціях Турка (-31,7 °С) і Славське (-33,6 °С), а на рівнинній частині – на метеостанціях Львів і Рава-Руська (-32,4 °С). Абсолютний мінімум температури повітря на Львівщині зареєстровано на метеостанції Турка (-39,0 °С). У свою чергу абсолютний максимум температури повітря у регіоні зафіксовано на метеостанції Дрогобич (+38,1 °С) [18]. Враховуючи показники температури повітря у Львівській області, можна оцінити умови як оптимальні для будівництва електростанцій, що не призведять до сильного перегрівання фотомодулів та інверторів.

Інсоляція (глобальне горизонтальне випромінювання) є потоком сонячної радіації, що під прямим кутом надходить на земну поверхню від сонячних променів за світловий день та вимірюється у кВт/м^2. Згідно з геоданими ресурсу SolarGIS [11], середньорічні показники інсоляції у регіоні змінюються від 958 (Сколівська, Славська, Козівська, Турківська і Східницька громади) до 1 141 кВт/м^2 і вище у рівнинній частині області (рис. 2б).

Для нормальної роботи фотомодулів за NOCT умовами необхідно, щоб інсоляція перевищувала 800 Вт/м^2. Середні показники інсоляції у Львівській області становлять 3 100 Вт/м^2, а мінімальні – 2900 Вт/м^2 [11]. Загалом, для оптимальної роботи нових сонячних електростанцій у регіоні достатньо обсягу глобального горизонтального випромінювання.

Виробництво електроенергії від сонячних панелей залежатиме від кута їхнього нахилу. Оптимальним кутом нахилу у широтах області є 30–35°. Глобальне нахилене опромінення під оптимальним кутом у Львівській області становить 3 640 Вт/м^2, мінімальне – 3 310 Вт/м^2, а максимальне – 3 720 Вт/м^2 [11]. На основі геоданих SolarGIS, у регіоні визначено показники питомої вихідної фотоелектричної потужності (рис. 2в). Середні значення на Львівщині становлять 3,06 кВт·год/кВт, тоді як мінімальні – 2,81 кВт·год/кВт, а максимальні – 3,12 кВт·год/кВт [22] (рис. 3).

Альбедо (відбивна здатність поверхні) є здатністю земної або техногенної поверхонь відбивати чи розсіювати сонячні промені та визначають у відсотках. У свою чергу, в іноземних працях це безрозмірний показник, що змінюється від 0 до 1. При цьому нульове значення відповідає чорній поверхні, яка повністю поглинає радіаційне випромінювання. Альбедо не є постійним для певної території, оскільки земна поверхня має власні показники. Показники альбедо у 5 % (0,05) відповідають чорному асфальтному покриттю і водним об'єктам, 10 % (0,10) – лісовим масивам і парковим зонам, 15 % (0,15) – забудованим міжбудинковим просторам, 20 % (0,20) – дахам будинків, 25–30 % (0,25–0,30) – трав'яному покриву 30 % (0,30) – піщаному покриву, 90 % (0,90) – свіжому сніговому покриву [21, 22]. Для врахуванням відбивної здатності розроблено спеціальний вид двосторонніх (Bifacial) сонячних панелей (рис. 4). За умови використання особливостей відбиваючої поверхні ці панелі збільшують обсяги виробництва електроенергії на 25 % [23].



а) б) в)

Рис. 2. Кліматичні чинники розвитку сонячної енергетики у Львівській області [11, 19]: а) середньорічна температура повітря; б) інсоляція (глобальне горизонтальне випромінювання); в) довгострокове середньорічне потенційне виробництво фотоелектричної електроенергії

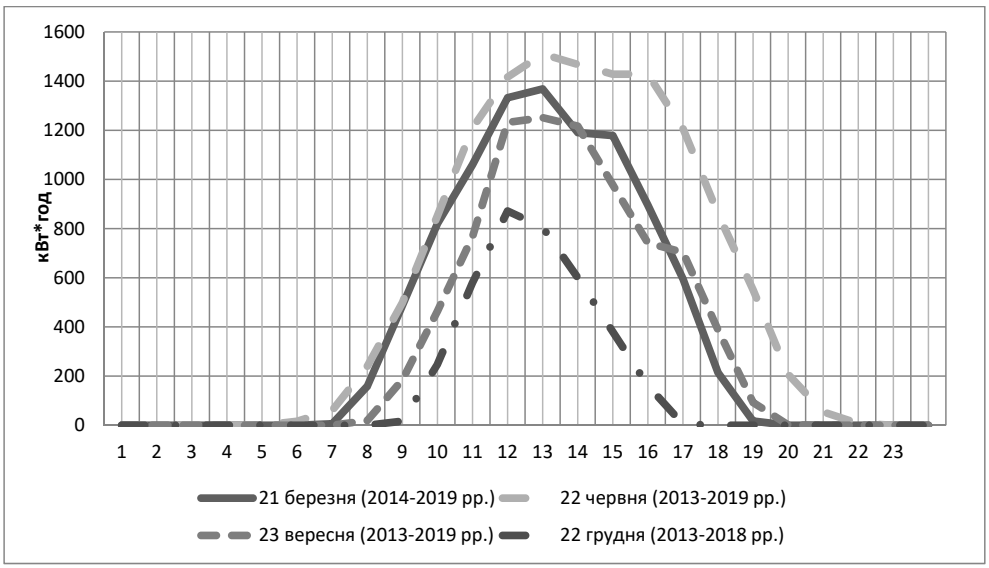


Рис. 3. Виробництво електроенергії на Самбірській СЕС у дні рівнодення і сонцестояння (2013–2019 рр.) [20]

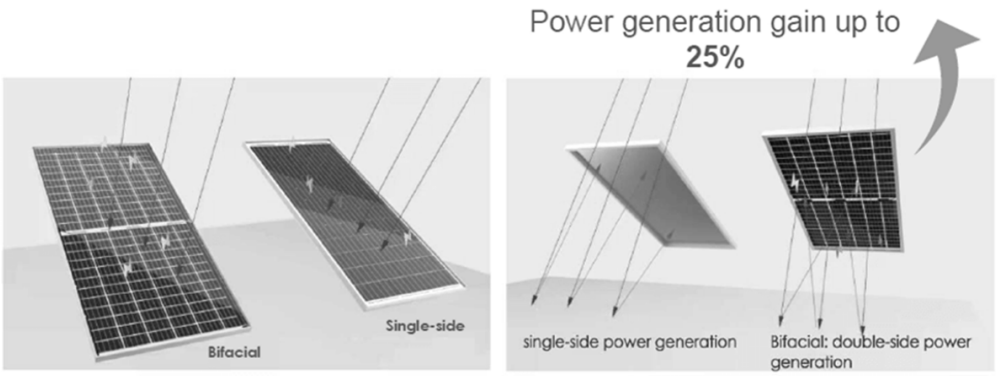


Рис. 4. Порівняльна характеристика односторонніх та двосторонніх фотомодулів сонячних панелей [23]

Особливо високі показники альбедо властиві для вкритої снігом земної поверхні. Згідно з даними Німецької служби погоди (Deutscher Wetterdienst) [13], тривалість снігового періоду у Львівській області коливається від трьох у рівнинній до шести місяців – у гірській місцевостях. Перший сніг у регіоні випадає переважно у листопаді та залишається на земній поверхні до лютого-березня – у рівнинній і до квітня – у гірській місцевостях.

Затіненість території є іншим важливим кліматичним чинником, що впливає на виробництво сонячної енергії. Через виникнення затінення поверхні та відсутність сонячного випромінювання зменшується ефективність роботи фотомодулів і він взагалі не зможе виробляти електроенергію (вночі, або при вкритті снігом).

Хмарність також суттєво впливає на ефективність роботи фотомодулів. Згідно з даними Німецької служби погоди [13], у Львівській області показник хмарності залежно від року коливається від 37,5 до 62,5 % у літній період та понад 75 % взимку. Середньорічний показник хмарності у регіоні становить 50–75 %, а кількість похмурих днів – від 150 до 200 днів.

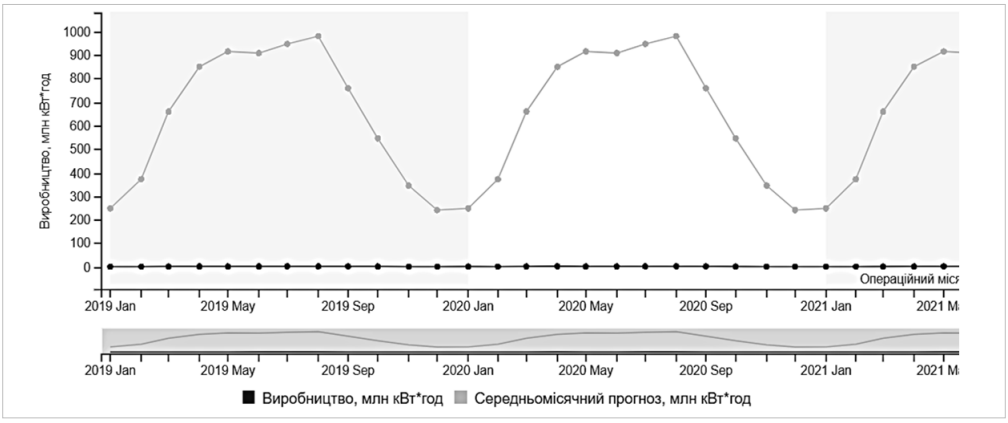
У свою чергу, кількість годин із сонячним світлом на Львівщині становить до 400 год. взимку і до 800 год. влітку – у гірській і до 1 000 год – у рівнинній частині регіону. Середньорічна кількість годин із сонячним світлом у Львівській області сягає 2 000 год. – у гірській і до 2 250 год. – у рівнинній його частині [13]. На прикладі Бориславської СЕС розглянемо обсяги виробництва електроенергії на сонячних електростанціях у регіоні (рис. 5а). Як бачимо, найбільше обсяги виробництва припадають на квітень-серпень (понад 800 млн кВт·год), коли тривалість сонячного випромінювання є більшою, а найменше – на грудень-січень (до 300 млн кВт·год).

Кут нахилу фотомодулів є ще одним важливим параметром, який значною мірою впливає на ефективність роботи сонячних електростанцій у Львівській області. Він залежить від висоти Сонця над горизонтом. Цей кут можна змінювати залежно від пори року. Запропонований оптимальний кут нахилу фотомодулів для регіону влітку становить 30°, у весняно-осінній період – 50°, а взимку – 70° (рис. 5б) [25].

Висновки. Пропонуємо на розгляд такі головні висновки і рекомендації:

1. Кліматичні чинники відіграють важливу, нерідко вирішальну, роль у розвитку сонячної енергетики у Львівській області. Серед цих чинників виокремимо такі показники як середньорічні температури атмосферного повітря, інсоляція сонячної радіації, альбедо земної чи техногенної поверхні, затіненість ділянки та хмарність.

а)



б)

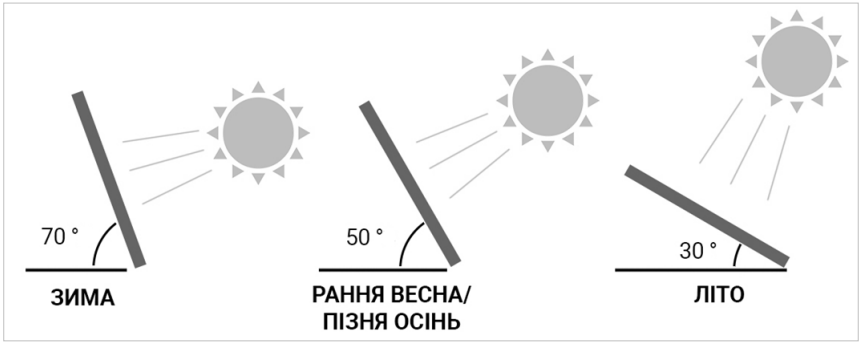


Рис. 5. Залежність обсягів виробництва сонячної енергії у Львівській області від кліматичних параметрів: а) графік виробництва електроенергії на Бориславській СЕС [24]; б) оптимальний кут нахилу фотомодулів [25]

2. Найкращими територіями для розміщення наземних сонячних станцій у Львівській області є відкриті рівнинні місцевості, на яких відсутні лісові масиви та інші природно-господарські об'єкти, що можуть служити джерелами затінення фотомодулів. У гірській місцевості спостерігаємо менш сприятливі умови для розміщення сонячних станцій, зокрема через особливості форм рельєфу та високу хмарність.

3. Найоптимальнішими площами для розміщення фотомодулів вважаємо дахи житлових будинків і великих виробничих приміщень з метою ефективного використання територій і мінімізації впливу на довкілля.

Література

1. Геоекологія Львівської області: монографія / за заг. ред. Є. Іванова. Львів : Простір-М, 2021. 606 с.
2. Lopushanska M., Krychevska D., Ivanov E., Pylypovych O. Geography, current state and development prospects of renewable energy facilities in Western Ukraine (example of Lviv region). *Geo Decade 2020-2030*: International Geographic Conference (24–26 November 2020, Sofia, Bulgaria): Book of abstracts. Sofia, 2020. P. 41–43.
3. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20 лютого 2003 р. № 555-IV. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2003. № 24. ст. 155. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text
4. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р / Кабінет Міністрів України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text
5. Департамент паливно-енергетичного комплексу та енергозбереження Львівської ОДА: офіційний сайт. URL: https://loda.gov.ua/departament_palyvno_energetychnogo_kompleksu_ta_energozberezhennya
6. Андронова О., Курак В. Оптимізація розміщення приймачів сонячної енергії рядами для кліматичних умов півдня України. *Відновлювана енергетика.* 2020. № 2 (61). С. 41–53. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).45-53.
7. Дёмин Д., Гаевская А., Гаевский О. Фактор потери мощности фотоэлектрических модулей при их взаимном затенении и оптимизация улов наклона и расстояния между рядами модулей. *Відновлювана енергетика.* 2019. № 4 (59). С. 37–48. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).37-48.
8. Гальчак В., Боярчук В., Сиротюк В., Сиротюк С. Параметри прямого потоку сонячної енергії при ясному небі з урахуванням прозорості атмосфери. *Відновлювана енергетика.* 2019. № 2 (57). С. 22–31. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).22-31.
9. Рєзцов В., Матях С., Кудреватих О. Інтерактивна карта потенціалу сонячної енергії України. *Відновлювана енергетика.* 2018. № 4 (55). С. 34–42. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2018.4(55).34-42.
10. Hu P. T., Negnevitsky M., Kashem M. A. Loading Capabilities Assessment of Power Transmission Lines. *Faculty of Engineering and Information Sciences – Papers*: Part A. 4409. URL: https://ro.uow.edu.au/eispapers/4409
11. SolarGIS: офіційний сайт. URL: https://solargis.com
12. Global Solar Atlas: офіційний сайт. URL: https://globalsolaratlas.info/map
13. Deutscher Wetterdienst: офіційний сайт. URL: https://www.dwd.de
14. Еко-Оптіма: офіційний сайт. URL: http://www.ecooptima.com.ua/#projects
15. Технічні характеристики Vitovolt 300 та їхні значення Viessmann. URL: https://serviceportal.viessmann.ua/articles/tehnicni-harakteristiki-vitovolt-300-ta-ihni-znacenna
16. Harvest the Sunshine. Deep Blue 3.0. JA Solar JAM78S30 580-605 MR. URL: https://www.jasolar.com/uploadfile/2022/0513/20220513051007792.pdf
17. Fronius. Fronius Primo 8.2-1: офіційний сайт. URL: https://220volt.com.ua/uploads/shop_product/1678/58/738.pdf
18. Львівська область: природні умови та ресурси: монографія / за заг. ред. д-ра геогр. наук, проф. М. М. Назарука. Львів: В-во Старого лева, 2018. 592 с.
19. Solensy. Сонячна інсоляція в Україні: офіційний сайт. URL: https://solensy.com.ua/sonyachna-insolyacziya
20. Статистичні дані виробництва електроенергії у дні рівнодень та сонцестоянь (2013-2019 рр.) та щомісячного виробництва (2016–2018 рр.) Самбірської сонячної електростанції (ТОВ «Еко-оптіма»).
21. Sweeney A., West R. P., O'Connor C. Parameters Affecting the Albedo Effect in Concrete. *Semantic Scholar*. URL: https://www.ecocem.co.uk/wp-content/uploads/2016/08/ECL019_Parameters_Affecting_the_Albedo_Effect_in_Concrete.pdf
22. The Albedo Concept in Solar Panels. *AmeriSolar Panels Manufacturer*. URL: https://www.weamerisolar.eu/albedo-in-solar-panels.
23. Rodríguez L. Bifacial modules: the future of solar PV? A comprehensive guide on financial and technical performance of the next hot thing in solar. *Rated Power*. URL: https://ratedpower.com/blog/bifacial-modules
24. Платформа Energo.ua: офіційний сайт. URL: https://www.energo.ua
25. Оптимальний кут для сонячних панелей. *Сонячна енергія*: інтернет-магазин. URL: https://sun-energy.com.ua/articles/kut_paneli