

## **ПРИКЛАДНІ ЗАДАЧІ СУПУТНИКОВОГО ІНТЕЛЕКТУ НА МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ**

### **1. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ**

Софія Дрозд, магістр  
Кафедра математичного моделювання і аналізу даних  
Навчально-науковий Фізико-технічний інститут  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

sofi.drozd.13@gmail.com

### **ВСТУП**

Війна в Україні призвела до серйозних руйнівних наслідків, особливо в енергетичному секторі, через прямі бомбардування та обстріли інфраструктурних об'єктів у різних частинах країни. За даними Національної енергетичної компанії «Укренерго», станом на травень 2023 року Україна втратила близько 27 ГВт існуючих потужностей генерації. Найбільших збитків зазнали енергетичні об'єкти на сході та півдні України. Зокрема, Запорізька атомна електростанція опинилася під окупацією, а Каховська гідроелектростанція була зруйнована. Альтернативні джерела енергії також зазнали значних втрат, зокрема, приблизно половина сонячних електростанцій вийшла з ладу.

Відновлення енергетичної інфраструктури є критично важливим для відновлення добробуту та розвитку країни. В умовах євроінтеграції України особливо важливо не лише відновити енергетичні потужності, але й орієнтуватися на виконання принципів Європейського зеленого курсу (European Green Deal).

### **3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...**

---

Цей амбітний план Європейського Союзу спрямований на перехід до кліматично нейтральної економіки до 2050 року, що передбачає поступову відмову від викопних видів палива на користь відновлюваних джерел енергії.

Україна, як країна-кандидат на вступ до ЄС, активно прагне відповідати цим стандартам, що накладає додаткові вимоги до відновлення енергетичної інфраструктури. Відповідно, пріоритетним стає розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики, яка має значний потенціал. Будівництво сонячних електростанцій є швидким та відносно доступним рішенням, особливо в контексті сучасних технологій та стандартизованих компонентів. Проте для ефективного використання сонячної енергії важливим є правильний вибір місць для встановлення станцій, що дозволить максимізувати виробництво електроенергії та забезпечити оптимальну ефективність системи.

#### **1.1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ**

Оптимальне розташування сонячних панелей дозволяє максимізувати виробництво електроенергії та забезпечити оптимальну ефективність системи. Неправильний вибір місця може призвести до зниження продуктивності та недовикористання потенціалу сонячної енергії.

Для визначення оптимальних територій для встановлення сонячних електростанцій цінним ресурсом є дані спостереження Землі [1]. Використання супутникових даних дозволяє швидко та ефективно аналізувати велику кількість інформації щодо потенційних місць встановлення сонячних електростанцій. Супутникові дані можуть надати інформацію про кліматичні умови, рельєф, землекористування та інші параметри, що впливають на продуктивність сонячних панелей.

Низка досліджень присвячена аналізу потенціалу та викликам встановлення великих сонячних електростанцій у різних країнах. Так, у роботі [2] оцінили потенціал використання сонячної радіації в різних регіонах Ірану, вказавши на значний потенціал у центральних та південних частинах країни. Подібним чином, у [3] показано, що сонячні фотогальванічні та вітрові електростанції в двох провінціях Афганістану можуть досягти рівня проникнення 65%–70% без значного скорочення виробництва. У дослідженні [4] запропонована модель системи підтримки прийняття рішень для

Індонезії для розвитку великомасштабних сонячних електростанцій у тропічних країнах. У [5] обговорювались питання економічної життєздатності концентрованої сонячної енергії для Іспанії, наголошуючи на її обмеженнях через високі капітальні та експлуатаційні витрати. В праці [6] оцінено десять провінцій Канади для будівництва сонячних електростанцій. В роботі [7] надали рекомендації щодо вибору місця для сонячних електростанцій у багатьох країнах, включаючи В'єтнам. У [8] наведені результати геопросторового та часового порівняння сонячних технологій у Європі та США, висвітливши значні регіональні відмінності в річній продуктивності.

Дослідження [9] визначає критерії вибору оптимального місця для дуже великих фотогальванічних сонячних електростанцій у глобальному контексті. У [10] підкреслили потенціал сонячної енергії для чистішого виробництва в Пакистані, тоді як у [11] демонструють технічний потенціал певних локацій на південному сході Ірану для забезпечення значних обсягів сонячної електроенергії. У [12] визначають та ранжують драйвери та бар'єри для розгортання концентрованої сонячної енергії в ЄС. У [13] обговорюють можливості для ширшого інвестування у впровадження сонячної енергії.

Незважаючи на значний потенціал, можливості використання сонячної енергії в Україні залишаються переважно невивченими, і в літературі немає ґрунтовних публікацій, що безпосередньо стосуються цієї теми для країни.

Для визначення найважливіших критеріїв придатності земель часто використовується метод багатокритеріального аналізу. Цей метод часто поєднується з методом аналізу ієрархій (МАІ, англ. Analytic Hierarchy Process - АНР) для визначення важливості кожного критерію відносно інших [14].

Для прямого розрахунку придатності земель використовуються булева логіка, модель зважених сум (МЗС, англ. Weighted Sum Model - WSM) або нечітке накладання. Як метод булевої логіки, так і МЗС використовують дискретні порогові значення для визначення придатності. Коефіцієнти та ваги в моделях зазвичай визначаються групою експертів. Обидва методи передбачають припущення та певний ступінь невизначеності.

Натомість нечітка логіка пропонує більш адаптивний підхід, який не обмежується жорсткими межами. Замість чітких категорій із визначеними межами, вона дозволяє використовувати кілька градацій. Наприклад, для оцінки інтенсивності глобальної горизонтальної сонячної радіації можуть бути встановлені нечіткі

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

---

межі для розмежування таких категорій, як «дуже інтенсивна», «помірно інтенсивна» тощо, що дає результати, які точніше відображають реальність.

Так, у [15] вдалося виконати завдання з вибору місць для сонячних електростанцій, поєднавши нечітку та булеву логіку, враховуючи економічні, технічні та екологічні показники. Однак у цій роботі всі критерії мають однакову вагу, що може спотворювати результати.

У [16] показали, що комбінація нечіткої логіки, МЗС та багатокритеріального аналізу прийняття рішень характеризується високою точністю та продемонстрували успішне застосування нечіткої логіки для оцінки оптимальних місць для сонячних електростанцій.

Попри існуючі досягнення в цій сфері, потенціал для використання сонячної енергії в Україні залишається переважно невивченим. Немає значних публікацій, які б всебічно досліджували можливості встановлення сонячних електростанцій у цій країні. Хоча деякі дослідження були проведені [17], вони не враховують усіх факторів і не пропонують комплексного методу для визначення придатності територій по всій країні для розміщення сонячних ферм.

## 1.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою цього дослідження є розробка та впровадження методології для визначення оптимальних територій в Україні для встановлення сонячних електростанцій з урахуванням специфічних географічних і кліматичних умов країни. Використовуючи мультимодальні джерела геопросторових даних, створюється комплексна модель, яка інтегрує кліматичні дані, інформацію про рельєф, землекористування та інші критично важливі фактори. Ця модель дозволяє ідентифікувати території, де сонячні електростанції можуть забезпечити максимальну продуктивність і ефективність.

Ключовим завданням є застосування сучасних методів багатокритеріального аналізу, зокрема поєднання методу аналізу ієрархій (МАІ) з нечіткою логікою та моделлю зважених сум (МЗС). Такий підхід забезпечує точнішу оцінку придатності земель для розміщення сонячних станцій, враховуючи широкий спектр факторів та їх взаємодію.

Крім визначення нових потенційних зон для сонячних електростанцій, дослідження передбачає оцінку ефективності вже існуючих об'єктів. Планується проведення детального аналізу поточного розташування сонячних електростанцій в Україні, щоб визначити їх оптимальність з точки зору енергетичного потенціалу. Це дозволить виявити можливі недоліки в наявній інфраструктурі та запропонувати рекомендації для її покращення.

В даному розділі запропоновано модель аналізу придатності територій України для ефективного встановлення сонячних електростанцій з використанням підходу на основі мультимодальних джерел геопросторових даних, таких як супутникові спостереження за кліматом, характеристики рельєфу та землекористуванням.

### 1.3. ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

Ефективність сонячних електростанцій залежить від різних критеріїв, включаючи кліматичні, топографічні, економічні та інші параметри. У рамках цього дослідження основні зусилля були зосереджені на ключових критеріях, що впливають на оптимальний вибір розташування сонячних електростанцій. Зокрема, до цих факторів належать наступні.

- **Кліматичні умови:** глобальна горизонтальне сонячне випромінювання (англ. Global Horizontal Irradiance - GHI), температура, опади, швидкість вітру.

- **Топографічні ознаки:** висота та нахил місцевості.
- Грунтовий покрив і землекористування.

Для аналізу ґрунтового покриву та землекористування було використано карту класифікації земного покриву за 2022 рік, створену на основі даних Sentinel-1 і Sentinel-2.

Кліматичні та топографічні параметри території України були отримані з використанням кліматичних і топографічних карт, побудованих на платформі Google Earth Engine на основі відкритих супутникових даних.

**Кліматичні умови.** Для аналізу клімату на території України було використано погодинні дані з набору ERA5-Land з просторовим розрізненням 9 км, надані Copernicus Climate Data Store. Цей набір даних містить усі необхідні в рамках даного дослідження параметри для аналізу клімату, доступні з 1950 року, а саме:

- Глобальне горизонтальне сонячне випромінювання (GHI);

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

---

- Температура на висоті 2 метри над рівнем землі;
- U та V компоненти вітру на висоті 10 метрів над рівнем землі;
- Кількість опадів, включаючи дощ і сніг.

Щоб забезпечити точність оцінки кліматичних умов і врахувати часові зміни, використовувалися дані за 2015-2022 роки, що дозволило побудувати усереднені кліматичні карти за п'ятирічний період, забезпечуючи релевантність результатів дослідження. Побудовані кліматичні та топографічні карти представлені на рис. 1.

**Топографічні особливості.** Для побудови карт рельєфу території України було використано набір даних Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM) з просторовим розрізненням 90 м. Отримані карти висот та схилів зображено на рис. 2.

**Земний покрив і землекористування.** Сонячні електростанції не можна встановлювати в місцях з невідповідним ґрунтовим покривом, таких як болота, річки або густі ліси. Крім того, вибір місця розташування сонячних електростанцій має бути узгоджений з іншими потребами землекористування для забезпечення найбільш ефективного використання території. Тому сонячні електростанції заборонено встановлювати в заповідниках, національних парках і подібних територіях.

Найбільш придатними зонами для розміщення сонячних електростанцій є вільні та необроблювані земельні ділянки. Менше придатні також сільськогосподарські поля і рідколісся.

Карта класифікації земного покриву для 2022 року, використана у даному дослідженні, показана на рис. 3. Вона включає 16 класів, серед яких 8 класів відповідають сільськогосподарським культурам. Карта містить інформацію про необроблені поля, ліси, парки та інші типи земель, які впливають на вибір місць для сонячних батарей [18].

Як видно з рис. 3, найбільші площі необроблених земель розташовані у південній частині України. Північні та західні райони країни багаті на ліси. На решті території України сільськогосподарські поля розподілені рівномірно.

### Частина 3. Прикладні задачі супутникового інтелекту на ...

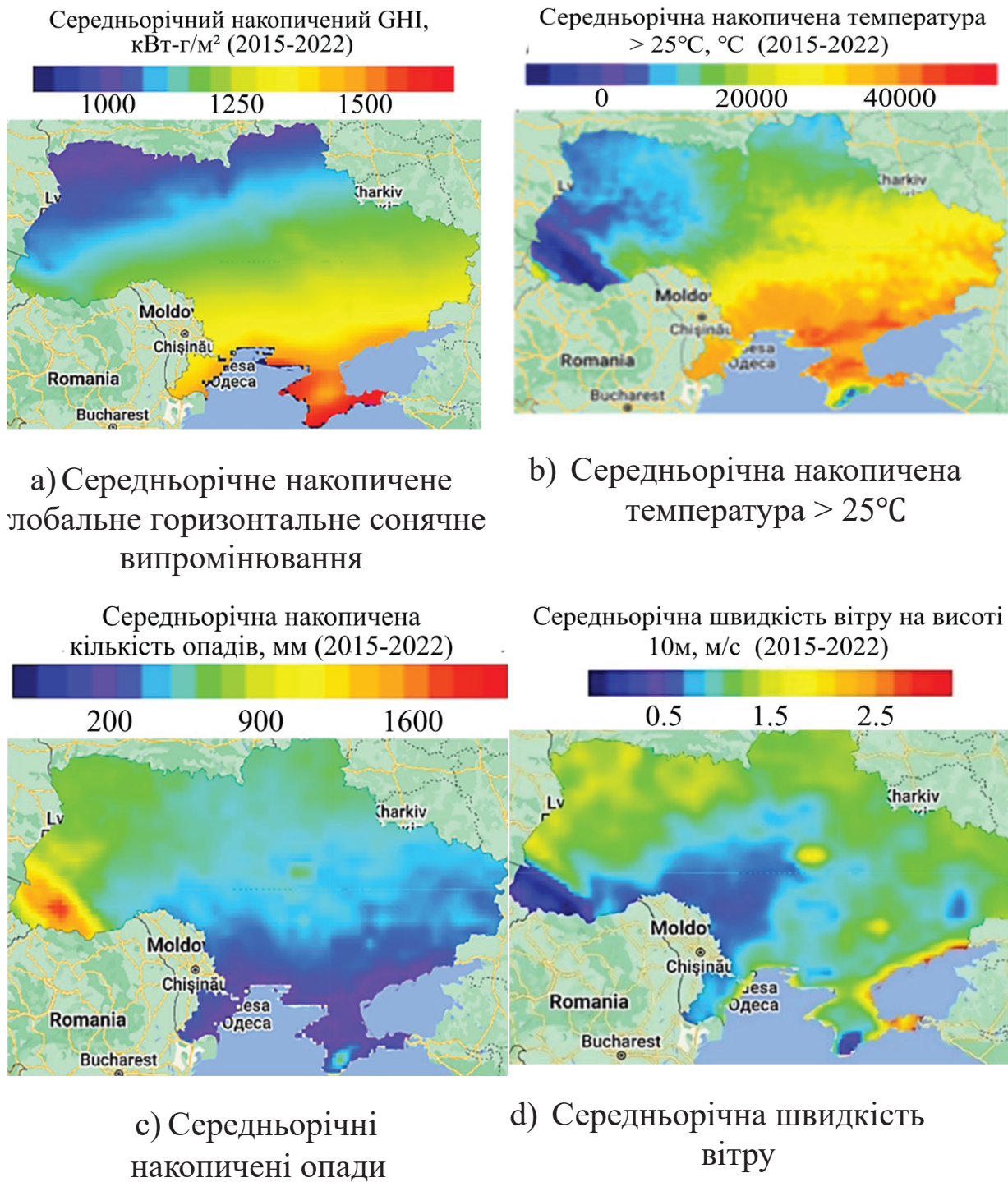


Рис. 1. Кліматичні карти України (усереднені дані за 2015–2022 рр.)

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

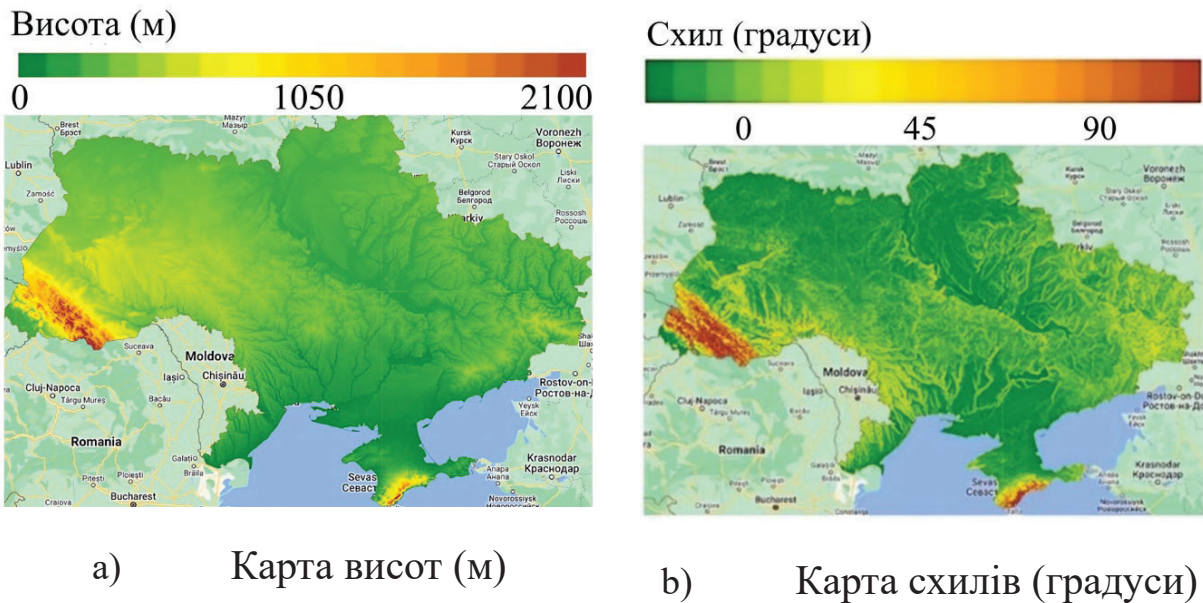


Рис. 2. Карти рельєфу України

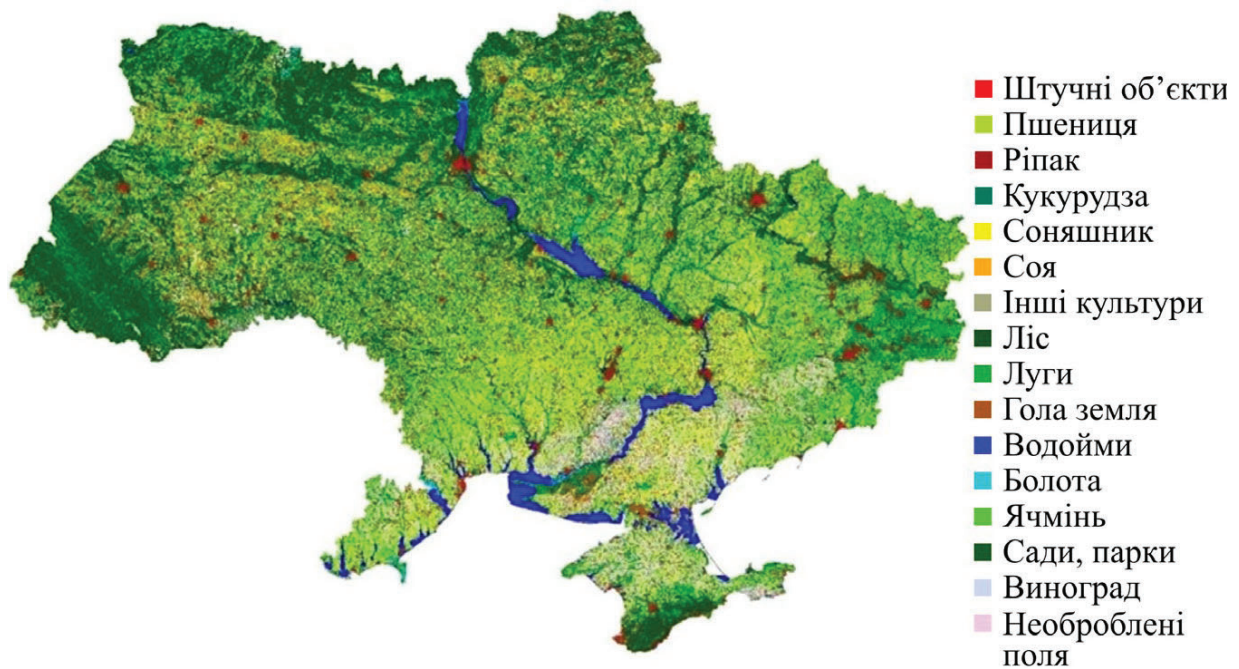


Рис. 3. Карта класифікації земного покриву для 2022 року

**Збір даних про найбільші сонячні електростанції в Україні.** На основі кліматичних, топографічних та класифікаційних карт можна оцінити не лише потенціал території України для побудови нових ефективних сонячних електростанцій, а також оптимальність розташування існуючих найбільших об'єктів сонячної енергетики в Україні.



Для отримання даних про розташування найбільших сонячних електростанцій в Україні було використано відкриті карти платформи Wikimapia (<https://wikimapia.org/>). Для проведення досліджень було завантажено векторні дані для 298 основних сонячних електростанцій України (рис. 4).

Ці полігони містять інформацію про географічні координати сонячних електростанцій, назви та тип (сонячна електростанція, сонячні батареї тощо). За допомогою цього набору даних можна провести геопросторовий аналіз і оцінити адекватність розміщення найбільших сонячних електростанцій в Україні та визначити території, потенціал яких ще не повністю використано.

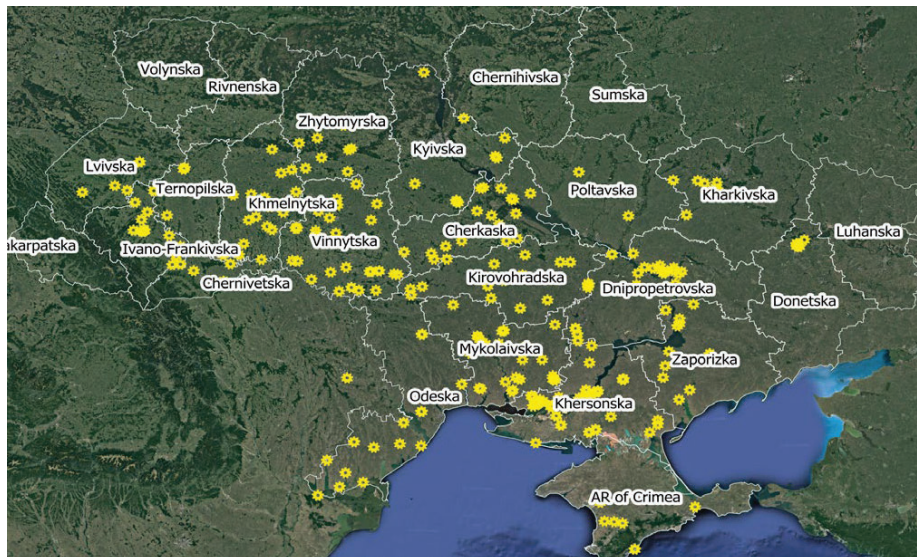


Рис. 4. Сонячні електростанції України

## 1.4. ОПИС МЕТОДОЛОГІЇ

Для визначення найбільш оптимальних місць для розміщення сонячних електростанцій на території України використано комплексну методику. Цей підхід поєднує метод зваженої лінійної комбінації, метод парного порівняння (похідний від МАІ), який допомагає визначати вагові коефіцієнти для кліматичних та топографічних параметрів, а також землекористування, і застосування нечіткої логіки для нормалізації цих параметрів.

На рис. 5 представлено процес побудови карти придатності для встановлення сонячних електростанцій.

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

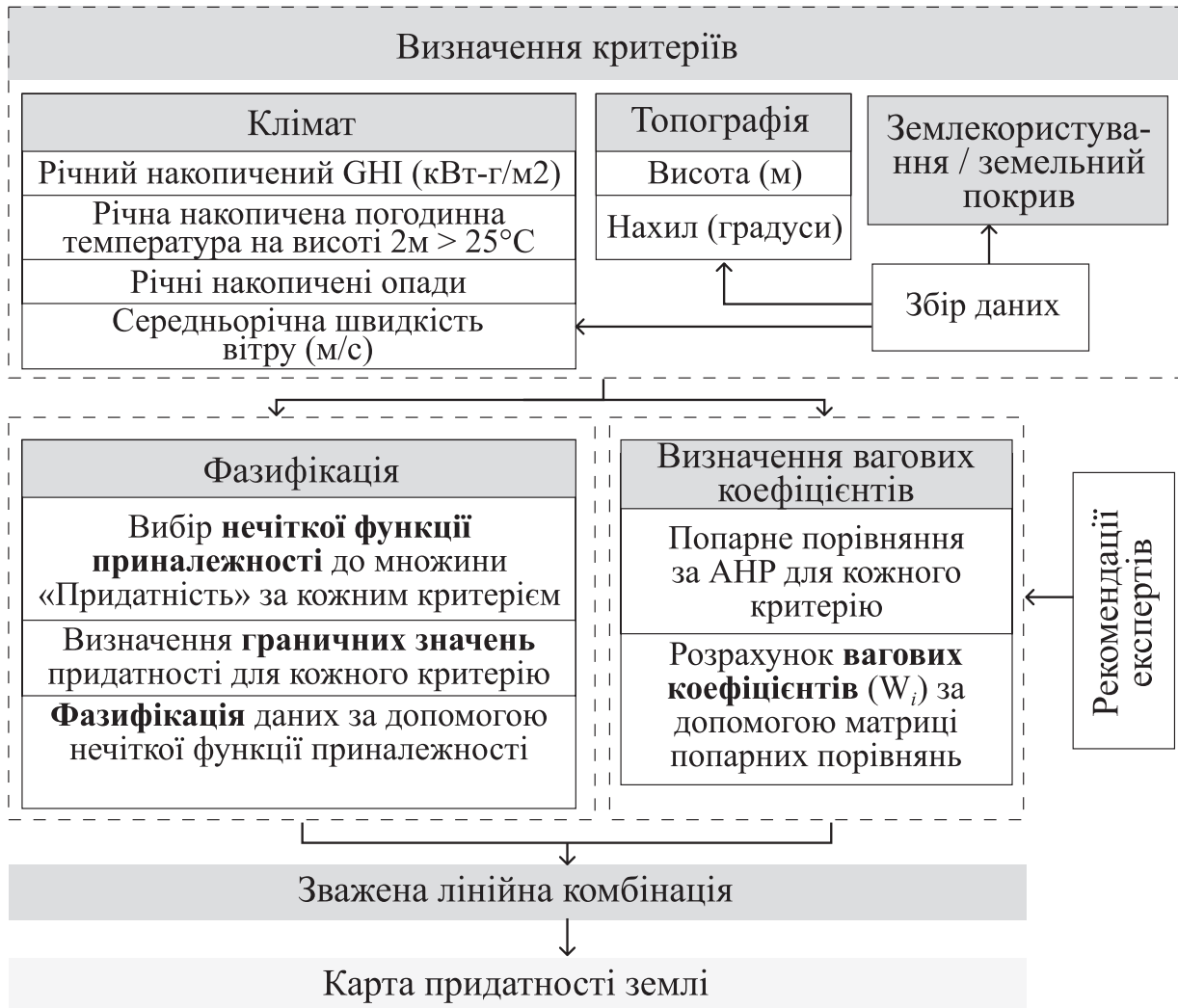


Рис. 5. Алгоритм побудови карти придатності територій для встановлення сонячних електростанцій

На першому етапі визначаються кліматичні, топографічні параметри, що впливають на ефективність сонячної електростанції, а також землекористування. В результаті отримуються растрові дані, які відповідають цим критеріям, як було описано в попередньому підрозділі.

На наступному етапі дані нормалізуються за допомогою нечіткої логіки, тобто *фазифікуються*, в діапазоні від 0 до 1. Нульове значення відповідає абсолютній непридатності критерію для встановлення сонячної електростанції, тоді як 1 є ідеальним значенням критерію. У результаті буде отримано нечіткі карти придатності для кожного критерію.

Для точного врахування впливу кожного критерію на придатність землі для встановлення сонячної електростанції визначаються вагові коефіцієнти на основі думок експертів – експертних рекомендацій.

Після отримання карт придатності та відповідних вагових коефіцієнтів для кожного критерію використовується зважена лінійна комбінація. В результаті може бути сформована карта придатності землі для встановлення сонячних електростанцій. Більш детальний опис кожного кроку алгоритму наведено нижче.

### 1.5. НЕЧІТКА ЛОГІКА ДЛЯ НОРМАЛІЗАЦІЇ ВХІДНИХ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ

Хоча модель зважених сум зазвичай використовується для аналізу придатності без використання нечіткої логіки, у даному дослідженні розподіл кліматичних і топографічних параметрів на чіткі класи придатності для встановлення сонячних панелей неможливий. Це пов'язано з труднощами в остаточному присвоєнні конкретних числових діапазонів високопридатним, помірно придатним або непридатним класам.

Включення нечіткої логіки дозволяє більш гнучко розглядати неоднозначності та невизначеності в даних, які можуть виникнути під час територіального аналізу. Це допомагає отримати більш реалістичне та адаптоване до різних умов рішення. Тому для розділення території України на придатні чи невідповідні зони для кожного з вхідних кліматичних і топографічних параметрів, ми використовуємо нечітку логіку, зокрема метод *фазифікації*. Фазифікація — це процес перетворення чіткого набору вхідних даних у нечіткий набір, у нашому випадку із присвоєнням ступенів належності значень вхідних параметрів до нечіткої множини в діапазоні від 0 до 1. Це перетворення досягається шляхом застосування ретельно відібраної функції належності, яка визначає рівень приналежності кожної точки даних до нечіткої множини.

Для створення нечіткого набору для кожного вхідного критерію, який розглядається під час аналізу придатності території для встановлення сонячних панелей, необхідно виконати наступні кроки.

*Вибір нечітких функцій належності.* На цьому кроці визначається математична функція  $\mu(x)$ , яка визначає ступінь приналежності елемента до певного набору або категорії. Ця функція приналежності може приймати різні форми, такі як трикутники, трапеції, Гаусса (нормальний розподіл) та інші. В даному випадку, для кожного критерію буде визначено функції приналежності до нечіткої множини «Придатність», трикутної або

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

трапецієподібної форми, що найкраще представляють природу вхідних даних.

*Визначення граничних точок.* Для визначення функції приналежності в певному числовому діапазоні, необхідно встановити крайні граничні значення для кожного критерію. Ці значення визначають повну приналежність до множини «Придатність» (ймовірність 1) або повну неприналежність (ймовірність 0). Значення, після якого ймовірність стає нульовою, називають «порогом придатності».

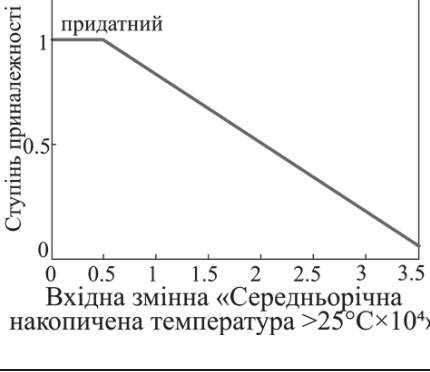




*Розрахунок ймовірності членства.* Після визначення функції приналежності, області визначення та граничних точок для кожного вхідного параметра будуються відповідні набори термів і обчислюється ймовірність приналежності до нечіткої множини «Придатність». Ця ймовірність коливається від 0 до 1 для проміжних значень між крайніми точками «повністю придатний» і «повністю непридатний». Для цього використано інструмент Fuzzify із модуля Saga в програмному забезпеченні QGIS. Граничні точки, визначені на попередньому кроці, є вхідними параметрами для запуску алгоритму Fuzzify, який безпосередньо створює функцію належності та призначає нечіткі значення кожному критерію.

Процес фазифікації для кліматичних і топографічних критеріїв описано в табл. 1.

Таблиця 1 Фазифікація кліматичних та топографічних параметрів

Параметр	Поріг придатності	Функція приналежності	Графік функції приналежності
GHI	< 1100 kWh/m <sup>2</sup>	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 1100 \\ 1 - \frac{1500 - x}{400}, & 1100 \leq x < 1500 \\ 1, & x \geq 1500 \end{cases}$	

### Частина 3. Прикладні задачі супутникового інтелекту на ...

Темп.	$\geq 35000$ °C	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < 5000 \\ \frac{35000 - x}{30000}, & 5000 \leq x < 35000 \\ 0, & x \geq 35000 \end{cases}$	 <p>придатний</p> <p>Ступінь приналежності</p> <p>Вхідна змінна «Середньорічна накопичена температура &gt;25°C×10<sup>4</sup>»</p>
Швид. вітру	$< 0.5$ м/м і $\geq 3$ м/с	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,5 \\ \frac{1,5 - x}{1}, & 0,5 \leq x < 1,5 \\ 1, & x = 1,5 \\ \frac{3 - x}{1,5}, & 1,5 < x < 3 \\ 0, & x \geq 3 \end{cases}$	 <p>придатний</p> <p>Ступінь приналежності</p> <p>Вхідна змінна «Середньорічна швидкість вітру на висоті 10м (м/с)»</p>
Опади	$< 200$ мм і $\geq 1500$ мм	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 200 \\ 1 - \frac{500 - x}{300}, & 200 \leq x < 500 \\ 1, & 500 \leq x < 700 \\ \frac{1500 - x}{800}, & 700 \leq x < 1500 \\ 0, & x \geq 1500 \end{cases}$	 <p>придатний</p> <p>Ступінь приналежності</p> <p>Вхідна змінна «Середньорічна накопичена кількість опадів, мм»</p>
Нахил	$\geq 15^\circ$	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < 1 \\ \frac{15 - x}{11}, & 1 \leq x < 15 \\ 0, & x \geq 15 \end{cases}$	 <p>придатний</p> <p>Ступінь приналежності</p> <p>Вхідна змінна «Схил»</p>
Висота	$< 0$ м і $\geq 2200$ м	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1 - \frac{500 - x}{500}, & 0 \leq x < 500 \\ 1, & 500 \leq x < 1500 \\ \frac{2200 - x}{700}, & 1500 \leq x < 2200 \\ 0, & x \geq 2200 \end{cases}$	 <p>придатний</p> <p>Ступінь приналежності</p> <p>Вхідна змінна «Висота (м)»</p>

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

Оскільки використовувана вихідна карта землекористування представлена у вигляді дискретних цілочисельних значень, що просто ідентифікують кожен клас і не повинні сприйматися як безпосередні порівнювані числа, для фазифікації цієї карти довелося здійснити кілька додаткових операцій. Основне завдання полягало в тому, щоб перевести цілочисельні ідентифікатори кожного класу у числа, що вказували б на ступінь придатності земного покриву для встановлення сонячних елекстростанцій. Для цього кожен клас було оцінено за шкалою від 1 до 5, де 1 означає абсолютну непридатність території, а 5 — повну придатність (табл. 2).

Таблиця 2 Перекласифікація карти земного покриву

Id класу	Назва класу	Оцінка
1	Штучні об'єкти	3
2	Пшениця	4
3	Ріпак	4
5	Кукурудза	4
7	Соняшник	4
8	Соя	4
9	Інші культури	4
10	Ліс	1
11	Луги	5
12	Гола земля	5
13	Вода	1
14	Болота	1
15	Ячмінь	4
18	Сади, парки	2
19	Гречка	4
22	Не оброблені поля	5

Території, непридатні для встановлення сонячних панелей з огляду на специфічні характеристики земельного покриву, такі як річки, болота та ліси, отримали оцінку 1. Сади, парки мають менше обмежень, але все ще помірно непридатні через законодавчі обмеження (заборона встановлення сонячних панелей у заповідниках чи національних парках) або з точки зору міркування щодо використання. Тому вони були оцінені як 2.

Невеликі сонячні станції для побутових або промислових потреб можна встановити на дахах будівель. Сільськогосподарські

поля, особливо завдяки ефективності сучасних агрофотоелектричних систем, які поєднують сільське господарство та виробництво сонячної енергії, добре підходять для установки сонячних ферм і отримали оцінку 4. Однак найбільш придатними територіями для сонячних електростанцій, особливо для великих сонячних електростанцій, є необроблені поля, голі землі та луки, оцінені як 5.

Після перекласифікації карта землекористування була фазифікована, подібно до підходу до карт кліматичних і топографічних компонентів. Фазифікація проводилася лінійною функцією з крайніми точками 1 (абсолютно непридатна земля) і 5 (повністю придатна земля) для визначення ступеня придатності.

Нечітка множина «придатності», отримана в результаті фазифікації, була розділена на 5 рівних діапазонів, кожен з яких описується відповідною лінгвістичною змінною (табл. 3).

Таблиця 3 Нечіткі лінгвістичні змінні для множини "Придатність"

Інтервал	Лінгвістична змінна
<0.2	Дуже низька придатність
0.2-0.4	Низька придатність
0.4-0.6	Середня придатність
0.6-0.8	Висока придатність
>0.8	Дуже висока придатність

Таким чином, для кожного кліматичного та топографічного параметра, а також карти землекористування були побудовані нові карти, умовно розділені на 5 нечітких діапазонів (рис. 6). На цих картах кожен піксель описує ймовірність належності відповідного параметра до нечіткого набору «Придатність» для встановлення сонячних панелей.

Оскільки початкові дані про клімат, рельєф і землекористування були отримані з різних джерел, карти мали різне просторове розрізнення, що могло призвести до неточностей. Для вирішення цієї проблеми та забезпечення належного використання даних, всі карти були перепроєктовані до загального просторового розрізнення 100 м.

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

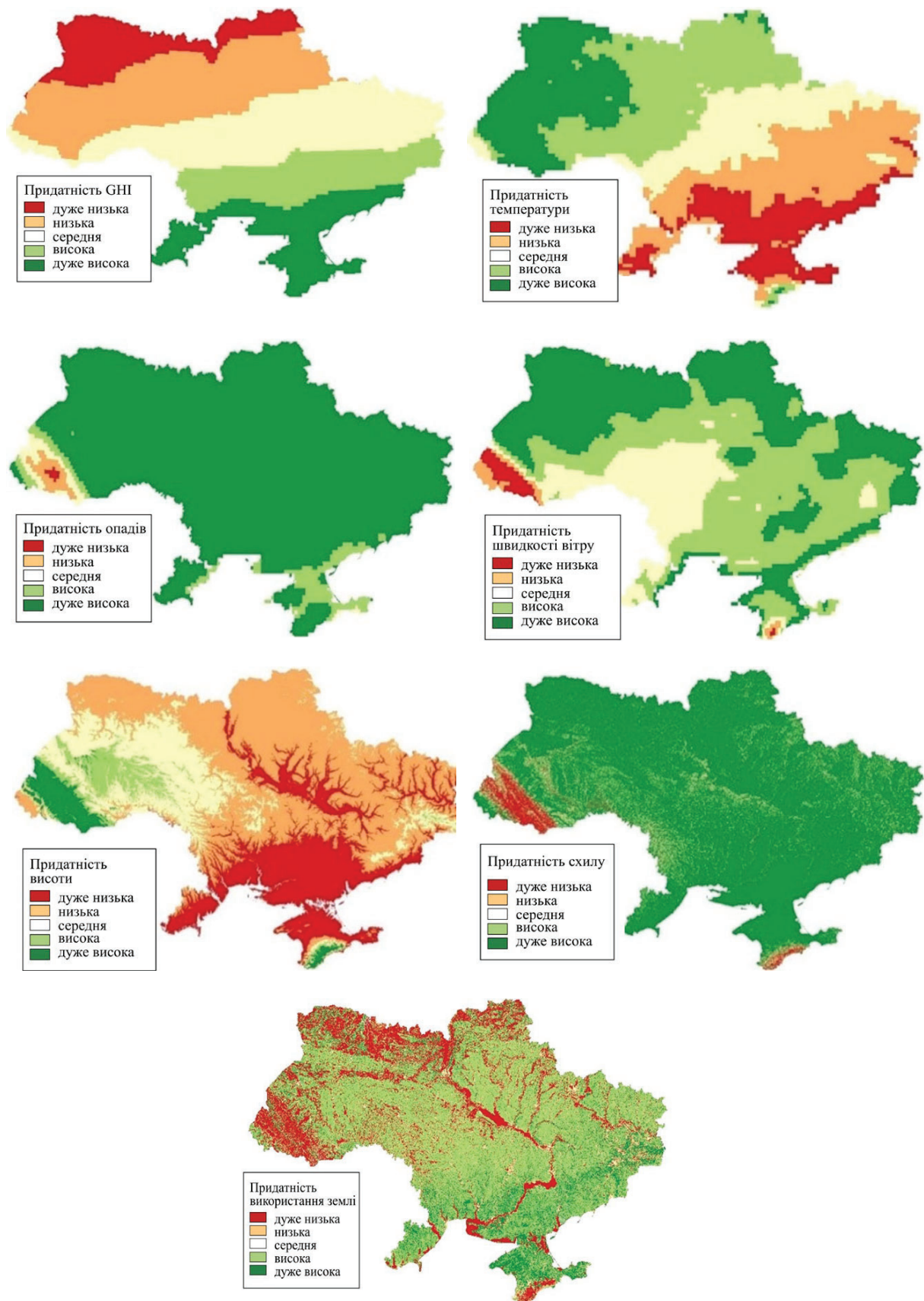


Рис. 6. Фазифіковані карти



## 1.6. ВИЗНАЧЕННЯ ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ПОПАРНИХ ПОРІВНЯНЬ

**Опис методу.** Оскільки клімат, топографічні фактори та землекористування мають різний ступінь важливості для визначення придатності районів для сонячних електростанцій, необхідно встановити вагові коефіцієнти для кожного з цих параметрів. Для визначення цих вагових коефіцієнтів використано метод попарного порівняння на основі методу аналізу ієрархій (МАІ).

Метод МАІ, розроблений Томасом Сааті [19], заснований на використанні матриць попарних порівнянь для визначення відносної важливості різних змінних. Дев'ятибальна шкала, описана в табл. 4, використовується для спрощення порівняння цих змінних.

Таблиця 4 Шкала матриці порівнянь

Рівень переваги	Визначення	Опис
1	Відсутність переваги	Дві альтернативи мають однакову важливість у досягненні цілі.
3	Слабка перевага	Досвід та судження слабо віддають перевагу одній альтернативі перед іншою.
5	Сильна перевага	Досвід та судження міцно віддають перевагу одній альтернативі перед іншою.
7	Дуже сильна перевага	Віддача переваги одній альтернативі над іншою дуже виражена. Її перевага практично очевидна.
9	Екстремальна перевага	Докази на користь переваги однієї альтернативи перед іншою надзвичайно сильні та очевидні.
2, 4, 6, 8	Проміжні значення між сусідніми оцінками	Ситуація, де потрібно прийняти компромісне рішення між сусідніми значеннями.

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

Значення на цій шкалі коливаються від 1 до 9, де 1 означає однакову важливість змінних, а 9 вказує на надзвичайно сильну перевагу однієї змінної над іншою. У результаті порівняння кожного з критеріїв між собою отримуємо матрицю попарних порівнянь, яка описується такою формулою:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} & 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} & \cdots & \cdots & \vdots \\ \cdots & 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 & & & & & & \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $A$  — матриця попарних порівнянь;  $a_i$  — рівень важливості;  $n$  — кількість критеріїв.

Для визначення вагового коефіцієнта для кожного критерію за допомогою матриці попарних порівнянь спочатку необхідно обчислити середнє геометричне для кожної змінної (середнє геометричне у рядках) за формулою:

$$GM_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (2)$$

де  $GM_i$  — середнє геометричне для  $i$ -ї змінної (критерію);  $a_{ij}$  — елементи матриці попарного порівняння;  $n$  — це число критеріїв.

Потім отримані значення нормалізуються за допомогою формули:

$$W_i = \frac{GM_i}{\sum_1^n GM_i}. \quad (3)$$

Нормовані значення середнього геометричного є ваговими коефіцієнтами для кожного критерію. Для заповнення матриці попарних порівнянь залучено експертів з досвідом у відповідній галузі. У контексті цього дослідження експертами були професіонали, які спеціалізуються на встановленні сонячних електростанцій.

Навіть за наявності висококваліфікованих експертів врахування їхніх оцінок може призвести до неправильних результатів через людські помилки. Для виявлення потенційних неточностей та забезпечення об'єктивності експертних порівнянь, можна скористатися методом перевірки рівня невідповідності, широко відомий як коефіцієнт узгодженості (CR) [20], який дозволяє контролювати якість експертних оцінок і виявляти

випадки, коли експерти дають суперечливі або неправильні відповіді.

CR розраховується за такими формулами:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (5)$$

де  $CI$  — індекс узгодженості;  $n$  — кількість критеріїв;  $\lambda_{max}$  — визначає найбільше власне значення матриці;  $RI$  — табличне значення на основі кількості критеріїв, так званий випадковий індекс;  $CR$  — значення коефіцієнта консистенції.

Значення CR порівнюється з певним порогом узгодженості. Сааті припускає [18], що значення CR має бути менше або дорівнювати 0.1. Якщо CR перевищує це порогове значення, матриця вважається неузгодженою, і необхідно переглянути або відкоригувати значення в матриці попарного порівняння.

**Розрахунок вагових коефіцієнтів.** Для заповнення матриці попарних порівнянь використано опитування експертів у сфері сонячної енергетики [18, 21, 22]. Результати наведені у табл. 5.

Таблиця 5 Матриця попарних порівнянь, отримана з оцінок авторів публікацій та експертів.

	ГНІ	Темп.	Опади	Вітер	Висота	Нахил	Землекор.	GMi	Wi
ГНІ	1,00	2,00	5,00	6,00	5,00	2,00	4,00	3,04	0,33
Темп.	0,50	1,00	4,00	4,00	3,00	2,00	2,00	1,92	0,21
Опади	0,20	0,25	1,00	2,00	2,00	0,33	0,50	0,62	0,07
Вітер	0,17	0,25	0,50	1,00	0,33	0,20	0,33	0,33	0,04
Висота	0,20	0,33	0,50	3,00	1,00	0,25	0,25	0,48	0,05
Нахил	0,50	0,50	3,00	5,00	4,00	1,00	2,00	1,63	0,18
Землекор.	0,25	0,50	2,00	3,00	4,00	0,50	1,00	1,06	0,12
Сума	2,82	4,83	16,00	24,00	19,33	6,28	10,1	9,08	1,00

Після аналізу матриці попарних порівнянь встановлено, що ГНІ, температура та нахил є найвпливовішими критеріями для вибору місця розташування сонячних електростанцій, оскільки вони мають вищі ваги порівняно з іншими параметрами. Опади, швидкість вітру та висота мають менші ваги в цьому контексті, а землекористування — помірну вагу.

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

Для перевірки узгодженості отриманої матриці було обчислено CR з використанням формул (4)-(5). Як зазначено в табл. 6, CR дорівнює 0.0335.

Таблиця 6 Розрахунок CR отриманої матриці попарних порівнянь

$\lambda_{\max}$	CI	RI	CR
7.2657	0.0443	1.3200	0.0335

Це значення свідчить про узгодженість отриманої матриці, що дозволяє використовувати отримані вагові коефіцієнти для проведення наступних розрахунків.

## 1.7. МОДЕЛЬ ЗВАЖЕНОЇ СУМИ

Після фазифікації значень вхідних параметрів та визначення вагових коефіцієнтів для кожного параметра шляхом попарних порівнянь, наступним і завершальним кроком у методології процесу вибору оптимального місця розташування сонячних електростанцій є застосування моделі зваженої суми (МЗС).

МЗС — це сума зважених фазифікованих критеріїв в аналізі придатності, яка описується формулою:

$$S_i = \sum_{i=1}^n Criteria_i * W_i, \quad (6)$$

де *Criteria* — фазифіковане значення параметра, який використовується для вибору місця розташування сонячних електростанцій у даному дослідженні; *W* — ваговий коефіцієнт, присвоєний критерію методом попарних порівнянь; *n* — кількість критеріїв; *S<sub>i</sub>* — індекс придатності.

Таким чином, буде отримано карту придатності територій для встановлення сонячних електростанцій, значення пікселів на якій будуть варіюватися в діапазоні 0-1, де 1 означає ідеальну придатність, а 0 — абсолютно непридатну територію.

Враховуючи, що водно-болотні угіддя, річки та густі ліси за своєю природою є непридатними для встановлення сонячних електростанцій з огляду на їх специфічні характеристики та екологічну важливість, повністю ці території були виключені з результуючої карти, використовуючи наступну формулу:

$$S_i = Land_{restriction} * \sum_{i=1}^n Criteria_i * W_i, \quad (7)$$

де  $Land_{restriction}$  — бінарна карта класифікації ґрунтового покриву, на якій водно-болотні угіддя, річки та ліси мають значення 0, а всі інші класи – 1.

Тому остаточною картою придатності відображає лише ті місця, які справді придатні для встановлення сонячної електростанції.

### 1.8. ОЦІНКА ПРИДАТНОСТІ ЗЕМЕЛЬ УКРАЇНИ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

В результаті проведених досліджень було побудовано карту придатності території України для встановлення сонячних електростанцій (рис. 7). Для забезпечення більш детального уявлення про придатність землі для встановлення сонячних електростанцій, ця карта була розділена на нерівні інтервали, що дозволило чітко окреслити різні зони придатності.

Як видно з цієї карти, майже вся територія України має індекс придатності землі для встановлення сонячних електростанцій вище 0.55, що вказує на високий енергетичний потенціал країни. Винятком є зона Карпат, де вплив сонячного світла для ефективної роботи сонячних панелей обмежений через складний крутий рельєф та значні опади. Крім того, слід відзначити, що в зоні Карпат та на Поліссі є багато територій, які через особливості ґрунтового покриву є непридатними для розміщення сонячних електростанцій. В цьому регіоні переважають ліси та болота.

Індекс придатності земель для розміщення сонячних електростанцій зростає з півночі на південь і досягає найвищих значень (понад 0.75) на Кримському півострові, частково в Одеській, Миколаївській, Херсонській та Запорізькій областях. У центральній частині України придатність територій для розміщення сонячних електростанцій переважно знаходиться в межах 0.65-0.7. Цікаво, що в центрально-західних областях показник придатності вищий. Зокрема, у Чернівецькій, Вінницькій, Хмельницькій та Тернопільській областях він підвищується до 0.7-0.75. Натомість у східних регіонах є території з придатністю в межах 0.55-0.65. Це можна пояснити тим, що на заході України температури нижчі, ніж на сході при майже однаковій інтенсивності ГНІ.

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

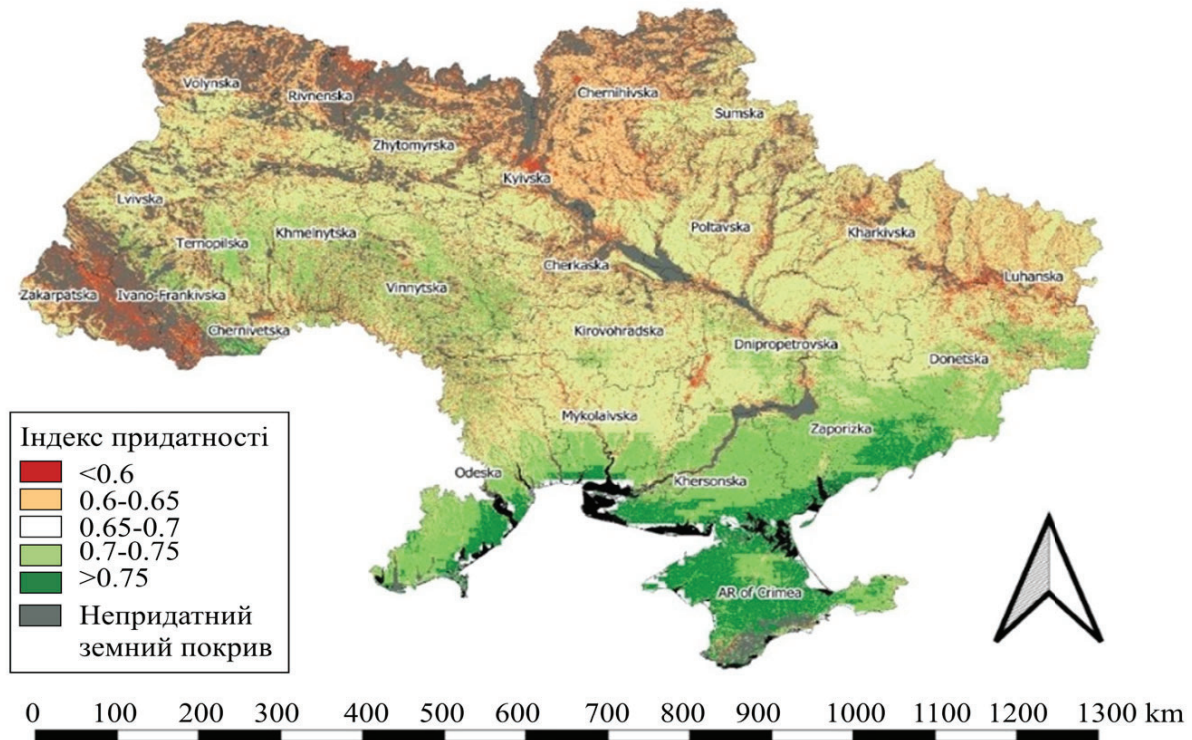


Рис. 7. Карта придатності територій України для встановлення сонячних електростанцій

В північній частині країни показник придатності ще нижчий, але не опускається нижче 0.55, що свідчить про помірний рівень придатності для ефективної роботи сонячної електростанції.

Для кращого розуміння розподілу індексу придатності по країні в числовому діапазоні, було побудовано графік щільності (рис. 8). З цього графіка видно, що придатність землі для встановлення сонячних панелей коливається приблизно від 0.45 до 0.85, з піком близько 0.65.

На основі отриманого розподілу було виділено 5 основних інтервалів, в яких знаходиться індекс придатності. На основі цих значень були створені відповідні лінгвістичні змінні для нечіткого набору придатності землі з параметрами, як показано в табл. 7.

Як видно з рис. 9, є певний відсоток земель із дуже низьким (10.68%) та низьким (16.68%) індексом придатності, а також повністю непридатних ділянок (18.18%) через наявність водойм та лісу. Водночас більше третини (35.65%) земель України має перспективний середній показник придатності. На зони високої та дуже високої придатності припадає 14.4% та 4.78% території відповідно, що забезпечує можливість розвитку та ефективного використання сонячної енергетики на території України.

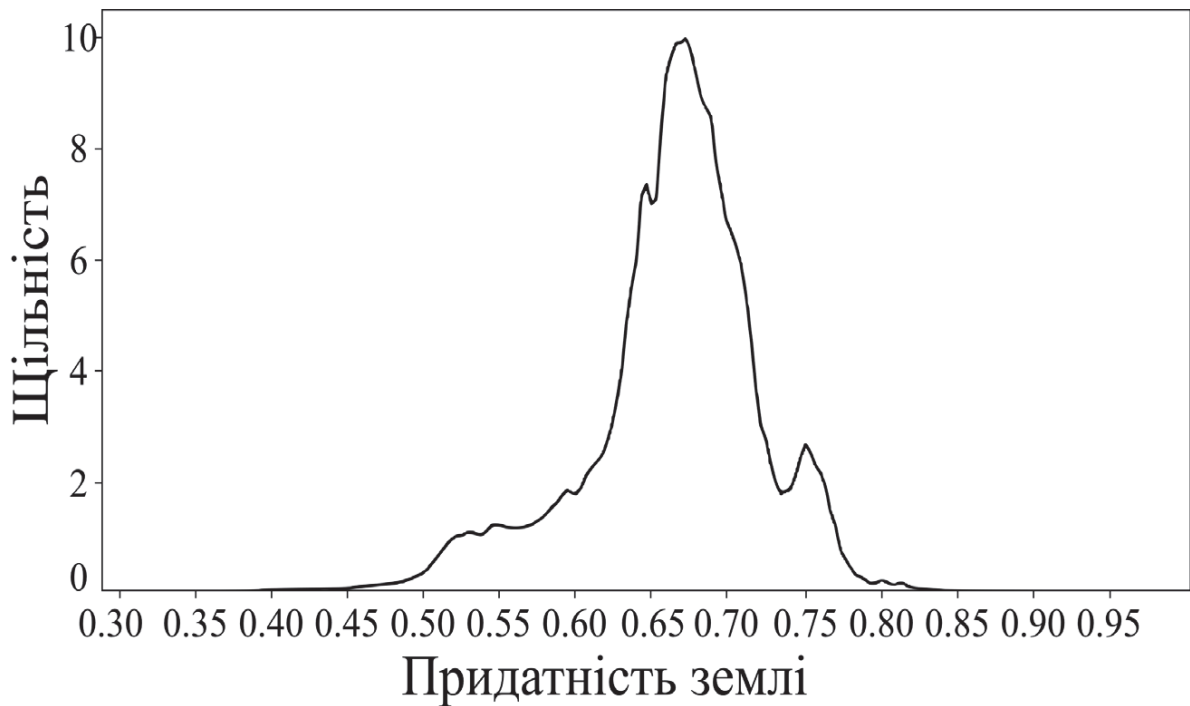


Рис. 8. Розподіл індексу придатності території України для встановлення сонячних електростанцій

Таблиця 7 Розподіл зон у відповідному інтервалі індексу придатності на нечіткі лінгвістичні змінні

Індекс придатності	Лінгвістична змінна	Розподіл зон за лінгвістичними змінними
<0.6	Дуже низька придатність	
0.6-0.65	Низька придатність	
0.65-0.7	Середня придатність	
0.7-0.75	Висока придатність	
>0.75	Дуже висока придатність	

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

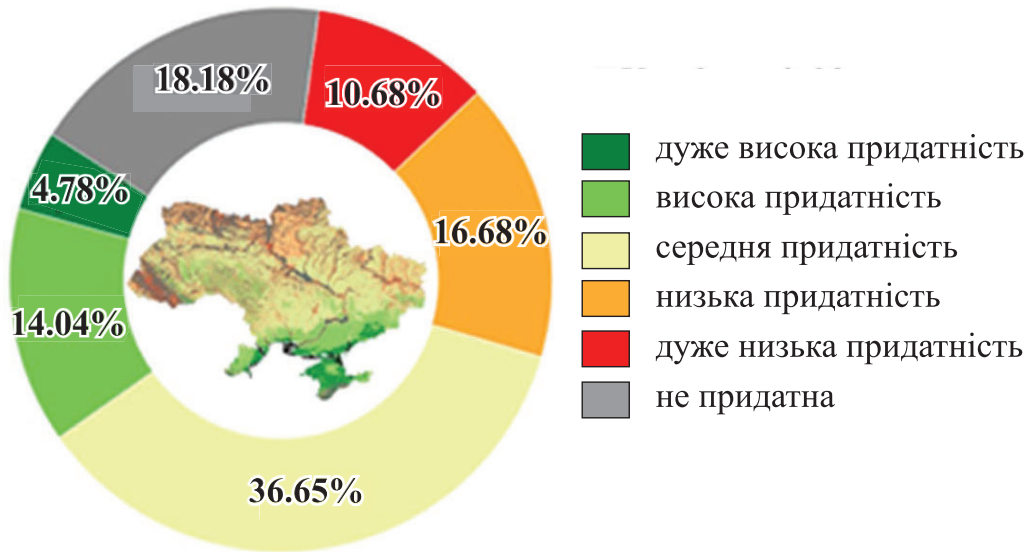


Рис. 9. Розподіл території України за показником придатності земель для встановлення сонячних електростанцій.

## ВИСНОВКИ

Проведений у даному розділі аналіз підтверджує значний потенціал використання сонячної енергії на території України. Використання комплексної методології, що включає супутникові спостереження, багатокритеріальний аналіз, нечітку логіку та зважену лінійну комбінацію, дозволило ефективно виділити оптимальні зони для будівництва сонячних електростанцій.

Отримана карта придатності вказує на те, що південні регіони, особливо Кримський півострів, мають найбільший потенціал для розміщення сонячних електростанцій, зі значенням індексу придатності, що перевищує 0,75. Водночас навіть у північних регіонах цей індекс залишається досить високим, не опускаючись нижче 0,55. Загалом, понад 50% території України демонструють помірну або високу придатність для розвитку сонячної енергетики.

Аналізуючи розташування існуючих великих сонячних електростанцій, було встановлено, що багато з них знаходяться в оптимальних регіонах. Проте деякі території, такі як Полтавська та Донецька області, наразі використовуються недостатньо, незважаючи на їх придатність для будівництва сонячних ферм. Виявлені території з високим індексом придатності та ідеальними характеристиками земельного покриття, зокрема в Одеській, Миколаївській та Запорізькій областях, можуть бути ефективно використані для розвитку сонячної енергетики.



Запропонована методологія та результати дослідження сприяють вибору оптимальних ділянок по всій Україні для встановлення сонячних електростанцій, що забезпечить максимальну продуктивність. Розроблений підхід може стати цінним інструментом для підтримки розширення використання сонячної енергії та зміцнення енергосистеми України. Використання значного потенціалу сонячної енергії країни є критично важливим для досягнення енергетичної незалежності, відповідності цілям Європейської Зеленої Угоди та забезпечення сталого розвитку України.

У майбутньому планується розширити дослідження та, на основі отриманої карти придатності, застосувати регресійний аналіз для визначення потенційного обсягу електроенергії, яку можуть генерувати майбутні сонячні електростанції. Це дозволить провести більш детальну оцінку територій і визначити оптимальні місця для створення потужних та ефективних сонячних електростанцій.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mahtta R., Joshi P. K., Jindal A. K. Solar power potential mapping in India using remote sensing inputs and environmental parameters. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 71. P. 255–262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.037>
2. The potential of harnessing solar radiation in Iran: Generating solar maps and viability study of PV power plants / S. M. Besarati et al. *Renewable Energy*. 2013. Vol. 53. P. 193–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.012>
3. Ershad A. M., Brecha R. J., Hallinan K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan. *Renewable Energy*. 2016. Vol. 85. P. 445–453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.067>
4. GIS-AHP Multi Criteria Decision Analysis for the optimal location of solar energy plants at Indonesia / H. S. Ruiz et al. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 3249–3263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.198>
5. San Miguel G., Corona B. Economic viability of concentrated solar power under different regulatory frameworks in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 205–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.017>

### 3.1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних...

---

6. A novel integrated approach for ranking solar energy location planning: a case study / A. Mostafaeipour et al. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2020. Ahead-of-print, ahead-of-print. DOI: <https://doi.org/10.1108/jedt-04-2020-0123>

7. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approaches for Solar Power Plant Location Selection in Viet Nam / C.-N. Wang et al. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 6. P. 1504. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11061504>

8. A Geospatial Comparison of Distributed Solar Heat and Power in Europe and the US / Z. Norwood et al. *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9, no. 12. P. e112442. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112442>

9. A framework for selecting the location of very large photovoltaic solar power plants on a global/supergrid / B. O. Saracoglu et al. *Energy Reports*. 2018. Vol. 4. P. 586–602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.09.002>

10. Rafique M. M., Rehman S., Alhems L. M. Assessment of solar energy potential and its deployment for cleaner production in Pakistan. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020. Vol. 34, no. 8. P. 3437–3443. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0736-9>

11. Theoretical and technical potential evaluation of solar power generation in Iran / G. Ghasemi et al. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 138. P. 1250–1261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.068>

12. Kiefer C. P., del Rio P. Analysing the barriers and drivers to concentrating solar power in the European Union. Policy implications. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 251. P. 119400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119400>

13. Stevović I., Mirjanić D., Stevović S. Possibilities for wider investment in solar energy implementation. *Energy*. 2019. Vol. 180. P. 495–510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.194>

14. Al Garni H. Z., Awasthi A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*. 2017. Vol. 206. P. 1225–1240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>

15. Yousefi H., Hafeznia H., Yousefi-Sahzabi A. Spatial Site Selection for Solar Power Plants Using a GIS-Based Boolean-Fuzzy Logic Model: A Case Study of Markazi Province, Iran. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 7. P. 1648. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11071648>

16. Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN / M. Zoghi et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 68. P. 986–996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.014>

17. Оптимізація процесу вибору місця розташування сонячних електростанцій з використанням ГІС-аналізу / О. Вутенко та ін. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2019. Т. 1, № 53. С. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.26906/sunz.2019.1.017>

18. Prieto-Amparbn J.A., Pinedo-Blvarez A., Morales-Nieto C.R., Valles-Aragyn M.C., Blvarez-Holgunn A., Villarreal-Guerrero F. A regional GIS-Assisted Multi-Criteria evaluation of Site-Suitability for the development of solar farms. *Land*. 2021. Vol. 10, no. 2. pp. 217. DOI: [10.3390/land10020217](https://doi.org/10.3390/land10020217).

19. Saaty T.L. *The analytic hierarchy process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill International Book Co. 1980. Vol. 287.

20. A framework for selecting the location of very large photovoltaic solar power plants on a global/supergrid / B. O. Saracoglu et al. *Energy Reports*. 2018. Vol. 4. P. 586–602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.09.002>

21. Tafula J.E., Justo C.D., Moura P., Mendes J., Soares A. Multicriteria Decision-Making approach for optimum site selection for Off-Grid solar photovoltaic microgrids in Mozambique. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 6. pp. 2894. DOI: [10.3390/en16062894](https://doi.org/10.3390/en16062894).

22. Taoufik M., Meriem L., Fekri A. Land suitability analysis for solar farms exploitation using the GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP) – a case study of Morocco. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2021. Vol. 24, no. 2. pp. 79–96. DOI: [10.33223/epj/133474](https://doi.org/10.33223/epj/133474).